

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**

**ABRAÃO CÍCERO DA SILVA**

**ADUBAÇÃO CORRETIVA DE FÓSFORO EM SOLOS TROPICAIS:  
EFEITO NA DINÂMICA DAS FRAÇÕES INORGÂNICAS DE  
FÓSFORO E NA REDUÇÃO DO ESTRESSE OXIDATIVO DA CANA  
SOCA**

**Recife - PE**

**2018**



Abraão Cícero da Silva  
Engenheiro Agrônomo

**Adubação corretiva de fósforo em solos tropicais: efeito na dinâmica das frações inorgânicas de fósforo e na redução do estresse oxidativo da cana soca**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Emídio Cantídio de Almeida Oliveira

Recife - PE

2018



Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE

Nome da Biblioteca, Recife-PE, Brasil

S586a Silva, Abraão Cícero da  
Adubação corretiva de fósforo em solos tropicais: efeito na  
dinâmica das frações inorgânicas de fósforo e na redução do estresse  
oxidativo da cana soca / Abraão Cícero da Silva. – 2018.  
97 f. : il.

Orientador: Emídio Cantídio de Almeida Oliveira.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de  
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo,  
Recife, BR-PE, 2018.  
Inclui referências.

1. Adsorção de fósforo 2. Fracionamento 3. Adubação  
4. Enzimas antioxidantes 5. Sacharum spp. I. Oliveira, Emídio  
Cantídio de Almeida, orient. II. Título

CDD 631.4

ABRAÃO CÍCERO DA SILVA

**Adubação corretiva de fósforo em solos tropicais: efeito na dinâmica das frações inorgânicas de fósforo e na redução do estresse oxidativo da cana soca**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Aprovada em 28 de Fevereiro de 2018

---

Prof. Dr. Emídio Cantídio de Almeida Oliveira  
Orientador  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Alexandre Campelo de Oliveira  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Dr. Djalma Euzebio Simões Neto  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Prof. Dr. Fernando José Freire  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Prof. Dr. Renato Lemos dos Santos  
Instituto Federal de Pernambuco



*Aos meus pais, Cícero Cornélio da silva e Maria Concebida Batista da Silva.*

*Aos meus irmãos, Alexandre Batista, Alexandro Batista, Maria de Fátima, Maria José.*

DEDICO



## AGRADECIMENTOS

A Deus pela a grande graça em minha vida, por ter plantado no meu coração um grande sonho e iluminado os caminhos que percorri, deu força para lutar quando tudo parecia perdido, renovou a minha fé e esperança nos momentos em que deixei de acreditar em mim, no meu potencial... e hoje aqui estou defendendo minha tese de doutorado.

A minha mãe, pai e irmãos (Maria Concebida, Cícero Cornélio, Maria de Fátima, Maria José, Alexandre Batista e Alexandro Batista) e minha namorada Naara Claudia pela a torcida incentivo sempre me motivaram, entenderam as minhas faltas e momentos de afastamento por saber que estava em busca de um grande sonho e realização pessoal e profissional.

Agradeço as minhas primas pela torcida e incentivo ao longo dessa jornada, em especial a Gemima Melo que foi a primeira graduada, mestre e doutora da família que sempre me incentivou a trilhar o caminho acadêmico.

Ao meu orientador Prof. Dr. Emídio Cantídio de Almeida Oliveira, agradeço o apoio inestimável para realização deste estudo, a dedicação, amizade e o entusiasmo científico que soube transmitir durante esses anos de convivência.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade e condições concedidas para realização da pesquisa. Aos professores da Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRPE.

Aos professores coordenadores de laboratório, técnico de laboratório e alunos de graduação e pós-graduação que cederam espaço, equipamentos, reagentes e compartilharam conhecimento nos laboratórios de Microbiologia do Solo, Mineralogia do Solo, Química, Química Ambiental, Cultura de Tecidos Vegetais. Em especial a professora Giselle Gomes Monteiro Fracetto por ter cedido espaço em seu laboratório durante todo o período experimental do doutorado.

Aos estimados colegas e estagiários, a Pedro Luiz Ribeiro de Vasconcelos que ajudou na construção deste trabalho.

Ao Grupo de pesquisa em nutrição de plantas, adubação e fertilidade do solo (GNAF) pelo apoio, suporte e ajuda, em especial a Amanda Lima, Eduardo Damasceno, Ariane Marcia, Magda Aline, Wildson Morais e Luan Rafael.

Aos amigos de pós-graduação, representados por Adriana Bezerra da Silva, Aleksandro Ferreira, Ariane Marcia, Aglair Cardoso, August Cesar, Bruno Campos Mantovanelli, Carlos Vitor Oliveira Alves, Juscélia Ferreira da Silva, Mayame de Brito Santana, Janyelle Lemos, Juliet Emília Santos Souza, Emanuelle Maria da Silva, Felipe Martins do Rêgo Barros, Magda Aline, Luan Rafael, Tiago Santos, Thiago Schlosser, Ítalo Oliveira e Vinicius Gomes.

A Sra. Maria do Socorro Santana, secretária do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela cordialidade e presteza.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado.

As usinas Cucaú, Olho D`Água e Japungú pelo suporte e apoio na condução dos campos experimentais.

Ao sistema de expansão universitária que criou a Unidade Acadêmica de Garanhuns-UAG, me proporcionando condições de realizar graduação em agronomia e mestrado em produção agrícola, pois sem a criação da UAG não teria formando-me em agronomia.

Enfim a todos que contribuíram diretamente ou indiretamente para este trabalho e fizeram parte da minha jornada. Muito obrigado!

## Adubação corretiva de fósforo em solos tropicais: efeito na dinâmica das frações inorgânicas de fósforo e na redução do estresse oxidativo da cana soca

### RESUMO

As fontes de fósforo (P) de menor solubilidade, seja orgânica ou mineral, quando aplicadas em solos com baixa capacidade de adsorção de P pode promover aumento no teor de P residual no solo por período mais longo do que as de alta solubilidade. Sendo de grande importância em áreas cultivadas com culturas de ciclo longo. Nessa pesquisa avaliou-se a dinâmica do fósforo e a produtividade de socas de cana-de-açúcar após a adubação fosfatada corretiva com fontes de solubilidade variada em solos de região de clima tropical no Brasil. Os experimentos foram conduzidos em três solos (PAd, CYbe e LVAd) cultivados com cana-de-açúcar em região de clima tropical em Pernambuco e Paraíba. Os tratamentos consistiram no controle, sem a realização da adubação corretiva, e da incorporação das doses de 50, 100, 200 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> utilizando três fontes de fósforo, Superfosfato Triplo (ST), Fosfato Natural Reativo Gafsa (FNR) e Torta de Filtro (TF). Foi avaliado a dinâmica do P no solo (frações de P nas doses de 300 kg ha<sup>-1</sup> aos 3, 12, 24 e 36 meses nas camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m de profundidade), determinando-se as frações do P inorgânico P-H<sub>2</sub>O, P-Al, P-Fe e P-Ca. Na primeira, segunda e terceira soca de cana-de-açúcar. Em todas as parcelas experimentais determinou-se o P disponível no solo, acúmulo de P na biomassa foliar, atividade das enzimas do complexo antioxidativo, produção de biomassa, produtividade de colmo e porcentagem de sacarose no caldo. Os dados foram submetidos a análise de variância (ANAVA) a 5% de significância e comparado por teste de média (qualitativo) e análise de regressão (quantitativo). Na avaliação da dinâmica do P no solo adubação proporcionou aumento em todas as frações (P-H<sub>2</sub>O, P-Al, P-Fe e P-Ca) até os 36 meses após adubação corretiva nos três solos estudados. O aumento na fração P-H<sub>2</sub>O ocorreu até os 0,20 m. A fonte ST foi superior as demais até os 12 meses, nos demais períodos foi a TF e o FRN. A adubação corretiva aumentou o teor de P disponível nas três socarias de cana na camada 0,20 m de profundidade em todos os solos. O teor de P nas folhas foi superior a 2 g kg<sup>-1</sup> e a adubação com TF promoveu aumento no teor de P foliar na primeira soca no solo PAd e na segunda no CYbe. Adubação corretiva reduziu o estresse oxidativo na primeira e segunda soca da cana-de-açúcar. A produtividade de colmos (TCH) e massa seca da parte aérea (MSPA) da cana-de-açúcar aumentaram em todos os solos com incremento das doses de P, a maior produtividade ocorreu na primeira e segunda soca. A adubação corretiva aumentou o teor de sacarose contida no caldo na segunda soca no solo CYbe e na terceira no PAd. A adubação corretiva com fonte de menor solubilidade disponibiliza P residual por longo período. O maior teor de P no solo promove o menor estresse oxidativo nas plantas e aumenta a produtividade de biomassa.

Palavras-chave: Adsorção de fósforo. Fracionamento. Adubação. Enzimas antioxidantes. *Sacharum* spp.



## Corrective fertilization of phosphorus in tropical soils: effect on the dynamics of inorganic phosphorus fractions and reduction of oxidative stress of sugarcane

### ABSTRACT

The sources of phosphorus (P) of lower solubility, whether organic or mineral, when applied in soils with low adsorption capacity of P can promote increase in the residual P content in the soil for a longer period than those of high solubility. It is of great importance in areas cultivated with long cycle crops. This research evaluated the dynamics of phosphorus and the productivity of sugar cane stalks after corrective phosphate fertilization with sources of varied solubility in soils of tropical climate region in Brazil. The experiments were conducted in three soils (PAd, CYbe and LVAd) cultivated with sugarcane in a tropical climate region in Pernambuco and Paraíba. The treatments consisted in the control, without the implementation of corrective fertilization, and the incorporation of the doses of 50, 100, 200 and 300 kg ha<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> using three sources of phosphorus, Triple Superphosphate (ST), Natural Reactive Gafsa Phosphate (FNR) and Filter Cake (TF). The soil P dynamics (P fractions at the rates of 300 kg ha<sup>-1</sup> at 3, 12, 24 and 36 months in the layers of 0.0-0.10, 0.10-0.20, 0, 20-0.30 m depth), determining the inorganic P-H<sub>2</sub>O, P-Al, P-Fe and P-Ca fractions. In the first, second and third sugar cane soca. In all experimental plots, soil P was determined, P accumulation in leaf biomass, enzyme activity of the antioxidative complex, biomass production, yield of stem and percentage of sucrose in the broth. The data were submitted to analysis of variance (ANAVA) at 5% of significance and compared by means of a qualitative test and regression analysis (quantitative). In the evaluation of soil P dynamics, fertilization provided an increase in all fractions (P-H<sub>2</sub>O, P-Al, P-Fe and P-Ca) up to 36 months after corrective fertilization in the three studied soils. The increase in the P-H<sub>2</sub>O fraction occurred up to 0.20 m. The ST source was superior to the others until the 12 months, in the other periods it was the TF and the FRN. Corrective fertilization increased the available P content in the three sugar cane fields at the 0.20 m depth layer in all soils. The P content in the leaves was higher than 2 g kg<sup>-1</sup> and the fertilization with TF promoted an increase in leaf P content in the first stalk in the soil PAd and in the second in the CYbe. Corrective fertilization reduced oxidative stress in the first and second sugarcane soca. The yield of stalks (TCH) and shoot dry mass (MSPA) of sugarcane increased in all soils with increasing doses of P, the highest productivity occurred in the first and second stunts. Corrective fertilization increased the sucrose content contained in the broth in the second stump in the CYbe soil and in the third in the PAd. Corrective fertilization with source of lower solubility provides residual P for long period. The higher P content in the soil promotes the lower oxidative stress in the plants and increases the productivity of biomass.

Keywords: Phosphorus adsorption. Fractionation. Fertilizing. Antioxidant enzymes.

*Sacharum spp*



## LISTA DE TABELAS

### Capítulo 01

<b>Tabela 1-</b> Caracterização química e física do LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd) na camada de 0,0 a 0,30 m de profundidade.....	47
<b>Tabela 2 -</b> Frações inorgânica de fósforo em um ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd) aos 3, 12, 24 e 36 meses após a adubação fosfatada corretiva com 300 kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> na forma de Superfosfato triplo (ST), Fosfato natural reativo (FRN) e Torta de filtro (TF).....	54
<b>Tabela 3-</b> Frações inorgânica de fósforo em um CAMBISOLO FLÚVICO tb eutrófico (CYbe) aos 3, 12, 24 e 36 meses após a adubação fosfatada corretiva com 300 kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> na forma de Superfosfato triplo (ST), Fosfato natural reativo (FRN) e Torta de filtro (TF).....	55
<b>Tabela 4 -</b> Frações inorgânica de fósforo em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO distrófico (LVAd) aos 3, 12, 24 e 36 meses após a adubação fosfatada corretiva com 300 kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> na forma de Superfosfato triplo (ST), Fosfato natural reativo (FRN) e Torta de filtro (TF).....	56

### Capítulo 02

<b>Tabela 1 –</b> Caracterização química e física do LATOSSOLO VERMELHO AMARELO distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO distrófico (PAd) até a camada de 0,0 a 0,30. ....	73
<b>Tabela 2 -</b> P- disponível (Mehlich-1) no solo, avaliado na primeira, segunda e terceira soca em solos após adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd). Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro).....	80
<b>Tabela 3 -</b> Teor de P na folha + 1 avaliado na primeira, segunda e terceira soca em relação a adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd). Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro).....	83

**Tabela 4** : Atividades enzimáticas avaliadas na primeira e segunda soca de cana-de-açúcar em relação a adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd). Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro)..... 84

**Tabela 5** - Produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e colmos (TCH) na primeira, segunda e terceira soca de cana-de-açúcar em relação a adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd). Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro)..... 88

**Tabela 6** - Percentagem de sacarose no caldo da cana-de-açúcar (Pol) na primeira, segunda e terceira soca em função da adubação fosfatada corretiva com fontes de solubilidade variada em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd). Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro)..... 90

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo 01

- Figura 1-** Difratoograma Difratoogramas de raios X da fração argila das profundidades 0,0 a 0,30 m em LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrofíco (LVAd) localizado em Ribeirão-PE. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita.....  
406
- Figura 2-** Difratoograma de raios X da fração argila na profundidades 0,0 a 0,30 m de profundidade em um CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) localizado em Camutanga-PE. K: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita.....  
428
- Figura 3 -** Difratoograma de raios X da fração argila das profundidades 0,0 a 0,30 m de profundidade em um ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd) localizado em Santa Rita-PB. K: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita.....  
439

### Capítulo 02

- Figura 1 -** Difratoogramas de raios X da fração argila das profundidades 0,0 a 0,30 m em LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrofíco (LVAd) localizado em Ribeirão-PE. K: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita.....66
- Figura 2 -** Difratoogramas de raios X da fração argila na profundidades 0,0 a 0,30 m de profundidade em um CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) localizado em Camutanga-PE. K: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita..... 68
- Figura 3 -** Difratoogramas de raios X da fração argila das profundidades 0,0 a 0,30 m de profundidade em um ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd) localizado em Santa Rita-PB. K: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita..... 69
- Figura 4 -** P-disponível (Mehlich-1) avaliado na primeira (A, D e G), segunda (B, E, H) e terceira (C, F e I) soca de cana-de-açúcar em relação a adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd). Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro)..... 76

**Figura 5** - Atividade enzimática avaliada no solo LVAd (A, B e C), CYbe (D, E e F) e PAd (G, H e I) na primeira socaria de cana-de-açúcar em relação a adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água. Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro). LVAd (LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico). CYbe (CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico) e PAd (ARGISSOLO AMARELO Distrófico)..... 80

**Figura 6** - Atividade enzimática avaliada no solo LVAd (A, B e C), CYbe (D, E e F) e PAd (G, H e I) na segunda socaria de cana-de-açúcar em relação a adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água. Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro). LVAd (LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico), CYbe (CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico) e PAd (ARGISSOLO AMARELO Distrófico)..... 81

**Figura 7** - Produtividade de colmos e massa seca da parte aérea em LVAd (A e B), CYbe (C e D) e PAd (E e F) na primeira, segunda e terceira socaria de cana-de-açúcar em relação a adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água. Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro). LVAd (LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico), CYbe (CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico) e PAd (ARGISSOLO AMARELO Distrófico)..... 83

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL .....	19
1.1 Hipóteses.....	20
1.2 Objetivo geral.....	20
1.3 Objetivos específicos .....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	22
2.1 A cultura da cana-de-açúcar.....	22
2.2 Importância do fósforo na nutrição de plantas.....	23
2.3 Importância do fósforo na qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar .....	24
2.4 Dinâmica do fósforo no solo.....	25
2.5 Fontes de Fósforo.....	26
2.6 Estresses em plantas e espécies reativas de oxigênio .....	28
REFERÊNCIAS.....	30
3 DINÂMICA DAS FRAÇÕES INORGÂNICAS DE FÓSFORO EM SOLOS DE CLIMA TROPICAL APÓS ADUBAÇÃO FOSFATADA CORRETIVA COM FONTES DE DIFERENTES SOLUBILIDADES.....	35
3.1 Introdução .....	38
3.2 Material e métodos.....	40
3.2.1 Campos experimentais .....	40
3.2.2 Os tratamentos .....	44
3.2.3 Avaliação das frações de P .....	45
3.2.4 Análise Estatística.....	46
3.3 Resultados e Discussão .....	47
3.3.1 Resultados.....	47
3.3.2 Discussão .....	54
3.4 Conclusões .....	57
Referências.....	58

4 ESTRESSE OXIDATIVO E PRODUTIVIDADE DA CANA SOCA CULTIVADA EM SOLOS QUE RECEBERAM ADUBAÇÃO FOSFATADA CORRETIVA.....	61
4.1 Introdução .....	64
4.2 Material e Métodos .....	66
4.2.1 Campo experimental .....	66
4.2.2 Os tratamentos .....	70
4.2.3 Determinação do P disponível no solo.....	71
4.2.4 Avaliação nutricional do fósforo .....	71
4.2.5 Determinação da atividade das enzimas do complexo antioxidativo .....	71
4.2.6 Produção de biomassa.....	72
4.2.7 Produtividade e porcentagem de sacarose .....	73
4.2.8 Análise Estatística .....	73
4.3 Resultados e Discussão .....	74
4.3.1 Resultados .....	74
4.3.2 Discussão .....	84
4 Conclusões .....	89
Referências.....	90
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	94

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O fósforo (P) é um dos macronutrientes mais importantes para as plantas por ser fonte de energia atuando nos ácidos nucleicos, nucleotídeos, fosfolipídios, fosfatos de açúcar e na respiração, como ativador enzimático.

A produção de cana-de-açúcar é severamente afetada pelo teor de P-disponível no solo. O P contribui para a formação do sistema radicular mais vigoroso e contribui para a melhoria do perfilhamento, o que resulta na maior produtividade de biomassa das plantas. Além das melhorias na produtividade, o P contribui também para melhor qualidade industrial do caldo, aumentando a porcentagem aparente de sacarose contida no caldo (pol%) e a pureza.

Nas regiões que predomina cultivo de cana-de-açúcar o clima é o tropical, pois está é uma cultura que produz bem em altas temperaturas (33°C) e precipitação pluvial superior a 1200 mm ao ano. Em regiões com essas características (alta temperaturas e elevada precipitação pluvial) os solos tendem a apresentar grau avançado de intemperismo com predomínio de minerais do tipo 1:1 e óxidos de ferro e alumínio. Nesses solos predomina cargas positivas, o que contribui para o baixo teor de P disponível para absorção pelas plantas, devido à forte ligação covalente dos íons fosfatados com os colóides do solo. Adsorção de P é maior nos solos ricos em óxidos, pois o ponto de carga zero (PCZ) desses pode chegar a 9,0 e a grande superfície específica dos óxidos contribui para a maior adsorção do P.

Nos solos que os óxidos não são predominantes, a limitação do P é atribuída a formação de precipitados dos íons fosfatados com alumínio (Al), ferro (Fe) e cálcio (Ca) na solução do solo. Em solos ácidos essa precipitação predomina com Al e Fe e nos solos não ácidos ocorre com o Ca. Quanto maior o teor de P na solução do solo mais favorável é a ocorrência da formação de precipitados, nos sistemas agrícolas que adubação é realizada com fontes aciduladas de alta solubilidade, o teor de precipitados de P com outros elementos é alto.

A estabilidade dos compostos de P precipitado é baixa, principalmente para o P-Al e P-Fe. A solubilidade desses ocorre em escala de pH variando entre 4 e 6, e como nos solos agricultáveis acidez é corrigida a próximo de 6, o P precipitado no decorrer do tempo torna-se lábil, o qual pode ser absorvido pelas plantas, formar novos precipitados ou ser adsorvido aos colóides.

No entanto, independe da capacidade de adsorção e fixação de P, nos solos cultivados com cana-de-açúcar é tradicional aplicar o adubo fosfatado uma única vez no fundo do sulco de plantio em doses superiores a exigência da cultura. Essa forma de aplicação não estimula a

ramificação e o crescimento do sistema radicular além da linha de plantio, o que limita o teor de água e nutrientes absorvidos pelas plantas e compromete a produtividade da cana-de-açúcar e a qualidade industrial do caldo.

Adubação corretiva em área total na superfície do solo cultivado com cana-de-açúcar pode proporcionar distribuição do P na camada superficial do solo até 0,30 m de profundidade e proporcionar maior absorção desse nutriente, estimulando o desenvolvimento do sistema radicular e favorecendo a produtividade das plantas. Adubação corretiva com fontes de baixa solubilidade, em solos com baixa capacidade de adsorção de P, pode disponibilizar maior teor de P residual no decorrer do tempo e beneficiar a produtividade das socas de cana-de-açúcar.

A fonte de baixa solubilidade mais utilizada na agricultura é o fosfato natural reativo (FRN), oriundo de rochas apáticas, sendo que a quantidade dessas rochas é limitada na natureza e encontrar fontes alternativas renováveis capazes de reduzir o uso do P inorgânico é importante para a sustentabilidade da adubação fosfatada.

As fontes orgânicas são promissoras na substituição do P inorgânico, por aumentar o teor de P no solo, melhorar as propriedades físicas, químicas e a qualidade da biota do solo. Entre as diversas fontes com potencial de uso agrícola, no setor canavieiro a torta de filtro, que é um resíduo industrial do processamento dos colmos da cana-de-açúcar, apresenta potencial de uso agrícola para adubação corretiva, por ser rica em P, produzida em grande volume e com baixo custo de produção.

## **1.1 Hipóteses**

A correção de solos com fontes fosfatadas de solubilidade variada promovem variações nas frações do P-inorgânico e no P-disponível no solo.

O maior teor de P disponível no solo pode reduzir o estresse oxidativo e aumentar a produtividade das plantas de cana-de-açúcar.

## **1.2 Objetivo geral**

Avaliar a dinâmica do P inorgânico, a disponibilidade de P no decorrer do tempo e a produtividade da cana-de-açúcar em solos de clima tropical após adubação fosfatada corretiva com fontes de P de solubilidade diversa.

### **1.3 Objetivos específicos**

Determinar as frações do P-inorgânico em solos de clima tropical após adubação fosfatada corretiva com fontes de solubilidade variada.

Determinar o teor de P disponível no solo para as socarias de cana-de-açúcar após a adubação corretiva com diferentes fontes e doses de P.

Determinar o teor de P nas folhas diagnóstica em socarias de cana-de-açúcar após a adubação corretiva com diferentes fontes e doses de P.

Avaliar o efeito da maior disponibilidade de P no decorrer do tempo sobre o estresse oxidativo em socarias de cana-de-açúcar.

Avaliar o efeito da maior disponibilidade de P no solo sobre produtividade de biomassa e colmos em socas de cana-de-açúcar.

Avaliar o efeito do maior teor de P disponível no solo sobre o percentual de sacarose no caldo das socarias de cana-de-açúcar.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma monocotiledônea pertencente à divisão Magnoliophyta, classe Liliopsida, família Poaceae e ao gênero *Saccharum*. É originária da região leste da Indonésia e Nova-Guiné (SANTOS et al., 2008). Foi introduzida no Brasil em meados de 1526 fazendo parte do contexto histórico brasileiro, por ser a primeira atividade econômica documentada na história brasileira (SIMÕES NETO, 2008).

Tem importância econômica a nível mundial, principalmente no que se refere a produção de açúcar e energia (HENRY, 2010). Contém altas concentrações de sacarose podendo chegar a 60% do peso seco do caule maduro. Outra característica importante é a lenhocelulósica, o que torna possível a produção de bioenergia produzida por cana-de-açúcar. Entre as fontes de energia, o etanol é um subproduto que substitui parte dos combustíveis fósseis, o qual é produzido em larga escala.

O Brasil se destaca como maior exportador mundial de álcool e maior produtor de cana-de-açúcar. A produção desta cultura é favorecida pelo clima tropical com temperaturas elevadas variando entre 21 e 33° C (TALUKDAR; VERMA; MALIK, 2017). Estima-se que para a safra 2017/18, a produção seja de 647,6 milhões de toneladas ocupando uma área de cultivo de 8,84 milhões de hectares (CONAB, 2017). A região Nordeste ocupa a terceira posição no ranque da produção nacional com 43,43 milhões de toneladas. O estado de Pernambuco e Paraíba estão entre os maiores produtores do Nordeste ocupando segunda e terceira posição, respectivamente, no ranque de produção (CONAB, 2017).

No Brasil a produtividade ainda é baixa, em média 73,2 Mg.ha<sup>-1</sup>, inferior ao potencial genético da cultura, a qual em condições edafoclimáticas favoráveis pode ultrapassar as 150 Mg ha<sup>-1</sup>. Na região nordeste a média é de 47 Mg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2017), em virtude de diversos fatores como a baixa precipitação, ocorrência de pragas, doenças, propriedades químicas e físicas do solo desfavoráveis ao cultivo. Entre esses a fertilidade do solo é um dos fatores que mais limita a produtividade da cana-de-açúcar, pois está é exigente em nitrogênio, fósforo e potássio, necessitando de 30 a 60 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio, no cultivo da cana-planta. E de 80 a 150 kg ha<sup>-1</sup> para as soqueiras, dependendo do ambiente de produção, da variedade e da idade do canavial. A exigência por potássio tanto para a cana-planta como para as soqueiras é de 80 a 150 Kg por hectare. Essa alta demanda por potássio está relacionada ao estímulo da vegetação e ao perfilhamento, ao aumento do teor de carboidratos, óleos, lipídeos, como também proteínas. O potássio contribui também para a promoção do armazenamento de açúcar e amido

e ajuda na fixação de nitrogênio (ROSSETTO; SANTIAGO, 2007). Já o P é o macronutriente exigido em menor quantidade, mas as doses utilizadas nos solos são altas, variando de 90 a 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, essas altas doses se deve a ocorrência da fixação e precipitação do P nos solos mais intemperizados.

Entre os nutrientes exigidos pela cana-de-açúcar o P tem grande importância, pois quando em deficiência o perfilhamento, desenvolvimento das folhas, comprimento e diâmetro dos entrenós são afetados de forma negativa comprometendo todo o sistema de produção (ALVAREZ; AMARAL; ARRUDA, 1960; ALVAREZ; PACHECO, 1963).

Diante da importância da fertilidade para a eficiência de produção da cana-de-açúcar existe uma crescente necessidade de conhecimento sobre o manejo nutricional, principalmente referente a adubação fosfatada. Pois os solos altamente intemperizados competem com as plantas, uma vez que esses apresentam alta capacidade de adsorção e fixação de P (NOVAIS; SMYTY, 2009).

## **2.2 Importância do fósforo na nutrição de plantas**

O P é um macronutriente que atua nos ácidos nucleicos, nucleotídeos, fosfolípidos e fosfatos de açúcar (RENNENBERG; HERSCHBACH, 2013). Desempenha papel importante na respiração por ser um ativador enzimático agindo no metabolismo de carboidratos (VANCE; UHDE-STONE; ALLAN, 2003).

A função do P não pode ser realizada por nenhum outro nutriente. O P é representado por cerca de 0,2% do peso seco das plantas. Apesar de estar presente no solo em grandes quantidades, o P não se encontra prontamente disponível para absorção, devido à baixa solubilidade de fosfatos de ferro, alumínio e cálcio, o que o torna um nutriente de difícil absorção para as plantas. Além disso, a sua mobilidade também é baixa, o que dificulta a absorção (SCHACHTMAN; REID R; AYLING, 1998). De acordo com Há e Tran (2014), no primeiro ano de adubação apenas 15% a 30% do fertilizante contendo P é absorvido pelas plantas.

A baixa absorção contribui para ocorrência de deficiência de P para as plantas, as quais em casos de deficiência manifestam várias respostas fisiológicas. Essas respostas geralmente se desenvolvem aproximadamente uma semana após a exposição aos níveis críticos de P e refletem a adaptação de processos bioquímicos e metabólicos. Uma das repostas é a acumulação de antocianinas, presentes nos tecidos das folhas para proteger cloroplastos e ácidos nucleicos da luz intensa ou ultravioleta (BUSTOS; CASTRILLO; LINHARES, 2010). Quando esse

fenômeno ocorre as folhas apresentam coloração verde escuro ou purpurina (SUMMERHAYS et al., 2014).

Outras características da deficiência de P é o menor crescimento das raízes primárias e o aumento no desenvolvimento das raízes laterais e finas (BROWN; GEORGE; THOMPSON, 2012; BUSTOS et al., 2010). Essa inibição ocorre porque a atividade do meristema é gradualmente afetada com a deficiência de P (JAIN; POLING; SMITH, 2009). Esse fenômeno é atribuído a baixa manutenção das células nas raízes deficientes de P, por não receberem do retículo endoplasmático a resposta da ATPase de maneira adequada (WANG; MENG, 2010). Por fim, conforme relatam Clarkson, Carvajal e Henzler (2000), a deficiência em P prejudica a funcionalidade das raízes, por ocorrer uma diminuição nos genes que codificam as aquaporinas. O comprometimento no desenvolvimento e a funcionalidade do sistema radicular das plantas induz tanto a deficiência nutricional do P como para os demais elementos. A deficiência de P dificulta o desenvolvimento da área foliar prejudicando a taxa fotossintética das folhas individuais, resultando em uma oferta insuficiente de fotossintetização adequada e prejudicando a produção de biomassa (SATO et al., 2010; ZAMBROSI; MATTOS; SYVERTSEN, 2011).

### **2.3 Importância do fósforo na qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar apresenta potencial geneticamente favorável a acumulação de açúcares, especialmente na forma de sacarose. Sob condições ideais de cultivo este potencial é otimizado, resultado do pleno desenvolvimento das plantas. Ao final do ciclo vegetativo ocorre a maturação, quando o acúmulo de sacarose é maximizado nas plantas cultivadas (SANTOS et al., 2011). O teor de sacarose é menor em ambientes que proporcionem estresse às plantas.

Cana-de-açúcar de boa qualidade tem que apresentar alta produtividade de colmos e atender as exigências mínimas requeridas no setor agroindustrial na ocasião do processamento, tais como teor de sacarose e a fibra industrial (MOURA et al., 2005). Entre os diversos fatores que interferem na produtividade e qualidade do caldo da cana-de-açúcar a nutrição de plantas tem papel importante, principalmente na adubação fosfatada. Pois o P é um elemento que proporciona benefícios tanto na produtividade, como na qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar. Uma adubação fosfatada adequada contribui para maior porcentagem aparente de sacarose contida no caldo da cana (pol%) e pureza de caldo (SIMÕES NETO et al., 2009). Santos et al. (2011) avaliando o efeito da adubação com diferentes fontes sobre a qualidade industrial da cana-de-açúcar verificaram que o aumento das doses de fosfato no sulco de plantio aumentaram o percentual do Brix %. Simões Neto et al. (2012) avaliando as características agroindustriais da cana-de-açúcar em função da adubação fosfatada, em solos de Pernambuco

concluíram que a adubação fosfatada nas condições de cana-planta influenciou positivamente a produção agrícola e industrial. Mas, os valores de açúcares totais redutores não foram influenciados pelas doses de P, entretanto, foram mais elevados nos solos com maior poder tampão de fosfato.

A presença de fósforo no caldo da cana-de-açúcar exerce papel fundamental no processo de clarificação. Caldos contendo baixos teores deste elemento são de difícil floculação e, neste caso a decantação das impurezas (bagacilho, argila, clorofila, entre outros) é reduzida. Caldo turvo e de coloração intensa implica na produção de açúcar de pior qualidade e, portanto, de menor valor comercial, chegando a inviabilizar o produto para exportação, devido às exigências de cor (BOVI; SERRA, 2001).

#### **2.4 Dinâmica do fósforo no solo**

O P inorgânico de uso agrícola é formado por compostos derivados do ácido ortofosfórico e pirofosfatos (GATIBONI; RHEINHEIMER; FLORES, 2007). As plantas não absorvem o P diretamente da fase sólida, para isso tem que ocorrer o intemperismo e a solubilidade. Sendo que as formas sólidas devem ser convertidas em líquido e quimicamente convertidas em fosfato mono ou diprotonado ( $\text{HPO}_4^{2-}$  ou  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) para que as plantas consigam absorver com eficiência (YOUNG; WESTFALL; COLLIVER, 1985).

O conteúdo de P no solo varia de 35 a 5.300 mg kg<sup>-1</sup> de solo, com valores médio de 800 mg kg<sup>-1</sup> (SPARKS, 2003). No entanto, a concentração de P na solução do solo é muito baixa e para suprir a necessidade das plantas é necessário recorrer à adubação. Do P fornecido pela adubação pequenas concentrações permanecem em solução no solo, em média 0,01% do P total (SINGH; SCHULZE, 2015).

A baixa disponibilidade de P no solo ocorre por causa da alta estabilidade dos íons fosfatados com as frações minerais e orgânicas do solo (ARAI; SPARKS, 2007). Dificultando a disponibilidade de P para as plantas, pois o P é adsorvido a superfície dos coloides e posteriormente fixado, tornando-se não lábil. A adsorção predomina em solos com altos teores de argilas, principalmente as ricas em óxido de ferro e alumínio (NZIGUHEBA; MERCKX, 2002; SANCHEZ, 2002; BRADY; WEI, 2008). Adsorção de P é maior nos óxidos de ferro, principalmente nas goethititas em função da maior superfície específica (WANG et al., 2013; BORTOLUZZI et al., 2015).

A fixação de P é altamente influenciada pelo o valor do pH e o teor de matéria orgânica (CHATTERJEE et al., 2014). Com o aumento do pH as cargas superficiais das partículas do solo tornam-se cada vez mais negativas e a repulsão entre o fosfato e a superfície adsorvente

aumenta (POSNER; BOWDEN, 1980). A maior adsorção de P nos óxidos ocorre com o pH igual ou inferior 4, pois nessa faixa de pH predomina o maior saldo de carga positiva dos óxidos e pode ser reduzida com o aumento do teor de ácidos orgânicos, tais como os ácidos húmicos, fulvático e ácido cítrico, estes podem inibir a adsorção de P através da competição, dos efeitos eletrostáticos e do impedimento da adsorção de P (BORGGAARD et al., 2005; WENG et al., 2008).

Nos solos com avançado grau de intemperismo, mas que predomina a caulinita na mineralogia da fração argila a adsorção de P é insignificativa comparado aos óxidos (JOHNSON; LOEPPERT, 2006; ULÉN; SNÄLL, 2007; CUI; WENG, 2013; PÉREZ et al., 2014). Pois nas caulinitas o número de sítios ativos são baixos, grupo funcionais OH, o que dificulta a adsorção de P (CELI; LUCA; BARBERIS, 2003). E a menor PCZ e superfície específica dificultam a adsorção do P.

O fator que mais limita o teor de P em solos cauliniticos é a precipitação de compostos solúveis do íon fosfatado com Al, Fe e Ca livre na solução do solo. A precipitação do P é altamente dependente do pH do solo (SINGH; SCHULZE, 2015). Em ambientes com pH baixo ocorre com o Al e Fe. Quando alto, as cargas superficiais das partículas de solo tornam-se mais negativas, aumentando a repulsão entre o íon fosfatado e a superfície adsorvente dos coloides, o que promoverá redução da fixação de P e aumento da precipitação com o Ca disponível em solução (NOVAIS; SMYTH, 1999). A precipitação de P nos solos torna-se particularmente importante durante a dissolução de fertilizantes granulares, pois durante a solubilidade dos grânulos ocorre as maiores reações (SAMPLE et al., 1980). Quanto mais solúvel e concentrada em P for a fonte, maior será o teor de P temporariamente disponível em solução do solo, ocasionando desequilíbrio químico, aumentando a adsorção e precipitação. Por outro lado, aumentando a difusão facilitando absorção de P pelas raízes das plantas (NOVAIS; SMYTH, 2007).

Na agricultura brasileira para evitar a adsorção e precipitação do P no solo são difundidas as técnicas de aplicação localizada e parceladas, reduzindo o contato íon fosfatado com as partículas de solo (NOVAIS; SMITY, 2007). No entanto em solos com baixa capacidade de adsorção como os caulíticos, o P aplicado em área total aumenta a eficiência de absorção deste elemento pelas as raízes, uma vez que esse apresenta baixa mobilidade no solo.

## **2.5 Fontes de Fósforo**

Para suprir a necessidade nutricional das culturas de importância agrícola é necessário aplicar grandes quantidades de adubos fosfatado nos solos cultivados. Essa necessidade de

adubação com altas doses ocorre porque estes solos são naturalmente de baixa fertilidade e com alta capacidade de adsorção do íon fosfatado aos óxidos de ferro e alumínio, principais representantes da fração argila em solos altamente intemperizados (CESSA et al., 2009).

Além de elevar os custos de produção, o uso de fosfato inorgânico está levantando uma crescente conscientização sobre a limitação das reservas das rochas fosfatadas. Portanto, aumentar a eficiência do uso na adubação fosfata é de vital importância no setor agrícola para manter ou maximizar a produtividade atual (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009). A eficiência pode ser obtida com o uso coerente das fontes de P mais apropriadas para cada tipo de solo. O P é entre os macronutrientes o que tem maior opção de fontes no mercado, as quais podem variar quanto à reatividade (SANTOS et al., 2008). Podendo serem classificadas em solúveis, pouco solúveis e insolúveis, a eficiência do P é a mesma independente da fonte, após a mineralização o átomo de P é o mesmo e vai ter a mesma função no metabolismo vegetal.

No entanto, a solubilidade da fonte de P utilizada pode influenciar sobre a dinâmica do P no solo. De acordo com Bryan e Hopkins (2015) a adição de fertilizantes fosfatado de alta solubilidade resulta no aumento da concentração de P em solução a níveis que excedem o equilíbrio químico constante, condições essas favoráveis à precipitação do fosfato com outros elementos presentes na solução do solo como o cálcio, alumínio, ferro entre outros. Enquanto que uma fonte de menor solubilidade pode minimizar a formação destes compostos de fosfato precipitados, devido ao baixo teor de P em solução.

Entre as fontes solúveis as mais exploradas na agricultura é o superfosfato simples com 18% de  $P_2O_5$ , 11% de enxofre e 19% de cálcio; superfosfato triplo com 43% de  $P_2O_5$  e 13% de cálcio; fosfato monoamônico com 48% de  $P_2O_5$  e 9% de nitrogênio (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Como fonte de menor solubilidade existem os fosfatos naturais reativos, os quais são concentrados em apáticos, obtidos a partir de minerais fosfáticos com reações maiores em solos ácidos (KAMINSKI; PERUZZO, 1997). Esta fonte de P apresenta menor disponibilidade imediata de nutrientes para as plantas, uma vez que dissolvem lentamente na solução do solo (HOROWITZ; MEURER, 2004). A baixa solubilidade é uma característica importante em solos com alta capacidade de adsorção e precipitação de P, pois com o uso dessas fontes a adsorção e precipitação pode ser menor. No entanto é necessário verificar se a baixa solubilidade está suprimindo a exigência nutricional das plantas. Os fosfatos naturais reativos de origem de rochas ígneas e metamórficas apresentam solubilidade baixa, enquanto que os de rochas sedimentares apresentam maiores solubilidades. Entre as fontes de fosfato natural reativos, o Gafa ou Carolina do Norte apresentam solubilidades capazes de suprir as necessidades de P exigidas pelas plantas de ciclo curto (NOVAIS; SMITH, 1999).

Existem também as fontes orgânicas de P, estas liberam o P gradativamente com solubilidade baixa a intermediária e são renováveis. Com destaque para a torta de filtro em regiões canavieiras, pois essa é um subproduto do processamento da cana-de-açúcar, composta da mistura de bagaço moído e lodo da decantação do tratamento do caldo (SANTOS et al., 2010).

A torta apresenta potencial para suprir a demanda nutricional das plantas, pois em sua composição encontra-se os macro e micronutrientes (NUNES JÚNIOR, 2008). A concentração de P na torta é de 1,2 a 1,8% com 50% desse do fósforo prontamente disponível, os demais serão mineralizados lentamente (ROSSETTO; SANTIAGO, 2007). Outra vantagem da torta é ser uma fonte de matéria orgânica e contribuir para melhorar as propriedades físicas do solo.

## **2.6 Estresses em plantas e espécies reativas de oxigênio**

O estresse pode ser considerado desfavorável quando a demanda de energia pelas plantas para sua sobrevivência é maior que a produção. Nesse caso, inicialmente pode ocorrer uma desestabilização inicial de suas funções, seguida ou não por uma estabilização e indução dos processos fisiológicos de adaptação (LARCHER, 2000). As plantas podem sofrer estresse por diversas causas, tais como infestação por pragas, doenças, déficit hídrico, deficiências nutricionais, salinidade, mudanças de temperatura, dentre outros.

Os estresses ambientais podem resultar em um estresse oxidativo, que caracteriza-se pela formação de espécies reativas de oxigênio (ROS, do inglês reactive oxygen species), espécies que podem ser formadas durante o processo metabólico em organelas como as mitocôndrias, cloroplastos e peroxissomos (KARUPPANAPANDIAN; MOON; MANOHARAN, 2011).

A ocorrência do acúmulo de espécies reativas e citotóxicas de oxigênio, como os radicais superóxido ( $O_2^-$ ), peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e os radicais hidroxila (OH) e oxigênio “singleto” ( $O^2$ ) são as principais espécies produzidas (MITTLER, 2002). O excesso das ROS podem afetar severamente a funcionalidade e integridade das células, em função dos danos oxidativos em proteínas, lipídeos e ácidos nucleicos, caracterizando o estresse oxidativo secundário (GILL; TUTEJA, 2010).

Para reduzir o estresse, as plantas desenvolveram mecanismos de defesa enzimáticos e não enzimáticos capazes de neutralizar a citotoxicidade das ROS. O sistema celular de defesa antioxidante começa com uma cascata enzimática, mas envolve também componentes não enzimáticos, dentre os quais destacam-se o ascorbato (AsA), a glutatona (GSH), o  $\beta$ -caroteno e o  $\alpha$ -tocoferol. Tais antioxidantes podem evitar a formação de radicais livres, sequestrá-los ou

promover sua degradação, prevenindo a ocorrência de danos às células das plantas (SERKEDJIEVA, 2011). A regulação da expressão de genes codificantes de enzimas antioxidantes, cujas atividades evitam ou reduzem os danos potenciais causados pelas ROS faz parte da resposta a esse estresse (CYRNE; FERNANDES; MARINHO, 2003).

As enzimas do sistema antioxidante são bastante sensíveis às condições de estresse abiótico, servindo de indicador do estresse. Destacam-se entre essas enzimas a superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) (NOCTOR; FOYER, 1998).

As primeiras enzimas a agirem no sistema antioxidante celular são as SOD, que defendem contra as ROS e catalisam a dismutação de dois radicais  $O_2^{\bullet-}$ , gerando  $H_2O_2$  e  $O_2$ . Essas enzimas participam da modulação do nível de  $H_2O_2$  em cloroplastos, mitocôndrias, citosol e peroxissomos (BHATTACHARJEE, 2010). A dismutação do  $O_2^{\bullet-}$  ocasiona a formação de outra ROS, o  $H_2O_2$ . Essas enzimas são divididas em três grupos a CuSOD e ZnSOD (contendo cobre e zinco, respectivamente), são localizadas no citosol e cloroplastos; a FeSOD (contendo ferro), está presente nos cloroplastos e a MnSOD (contendo manganês) é encontrada nas mitocôndrias e peroxissomos (ALSCHER; ERTURK; HEATH, 2002).

Já a CAT é uma das principais enzimas na eliminação do  $H_2O_2$  gerado durante a fotorrespiração e a  $\beta$ -oxidação dos ácidos graxos. Atua nos peroxissomos e glioxissomos e pode ser encontrada também em mitocôndrias (BARBOSA et al., 2014). Essa enzima convertendo o  $H_2O_2$  em água e oxigênio molecular, os quais são liberados durante a  $\beta$ -oxidação de ácidos graxos (HOLTMAN et al. 1994) ou durante o processo de fotorrespiração (IGAMBERDIEV; LEA, 2002).

A APX é uma heme-proteína, da classe I da superfamília das peroxidases, com distintas formas isoenzimáticas, diversamente reguladas. Suas isoformas podem ser encontradas no citosol, mitocôndrias, peroxissomos, cloroplastos, estroma e ligadas às membranas dos tilacoides e parede celular (DABROWSKA et al., 2007). APX é considerada a enzima mais importante na eliminação do  $H_2O_2$  de certos compartimentos celulares, como os cloroplastos, onde não existem catalases para atuar nessa função (MITTLER, 2002). Essa enzima oxida duas moléculas de ascorbato na redução do  $H_2O_2$ . O ascorbato oxidado é regenerado pelo ciclo metabólico do ascorbato-glutationa, mediante a ação de outras enzimas (NOCTOR; FOYER, 1998).

## REFERÊNCIAS

- ALSCHER, R. G.; ERTURK, N.; HEATH, L. S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. **Journal of Experimental Botany, Oxford**, Londre, v. 53, n. 4, p. 1331-1341, 2002.
- ALVAREZ, R.; AMARAL, A. Z.; ARRUDA, H. V. Ensaio de adubação N-P-K em cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v.19, n. 1, p.1061-1069, 1960.
- ALVAREZ, R.; PACHECO, J. A. Adubação da cana-de-açúcar: VII. Ensaio preliminar de adubação N-P-K no arenito Bauru **Bragantia**, Campinas, v.22, n. 4, p. 193-199, 1963.
- ARAI, Y.; SPARKS, D. L. Phosphate reaction dynamics in soils and soil minerals: a multiscale approach. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 94, n, 56, 135-179, 2007.
- BARBOSAI, M. R.; SILVA, M. M. A.; WILLADINO, L.; ULISSES, C.; CAMARA, T. R. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 31 p.453-460, 2014.
- BHATTACHARJEE, S. Sites of generation and physicochemical basis of formation of reactive oxygen species in plant cell. In: GUPTA, S.D. **Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants**. 1 ed. **Enfield**: Science Publishers, 2010. p.1-30.
- BORGGGAARD, O. K.; B. RABEN-LANGE, A. L.; GIMSING, AND B. W. STROBEL. Influence of humic substances on phosphate adsorption by aluminium and iron oxides. **Geoderma**, Amsterdam, v.127, n. 121 p. 270-279, 2005.
- BORTOLUZZI, E. C.; PÉREZ, C. A. S.; ARDISSON, J. D.; TIECHER, T.; CANER, L. Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 104, n. 123, p. 196-204, 2015.
- BOVI, R.; SERRA, G. E. Folhas verdes, folhas secas, fibra do colmo e clarificação do caldo de cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 457-463, 2001.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The Nature and Properties of Soil**. 4a ed. Prentice Hall, 2008.
- BROWN, L. K.; GEORGE, T. S.; THOMPSON J. A. What are the implications of variation in root hair length on tolerance to phosphorus deficiency in combination with water stress in barley (*Hordeum vulgare*). **Anatomica Botânica**, Porto Alegre, v. 110, n. 2, p. 319-28, 2012.
- BUSTOS, R.; CASTRILLO, G.; LINHARES F. A central regulatory system largely controls transcriptional activation and repression responses to phosphate starvation in *Arabidopsis*. **PLoS Gen**, New York, v. 6, n. 34, p. 1001-102, 2010.
- CESSA, R. M. A.; CELI, L. C.; VITORINO, A. C.; NOVELINO, J. O.; ELISABETTA, B. Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois Latossolos vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1153-1162, 2009.

CHATTERJEE, D.; DATTA, S. C.; MANJAIHAH, K. M. Fractions, uptake and fixation capacity of phosphorus and potassium in three contrasting soil orders. **Soil Science Plant Nutrition**, Santa Maria, v. 14, n. 3, p. 640-656, 2014.

CLARKSON, D. T. M.; CARVAJAL, T. HENZLER. Root hydraulic conductance: Diurnal aquaporin expression. and the effects of nutrient stress. **Jornal Experimental de Botânica**, Brasilia, v. 51, n. 2, p. 61-70, 2000.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra Brasileira**: primeiro levantamento. Brasilia: CONAB, | 2017. 78 p.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. **Jornal Global Environmental Change**, Pearson, v. 19, n. 12, p. 292-305, 2009.

CYRNE, L.; FERNANDES, L.; MARINHO, H. S. Regulation of antioxidant enzymes gene expression in the yeast *Saccharomyces cerevisiae* during stationary phase. **Free Radical Biology e Medicine**, Washington, v. 34, n. 2, p. 385-393, 2003.

DABROWSKA, K. A. T. A. A.; GOC, A.; SZECHYŃSKA-HEBDA, M.; SKRZYPEK, E. Characteristics of the plant ascorbate peroxidase family. **Acta Biologica Cracoviensia**, Gdańsk, v. 49, n. 32, p.7-17, 2007

GATIBONI, L. C.; RHEINHEIMER, D. D.; FLORES, J. P. C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solos sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, 691-699, 2007.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Jornal Plant Physiology and Biochemistry**, Gdańsk, v. 48, n. 4, p. 909-930, 2010.

HENRY, R. J. Basic information on the Sugarcane plant. In: HENRY, R. J.; KOLE, C. **Genetics, Genomics and Plant Breeding of Sugarcane**. 2 ed. Enfield: Science Publisher, 2010. p. 1-7.

HOLTMAN, W. L.; HEISTEK, J. C.; MATTERN, K. A.; BAKHUIZEN, R.; DOUMA, A. C. Betaoxidation of fatty acids is linked to the glyoxylate cycle in the aleurone but not in the embryo of germination barley, **Plant Science**, Gdańsk, v. 99, n. 2, p. 43-53, 1994.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Eficiência agronômica de fosfatos naturais. In: YAMADA, T. e ABDALLA, S.R.S. (Eds). **Fósforo na agricultura brasileira**, Piracicaba, v. 1, n. 1, p. 665-682, 2004.

IGAMBERDIEV, A. U.; LEA, P. J. The role of peroxisomes in the integration of metabolism and evolutionary diversity of fotosynthetic organism. **Phytochemistry**, Berlin, v. 60, n.7, p. 651-674, 2002.

ILL, M. W.; HOPKINS, B. G.; JOLLEY, V. D. Maize in-season growth response to organic acid-bonded phosphorus fertilizer (Carbond P®). **Jornal Soil Scice Plant Nutrition**, Santa Maria, v. 12, n.2, p. 123-132, 2014.

JAIN, A.; POLING, M. D.; SMITH, A. P.; Variations in the composition of gelling agents affect morphophysiological and molecular responses to deficiencies of phosphate and other nutrients. **Plant Physiol**, Lancaster, v. 150, 33-49, 2009.

KAMINSKI, J. **Avaliação agronômica em função da granulometria de termofosfato magnsiano fundido**. 1ª ed, Santa Maria, 1997. P. 20-44.

KARUPPANAPANDIAN, T.; MOON, J. C.; KIM, C. MANOHARAN, K. Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. **Australian Journal of Crop Science**, Australia, v. 5, n. 23, p.709-725, 2011.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: RiMa Artes e Texto, 2000. p. 234.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, Amsterdam, v. 7, n. 1, p. 405-410, 2002.

MOURA, M. V. P. F.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, C. A. V. DE; DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, H. M. DE; PORDEUS, R. V. Doses de adubação nitrogenada e potássica em cobertura na cultura da cana-de-açúcar, primeira soca, com e sem irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p.753-760, 2005.

NOCTOR, G.; FOYER, C. H. Ascorbate and Glutathione: Keeping active oxygen under control. **Annual Review Plant Physiology Plant Molecular Biology**, Amsterdam, v. 49, n. 1, p. 249-279, 1998.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. (Eds.). **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Oxford: Viçosa, 1999. p. 72.

NUNES JUNIOR, D. Torta de Filtro: de resíduo a produto nobre. **Revista Idea News**, Ribeirão Preto, v. 2 n. 92, p. 22-30, 2008.

NZIGUHEBA, G.; MERCKX, R.; PALM, C. A. Dinâmica do fósforo do solo e resposta do milho a diferentes taxas de fertilizante de fósforo aplicado a um Acrisol no oeste do Quênia. **Plant Soil**, Czech, v. 243, n. 8, p. 1-10, 2002.

OLMOS, E.; MARTÍNEZ-SOLANO, J. R.; PIQUERAS A, HELLÍN E. Early steps in oxidative burst induced by cadmium in cultured tobacco cells. **Journal of Experimental Botany**, Brasilia, v. 54, n. 3, p.291-301, 2003.

RENNENBERG, H.; HERSCHBACH, C. Phosphorus nutrition of woody plants: many questions - few answers. **Plant Biology**, Porto Alegre, v. 23, n. 1, p. 2013.

SALVATO, F.; WILSON, R.; LLERENA, J. P. P.; KIYOTA, E.; REIS, K. L.; BOARETTO, L. F.; BALBUENA, T. S.; AZEVEDO, R. A. A.; THELEN, J. J.; PAULO MAZZAFERA, P. Luxurious nitrogen fertilization of two sugarcane genotypes contrasting for lignin composition causes changes in the stem proteome related to carbon, nitrogen and oxidant metabolism but does not alter lignin content. **Ncbi information**, Rockville, v. 6, n. 16, p. 3688-3703. 2017.

SANCHEZ, P. A. Fertilidade do solo e fome na África. **Revista Ciência**, Brasília, v. 295, n. 3, p. 2019-2020, 2002.

SANTOS, D. H.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S. S.; FABRIS, L. B. Produtividade de cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, Campina Grande, v. 40, n. 6, p.454-461, 2010.

SANTOS, D. H.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S. S.; ECHER, F. R. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, p. 443-449, 2011.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. K. Fatores que afetam a disponibilidade e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008.

SCHACHTMAN, D. P.; REID, R. J, AYLING, S. M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. **Plant Physiol**, Londre, v.116, n. 6, p. 447-453, 1998.

SIMÕES NETO, D. E. **Avaliação da disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação fosfatada para cana-planta em solos do estado de Pernambuco**. 2008. 106 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2008.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; ROCHA, A. T.; FREIRE, F. J. F.; MARIA B. G. S.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A. Características agroindustriais da cana-de-açúcar em função da adubação fosfatada, em solos de Pernambuco. **Revista Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n. 1, p.347–354, 2012.

SPARKS, D. L. Environmental Soil Chemistry. Academic Press, San Diego, C A.  
SUKBONG, H. A.; LAM-SON TRAN. Understanding plant responses to phosphorus starvation for improvement of plant tolerance to phosphorus deficiency by biotechnological approaches. **Reviews in Biotechnology**, Brasília, v. 34, n.1, p. 16-30, 2003.

SUMMERHAYS, J. S. B. G.; HOPKINS, V. D. JOLLEY, M. W. Enhanced phosphorus fertilizer (Carbond P®) supplied to maize in moderate and high organic matter soils. **Jornal of Plant Nutricion**, Santa Maria, v. 38, n. 9, p. 123-132, 2015.

SYERS, J. K.; JOHNSTON A. E.; CURTIN, D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behavior with agronomic information. **FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin** No. 18. Rome, Italy: FAO, 2008.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, Astracã, v. 157, n. 4, p. 423-447, 2003.

WANG, X. D. U G.; MENG Y. The function of LPR1 is controlled by an element in the promoter and is independent of SUMO Ligase SIZ1 in response to low Pi stress in *Arabidopsis thaliana*. **Plant and Cell Physiol**, Makoto, 51, 380–94, 2010.

WANG, X.; LIU, F.; TAN, W.; LI, W.; FENG, X.; SPARKS, D. L.; Characteristics of phosphate adsorption-desorption onto ferrihydrite: comparison with wellcrystalline Fe (hydr) oxides. **Soil Science**, Londres, v.178, n. 2, p. 1-11, 2013.

WENG, L. P.; VAN RIEMSDIJK, W. H.; HIEMSTRA, T. Humic nanoparticles at the oxide-water interface: Interactions with phosphate ion adsorption. **Environmental Science e Technology**. Brasilia, n. 42, 4, p. 8747-8752, 2008.

YOUNG, R. D.; WESTFALL, D. G.; COLLIVER, G. W. Production, marketing, and use of phosphorus fertilizers. In **Fertiliser Technology and Use**. 3. ed . Engelstad, 1985. p. 323-376.

SANTOS, 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**, Birmighan, v. 124, n. 32, p. 1145 - 1151, 2010.

ZAMBROSI, F. C. B.; MATTOS, D. J. R.; SYVERTSEN, J. P. Plant growth, leaf photosynthesis, and nutrient-use efficiency of citrus rootstocks decrease with phosphite supply. **Journal Plant Nutricion Soil Science**, Rockville, v.174, n. 123, p. 487 – 495, 2011.

## **CAPÍTULO 01**

### **3 DINÂMICA DAS FRAÇÕES INORGÂNICAS DE FÓSFORO EM SOLOS DE CLIMA TROPICAL APÓS ADUBAÇÃO FOSFATADA CORRETIVA COM FONTES DE DIFERENTES SOLUBILIDADES**

## **Dinâmica das frações inorgânicas de fósforo em solos de clima tropical após adubação fosfatada corretiva com fontes de diferentes solubilidades**

### **Resumo**

As fontes de fósforo (P) de menor solubilidade, seja orgânica ou mineral, quando aplicadas em solos com baixa capacidade de adsorção de P promovem aumento no teor de P residual do solo por longo período. Sendo de grande importância em áreas cultivadas com cultura de ciclo longo. Nessa pesquisa avaliou-se a dinâmica do P em diferentes solos em região de clima tropical após a adubação fosfatada corretiva com fontes de solubilidade diversa. Os experimentos foram conduzidos em três solos (PAd, CYbe e LVAd) cultivados com cana-de-açúcar em região de clima tropical em Pernambuco e Paraíba. Os tratamentos foram constituídos do controle sem a utilização de P e adubação com 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em área total utilizando três fontes com diferentes solubilidade em água, o Superfosfato Triplo (ST), Fosfato Natural Reativo (FRN) e Torta de Filtro (TF). As amostras de solo para avaliação foram coletadas aos 3, 12, 24 e 36 meses após adubação. Na área útil de cada parcela experimental foram coletadas amostras nas camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m de profundidade. Após o preparo das amostras determinou-se o fracionamento do P inorgânico. Os dados foram submetidos análise de variância (ANAVA), ao nível de 5 % de significância pelo teste F, quando significativos comparado por teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Os dados também foram submetidos ao contraste ortogonal, comparando o controle com os tratamentos que receberam adubação. Adubação corretiva aumento o teor de todas as frações de P avaliadas (P-H<sub>2</sub>O, P-Al, P-Fe e P-Ca) até os 36 meses após adubação em todos os três solos. Adubação promoveu aumento da fração P-H<sub>2</sub>O até a camada de 0,0 a 0,20 m e os maiores teores nessa fração foram promovidos pela fonte ST até os 12 meses após adubação, as fontes TF e FRN aos 12, 24 e 36 não apresentaram variação para essa fração. O P da fonte ST foi o que mais formou precipitado com Al e Fe, enquanto que o FRN com Ca. Adubação fosfatada corretiva em solos com baixa capacidade de adsorção de P promove maior teor da fração P-H<sub>2</sub>O no decorrer do tempo.

Palavra-chave: Torta de filtro. Adsorção de fósforo. Fracionamento. Adubação.

## **Dynamics of inorganic phosphorus fractions in tropical climate soils after corrective phosphate fertilization with sources of different solubilities**

### **Abstract**

The sources of phosphorus (P) of lower solubility, either organic or mineral, when applied in soils with low adsorption capacity of P promote an increase in the residual P content of the soil for a long period. It is of great importance in areas cultivated with long cycle culture. This research evaluated the dynamics of P in different soils in a tropical climate region after corrective phosphate fertilization with diverse sources of solubility. The experiments were conducted in three soils (PAd, CYbe and LVAd) cultivated with sugarcane in a tropical climate region in Pernambuco and Paraíba. The treatments were constituted of the control without the use of P and fertilization with 300 kg ha<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in total area using three sources with different solubility in water, Triple Superphosphate (ST), Natural Reactive Phosphate (FRN) and Filter Cake (TF). Soil samples for evaluation were collected at 3, 12, 24 and 36 months after fertilization. In the area of each experimental plot, samples were collected in the layers of 0.0-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.30 m. After preparation of the samples, the fractionation of the inorganic P was determined. The data were submitted to analysis of variance (ANAVA), at the 5% level of significance by the F test, when significant compared by Tukey's test ( $p \leq 0.05$ ). The data were also submitted to orthogonal contrast, comparing the control with the treatments that received fertilization. Corrective fertilization increased the content of all the evaluated P fractions (P-H<sub>2</sub>O, P-Al, P-Fe and P-Ca) up to 36 months after fertilization in all three soils. Fertilization promoted an increase of the P-H<sub>2</sub>O fraction up to the layer of 0.0 to 0.20 m and the highest contents in that fraction were promoted by the ST source until 12 months after fertilization, the sources TF and FRN at 12, 24 and 36 did not present for this fraction. The P source of the ST source was the one that formed the most precipitate with Al and Fe, whereas the FRN with Ca. Corrective phosphate fertilization in soils with low adsorption capacity of P promotes higher content of the P-H<sub>2</sub>O fraction over time.

Key words: Filter cake. Phosphorus adsorption. Fractionation. Fertilizing.

### 3.1 Introdução

A disponibilidade de P em solos com avançado grau de intemperismo é baixa, em média 0,01% do fósforo total encontra-se disponível na solução do solo (SINGH; SCHULZE, 2015). Esses solos apresentam predominância de óxidos de ferro e alumínio na fração argila e os óxidos contêm ponto de carga zero (PCZ) variando entre 7,5 a 9,5. Nessas condições predominam cargas positiva no solo favorecendo a formação de compostos de esfera interna entre P e os óxidos (MEURER, 2012). A limitação no teor de P é maior nos solos ricos em óxidos de ferro, principalmente nos que predominam goethitas, pois estas têm maior superfície específica (WANG et al., 2013; BORTOLUZZI et al., 2015).

Nos solos com avançado grau de intemperismo, porém com predomínio de caulinita na fração argila a adsorção de P é baixa devido a menor PCZ e superfície específica (MEURER, 2012). Na caulinita o número de sítios ativos são baixos, grupo funcionais OH, o que dificulta adsorção de P (CELI; LUCA; BARBERIS, 2003).

Nestes solos a menor disponibilidade do P é atribuída, não mais a adsorção, a formação de compostos precipitados com alumínio (P-Al) e ferro (P-Fe) em meio ácido e com cálcio (P-Ca) em meio alcalino (SINGH; SCHULZE, 2015). Quanto maior o teor de Fe e Al na solução do solo maior é a limitação de P disponível. Pesquisas mostram que em menor concentração de Fe e Al na solução do solo a solubilidade dos compostos precipitados ocorre a pH inferior a 4, enquanto que, em concentrações de Al e Fe superiores ao teor de P na solução do solo a ocorrência da solubilidade dos compostos inicia com valor de pH próximo de 6 (GAARDER; GRAEHL-NIELSON, 1935). Ou seja, a precipitação do P não é um fenômeno agravante na disponibilidade de P comparado a adoção, pois o pH das áreas agricultáveis são corrigidos para próximo de 6 e nessas condições ocorre a solubilidade dos precipitados de P-Al e P-Fe.

Quanto maior o teor de P na solução do solo, maior será a formação de precipitados, ou seja, nos sistemas agrícolas a aplicação de fontes aciduladas de P de alta solubilidade em água resulta no aumento temporário da concentração de P em solução a níveis que excedem o equilíbrio químico e favorecem a reação do íon ortofosfato com outros elementos (FIXEN; BRUULSEMA, 2014; BRYAN; HOPKINS 2015). Como alternativa, uso de fontes de P de menor solubilidade contribuem para a menor precipitação de P.

A fonte fosfato natural reativo, é a fonte de baixa solubilidade mais utilizada na agricultura (NOVAIS; SMITH, 1999). O atrativo dessa fonte é o baixo custo de produção e a eficiência na fosfatagem. No entanto existe uma grande preocupação com as reservas de rochas apáticas, matéria prima dos fosfatos agrícolas, pois estas podem acabar em algumas décadas

caso sejam utilizadas indiscriminadamente (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009; CORDELL; NESET, 2014).

Para reduzir o uso de fontes de fósforo oriundo de rochas apáticas, as fontes orgânicas são atrativas, por serem renováveis, de baixo custo e podem suprir o fósforo semelhante as fontes minerais, a depender das características do material da fonte. E contribuem para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (GUL et al., 2015). Estas têm decomposição lenta, disponibilizam o P à medida que ocorre a decomposição da matéria orgânica e a mineralização do P (GAIND, 2014). Dentre as diversas fontes orgânicas de uso agrícola, a torta de filtro tem grande potencial na adubação em países que cultivam cana-de-açúcar como o Brasil. O qual produz 647,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (CONAB, 2017) e em cada tonelada de cana processada 40 kg é torta de filtro, ou seja a produção de torta de filtro no Brasil é de 25,9 milhões de toneladas de torta.

As fontes de P de menor solubilidade quando aplicadas em solos com baixa capacidade de adsorção de P, como nos solos com predomínio de caulinita, ocasionam aumento no teor de P residual do solo por longo período. Sendo de grande importância em áreas cultivadas com cultura de ciclo longo. Nessa pesquisa avaliou-se a dinâmica do P-inorgânico em diferentes solos em região de clima tropical após a adubação fosfatada corretiva com fontes de solubilidade diversa.

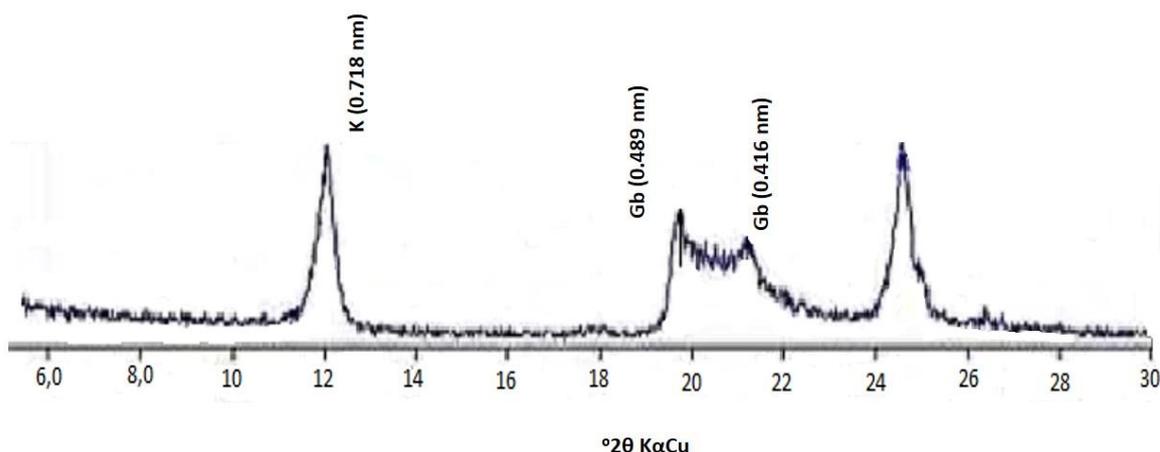
## 3.2 Material e métodos

### 3.2.1 Campos experimentais

A pesquisa foi realizada em condições de campo, durante o período de 2014 a 2017 em três áreas experimentais localizadas nos Estados de Pernambuco e Paraíba, Brasil.

A primeira área experimental localizou-se na área agrícola da Usina Cucaú, situada no município de Ribeirão, na Zona da Mata Sul do Estado de Pernambuco, Brasil (latitude de 08° 30' 11,2'' S e longitude de 35° 17' 32,7'' W). De acordo com o sistema Köppen, o clima dominante na região é o Tropical As', com inverno chuvoso e verão seco com precipitação pluvial média anual de 1.800 mm.

O solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), com textura franco-argilosa (EMBRAPA, 2013) e predominância da caulinita entre os minerais da fração argila (Figura 1).



**Figura 1-** Difratogramas de raios X da fração argila das profundidades 0,0 a 0,30 m em LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd) localizado em Ribeirão-PE. K: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita.

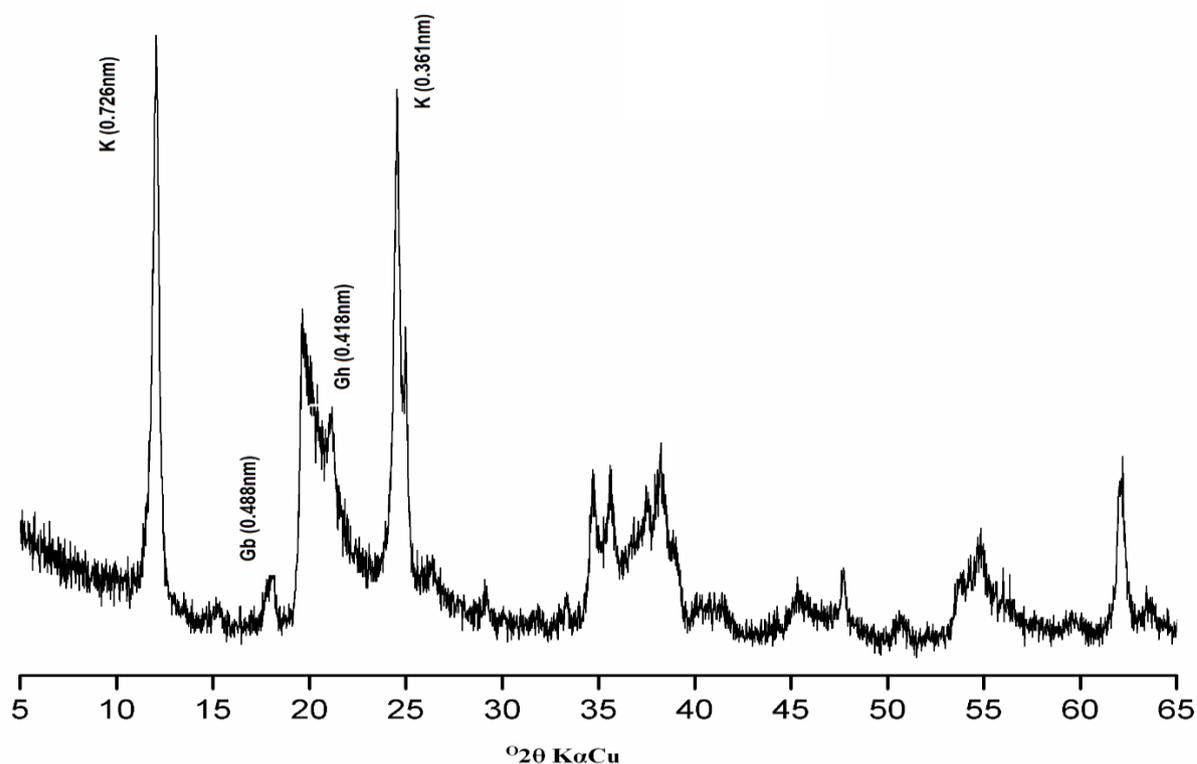
A caracterização química e física do solo foi realizada na camada de 0,0 a 0,3 m de profundidade (Tabela 1).

**Tabela 1.** Caracterização química e física do LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd) na camada de 0,0 a 0,30 m de profundidade.

Atributos	Classes de solo		
	LVAd	CYbe	PAd
	Químico do solo		
pH (H <sub>2</sub> O 1:2,5)	4,7	5,1	4,9
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,9	3,5	2,9
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,20	0,17	0,11
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,14	0,12	0,09
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,3	4,6	1,3
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,3	1,7	0,5
Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,03	0,01	0,04
SB <sup>(1)</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,78	6,42	2,0
M.O <sup>(2)</sup> (%)	3,20	2,81	1,93
CTC <sub>Pot</sub> <sup>(3)</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,68	9,92	4,9
V <sup>(4)</sup> (%)	43,5	64,7	45,5
P-rem (mg)	19,0	16,0	12,0
P (mg dm <sup>-3</sup> )	2,3	5,0	4,0
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	180,5	160,1	180,4
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,15	0,35	0,26
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	2,05	0,65	0,73
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	1,73	1,05	1,58
Ca/Mg	11,0	6,3	2,6
Ca/K	23,8	38,3	14,4
	Física do solo		
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	430,0	560,0	900,0
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	174,0	193,0	36,0
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	396	247	64
Ds <sup>(5)</sup>	1,30	1,46	1,51
Dp <sup>(6)</sup>	2,43	2,48	2,54

<sup>(1)</sup> Soma de base; <sup>(2)</sup> Matéria orgânica; <sup>(3)</sup> Capacidade de troca de cátions potencial; <sup>(4)</sup> Saturação por bases; <sup>(5)</sup> Densidade do solo; <sup>(6)</sup> Densidade das partículas.

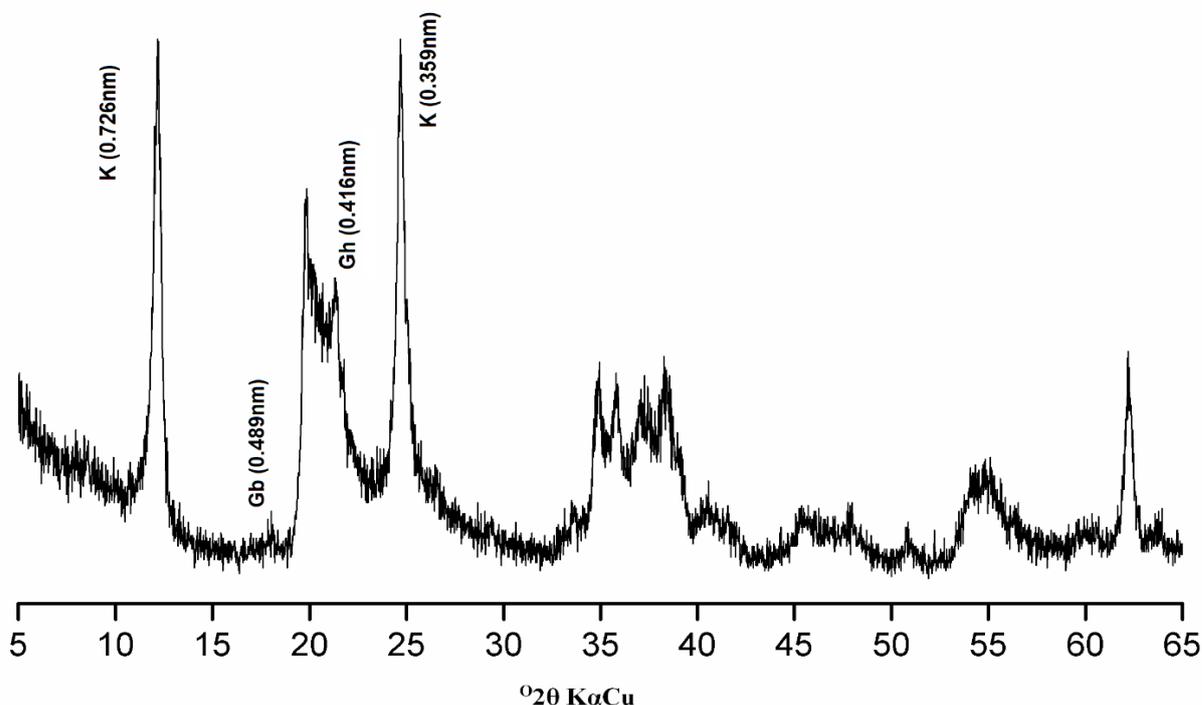
A segunda área experimental foi implantada na área agrícola da Usina Olho D` água, localizada no município de Camutanga, na Zona da Mata Norte do Estado de Pernambuco, Brasil (latitude de 07° 22' 37'' S e longitude de 35° 56' 56'' W). De acordo com o sistema Köppen, o clima dominante na região é o Tropical As', com inverno chuvoso e verão seco precipitação pluvial média anual de 1.100 mm. O solo da área experimental foi classificado como CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe), com textura franco-arenosa (EMBRAPA, 2013) e predominância da caulinita entre os minerais da fração argila (Figura 2). A caracterização química e física encontra-se na Tabela 1.



**Figura 2.** Difratoformas de raios X da fração argila na profundidades 0,0 a 0,30 m de profundidade em um CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) localizado em Camutanga-PE. K: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita.

A terceira área experimental foi implantada na área agrícola da Usina Japungú, situada no município de Santa Rita, na Zona da Mata Norte do Estado da Paraíba, Brasil (latitude de 07° 06' 50'' S e longitude de 34° 58' 41'' W). De acordo com o sistema Köppen, o clima dominante na região é o Tropical As', com inverno chuvoso e verão seco precipitação pluvial média de 1.600 mm ao ano. O solo da área experimental foi classificado como ARGISSOLO

AMARELO distrófico (PAd) com textura areia franca (EMBRAPA, 2013) e predominância da caulinita entre os minerais de argila (Figura 3).



**Figura 3.** Difratomogramas de raios X da fração argila das profundidades 0,0 a 0,30 m de profundidade em um ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd) localizado em Santa Rita-PB. K: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita.

Os solos foram caracterizados, fisicamente, pela sua granulometria, densidade do solo e densidade das partículas segundo a metodologia da EMBRAPA (1997); quimicamente, foram caracterizados pelo pH (H<sub>2</sub>O 1:2,5); Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup>; Na<sup>+</sup>; K<sup>+</sup>; Al<sup>3+</sup>; (H+Al); P; C.; P-rem; Cu, Fe, Zn e Mn. O Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> foram extraídos por KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>; o P e o K por Mehlich-1 e o (H+Al) por acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup>, conforme EMBRAPA (2009). O Ca<sup>2+</sup> e o Mg<sup>2+</sup> foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, o K<sup>+</sup> por fotometria de chama e o P por colorimetria, conforme Braga e Defelipo (1974); o Al<sup>3+</sup> e o (H+Al) por titulometria e o C por combustão úmida com dicromato de potássio.

O P-rem, que é a concentração de P da solução de equilíbrio após agitação durante 1 h da TFSA (terra fina secada ao ar) com solução de CaCl<sub>2</sub> 10 mmol L<sup>-1</sup>, contendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P, na relação de 1:10, foi determinado de acordo com Alvarez et al. (2000).

Antes de realizar adubação corretiva, o solo da primeira área (LVAd) teve acidez do solo corrigida com 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário (CaO: 40 %, MgO: 9.96 % e PRNT: 66,6 %) tomando como base elevar a saturação de bases para 60 % da camada superficial do solo. Em

adição foi aplicado  $1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de gesso mineral (CaO: 45 %), calculado para elevar a saturação de cálcio no solo para 50 % na camada subsuperficial do solo. No solo da segunda área (CYbe) foram aplicados  $0,8 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário (CaO: 40 %, MgO: 9.96 % e PRNT: 66,6 %) para neutralizar o alumínio trocável. Para a terceira área (PAd) foram aplicados  $1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário (CaO: 40 %, MgO: 9.96 % e PRNT: 66,6 %) para elevar a saturação de base a 60 %.

### 3.2.2 Os tratamentos

Os tratamentos foram constituídos do controle sem utilização da adubação fosfatada corretiva e da aplicação de  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  utilizando três fontes com diferentes solubilidades em água; o Superfosfato Triplo (ST - 44 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total e 40 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  solúvel em água); Fosfato Natural Reativo de Gafsa (FNR - 29 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total e 8.7 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  solúvel em ácido cítrico) e a Torta de Filtro (TF: 2.90 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total e 60 % de umidade).

A torta de filtro foi caracterizada, sendo determinados os valores de 12.5; 2.40; 186.0  $\text{g kg}^{-1}$  de N,  $\text{K}_2\text{O}$  e Matéria Orgânica, respectivamente. A quantidade adicional do N e do  $\text{K}_2\text{O}$  aplicadas com a TF foram niveladas para os demais tratamentos utilizando nitrato de amônio e cloreto de potássio.

A dose de P utilizada foi baseada nos resultados encontrados por Silva (2015) que avaliando adubação fosfatada corretiva nas doses de 0, 50, 100, 200 e  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  verificou que o comportamento das frações de fósforo foi semelhante para as doses, o que mudou foi o teor de P. A escolha da maior desse foi porque esta disponibilizou maiores teores de P disponível no solo.

Após a incorporação dos corretivos com uma gradagem (0,30 m), as fontes de P foram aplicadas em área total, de modo que cobrisse toda superfície do solo. Em seguida foi realizada a incorporação com grade niveladora a 0,15 m para aumentar contato das fontes de P com o solo.

O experimento foi conduzido em áreas cultivadas com cana-de-açúcar e após aplicação dos tratamentos, foram abertos os sulcos de plantio e realizada a adubação com adição de  $25 \text{ kg ha}^{-1}$  de N e  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de fosfato monoamônio. Aos 90 dias após o plantio (DAP) realizou-se a adubação de cobertura, no qual foram aplicados  $35 \text{ kg ha}^{-1}$  de N e  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ , com uso das fontes sulfato de amônio e cloreto de potássio, respectivamente. A adubação mineral de plantio e cobertura foi realizada para todos os tratamentos.

Os tratamentos foram distribuídos em blocos casualizado, com quatro repetições. As parcelas experimentais da primeira área experimental (LVAd) foram constituídas de 6 m de largura por 20 m de comprimento ( $120 \text{ m}^2$ ). Para área útil das parcelas descartou-se 1 m em

cada bordadura, considerou-se 4 m centrais e os 18 de comprimento (72 m<sup>2</sup>). As outras duas áreas experimentais foram constituídas de 6 m de largura por 10 m de comprimento (60 m<sup>2</sup>). Para área útil das parcelas descartou-se 1 m em cada bordadura, considerou-se 4 m centrais e os 8 de comprimento (32 m<sup>2</sup>).

### **3.2.3 Avaliação das frações de P**

As amostras de solo foram coletadas aos 3, 12, 24 e 36 meses após aplicação dos tratamentos. Na área útil de cada parcela foram coletadas 5 amostras simples na entre linhas de plantio da cana-de-açúcar, de modo a não haver misturas de camadas de solo que não receberam os tratamentos ou influência da adubação fosfatada de plantio. As amostras foram coletadas nas camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e misturadas e tomado uma amostra composta por camada. Para o preparo das amostras de solo adotou-se a metodologia proposta pela Embrapa (2009).

O fracionamento do fósforo inorgânico (Pi) foi determinado conforme a metodologia proposta por Chang e Jackson (1957).

#### **Extração do Pi facilmente solúvel (P-H<sub>2</sub>O)**

Pesou-se 1,0 g de solo (TFSA) e colocou-se em erlenmeyer de 125 mL e adicionou-se 50 mL de NH<sub>4</sub>Cl 1 mol L<sup>-1</sup>, seguido de agitação durante 30 minutos em mesa agitadora horizontal. Após esse período, a suspensão foi centrifugada durante 5 min a 5.000 rpm, e o sobrenadante filtrado em papel de filtro e transferido para balão volumétrico de 50 mL, do qual determinou-se o teor P e calculou a concentração P-H<sub>2</sub>O.

#### **Extração do Pi ligado ao alumínio (P-Al)**

O resíduo de solo do processo anterior que ficou no tubo de centrífuga na extração foi transferido para erlenmeyer de 125 mL, no qual foi adicionado 50 mL de NH<sub>4</sub>F 0,5 mol L<sup>-1</sup> (pH 8,2), seguido de agitação em agitador horizontal por 60 minutos. Passado esse período, a suspensão foi centrifugada durante 5 min a 5.000 rpm, sendo o sobrenadante, filtrado em papel-filtro e transferido para balão volumétrico de 50 mL e o volume, ajustado para 50 mL com água deionizada, no qual foi determinada a concentração de P e calculado o teor de P-Al no solo.

#### **Extração do Pi ligado a ferro (P-Fe)**

O resíduo de solo do tubo de centrífuga do processo anterior foi transferido para erlenmeyer de 125 mL, em seguida adicionou-se 50 mL de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e agitou-se por

17 h. Posteriormente, a suspensão foi centrifugada durante 5 min a 5.000 rpm, e o sobrenadante, filtrado em papel de filtro e transferido para balão volumétrico de 50 mL e volume foi ajustado para 50 mL com água deionizada. Para eliminar a turbidez do extrato, adicionou-se 4 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1 mol  $\text{L}^{-1}$ , seguido de agitação com bastão de vidro. Quando necessário, adicionaram-se gotas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado até a floculação completa dos coloides. Na sequência após decantação das partículas o extrato foi centrifugado novamente durante 5 min a 5000 rpm e filtrado em papel de filtro para obtenção de um extrato límpido, a ser transferido para balão volumétrico de 50 mL. Sendo em seguida, determinada a concentração de P no extrato C e calculado o teor de P-Fe no solo.

### **Extração do Pi ligado a cálcio (P-Ca)**

O resíduo do solo da etapa anterior foi transferido para erlenmeyer de 125 mL, no qual se adicionou 50 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,25 mol  $\text{L}^{-1}$ ; em seguida a suspensão foi agitada durante 60 minutos. Após esse período, a suspensão foi centrifugada durante 5 min a 5.000 rpm e filtrada em papel de filtro, e o sobrenadante, transferido para balão volumétrico de 50 mL. Na sequência, foi determinada a concentração de P e calculado o teor de P-Ca no solo. A determinação de P nos extratos foi feita por colorimetria, conforme Braga e Defelipo (1974).

### **3.2.4 Análise Estatística**

Os dados para análise estatística foram separados por área experimental, por camadas de solo (0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m) e por fração (P- $\text{H}_2\text{O}$ , P-Al, P-Fe e P-Ca), analisadas separadamente aos 3, 12, 24 e 36 meses após aplicação da adubação corretiva.

Os dados foram submetidos análise de variância (ANAVA), ao nível de 5 % de significância pelo teste F. Quando significativo pela ANAVA, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

O controle, tratamento que não recebeu adubação fosfatada corretiva, foi submetido ao teste de contraste ortogonal, comparando o tratamento controle e os tratamentos com que receberam adubação.

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com arranjo fatorial (4 x 3) + 1, quatro épocas de avaliações e três fontes de P.

Para as análises estatísticas utilizou-se o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

### 3.3 Resultados e Discussão

#### 3.3.1 Resultados

Adubação fosfatada corretiva promoveu aumento nas frações inorgânicas de P nos três solos estudados até acamada de 0,30 m de profundidade aos três meses após a adubação. O incremento média no teor das frações de P foi de 25 mg dm<sup>-3</sup> no PAd, 27 mg dm<sup>-3</sup> no CYbe e 46 mg dm<sup>-3</sup> no LVAd, avaliação aos três meses. Desse incremento a fração P-H<sub>2</sub>O contribuiu com 28%, 23% e 13 %, a fração P-Al com 19%, 14% e 32%, o P-Fe com 18%, 21% e 33% e a fração P-Ca 34%, 37% e 33 % respectivamente nos solos PAd, CYbe e LVAd.

A fração de fósforo disponível em água (P-H<sub>2</sub>O) foi maior nos três Solos com adubação corretiva até a profundidade de 0,20 m, sendo observado incremento para essa fração de 34%, 37%, e 21% nos solos PAd, CYbe e LVAd, conforme dados presentes na Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4. Na camada de 0,20 a 0,30 m o incremento no teor de P nesta fração (P-H<sub>2</sub>O) só ocorreu no solos PAd (Tabela 2) e CYbe (Tabela 3) com aumento de 27% e 21% respectivamente.

**Tabela 2.** Frações inorgânica de fósforo em um ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd) aos 3, 12, 24 e 36 meses após a adubação fosfatada corretiva com 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de Superfosfato triplo (ST), Fosfato natural reativo (FRN) e Torta de filtro (TF).

Fonte	P-H <sub>2</sub> O				P-Al				P-Fe			P-Ca				
	3 mes	12 mes	24 mes	36 mes	3 mes	12 mes	24 mes	36 mes	3 mes	12 mes	24 mes	36 mes	3 mes	12 mes	24 mes	36 mes
	<b>0,0 – 0,10 m</b>															
	P mg dm <sup>-3</sup>															
ST	10,1aA	9,2aA	5,7aB	4,3aB	4,2	4,4	5,4	3,8	3,5	3,9	3,6	3,8	8,5bA	9,3bA	8,5bA	7,7bA
FRN	5,0bA	6,0bA	6,4aA	4,8aA	4,5	4,2	3,6	3,5	3,3	4,0	4,3	3,9	12,3aB	16,7aA	13,1aB	10,5aB
TF	5,5bA	6,5bA	6,1aA	5,5aA	3,9	4,7	4,1	3,9	3,6	3,4	3,9	3,7	5,5cA	5,9cA	5,3bA	5,7bA
Med.	6,8	7,2	6,0	5,2	4,2	4,4	4,3	3,7	3,4	3,7	3,9	3,8	8,7	10,5	8,9	8,3
Controle	4,1	4,1	4,4	3,2	3,5	3,5	4,1	2,3	3,2	3,4	3,2	3,1	4,7	5,1	4,6	4,2
Test T	2,13**	3,13**	0,23**	-1,03*	1,44 <sup>NS</sup>	1,22 <sup>NS</sup>	2,11 <sup>NS</sup>	3,35 <sup>NS</sup>	1,65 <sup>NS</sup>	2,23 <sup>NS</sup>	1,31 <sup>NS</sup>	1,14 <sup>NS</sup>	3,01*	3,02*	2,04*	2,91**
	<b>0,10 – 0,20 m</b>															
ST	13,6aA	8,4aB	5,2aC	4,8aC	5,0	4,1	3,8	4,8	6,5	5,8	5,2	5,9	10,5aA	11,4bA	10,6bA	9,9aA
FRN	5,3bA	6,0bA	5,3aA	4,9aA	4,8	3,9	4,6	5,5	5,1	5,2	6,9	6,7	13,2aB	16,5aA	15,2aA	10,3aB
TF	5,2bA	5,8bA	5,6aA	5,8aA	5,1	3,6	4,5	4,5	4,2	4,6	5,5	5,8	5,9bA	5,9cA	5,2cA	5,6bA
Med.	8,0	6,7	5,3	5,1	4,9	3,8	4,3	4,9	5,2	5,2	5,5	6,1	10,6	11,2	10,3	8,2
Controle	4,2	4,5	3,9	3,0	4,1	3,4	3,8	2,7	3,0	3,0	3,2	3,8	5,0	4,7	4,2	3,9
Test T	4,30**	5,13**	2,03*	4,14*	4,11 <sup>NS</sup>	2,21 <sup>NS</sup>	6,32 <sup>NS</sup>	1,41 <sup>NS</sup>	2,05*	0,09*	1,05*	2,03*	0,67**	3,12**	4,05*	2,04*
	<b>0,20 – 0,30 m</b>															
ST	11,3aA	7,4aB	5,6aB	3,5aC	7,2aA	6,0aA	5,4aA	4,2aB	6,4	6,8	5,5	5,2	10,7aA	5,1aB	5,2aB	5,0aB
FRN	4,2bA	5,9bA	4,6aA	3,8aA	4,0bA	4,4bA	5,0aA	4,6aA	4,7	4,9	6,0	5,8	4,5bB	5,4aB	5,6aB	5,2aB
TF	5,1bA	5,6bA	4,5aA	4,3aA	5,0bA	4,3bA	4,0aA	3,6aA	4,0	4,5	5,0	5,3	5,0bB	4,6aB	5,1aB	4,6aB
Med.	6,8	6,3	4,9	3,8	5,4	4,9	4,8	3,8	4,9	5,4	5,5	5,7	6,7	5,0	5,3	4,9
Controle	3,8	3,2	4,2	3,1	4,0	3,5	3,5	3,0	3,2	4,3	3,2	3,3	5,2	4,8	4,1	4,6
Test T	3,30**	6,02*	3,43 <sup>NS</sup>	7,05 <sup>NS</sup>	2,04 <sup>NS</sup>	0,35*	-2,03*	0,32 <sup>NS</sup>	0,02 <sup>NS</sup>	0,38 <sup>NS</sup>	0,05*	0,04*	2,03 <sup>NS</sup>	1,32 <sup>NS</sup>	2,23 <sup>NS</sup>	-1,41 <sup>NS</sup>
	<b>Anava</b>															
Prof. (m)	0,0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30		0,0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30		0,0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30		0,0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	
F fonte	4,630**	5,431*	6,314*		12,435 <sup>NS</sup>	8,674 <sup>NS</sup>	23,012**		12,45 <sup>NS</sup>	17,457 <sup>NS</sup>	9,123 <sup>NS</sup>		9,567**	8,987**	1,234*	
F tempo	3,610**	4,210**	3,511*		7,541 <sup>NS</sup>	5,613 <sup>NS</sup>	5,514 <sup>NS</sup>		6,265 <sup>NS</sup>	14,654 <sup>NS</sup>	12,245 <sup>NS</sup>		12,000*	5,034*	3,372*	
F fon x tem	2,124*	7,234**	4,234 <sup>NS</sup>		8,987 <sup>NS</sup>	9,657 <sup>NS</sup>	6,63 <sup>NS</sup>		7,617 <sup>NS</sup>	8,765 <sup>NS</sup>	13,456 <sup>NS</sup>		9,123*	12,341*	2,345*	
CV (%)	10,5	18,05	15,7		12,3	10,3	15,91		17,4	12,77	15,37		12,7	11,8	12,9	

\* significativos ao nível de 5% de probabilidade; \*\* significativos ao nível de 1% de probabilidade; <sup>NS</sup> não significativo; letras minúscula na coluna comparam fontes e maiúsculas na linha comparam tempo. Test T compara o controle (sem adubação corretiva) com a adubação corretiva pelo contraste ortogonal.

**Tabela 3.** Frações inorgânica de fósforo em um CAMBISOLO FLÚVICO tb eutrófico (CYbe) aos 3, 12, 24 e 36 meses após a adubação fosfatada corretiva com 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de Superfosfato triplo (ST), Fosfato natural reativo (FRN) e Torta de filtro (TF).

Fonte	P-H <sub>2</sub> O				P-AI				P-Fe				P-Ca			
	3 mes	12 mes	24 mes	36 mes	3 mes	12 mes	24 mes	36 mes	3 mes	12 mes	24 mes	36 mes	3 mes	12 mes	24 mes	36 mes
<b>0,0 – 0,10 m</b>																
P mg dm <sup>-3</sup>																
ST	12,1aA	8,9aA	6,9aB	6,2aB	5,0	4,8	4,8	4,5	6,5	6,8	6,9	5,3	13,5baA	10,5bB	7,1bC	7,8bC
FRN	5,5bA	6,9bA	6,4aA	7,1aA	4,1	4,6	5,2	5,0	6,0	5,5	5,8	6,7	18,4aA	13,6aB	14,1aB	12,9aB
TF	6,0bA	6,5bA	6,2aA	5,8bA	4,4	3,6	4,5	4,3	5,2	5,7	5,6	5,3	9,8cA	6,1cB	7,9bB	5,9bB
Méd.	7,8	7,4	6,5	6,3	4,5	4,3	4,6	4,	5,9	6,0	6,1	5,7	13,7	10,0	9,7	8,6
Controle	4,5	5,0	4,3	4,2	4,0	4,2	4,4	4,7	3,8	4,0	4,3	3,5	6,7	6,2	5,3	5,4
Test T	3,10**	4,21**	1,34*	3,09*	2,10 <sup>NS</sup>	3,56 <sup>NS</sup>	2,045 <sup>NS</sup>	1,38 <sup>NS</sup>	0,63 <sup>NS</sup>	0,02*	3,42*	4,03*	1,41**	3,20**	4,10**	-2,01**
<b>0,10 – 0,20 m</b>																
ST	8,3aA	9,2aA	5,8aB	5,6bB	5,6	4,5	5,5	4,0	6,0aA	5,7aA	5,5abA	5,5bA	12,4bA	9,0bB	7,8bC	7,0bC
FRN	5,8bA	5,9bA	5,3aA	6,7aA	5,5	4,4	5,0	4,2	5,6aB	5,5aB	6,5aAB	7,2aA	14,9aA	13,1aA	10,5aB	9,9aB
TF	5,5bA	5,8bA	6,4aA	5,5bA	4,7	4,8	4,1	4,1	5,5aA	4,6aA	4,8bA	5,3bA	6,6cA	6,9bA	7,1cA	6,0bA
Méd.	6,5	6,9	5,8	5,9	5,2	4,5	4,8	4,1	5,7	5,2	5,6	6,0	11,3	9,6	8,4	7,6
Controle	4,8	4,3	3,9	4,2	4,5	4,4	4,5	3,8	4,1	3,3	3,9	3,8	6,8	6,5	5,3	4,3
Test T	0,04*	0,03*	0,05*	0,03*	0,09*	0,33 <sup>NS</sup>	0,21 <sup>NS</sup>	0,45 <sup>NS</sup>	0,03*	0,05*	0,03*	0,01**	0,00	0,00**	0,03*	0,05*
<b>0,20 – 0,30 m</b>																
ST	6,9aA	6,1aA	5,2aA	4,8aB	4,8	4,9	4,1	4,5	6,0	5,9	5,5	5,2	8,9aA	6,6bB	5,9bB	5,8aB
FRN	4,6bA	5,7aA	5,9aA	4,6aA	5,5	4,4	5,1	4,4	6,5	5,1	5,3	4,8	5,6bB	8,4aA	7,1aA	5,5aB
TF	5,1bA	5,8aA	4,1aA	5,0aA	5,0	4,3	4,4	4,5	5,1	4,5	4,6	4,3	4,6bA	5,3bA	5,8bA	5,5aA
Méd.	5,4	5,8	5,0	4,8a	5,1	4,5	4,8	4,4	5,8	5,1	5,1	4,7	6,3	6,7A	6,2A	5,6B
Controle	4,0	5,0	4,1	4,0	4,5	4,0	4,5	3,5	4,1	4,3	3,5	3,6	4,6	4,5	4,9	4,2
Test T	0,03 <sup>NS</sup>	1,67 <sup>NS</sup>	-4,35 <sup>NS</sup>	3,61 <sup>NS</sup>	0,56 <sup>NS</sup>	0,12 <sup>NS</sup>	3,34 <sup>NS</sup>	0,61 <sup>NS</sup>	0,03 <sup>NS</sup>	0,33 <sup>NS</sup>	3,04*	0,52 <sup>NS</sup>	0,03*	0,05*	0,56 <sup>NS</sup>	0,38 <sup>NS</sup>
<b>Anava</b>																
Prof.(m)		0,0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30		0,0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30		0,0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30		0,0-0,10	0,10-0,2	0,20-0,30
F fonte		6,458*	9,343*	4,234*		6,314 <sup>NS</sup>	15,234 <sup>NS</sup>	4,329 <sup>NS</sup>		7,842 <sup>NS</sup>	4,565*	6,413 <sup>NS</sup>		7,321*	9,451*	3,455*
F tempo		7,623**	6,450**	5,459*		10,53 <sup>NS</sup>	11,061 <sup>NS</sup>	1,383 <sup>NS</sup>		8,644 <sup>NS</sup>	9,00**	12,51 <sup>NS</sup>		3,344*	7,345*	6,213*
F fon x tem		4,253*	5,235*	2,345 <sup>NS</sup>		8,980 <sup>NS</sup>	3,456 <sup>NS</sup>	5,002 <sup>NS</sup>		7,593 <sup>NS</sup>	7,021*	7,890 <sup>NS</sup>		5,103*	6,554 <sup>NS</sup>	8,456*
CV (%)		9,39	7,8	12,3		16,5	11,2	15,1		9,84	10,12	12,10		12,71	10,80	18,52

\* Significativos ao nível de 5% de probabilidade; \*\* significativos ao nível de 1% de probabilidade; <sup>NS</sup> não significativo; letras minúscula na coluna comparam fontes e maiúsculas na linha comparam tempo. Test T compara o controle (sem fosfatagem) com a fosfatagem pelo contraste ortogonal.

**Tabela 4.** Frações inorgânica de fósforo em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO distrófico (LVAd) aos 3, 12, 24 e 36 meses após a adubação fosfatada corretiva com 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de Superfosfato triplo (ST), Fosfato natural reativo (FRN) e Torta de filtro (TF).

Fonte	P-H <sub>2</sub> O				P-Al				P-Fe				P-Ca					
	3 mes	12 mes	24 mes	36 mes	3 mes	12 mes	24 mes	36 mes	3 mes	12 mes	24 mes	36 mes	3 mes	12 mes	24 mes	36 mes		
	<b>0,0 – 0,10 m</b>																	
	P mg dm <sup>-3</sup>																	
ST	7,8aA	7,9aA	5,6bB	4,2bC	16,7aA	17,4aA	15,3bA	16,2aA	20,9aA	19,1aA	17,5aB	15,9aB	9,3bA	8,8bA	6,4bB	6,9bB		
FRN	7,0aA	6,2bA	7,4aA	7,5aA	17,1aA	18,7aB	21,5aA	17,8aB	16,6bA	16,0bA	15,9bAB	14,8aB	20,4aA	23,2aA	16,1aB	13,3aB		
TF	4,5bB	6,7bA	6,4bA	5,9bA	11,9aB	16,8aA	14,7bB	13,6bB	15,9bA	14,3cA	15,7bA	12,3bB	6,9bA	7,6bA	6,8bAB	5,9bB		
Med.	6,4	6,9	6,4	5,8	14,9	19,3	17,1	15,8	17,8	17,8	16,3	14,5	10,5	13,2	9,7	8,7		
Controle	4,4	5,7	4,6	4,0	7,8	12,2	9,0	10,6	14,1	13,2	10,4	9,5	6,0	6,1	5,9	4,8		
Test T	2,00**	3,10**	1,04*	0,14*	2,02**	0,52**	0,01**	0,03*	3,10*	3,02**	3,04*	0,15*	0,40*	1,24**	3,02*	0,06*		
	<b>0,10 – 0,20 m</b>																	
ST	6,7aA	7,5aA	5,8aB	4,4bB	18,0aA	18,9aA	13,5bB	10,9bC	20,0aA	22,7aA	19,6aA	16,0aB	9,7bA	7,1bA	6,8bB	7,2bB		
FRN	6,5aA	6,0bA	6,5bA	6,8aA	16,7aA	15,2bB	16,7aA	18,2aA	15,0bA	17,8bA	16,9bA	15,2aA	12,0aB	19,1aA	18,5aA	15,4aB		
TF	5,8aA	6,6abA	5,5abA	5,8aA	12,8aA	12,4bA	13,0bA	14,0bA	12,0bB	15,4cA	10,1cB	10,7bB	7,5bB	9,0bA	7,1bB	5,9cC		
Med.	6,3	6,7	5,9	5,6	15,8	15,5	15,0	14,0	15,6	18,6	15,5	13,9	9,7	11,7	10,8	9,5		
Controle	5,0	5,1	3,9	4,3	9,2	9,0	8,7	7,3	11,4	13,0	9,8	9,5	6,0	5,6	5,3	4,3		
Test T	0,25 <sup>NS</sup>	0,34*	2,05*	4,03*	0,50*	0,03*	0,00**	3,00**	-1,01*	3,00**	0,24*	0,73*	2,11*	2,00**	0,09*	1,02*		
	<b>0,20 – 0,30 m</b>																	
ST	5,8	5,6	4,2	5,1	15,4aA	9,2aB	7,7aB	7,6aB	15,5	12,7bA	11,4aB	13,1aA	6,3aA	6,8bA	6,2aA	5,9aB		
FRN	6,2	5,0	4,9	4,8	8,4bA	7,8aA	8,1aA	6,7aA	10,8	15,4aA	12,0aB	13,9aB	8,5aA	8,3aA	5,6aB	5,5aB		
TF	5,3	5,4	4,1	5,0	9,1bA	8,4aA	7,8aA	6,9aA	12,3	12,6bA	10,0aA	11,8bA	7,7aA	5,9bA	5,8aA	5,6aA		
Med.	5,7	5,3	4,4	4,9	14,7	8,4	7,8	7,1	12,8	13,5	10,6	12,9	8,8	7,0	5,7	5,6		
Controle	4,5	5,1	4,2	4,7	9,5	7,9	7,4	6,6	9,3	11,1	8,5	9,4	5,0	5,5	4,7	5,0		
Test T	0,13 <sup>NS</sup>	0,12 <sup>NS</sup>	0,45 <sup>NS</sup>	2,28 <sup>NS</sup>	0,03 <sup>NS</sup>	0,59 <sup>NS</sup>	0,69 <sup>NS</sup>	-1,52 <sup>NS</sup>	0,63 <sup>NS</sup>	0,35*	0,24*	0,64*	1,04*	2,04*	0,58 <sup>NS</sup>	0,34 <sup>NS</sup>		
Prof. (m)		0,0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,10		0,0-0,10	0,10-0,20		0,20-0,30		0,0-0,10	0,10-0,20		0,20-0,30		0,0-0,10	10-0,2	0,20-0,30
F fonte		8,234**	9,324*	7,345 <sup>NS</sup>		10,901**	3,416*		4,456 <sup>NS</sup>		8,342**	1,234*		3,450*		4,234**	5,345*	3,098*
F tempo		12,342*	10,125*	9,622 <sup>NS</sup>		8,233*	6,121*		1,125 <sup>NS</sup>		6,234*	4,230*		5,502*		3,201*	3,024*	6,203*
F fon X dos		9,253*	6,123*	5,678 <sup>NS</sup>		6,123*	5,049*		3,123 <sup>NS</sup>		8,234*	0,04*		7,124*		1,063*	5,053*	3,987*
CV (%)		10,1	13,5	15,6		4,412	12,0		15,6		12,8	10,7		15,40		12,9	15,8	10,57

\* Significativos ao nível de 5% de probabilidade; \*\* significativos ao nível de 1% de probabilidade; <sup>NS</sup> não significativo; letras minúscula na coluna comparam fontes e maiúsculas na linha comparam tempo. Test T compara o controle (sem fosfatagem) com a fosfatagem pelo contraste ortogonal.

Foi verificado para a fração de P-H<sub>2</sub>O aos três meses após adubação diferenças entre as fontes de P até a camada de 0,20 m de profundidade nos solos PAd e CYbe, no solo com maior teor de argila (LVAd) o efeito das fontes para essa fração ocorreu até a profundidade de 0,10 m (Tabela 4). Em todos os solos a fonte Superfosfato triplo (ST) foi a que apresentou os maiores valores de P-H<sub>2</sub>O e não ocorreu distinção entre o ST e FRN (Fosfato natural reativo) no solo LVAd (Tabela 4). Na camada mais profunda 0,20 a 0,30 m o efeito da adubação corretiva só foi verificado para o solo PAd, solo arenoso, com uso da fonte ST. Nos solos PAd e CYbe não houve diferença entre a fonte torta de filtro (TF) e FRN.

Na primeira avaliação aos três meses após a adubação corretiva verificou-se também aumento nas formas de P precipitado com Al (P-Al). No entanto ocorreu apenas no solo CYbe com incremento de 13,4% na camada 0,10 a 0,20 m e no LVAd com incremento de 47,6% na camada 0,0 a 0,10 m e de 41% até a camada de 0, 20 m. No PAd com alto teor de areia não formou precipitado do P com Al. Não houve efeito das fontes de P em nenhum dos três solos estudados.

A fração P-Fe aumentou com adubação corretiva, nessa fração foi verificado incrementos nos três solos estudados. Mas o LVAd foi o único que apresentou incremento na cama 0 a 0,20 m com incremento médio de 23%, enquanto o solo PAd apresentou incremento de 28% na camada de 0,10 a 0,20 m e nessa mesma camada no solo CYbe foi verificado incremento de 38% no P-Fe. Para essa fração houve efeito das fontes de fosfato no solo LVAd e o ST foi superior as demais fontes.

A fração P-Ca aumentou nos três solos estudados até a camada de 0,20 m de profundidade. Com incremento na camada de 0 a 0,10 m de profundidade de 38%, 51% e 45% respectivamente nos solos LVAd, CYbe e PAd. Na camada de 0,10 a 0,20 m os incrementos foram de 38%, 39% e 52% respectivamente no LVAd, CYbe e PAd. O incremento no teor de P desta fração foi maior nos solos com menor teor de argila (PAd e CYbe). A fonte FRN foi superior as demais em todas as três áreas experimentais até a cama de 0,20 m de profundidade.

Nas avaliações ao longo do tempo após adubação corretiva, 12, 24 e 36 meses após adubação verificou-se incremento nas frações de P (P-H<sub>2</sub>O, P-Fe, P-Al e P-Ca) até os 36 meses após adubação corretiva em todos os três solos. Sendo verificado para a fonte de maior solubilidade em água (ST) as maiores contribuições dessa fonte no aumento das frações até os 12 meses, no entanto até os 36 meses foram verificados efeitos da adubação corretiva do solo sobre a formação de precipitados, principalmente nos solos com maior teor de argila. Enquanto que para os demais ocorreu menor variação na formação de precipitados no solo.

Analisado o comportamento de cada fração é possível perceber que a fração P-H<sub>2</sub>O aumentou com adubação corretiva até a camada 0,20 m em todos os solos até os 36 meses após a aplicação das fontes de fosfato (Tabelas 2, 3 e 4). E na camada de 0,20 a 0,30 m o incremento do P para essa fração foi observado apenas no solo mais arenoso (PAd) até os 12 meses (Tabela 2).

E a fonte ST foi a que promoveu os maiores teores de P-H<sub>2</sub>O em todas as camadas no solo PAd até os 12 meses e nos solos CYbe e LVAd na camada 0 a 0,20 m (Tabelas 2, 3 e 4). Aos 24 meses as fontes ST, FNR e TF não apresentaram diferença no teor de P-H<sub>2</sub>O nos solos menos argilosos (PAd e CYbe). A utilização da fonte FNR aumentou o P disponível em água na camada 0 a 0,10 m dos 24 até os 36 meses no solo LVAd. Nesse solo verificou-se que não ocorreu diferença entre as fontes FRN e TF na camada de 0,10 a 0,20 m no mesmo período (12 a 36 meses).

Para adubação com a fonte ST a partir dos 12 meses foi verificada redução na formação de P-H<sub>2</sub>O com redução de 38%, 22% e 29 % aos 24 meses e de 53%, 29% e 47% aos 36 meses nos solos PAd, CYbe e LAVd respectivamente entre os 12 e 36 meses (Tabela 2, 3 e 4). Para adubação com as fontes FNR e TF, a fração P-H<sub>2</sub>O não apresentou diferença no período dos 12 a 36 meses na camada superficial de 0,0 a 0,10 m de profundidade. Para a camada de 0,10 a 0,20 m, o P-H<sub>2</sub>O reduziu aos 36 meses com uso do FNR apenas no solo PAd e a partir dos 24 meses com uso da TF no solo LVAd.

Já a fração P-Al aumentou com a adubação corretiva no solo LVAd na camada de 0 a 0,20 m até os 36 meses (Tabela 4), enquanto que no solo PAd só ocorreu na camada de 0,20 a 0,30 m até os 24 meses após adubação (Tabela 2). Para o solo CYbe adubação corretiva não promoveu efeito nessa fração (Tabela 3). No solo LVAd aos 12 meses não houve efeito entre as fontes até 0,10 m, na camada abaixo (0,10 a 0,20) a fonte ST apresentou os maiores teores de P-Al (Tabela 3). Nas avaliações dos demais períodos (24 e 36 meses) o FNR foi superior às demais fontes para essa fração. No solo PAd a adubação com o ST apresentou o maior teor de P-Al aos 12 meses, enquanto que na avaliação aos 24 meses não teve efeito para as fontes. Enquanto que na fração P-Fe houve aumento em todos os solos, no LVAd ocorreu na camada de 0 a 0,30 m durante todo período experimental. Enquanto que no CYbe ocorreu até a camada de 0,20 m até a última avaliação (36 meses) e nas avaliações aos 24 meses foi verificado efeito da adubação corretiva na camada de 0,30 m. No solo mais arenoso (PAd) o efeito da adubação fosfatada para essa fração ocorreu nas camadas mais profundas (0,10 a 0,30 m). No LVAd o maior teor para essa fração foi verificado para a fonte ST na camada de até 0,20 m de profundidade nas duas primeiras avaliações (12 e 24 meses) e na última avaliação não houve efeito.

para as fontes ST e FRN na camada 0 a 0,30 m e essas foram superior a TF. No PAd não teve efeito para fonte e no CYbe ocorreu apenas na camada 0,10 a 0,20 para o FRN aos 24 e 36 meses (Tabela 3).

Adubação fosfatada aumentou a fração do P-Ca em todos os solos e em todos os tempos avaliados na profundidade até 0,20 m e nos LVAd e CYbe também ocorreu efeito na camada 0,20 a 0,30 m aos 12 meses (Tabelas 3 e 4). Em todos os solos na camada superficial (0 a 0,20 m) o FRN apresentou os maiores teores de P-Ca, enquanto que na camada 0,20 a 0,30 no LVA o FRN foi superior as demais fontes e no CYbe FRN e ST foram iguais.

### 3.3.2 Discussão

A adubação fosfatada corretiva aplicada no preparo do solo no plantio proporcionou aumento na fração P-H<sub>2</sub>O na camada 0 a 0,20 m nos solos durante os três anos de avaliações, esse resultado pode ser atribuído a baixa capacidade de adsorção de P nesses solos. Pois o solo que apresenta o maior teor de argila, o LVAd com 396 g kg<sup>-1</sup> de solo comparado aos demais (CYbe e PAd com 247 e 64 g kg<sup>-1</sup> de solo) apresenta baixa capacidade de adsorção de P, uma vez que o P-rem mostrou o baixo teor de P adsorvido nesse solo. O predomínio de caulinita nos minerais da fração argila contribuem para a baixa capacidade de adsorção de P nesses solos. Cessa et al. (2009) avaliando a área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de P em dois Latosolos observaram que a caulinita, embora tem sido o filossilicato de maior representatividade na fração argila, apresenta baixa influência sobre adsorção de P. De acordo com Celi, Luca e Barberis (2003) a baixa adsorção de P em solos ricos em caulinita ocorre devido ao menor número de sítios ativos dessas. Gilkes e Prakongkep (2016) verificaram que a caulinita apresenta baixa superfície específica e consideraram estas como insignificante na adsorção de P. Meurer (2012) atribuiu a baixa capacidade de adsorção de P em solos argilosos as caulinitas, e esses mesmos pesquisadores atribuíram a baixa capacidade de adsorção P das caulinitas a baixa PCZ.

A maior concentração da fração P-H<sub>2</sub>O nas camadas superficiais dos solos (0 a 0,10 m) durante o período experimental se deve ao efeito da correção em superfície do solo neutralizando o Al e reduzindo o teor de Fe na camada superficial e também o próprio adubo fosfatado tende a concentra-se em superfície mesmo tendo sido incorporado com uma gradagem. Quando é corrigido o solo com calcário rico em Ca, a formação de precipitado com o Ca é favorecida (SINGH; SCHULZE, 2015). No entanto é mais vantajoso ocorrência dessa pequena parte do P-Ca do que a correção da acidez do solo, pois quando o solo não é corrigido ocorre tanto a precipitação com o Al e Fe contribuindo para a limitação do teor de P em solução do solo e as plantas ainda tem a produção afetadas pelos demais componentes da acidez do solo.

Os maiores teores de P-H<sub>2</sub>O nos solos aos três meses iniciais após adubação corretiva foi verificado para adubação com a fonte ST, por esta ter alta solubilidade em água e as reações químicas que liberar o P do granulo ocorre nos primeiros dias após a fosfatagem podendo estender-se por alguns meses a depender das características físicas, químicas e da umidade do solo (FIXEN; BRUULSEMA, 2014). Essa alta solubilidade do ST também contribuiu para o aumento no teor de P-H<sub>2</sub>O nos solos PAd e CYbe na camada de 0,20 a 0,30 m, esses com elevados percentuais de areia (90 e 56% respectivamente) favoreceu a percolação do P na camada de até 0,30 m de profundidade. Alto teor de P em solução favorece a mobilidade do P

em solos arenosos (HECKRATH et al., 1995). Abboud et al (2018) verificaram a mobilidade do P em solos com maiores percentuais de areia até a camada de 0 a 0,45 m, e atribuíram esse resultado a baixa capacidade de adsorção de P nos solos arenosos. Abdala, Ghosh e Silva (2012) estudando a dinâmica do P em vários solos, também verificaram a mobilidade do P em solos arenosos.

Esta fonte de alta solubilidade foi a que mais contribui para as fração P-H<sub>2</sub>O em todos os solos, no entanto após os 12 meses da adubação corretiva essa fonte disponibilizou P semelhante as demais até os 36 meses após adubação fosfatada corretiva. Fonte essa que pode contribuir para a recuperação da fertilidade fosfatada do solo em um período de tempo menor do que as demais fontes estudadas nessa pesquisa e mantem o efeito residual até os 36 meses mantendo a fertilidade do solo. Resultados semelhantes foram observados avaliando a disponibilidade de P em solos cultivados com cana-de-açúcar, verificaram que aos quatro meses após a fosfatagem o teor de P disponível no solo foi alto para os tratamentos com superfosfato triplo, mas nas avaliações aos dois anos após a aplicação desta fonte o teor de P foi igual aos tratamentos com fontes de baixa solubilidade.

O P-H<sub>2</sub>O nas fontes de menor solubilidade (FRN e TF) foi constante até os 36 meses e superior ao controle, ou seja, essas fontes disponibilizaram menores teores de P no início da fosfatagem mais apresentaram efeito residual por maior período de tempo comparado ao ST. Resultados semelhantes foram obtidos por Caione et al. (2013) avaliando o efeito residual de fontes de fósforo verificaram que o fosfato reativo natural disponibilizou P gradual até a segunda rebrota de cana-de-açúcar (três anos após a fosfatagem) e o teor de P para a fonte superfosfato triplo foi igual ao tratamento que não recebeu P. Segundo Novais e Smity (2007) e Bryan e Hopkins (2015) quanto mais ácido o solo se tornar maior é a solubilidade do FRN. Como nos solos agricultáveis acidez é corrigida, a solubilidade do FRN tende a ser baixa nos primeiros anos e aumenta quando o solo se tornar ácido, esse fenômeno contribui para o maior efeito residual do FRN. Lana (2004), avaliaram o potencial de fontes de fósforo na adubação verificaram que a solubilidade do fosfato reativo natural foi baixa em solos com acidez corrigida. Já a torta de filtro tem a solubilidade dependente dos fatores que aceleram as reações da decomposição da matéria orgânica no solo, tais como a temperatura e umidade (SIERRA et al., 2015). O maior efeito residual da TF de acordo com Powell e Satter (2001) e Curless, Kelling e Speth et al (2005), está correlacionado com a baixa solubilidade desta fonte, a qual disponibiliza nos meses iniciais baixo teor de P. No entanto a disponibilidade P por essas pode se estender por anos subsequentes (GALE et al., 2000; LABOSKI; LAMB, 2003).

A formação de precipitado do P com Al, Fe e Ca contribuiu para a redução da fração P-H<sub>2</sub>O durante todo o período experimental em todos os solos e a maior formação dos precipitados concentraram-se na camada de 0 a 0,20 m devido ao maior teor de P nessa camada, já que o fosfato foi incorporado até 0,15 m. Já para o precipitado de P-Al predominou nas camadas de solo mais profundas, pois essas tendem a concentrar maior teor de alumínio devido ao menor efeito da correção do solo em profundidade. Comportamento esse que foi mais frequente no solo PAd, esse com alto teor de areia ocorre a percolação do P nas camadas de solo como foi verificado para análise da fração P-H<sub>2</sub>O, o P chegou as camadas mais profundas e formou precipitado com Al. A fonte mais solúvel (ST) disponibiliza maior concentração de P em solução, o que facilita a percolação e precipitação do P nas camadas mais profundas.

Em superfície (0 a 0,10 m) não ocorreu precipitação do P com Al nos solos PAd e CYbe devido ao baixo poder tampão desses solos com altos percentuais de areia. Já para a fração P-Fe ocorreu em todos os solos porque na faixa de pH dos solos agricultáveis apenas o Al é totalmente neutralizado em solução, enquanto que o Fe continua em solução, tendo apenas redução no teor. Ernani (2001) verificou que a própria dissolução do superfosfato triplo diminui o pH ao redor do grânulo, possibilitando a precipitação do P com Fe (Ernani, 2001).

A fração P-Ca ocorreu em todos os solos porque o calcário e o gesso utilizado na correção do solo contem Ca e as próprias fontes de fosfato contêm Ca em sua composição, o que contribuiu para formação do precipitado P-Ca. Ernani et al (2001), verificaram que o teor de Ca trocável aumentou com aplicação das fontes superfosfato triplo e fosfato natural reativo em superfície.

### 3.4 Conclusões

Adubação corretiva com fontes de baixa solubilidade em solos com baixa capacidade de adsorção de P promove aumento no teor do P-H<sub>2</sub>O dos solos até os 36 meses após adubação corretiva.

A Fonte de maior solubilidade (ST) aplicada na adubação corretiva contribui para o aumento da fração de P-H<sub>2</sub>O no solo nos meses iniciais após adubação. Nos meses iniciais após adubação esta fonte também contribui para o aumento da precipitação do P com Al e Fe.

## Referências

- ABBOUDA, F. Y.; FAVARETTOA, N.; MOTTAA, A. V.; BARTHB, G.; GOULARTE, B. G. Phosphorus mobility and degree of saturation in oxisol under no-tillage after long-term dairy liquid manure application. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 177, n. 31, p. 45–53, 2018.
- ABDALA, D. B.; GHOSH, A. K.; DA SILVA, I. R.; De Novais, R. F.; Alvarez, V. V. H. Phosphorus saturation of a tropical soil and related P leaching caused by poultry litter addition. **Agriculture, Ecosystems e Environment**, Mato Grosso, v. 162, n. 1, p. 15-23, 2012.
- BARRÓN, V.; HERRUZO, M.; TORRENT, J. Phosphate adsorption by aluminous hematites of different shapes. **Soil Science Society of America Journal**, Amsterdam, v. 52, n. 10, p. 647-651, 1988.
- BORTOLUZZI, E. C.; PÉREZ, C. A. S.; ARDISSON, J. D.; TIECHER, T., CANER, L. Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. **Applied Clay Science**, Washington, v. 104, n. 12, 196-204, 2015.
- CELI, L.; De LUCA, G.; BARBERIS, E. Effects of interaction of organic and inorganic P with ferrihydrite and kaolinite-iron oxide systems on iron release. **Soil Science**, Amsterdam, v.168, n. 1, p. 479-488, 2003.
- CHANG, S. C.; JACKSON, M. L.; Fractionation of soil phosphorus. **Journal Soil Science**, Washington, n. 84, v. 2, p. 133-144, 1957.
- CORDELL, D.; DRANGERT, J. O. WHITE, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. **Revista Global Environmental Change**, Amsterdam v. 19, n. 3, p. 292-305, 2009.
- CUI, Y. S.; WENG, L. P. Arsenate and phosphate adsorption in relation to oxides composition in soils: LCD modeling. **Applied Clay Science**, Londres, v. 47, n. 13, p. 7269-7276, 2013.
- CURLESS, M. A.; KELLING, K. A.; SPETH, P. E. Nitrogen and phosphorus availability from liquid dairy manure to potatoes. **American Journal of Potato Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 287-297, 2005.
- EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes** / editor técnico, Fábio Cesar da Silva. 2 ed. Revista ampliada, Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 627 p. 2009.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** / Humberto Gonçalves dos Santos [et al.]. 3 ed. Rev. Ampl. Brasília, DF: Embrapa, 353 p. 2013.
- ERNANI, P. R.; STECKLING, C.; BAYER, C. características químicas de solo e rendimento de massa seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 939-946, 2001.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavra, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FIXEN, P. E.; BRUULSEMA, T. W. Potato management challenges created by phosphorus chemistry and plant roots. **American Journal of Potato Research**, Amsterdam v. 91, n.1, p. 121-131, 2014.

GALE, P. M.; MULLEN, M. D.; CIESLIK, C.; TYLER, D. D.; DEUK, B. N.; KIRCHNER, M.; MCCLURE, J. Phosphorus distribution and availability in response to dairy manure applications. **Journal Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Amsterdam, v. 31, n. 2, p. 553-565, 2000.

GUL, S.; JOANN, K. WHALEN, THOMAS, W. B. W.; SACHDEVA, V.; HONGYUAN DENG, S. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Washington, v. 206, 46-59, 2015.

HECKRATH, G.; BROOKES, P. C.; POULTON, P. R.; GOULDING, K. W. T. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment. **Jornal Environmental Science e Technology**, Amsterdam, v. 24, n. 21, 904-910, 1995.

HOPKINS, B. G.; HIRNYCK R. E. Organic potato production. **American Phytopathological Society**, Amsterdam, v. 123, n. 4, p. 101-108, 2007.

JOHNSON, S. E.; LOEPPERT, R. H. Role of organic acids in phosphate mobilization from iron oxide. **Soil Science Society of America Journal**, Amsterdam, v. 7, n. 1, p. 222-234, 2006.

LABOSKI, C. A. M.; LAMB J. A. Changes in soil test phosphorus concentration after application of manure or fertilizer. **Journal Soil Science Society of America**, Amsterdam, v. 67, n. 1, p. 544-554, 2003.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. (Eds.). Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Oxford: Viçosa, 1999. p. 72.

OLIVEIRA, C. M. B.; GATIBONI, L. C. MIQUELLUTI, D. J. M.; SMYTH, T.J.; ALMEIDA, J. A. Capacidade máxima de adsorção de fósforo e constante de energia de ligação em Latossolo bruno em razão de diferentes ajustes do modelo de Langmuir. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 38, n.12, p. 1805-1815, 2014.

ORDELL, D.; NESET, T. S. S. Phosphorus vulnerability: A qualitative framework for assessing the vulnerability of national and regional food systems to the multidimensional stressors of phosphorus scarcity. **Journal Global Environmental Change**, Amsterdam, v. 24, n. 2, 108-122, 2014.

PEREZ, C.; ANTELO, J.; FIOL, S.; FLORENCIO ARCE, F. Modeling oxyanion adsorption on ferrallic soil, part 1: parameter validation with phosphate ion. **Journal Environmental Toxicology and Chemistry**, Londres, v. 33, n. 10, p. 2208-2216, 2014.

POWELL, J. M. Z.; SATTER, L. D. Dairy diet effects on phosphorus cycles of cropland. **Journal Soil Water Conserv**, Les Ulis, v. 56, n. 2, p. 22-26, 2001.

PRADO, R. M.; CAIONE, G.; CAMPOS, C. N. S. Filter Cake and Vinasse as Fertilizers Contributing to Conservation Agriculture. **Hindawi Publishing Corporation, Applied and Environmental Soil Science**, Les Ulis, article ID 581984, 2013, 8 p.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba, 1991. p. 343.

ROBERT, J.; GILKES, A. Nattaporn Prakongkep. How the unique properties of soil kaolin affect the fertility of tropical soils. **Journal Applied Clay Science**, Washington, v. 131, n. 3, p. 100-106, 2016.

ROSSETTO, R; SANTIAGO, A. D. Adubação e calagem em cana-de-açúcar. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA**, 2008.

SANTOS, D. H.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S. S.; ECHER, F. R. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n. 1, p. 443-449, 2011.

SANTOS, D. H.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S. S.; FABRIS, L. B. Produtividade de cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiania, v. 40, n. 4, p. 454-461, 2010.

SIERRA, C. A.; TRUMBORE, S. E.; DAVIDSON, E. A.; VICCA, S. Sensitivity of decomposition rates of soil organic matter with respect to simultaneous changes in temperature and moisture, **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, Washington, n. 7, n. 1, p. 335-356, 2015.

ULÉN, B.; SNÄLL, S. Forms and retention of phosphorus in an illite-clay soil profile with a history of fertilisation with pig manure and mineral fertilizers. **Geoderma**, Amsterdam v.137, n.123, p. 455-465, 2007.

## **Capitulo 02**

### **4 ESTRESSE OXIDATIVO E PRODUTIVIDADE DA CANA SOCA CULTIVADA EM SOLOS QUE RECEBERAM ADUBAÇÃO FOSFATADA CORRETIVA**

## Estresse oxidativo e produtividade da cana soca cultivada em solos que receberam adubação fosfatada corretiva

### Resumo

A adubação corretiva com fontes de baixa solubilidade de fósforo (P) pode aumentar o teor de P disponível no solo no decorrer do tempo e promover melhorias na nutrição da cana-de-açúcar. A fonte mais utilizada na agricultura para adubação corretiva é o fosfato natural reativo, no entanto no setor suco energético a torta de filtro que é um subproduto do processamento da cana-de-açúcar é rica em  $P_2O_5$ , podendo fornecer P no solo semelhante as fontes minerais de baixa solubilidade. Diante do contexto esse trabalho teve como objetivo avaliar a produtividade socas de cana-de-açúcar após a adubação corretiva com fontes de fosfato de solubilidade variada em solos de região de clima tropical no Brasil. Os experimentos foram conduzidos em três solos (PAd, CYbe e LVAd) cultivados com cana-de-açúcar em região de clima tropical em Pernambuco e Paraíba. Os tratamentos consistiram no controle, sem a realização da adubação corretiva, e da incorporação corretiva com as doses de 50, 100, 200 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de  $P_2O_5$  utilizando três fontes de fósforo, Superfosfato Triplo (ST), Fosfato Natural Reativo Gafsa (FNR) Torta de Filtro (TF). As variáveis analisadas foram teor de P-disponível no solo, teor de P foliar, atividade das enzimas do complexo antioxidativo, Produção de biomassa, Produtividade de colmo e porcentagem de sacarose no caldo. Os dados foram submetidos a análise de variância (ANAVA) ao nível de 5 % de significância pelo teste F. Quando significativo pela ANAVA, os dados qualitativos (fontes) tiveram as médias comparadas pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) e os dados quantitativos (doses de P) foram ajustados modelos polinomiais. Adubação aumentou o teor de P disponível nos solos na camada de até 0,20 m de profundidade. O acúmulo de P nas folhas foi superior a 2 g kg<sup>-1</sup>. Adubação corretiva promoveu redução no estresse oxidativo na primeira e segunda soca da cana-de-açúcar. A produtividade de colmos (TCH) e massa seca da parte aérea (MSPA) aumentaram em todos os três solos estudados, a maior produtividade ocorreram na primeira e segunda rebrota. Adubação corretiva melhorou a porcentagem aparente de sacarose contida no caldo na segunda soca no solo CYbe e na terceira no PAd. As fontes de P de menor solubilidade em água, seja mineral ou orgânicas são as mais promissoras para adubação corretiva de P.

**Palavras-chave:** Estresse abiótico. Enzimas antioxidantes. Fósforo. *Sacharum* spp.

## Oxidative stress and productivity of cane soca grown on soils that received corrective phosphate fertilization

### Abstract

The sources of phosphorus (P) of lower solubility, whether organic or mineral, when applied in soils with low adsorption capacity of P can promote increase in the residual P content in the soil for a longer period than those of high solubility. It is important in areas cultivated with long cycle crops. This research evaluated phosphorus dynamics and sugarcane productivity in the cana soca cycle, after corrective phosphate fertilization with sources of varied solubility in soils of tropical climate region. The experiments were carried out in three soils, Dystrophic Yellow Argissolo (PAd), Tb Eutrophic Fluvial Cambisol (CYbe) and Dystrophic Yellow Red Latoso (LVAd) cultivated with sugarcane in a tropical climate region in Pernambuco and Paraíba. The treatments consisted in the control, without the implementation of corrective fertilization, and the incorporation of the doses of 50, 100, 200 and 300 kg ha<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> using three sources of phosphorus, Triple Superphosphate (ST), Natural Reactive Gafsa Phosphate (FNR) and Filter Cake (TF). The soil P dynamics was evaluated after application of 300 kg ha<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> at 3, 12, 24 and 36 months in the 0.0-0.10 layers; 0.10-0.20; 0.20-0.30 m depth), determining the inorganic P-H<sub>2</sub>O, P-Al, P-Fe and P-Ca fractions. In the first, second and third sugar cane soca. In all experimental plots, soil P was determined, P accumulation in leaf biomass, enzyme activity of the antioxidative complex, biomass production, yield of stem and percentage of sucrose in the broth. The data were submitted to analysis of variance (ANAVA) at 5% of significance and compared by means of a qualitative test and regression analysis (quantitative). In the evaluation of soil P dynamics, fertilization provided an increase in all fractions (P-H<sub>2</sub>O, P-Al, P-Fe and P-Ca) up to 36 months after corrective fertilization in the three studied soils. The increase in the P-H<sub>2</sub>O fraction occurred up to 0.20 m. The ST source was superior to the others until the 12 months, in the other periods it was the TF and the FRN. Corrective fertilization increased the available P content in the three sugar cane fields at the 0.20 m depth layer in all soils. The P content in the leaves was higher than 2 g kg<sup>-1</sup> and the fertilization with TF promoted an increase in leaf P content in the first stalk in the soil PAd and in the second in the CYbe. Corrective fertilization reduced oxidative stress in the first and second sugarcane soca. The yield of stalks (TCH) and shoot dry mass (MSPA) of sugarcane increased in all soils with increasing doses of P, the highest productivity occurred in the first and second stunts. Corrective fertilization increased the sucrose content contained in the broth in the second stump in the CYbe soil and in the third in the PAd. Corrective fertilization with source of lower solubility provides residual P for long period. The higher P content in the soil promotes the lower oxidative stress in the plants and increases the productivity of biomass.

**Keywords:** Abiotic stress. Antioxidant enzymes. Phosphorus. *Sacharum* spp.

## 4.1 Introdução

O fósforo (P) é um macronutriente que faz parte da constituição de ácidos nucleicos, nucleotídeos, fosfolípidos e fosfatos de açúcar (HERSCHBACH, 2013). Desempenha papel importante na respiração pois atua na ativação de enzimas e no metabolismo de carboidratos (VANCE; UHDE-STONE; ALLAN, 2003). Na cana-de-açúcar o fósforo contribui para o desenvolvimento do sistema radicular e perfilhamento (SANTOS, 2009), melhora a qualidade industrial, aumentando a porcentagem aparente de sacarose contida no caldo (pol%) e pureza do caldo (SIMÕES NETO et al., 2009).

No entanto nos solos agrícolas de região tropicais, a concentração natural de P na forma disponível é baixa ou insuficiente para satisfazer a necessidade nutricional das plantas (CHIMDI; ESALA; YLIVAINIO, 2014). Nas áreas de cultivo da cana-de-açúcar no Brasil, predominam solos intemperizados com presença dos minerais de argila caulinita, óxidos e hidróxidos de Fe e Al que precipitam e adsorvem o P de forma específica, o que reduz a disponibilidade, contribuindo, desta forma, para a menor produtividade dos canaviais (VALE et al., 2011).

Para atender a necessidade da planta, o suprimento do P na cana-de-açúcar é realizado com doses maiores que a necessidade da planta, aplicadas no fundo do sulco de plantio e com a utilização de fontes fosfatadas aciduladas de alta solubilidade em água (SIMÕES NETO et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2016).

Esse manejo da adubação fosfatada concentra o desenvolvimento radicular no local de aplicação do fertilizante fosfatado e limita a área de solo explorada pelas raízes, o que reduz a absorção de água e nutrientes, principalmente para socarias (rebrotas) consecutivas no período da estiagem nos cultivos de sequeiro, resultando em estresse abiótico (SILVA, 2015).

O estresse abiótico aumenta o estresse oxidativo, e produz espécies reativas de oxigênio (ROS, do inglês reactive oxygen species) (KARUPPANAPANDIAN; MOON; MANOHARAN, 2011). O excesso das ROS pode afetar severamente a funcionalidade e integridade das células, e promover danos oxidativos em proteínas, lipídeos e ácidos nucleicos, além de comprometer toda a produtividade da cana-de-açúcar (GILL; TUTEJA, 2010).

Como alternativa para ampliar a exploração pelas raízes além da região de aplicação do adubo fosfatado de fundo de sulco no plantio, a prática da adubação fosfatada corretiva, em área total no pré-plantio da cultura, conhecida nacionalmente como fosfatagem, possibilita corrigir os teores de P em toda a camada superficial do solo (SILVA, 2015). A elevação dos teores de P no solo além da linha de plantio promoveu na cana-planta cultivada em latossolo

vermelho com 45 % de argila, redução do estresse oxidativo e incrementou em 15 % a produtividade de colmos (SILVA, 2015).

Como a cana-de-açúcar é considerada uma cultura semi-perene, cultivada por no mínimo cinco anos consecutivos, a disponibilidade do P-fertilizante aplicado no plantio reduz com o tempo de reação com o solo, bem como a adubação fosfatada na cana soca é realizada na superfície do solo e utiliza fontes de P aciduladas, o que proporciona uma baixa eficiência da adubação. Nesse contexto, a adubação fosfatada corretiva no pré-plantio da cana-de-açúcar com fontes de P de baixa solubilidade pode promover maior disponibilidade de P além da linha de plantio, não apenas para a cana planta, mas também estende-se para a cana soca. Parente et al. (2016), observaram que a utilização do fosfato natural reativo e do superfosfato triplo como fonte de P para adubação fosfatada corretiva realizada no pré-plantio da cana-de-açúcar apresentou efeito residual na primeira rebrota e incrementou a produtividade em 20,9 %.

Na adubação fosfatada corretiva de pré-plantio, a fonte comumente utilizada na agricultura é o fosfato natural reativo com solubilidade em ácido cítrico, no entanto nos solos cultivados com a cana-de-açúcar existe a possibilidade de utilizar a torta de filtro, por ser uma fonte orgânica, renovável e rica em P, a qual pode contribuir para aumentar o P disponível no solo semelhantes as fontes minerais de menor solubilidade.

Diante do contexto, esse trabalho teve como objetivo avaliar como as fontes de P com solubilidade variada utilizadas na adubação fosfatada corretiva em pré-plantio da cana-de-açúcar influenciaram na disponibilidade de P no solo, nos teores de P da folha diagnóstico, na redução do estresse oxidativo, na produção de biomassa da parte área e na produtividade de colmos em três ciclos consecutivos de cana soca, cultivada em solos da região de clima tropical do Brasil com diferente composição granulométrica.

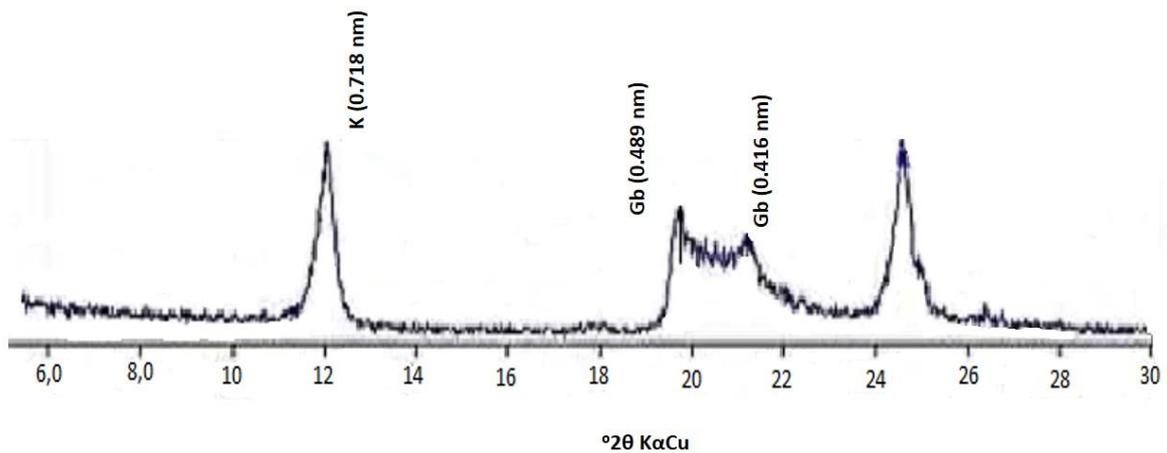
## 4.2 Material e Métodos

### 4.2.1 Campo experimental

A pesquisa foi realizada em condições de campo, durante o período de 2014 a 2017 em três áreas experimentais localizadas nos Estados de Pernambuco e Paraíba, Brasil.

A primeira área experimental localizou-se na área agrícola da Usina Cucaú, situada no município de Ribeirão, na Zona da Mata Sul do Estado de Pernambuco, Brasil (latitude de 08° 30' 11,2'' S e longitude de 35° 17' 32,7'' W). De acordo com o sistema Köppen, o clima dominante na região é o Tropical As', com inverno chuvoso e verão seco com precipitação pluvial média anual de 1.800 mm.

O solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), com textura franco-argilosa (EMBRAPA, 2013) e predominância da caulinita entre os minerais da fração argila (Figura 1).



**Figura 1.** Difractogramas de raios X da fração argila das profundidades 0,0 a 0,30 m em LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd) localizado em Ribeirão-PE. k: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita

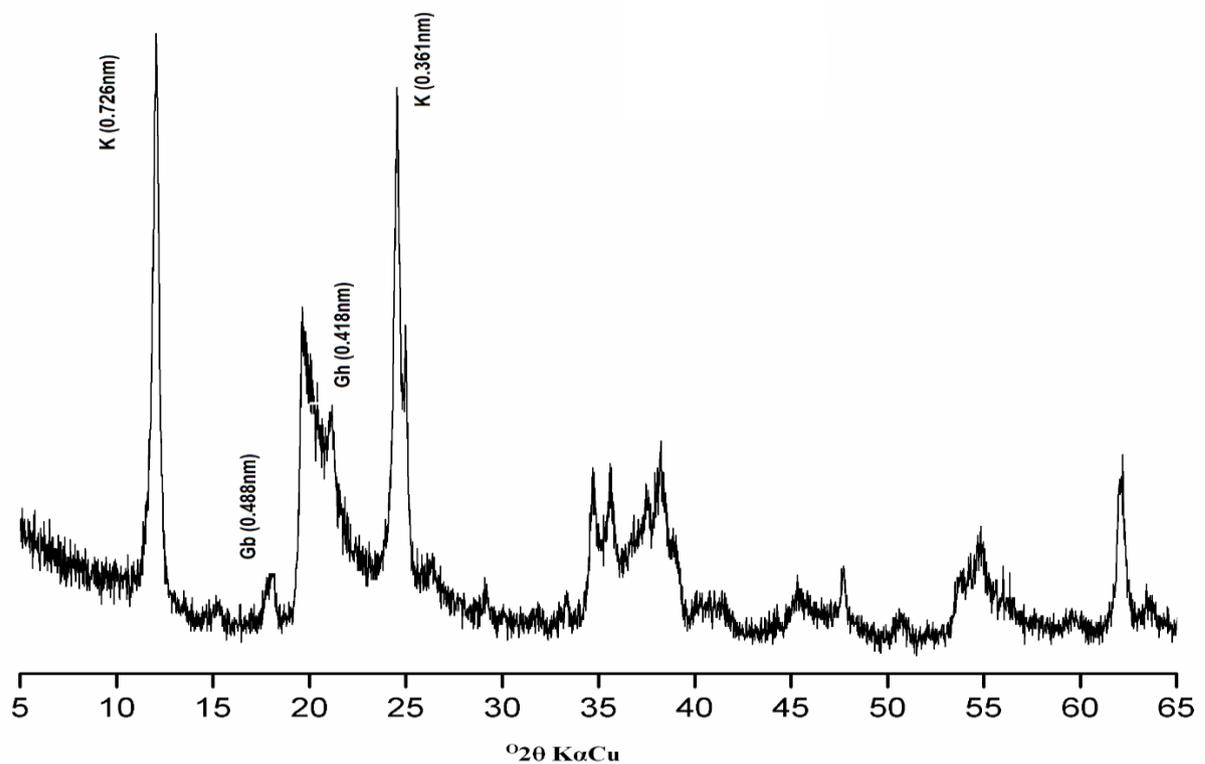
A caracterização química e física do solo foi realizada na camada de 0,0 a 0,3 m (Tabela 1).

**Tabela 1.** Caracterização química e física do LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd) na camada de 0,0 a 0,30 m de profundidade.

Atributos	Classes de solo		
	LVAd	CYbe	PAd
	Químico do solo		
pH (H <sub>2</sub> O 1:2,5)	4,7	5,1	4,9
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,9	3,5	2,9
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,20	0,17	0,11
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,14	0,12	0,09
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,3	4,6	1,3
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,3	1,7	0,5
Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,03	0,01	0,04
SB <sup>(1)</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,78	6,42	2,0
M.O <sup>(2)</sup> (%)	3,20	2,81	1,93
CTC <sub>Pot</sub> <sup>(3)</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,68	9,92	4,9
V <sup>(4)</sup> (%)	43,5	64,7	45,5
P-rem (mg)	19,0	16,0	12,0
P (mg dm <sup>-3</sup> )	2,3	5,0	4,0
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	180,5	160,1	180,4
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,15	0,35	0,26
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	2,05	0,65	0,73
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	1,73	1,05	1,58
Ca/Mg	11,0	6,3	2,6
Ca/K	23,8	38,3	14,4
	Física do solo		
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	430,0	560,0	900,0
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	174,0	193,0	36,0
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	396,0	247,0	64,0
Ds <sup>(5)</sup>	1,30	1,46	1,51
Dp <sup>(6)</sup>	2,43	2,48	2,54

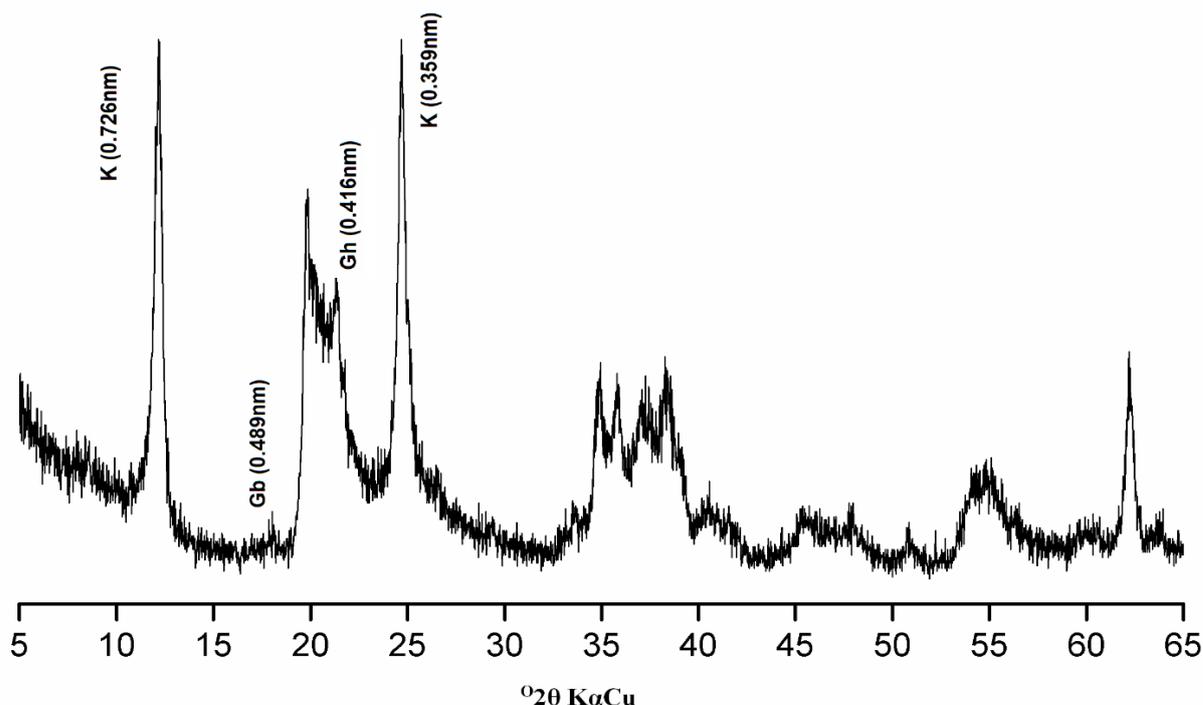
<sup>(1)</sup> Soma de base; <sup>(2)</sup> Matéria orgânica; <sup>(3)</sup> Capacidade de troca de cátions potencial; <sup>(4)</sup> Saturação por bases; <sup>(5)</sup> Densidade do solo; <sup>(6)</sup> Densidade das partículas.

A segunda área experimental foi implantada na área agrícola da Usina Olho D' água, localizada no município de Camutanga, na Zona da Mata Norte do Estado de Pernambuco, Brasil (latitude de 07° 22' 37'' S e longitude de 35° 56' 56'' W). De acordo com o sistema Köppen, o clima dominante na região é o Tropical As', com inverno chuvoso e verão seco precipitação pluvial média anual de 1.100 mm. O solo da área experimental foi classificado como CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe), com textura franco-arenosa (EMBRAPA, 2013) e predominância da caulinita entre os minerais da fração argila (Figura 2). A caracterização química e física encontra-se na Tabela 1.



**Figura 2.** Difratomogramas de raios X da fração argila na profundidades 0,0 a 0,30 m de profundidade em um CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) localizado em Camutanga-PE. K: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita.

A terceira área experimental foi implantada na área agrícola da Usina Japungú, situada no município de Santa Rita, na Zona da Mata Norte do Estado da Paraíba, Brasil (latitude de 07° 06' 50'' S e longitude de 34° 58' 41'' W). De acordo com o sistema Köppen, o clima dominante na região é o Tropical As', com inverno chuvoso e verão seco precipitação pluvial média de 1.600 mm ao ano. O solo da área experimental foi classificado como ARGISSOLO AMARELO distrófico (PAd) com textura areia franca (EMBRAPA, 2013) e predominância da caulinita entre os minerais de argila (Figura 3).



**Figura 3.** Difractogramas de raios X da fração argila das profundidades 0,0 a 0,30 m de profundidade em um ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PA) localizado em Santa Rita-PB. K: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita.

Os solos foram caracterizados, fisicamente, pela sua granulometria, densidade do solo e densidade das partículas segundo a metodologia da EMBRAPA (1997); quimicamente, foram caracterizados pelo pH (H<sub>2</sub>O 1:2,5); Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup>; Na<sup>+</sup>; K<sup>+</sup>; Al<sup>3+</sup>; (H+Al); P; C.; P-rem; Cu, Fe, Zn e Mn. O Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> foram extraídos por KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>; o P e o K por Mehlich-1 e o (H+Al) por acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup>, conforme EMBRAPA (2009). O Ca<sup>2+</sup> e o Mg<sup>2+</sup> foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, o K<sup>+</sup> por fotometria de chama e o P por colorimetria, conforme Braga e Defelipo (1974); o Al<sup>3+</sup> e o (H+Al) por titulometria e o C por combustão úmida com dicromato de potássio.

O P-rem, que é a concentração de P da solução de equilíbrio após agitação durante 1 h da TFSA (terra fina secada ao ar) com solução de CaCl<sub>2</sub> 10 mmol L<sup>-1</sup>, contendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P, na relação de 1:10, foi determinado de acordo com Alvarez et al. (2000).

Antes de realizar adubação corretiva, o solo da primeira área (LVAd) teve acidez do solo corrigida com 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário (CaO: 40 %, MgO: 9.96 % e PRNT: 66,6 %) tomando como base elevar a saturação de bases para 60 % da camada superficial do solo. Em adição foi aplicado 1,0 Mg ha<sup>-1</sup> de gesso mineral (CaO: 45 %), calculado para elevar a saturação de cálcio no solo para 50 % na camada subsuperficial do solo. No solo da segunda área (CYbe) foram aplicados 0,8 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário (CaO: 40 %, MgO: 9.96 % e PRNT: 66,6 %) para

neutralizar o alumínio trocável. Para a terceira área (PAd) foram aplicados  $1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário (CaO: 40 %, MgO: 9.96 % e PRNT: 66,6 %) para elevar a saturação de base a 60 %.

#### 4.2.2 Os tratamentos

Os tratamentos consistiram no controle, sem a realização da adubação fosfatada corretiva, e da aplicação das doses de 50, 100, 200 e  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  utilizando três fontes de fósforo com solubilidade em água variada; o Superfosfato Triplo (ST - 44 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total e 40 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  solúvel em água); Fosfato Natural Reativo de Gafsa (FNR - 29 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total e 8.729 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  solúvel em ácido cítrico) e a Torta de Filtro (TF: 1,33 a 2.90 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total e 40 a 60 % de umidade). As doses e as fontes de P foram aplicadas a lanço sobre a superfície do solo, sendo posteriormente incorporados com grade leve a 0,15 m de profundidade. A torta de filtro foi caracterizada, sendo determinados os valores de 12.5; 2.40; 186.0  $\text{g kg}^{-1}$  de N,  $\text{K}_2\text{O}$  e Matéria Orgânica, respectivamente. A quantidade adicional do N e do K aplicadas com a TF foram niveladas para os demais tratamentos utilizando nitrato de amônio e cloreto de potássio.

Os tratamentos foram distribuídos em blocos casualizado, utilizando o esquema fatorial de  $(4 \times 3) + 1$ , (quatro doses de P e três fonte, mais um tratamento controle) com quatro repetições. As parcelas experimentais da primeira área (LVAd) foram constituídas de 6 linhas de cana-de-açúcar com 20 m de comprimento ( $120 \text{ m}^2$ ), espaçadas a 1,0 m entre si. Para a área útil das parcelas, foi considerada as 4 linhas centrais com 18 m de comprimento ( $72 \text{ m}^2$ ). As parcelas da segunda (CYbe) área experimental foram constituídas de 6 linhas de cana-de-açúcar com 10 m de comprimento, espaçadas a 1,0 m entre si ( $72 \text{ m}^2$ ). Para a área útil das parcelas, foi considerada as 4 linhas centrais com 8 m de comprimento ( $38,4 \text{ m}^2$ ). Na terceira área experimental (PAd) as parcelas foram constituídas de 6 linhas duplas de cana-de-açúcar espaçadas a 0,9 x 1,5 m entre si, com 10 m de comprimento ( $72 \text{ m}^2$ ). Para área útil das parcelas, foram consideradas as 4 linhas centrais com 8 m de comprimento ( $38,4 \text{ m}^2$ ).

Após aplicação e incorporação dos tratamentos, foram abertos os sulcos de plantio e realizada a adubação com adição de  $25 \text{ kg de N ha}^{-1}$  e  $130 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  na forma de fosfato monoamônio no solo LVAd, no solo CYbe foram adicionado  $25 \text{ kg de N ha}^{-1}$  e  $90 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  e no PAd foram  $30 \text{ kg de N ha}^{-1}$  e  $120 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ . Assim todos os tratamentos receberam P no plantio no ciclo de cana-planta. Após 30 dias da germinação foi realizada a adubação de cobertura, na qual foram aplicados  $65 \text{ kg ha}^{-1}$  de N e  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ , com uso das fontes sulfato de amônio e cloreto de potássio, respectivamente. No ciclo de cana soca, os tratamentos não foram adubados com P em cobertura, foram aplicados 90 e  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de N e  $\text{K}_2\text{O}$ , respectivamente próximo aos 60 dias após a colheita.

#### **4.2.3 Determinação do P disponível no solo**

Para a determinação do P-disponível foram coletadas amostras de solo nas entrelinhas de plantio da cana-de-açúcar, de modo a não haver misturas de camadas de solo que não recebeu o tratamento ou influência da adubação fosfatada de plantio. As coletas foram realizadas aos três meses iniciais em cada soca de cana-de-açúcar na cama de solo 0,0 a 0,20 m profundidade. As amostras foram coletadas em todas as parcelas experimentais, em cada parcela foram coletadas três amostra simples de forma aleatória na área útil da parcela, essas amostras foram misturadas e formado uma amostra composta.

Após as coletas, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com abertura de malha de 2 mm.

A extração dos teores do P-disponível foram realizadas com o extrator duplo ácido Mehlich-1 (EMBRAPA, 2009). A determinação do teor de P foi por colorimetria conforme determina Braga e Defelipo (1974).

#### **4.2.4 Avaliação nutricional do fósforo**

O teor de fósforo foi determinado na folha diagnóstico (folha +1), identificada como a primeira folha que apresentava o colarinho visível (CAIONE et al., 2015). A coleta foi realizada aos quatro meses após o corte, aleatoriamente na área útil de cada parcela, sendo amostradas 10 folhas completamente desenvolvidas por parcela experimental. Cada amostra de folha teve a nervura central, as bases e as pontas descartadas, permanecendo apenas a parte mediana do limbo foliar com aproximadamente 20 a 25 cm (CAIONE et al., 2015), que posteriormente foi acondicionado em sacos de papel.

No laboratório as amostras foram lavadas com água destilada, acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada a 65 °C até peso constante. Após a secagem, as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley para posterior análise do teor de P, que foi extraído por digestão úmida com ácido nítrico em forno microondas (EMBRAPA, 2009) e determinado por colorimetria no comprimento de onda de 420 nm, por meio de reação com ácido ascórbico (DEFELIPO; RIBEIRO 1996).

#### **4.2.5 Determinação da atividade das enzimas do complexo antioxidativo**

Três amostras de folhas +1 foram coletadas para avaliação das atividades das enzimas do complexo antioxidativo. Para tanto, foram selecionadas as folhas que aparentemente mostrava-

se mais saudáveis, e para cada amostra de folha a nervura central, as bases e as pontas foram descartadas, utilizando somente a parte mediana e o limbo foliar.

Os materiais vegetais do limbo foliar foram identificados, enroladas em papel alumínio e acondicionadas em nitrogênio líquido ainda no campo. No laboratório, a determinação da atividade das enzimas foi realizada em triplicata, utilizando 0,1 g de material vegetal homogeneizado a frio em tampão fosfato de potássio 100 mM (pH 7.5) e polivinilpirrolidona (PVPP), centrifugado a 10.000g durante 15 min a 4° C. O sobrenadante foi utilizado para o preparo do extrato e determinação da atividade das enzimas antioxidativas; superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX).

A atividade da SOD foi determinada a partir da inibição da redução do nitrobluetetrazolium (NBT) pelo extrato enzimático, evitando assim a formação do cromóforo. A solução de reação (3 mL) foi constituída de 85 mM de tampão fosfato (pH 7.8), 75 µM de NBT, 5 µM riboflavina, 13 mM de metionina, 0,1 mM EDTA e 50 µL de extrato enzimático. A solução foi adicionada em tubos de vidro e irradiada com luz branca (lâmpada fluorescente de 15 W) por 5 min. Após esse período de exposição, a solução foi analisada em espectrofotômetro a 560 nm (GIANNOPOLITIS; RIES, 1977).

A atividade da CAT foi determinada em solução contendo 1 mL de tampão fosfato de potássio 100 mM (pH 7.5) e 25 µL de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) a 1 mM. A reação foi iniciada pela adição de 25 µL do extrato proteico e a atividade determinada seguindo-se a decomposição do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por 60 segundos, em espectrofotômetro a 240 nm, sob temperatura de 25°C (HAVIR; MCHALE, 1987).

A determinação da atividade da APX foi realizada por meio de reação composta por 650 µL de tampão fosfato de potássio 80 mM (pH 7.5), 100 µL de ascorbato 5 mM, 100 µL de EDTA 1 M, 100 µL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1 mM e 50 µL do extrato. A atividade da APX foi determinada pelo monitoramento da taxa de oxidação do ascorbato, em espectrofotômetro a 290 nm, a 30 °C, durante 60 segundos (NAKANO; ASADA, 1981).

#### **4.2.6 Produção de biomassa**

Ao final do ciclo produtivo das socas, nos anos de 2015, 2016 e 2017 com aproximadamente 360 dias do início do perfilhamento, foi determinada a produção de biomassa seca da parte aérea (BMSPA). Para tanto, foi contabilizado o número de plantas e coletada amostra de toda parte aérea e contida em 1 metro de comprimento na parte central da segunda linha de plantio nas parcelas experimentais. Ainda no campo, a massa fresca das folhas verde, folhas secas, ponteiro e colmo foram obtidos separadamente por meio da pesagem em balança

eletrônica com precisão de 0.02 kg. As amostras foram identificadas e acondicionadas em sacos de papel.

No laboratório, subamostras dos ponteiros, folhas e colmos foram pesadas em balança analítica (precisão de 0.01 g) e secas em estufa de ventilação forçada a 65 °C até atingir peso constante. Posteriormente as mesmas subamostras foram novamente pesadas para determinação da umidade do material.

#### **4.2.7 Produtividade e porcentagem de sacarose**

Posterior a avaliação da produção da massa seca da parte aérea das planta, foi realizado no mesmo período o corte da cana-de-açúcar para determinar a produtividade de colmos na área útil das parcelas experimentais. Todas as plantas contidas na área útil foram cortadas e as folhas separadas do colmo. O peso dos colmos foram determinados com auxílio de dinamômetro digital PR30-3000, com precisão de 5 kg, sendo os pesos realizado na área útil das parcelas e calculado a produtividade em tonelada de colmo por hectare (TCH).

Após a pesagem, foram tomados aleatoriamente 10 colmos e enviados ao laboratório para avaliação da porcentagem de sacarose. As amostras de colmo foram trituradas em forrageira e retiradas subamostras, as quais foram submetidas à prensa hidráulica por um minuto, sob pressão de 250 kg cm<sup>-2</sup>, para a coleta do caldo (CONSECANA, 2006). No caldo foi determinado a porcentagem de sacarose no colmo (PC).

#### **4.2.8 Análise Estatística**

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANAVA), ao nível de 5 % de significância pelo teste F, utilizando o delineamento em blocos ao acaso com arranjo fatorial (4 x 3) + 1 (Quatro doses e três fontes e mais um tratamento cobrtrole) com quatro repetições. Quando significativo pela ANAVA, os dados qualitativos (fontes) tiveram as médias comparadas pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Para os dados quantitativos (doses de P) foram ajustados modelos polinomiais. Como critério para escolha dos modelos matemáticos, foram selecionados aqueles que apresentassem maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e significância dos parâmetros da equação até 5 % de probabilidade.

As análises foram realizadas separadamente para cada área experimental e separadas por socas. Para as análises estatísticas utilizou-se o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

### 4.3 Resultados e Discussão

#### 4.3.1 Resultados

A correção dos teores de P nos solos durante o preparo para plantio com adubação corretiva apresentou efeito residual para as socaria de cana-de-açúcar, com incrementou no teor de P-disponível pelo o extrator Mehlich-1 em todos os solos até a camada de 0,20 m de profundidade. Os maiores teores de P-disponível foram verificados até a segunda socaria da cana-de-açúcar (3 anos após aplicação da adubação corretiva), com incremento médio no teor de p-disponível nos solos de 41%, 90% e 121% respectivamente nos solos LVAd, CYbe e PAd (Tabela 2). Quanto menor o teor de argila do solo maior foi o teor do P-disponível com a prática da adubação corretiva, ou seja, essa diferença é verificada nos dois solos de transição ao compara o solo argiloso (LVAd) com arenoso (PAd) existe uma diferença de 80% no teor de P-disponível.

**Tabela 2.** P- disponível (Mehlich-1) no solo, avaliado na primeira, segunda e terceira soca em solos após adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd). Fontes: ST (Superfósforo triplo), FNR (Fósforo natural reativo) e TF (Torta de filtro).

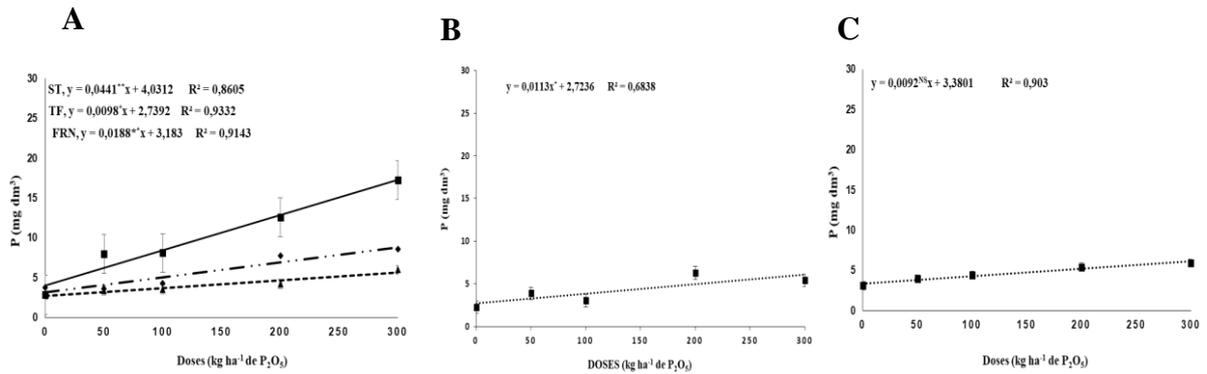
Fonte	P-disponível								
	1ª soca			2ª soca			3ª soca		
	LVAd	CYbe	PAd	LVAd	CYbe	PAd	LVAd	CYbe	PAd
ST	6,07B	5,11	10,11A	4,31	8,20B	5,86	3,92	4,04	4,52
FRN	11,4A	8,73	11,53A	6,18	14,3A	8,65	4,67	5,50	5,50
TF	4,29B	6,75	4,93B	4,30	7,17B	5,92	4,39	5,98	4,03
Média	7,25	6,81	8,52	4,93	10,07	6,81	4,32	5,17	3,50
Controle	3,6	5,0	3,48	3,12	5,3	3,08	3,01	4,18	4,61
F <sub>Fonte</sub>	23,14*	3,42 <sup>NS</sup>	0,62*	1,54 <sup>NS</sup>	6,03*	31,44 <sup>NS</sup>	2,65 <sup>NS</sup>	14,53 <sup>NS</sup>	6,12 <sup>NS</sup>
F <sub>Doses</sub>	5,560**	5,04*	12,05*	22,15*	12,02*	11,85*	4,22 <sup>NS</sup>	0,95 <sup>NS</sup>	12,45 <sup>NS</sup>
F <sub>F x D</sub>	12,03*	14,32 <sup>NS</sup>	3,23*	9,23 <sup>NS</sup>	0,84*	23,54 <sup>NS</sup>	12,33 <sup>NS</sup>	0,42 <sup>NS</sup>	23,34 <sup>NS</sup>
CV (%)	11,1	9,8	8,9	13,4	10,4	14,2	9,2	10,4	14,4

<sup>NS</sup> não significativo; \* significativos a 5% de probabilidade; \*\* significativos a 1% de probabilidade. Letras maiúsculas comparam as fontes na coluna.

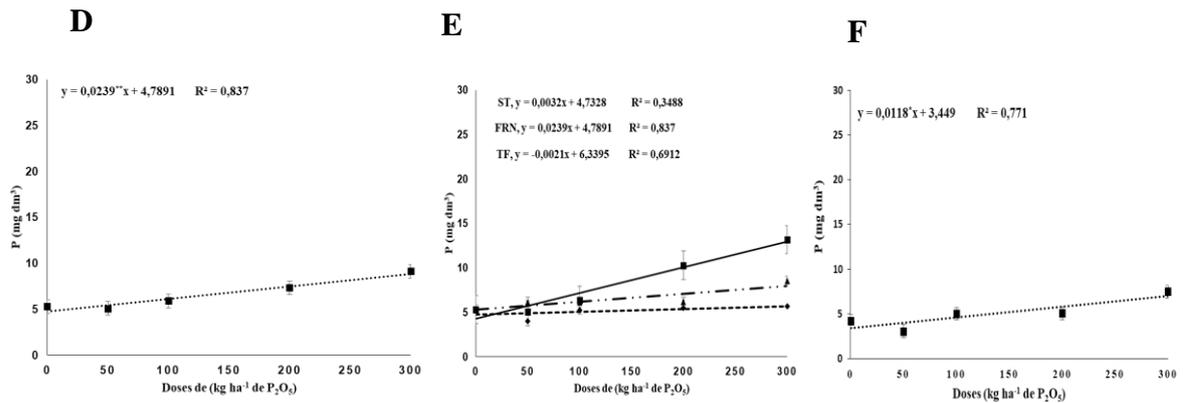
O efeito para as fontes de fósforo ocorreu na primeira soca da cana-de-açúcar no solo LVAd e no PAd, para o solo com o maior teor de areia (PAd) as fontes Superfósforo triplo (ST) e Fósforo natural reativo (FRN) disponibilizaram teores de P semelhantes entre si e foram superiores a fonte torta de filtro (TF), enquanto que no solo com maior teor de argiloso (LVAd) a fonte FRN promoveu o maior teor de P-disponível no solo. Na segunda soca da cana-de-açúcar a fonte FRN também promoveu o maior teor de P no solo PAd (Tabela 2).

O teor de P-disponível nos solos durante todo o tempo experimental ajustou-se ao modelo linear crescente com incremento das doses de P fornecidas na adubação corretiva (Figura 4). Os maiores valores de P foram verificados para as maiores doses com adubação com FRN na primeira soca nos solos LVAd e PAd (Figuras 4 A e G) e no solo CYbe na segunda soca de cana-de-açúcar (Figura 4E).

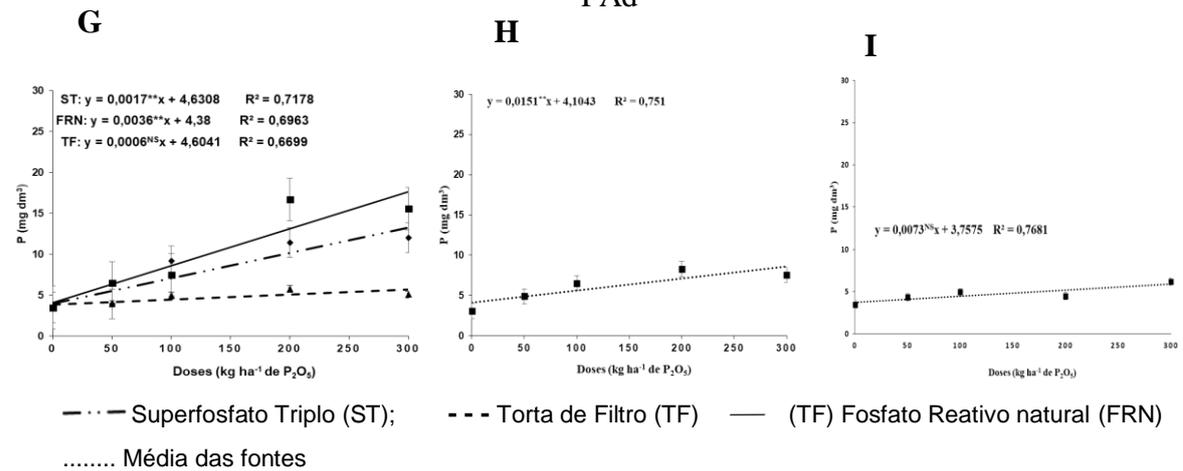
## LVAd



## CYbe



## PAAd



**Figura 4.** P-disponível (Mehlich-1) avaliado na primeira (A, D e G), segunda (B, E, H) e terceira (C, F e I) soca de cana-de-açúcar em relação a adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAAd). Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro).

Já para as avaliações do teor de P acumulado nas folhas +1 das plantas de cana-de-açúcar não ocorreu diferença para as doses e fontes utilizadas na adubação corretiva, exceto para a segunda soca de cana-de-açúcar no solo CYbe, a mesma fonte de P (FRN) que promoveu

o maior teor de P-disponível no solo também apresentou maior acúmulo de P na biomassa foliar conforme dados presentes na Tabela 3.

**Tabela 3.** Teor de P na folha + 1 avaliado na primeira, segunda e terceira soca após adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd). Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro).

Fonte	Teor de P na folha (g kg <sup>-1</sup> )								
	1ª soca			2ª soca			3ª soca		
	LVAd	CYbe	PAd	LVAd	CYbe	PAd	LVAd	CYbe	PAd
ST	2,50	3,13	3,20	3,02	2,12B	2,50	2,87	3,24	2,76
FRN	2,43	3,27	3,13	3,11	3,62A	2,43	3,12	3,15	2,53
TF	2,24	3,46	2,75	3,10	2,21B	3,04	2,98	3,38	2,41
Média	2,39	3,28	3,02	3,07	3,11	2,56	2,99	3,25	2,53
Controle	2,21	2,89	2,10	2,67	2,24	2,45	2,51	2,89	2,35
F <sub>Fonte</sub>	0,68 <sup>NS</sup>	2,74 <sup>NS</sup>	16,24 <sup>NS</sup>	0,56 <sup>NS</sup>	0,94*	7,68 <sup>NS</sup>	1,45 <sup>NS</sup>	5,56 <sup>NS</sup>	0,76 <sup>NS</sup>
F <sub>Doses</sub>	1,20 <sup>NS</sup>	1,30 <sup>NS</sup>	2,22 <sup>NS</sup>	5,30 <sup>NS</sup>	1,43 <sup>NS</sup>	0,50 <sup>NS</sup>	1,24 <sup>NS</sup>	3,22 <sup>NS</sup>	4,25 <sup>NS</sup>
F <sub>FxD</sub>	0,45 <sup>NS</sup>	1,83 <sup>NS</sup>	11,36 <sup>NS</sup>	9,87 <sup>NS</sup>	6,10 <sup>NS</sup>	3,79 <sup>NS</sup>	4,52 <sup>NS</sup>	0,41 <sup>NS</sup>	15,62 <sup>NS</sup>
CV (%)	16,0	18,12	8,36	10,3	10,3	14,94	12,3	10,69	13,21

<sup>NS</sup> não significativo; \* significativos a 5% de probabilidade; \*\* significativos a 1% de probabilidade. Letras maiúsculas comparam as fontes na coluna.

Os valores médio do teor de P acumulado nas folhas + 1 da cana-de-açúcar nos tratamentos que receberam adubação corretiva foram superior a 2,0 g kg<sup>-1</sup> e o maior valor observado foi 3,28 g kg<sup>-1</sup> nas folhas de cana-de-açúcar cultivadas no solo CYbe na primeira socaria (Tabela 3). No solo com maior teor de argila (LVAd) foram verificados os menores valores médio no teor de P-foliar na primeira soca de cana.

Com adubação corretiva foi verificado ocorrência da redução no estresse oxidativo na primeira e segunda socaria da cana-de-açúcar para alguns tratamentos que receberam adubação corretiva. Foram verificados diferentes resultados para as fontes de P sobre atividade das APX na primeira e segunda soca de cana-de-açúcar, no solo LVAd ocorreu redução de 28,2% na atividade enzimática e CYbe de 40,8% nos tratamentos que receberam adubação com o FRN. A menor atividade enzimática na segunda socaria foi verificada apenas para o solo CYbe com redução 48,1% em comparação ao tratamento que não recebeu adubação corretiva, e também foi a fonte FRN que promoveu a menor atividade enzimática (Tabela 4). Independente da textura do solo a fonte FRN foi a que promoveu menor atividade enzimática para a APX.

**Tabela 4.** Atividades enzimáticas avaliadas na primeira e segunda soca de cana-de-açúcar após a adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd). Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro).

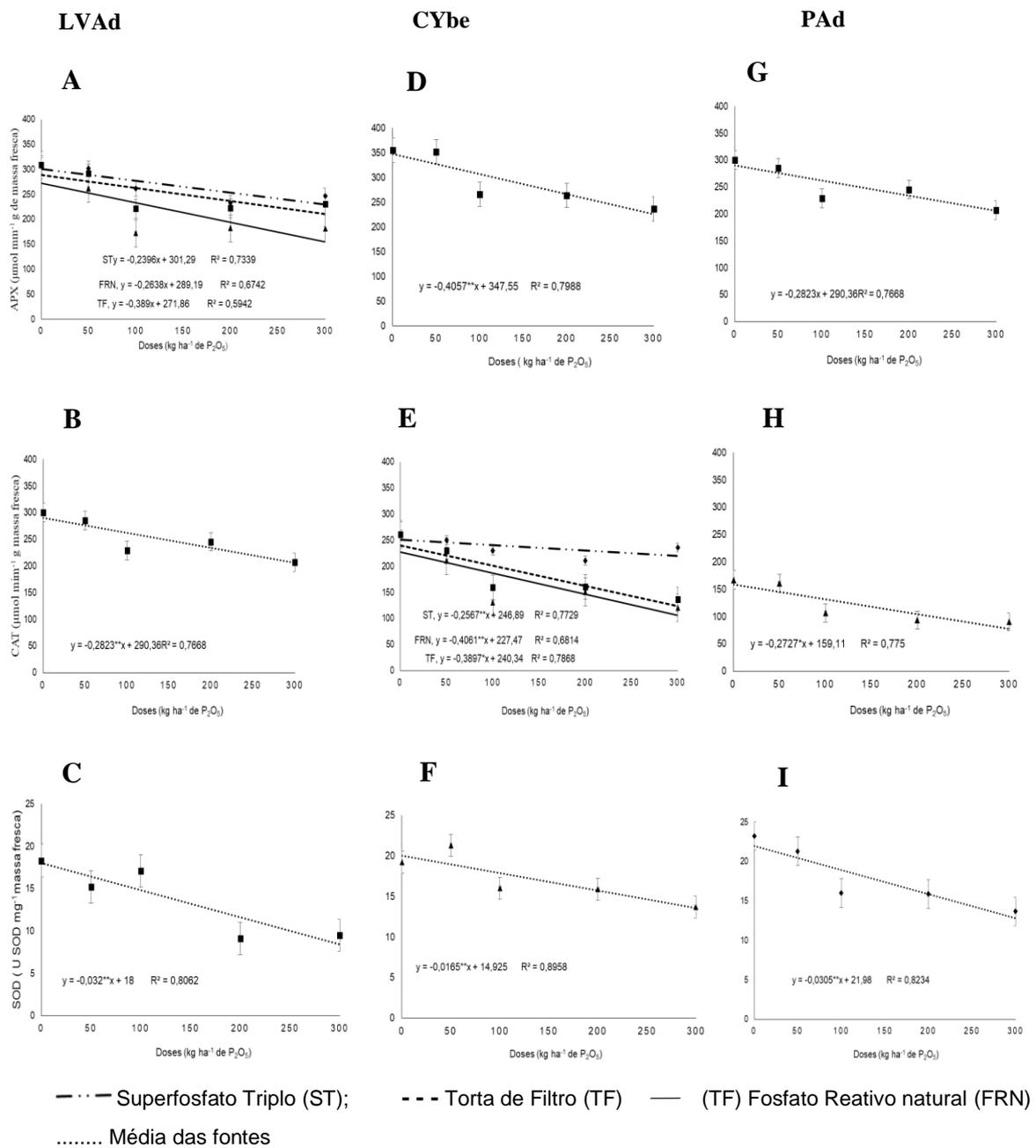
Fontes	Atividade enzimática					
	APX ( $\mu\text{mol min}^{-1} \text{g}$ massa fresca)					
	1ª Soca de cana			2ª Soca de cana		
	LVAd	CYbe	PAd	LVAd	CYbe	PAd
ST	290,4A	260,5A	230	255,0	260,0A	189,3
FRN	251,2B	182,7B	250	226,6	166,9B	170,1
TF	329,5A	249,2A	260	239,9	232,3A	172,4
Média	290,7	230,3	246	240,5	219,7	177,2
Controle	350,2	309,4	340	293,1	322,1	210,4
F <sub>Fontes</sub>	28,03*	36,02*	8,54 <sup>NS</sup>	45,65 <sup>NS</sup>	11,05*	27,44 <sup>NS</sup>
F <sub>Doses</sub>	162,05*	67,03*	34,4*	76,03*	123,04*	231,02*
F <sub>FxD</sub>	98,04*	45,5*	83,62 <sup>NS</sup>	32,23 <sup>NS</sup>	52,18 <sup>NS</sup>	54,32 <sup>NS</sup>
CV (%)	11,3	13,3	12,4	12,3	11,5	13,4
	CAT ( $\mu\text{mol min}^{-1} \text{g}$ de massa fresca)					
ST	173,0	211,7A	250,7	145,2	188,2A	176,7
FRN	160,1	161,7B	249,5	135,2	136,9B	159,5
TF	180,3	153,2B	232,9	130,9	124,9B	142,3
Média	171,0	175,5	244,3	137,1	150,0	157,0
Controle	235	260,5	300,5	180	322	210,3
F <sub>Fontes</sub>	0,62 <sup>NS</sup>	44,03*	72,37 <sup>NS</sup>	6,54 <sup>NS</sup>	98,03*	21,43 <sup>NS</sup>
F <sub>Doses</sub>	12,05*	9,04*	87,05*	23,04*	21,04*	63,05*
F <sub>FxD</sub>	0,89 <sup>NS</sup>	0,52 <sup>NS</sup>	0,81 <sup>NS</sup>	16,32 <sup>NS</sup>	5,24*	34,12 <sup>NS</sup>
CV (%)	14,8	12,3	10,3	10,3	16,1	13,3
	SOD (U SOD $\text{mg}^{-1}$ massa Fresca)					
ST	15,6	15,6	17,7	26,9A	12,9	17,7
FRN	12,3	12,4	16,6	17,5B	15,9	19,6
TF	13,1	19,9	15,7	21,9B	13,4	20,7
Média	13,6	15,9	16,6	22,0	14,0	19,4
Controle	19,2	19,9	23,2	32,13	20,8	25,2
F <sub>Fonte</sub>	137,52 <sup>NS</sup>	201,43 <sup>NS</sup>	45,37 <sup>NS</sup>	62,28*	42,52 <sup>NS</sup>	65,37 <sup>NS</sup>
F <sub>Dose</sub>	67,69*	96,05*	34,74*	12,03*	8,15*	21,08 <sup>NS</sup>
F <sub>FxD</sub>	63,61 <sup>NS</sup>	44,55 <sup>NS</sup>	43,18 <sup>NS</sup>	44,15*	9,24 <sup>NS</sup>	5,35 <sup>NS</sup>
CV (%)	12,21	14,2	9,4	10,0	13,3	17,7

<sup>NS</sup> não significativo; \* significativos a 5% de probabilidade; \*\* significativos a 1% de probabilidade. Letras maiúsculas comparam as fontes na coluna.

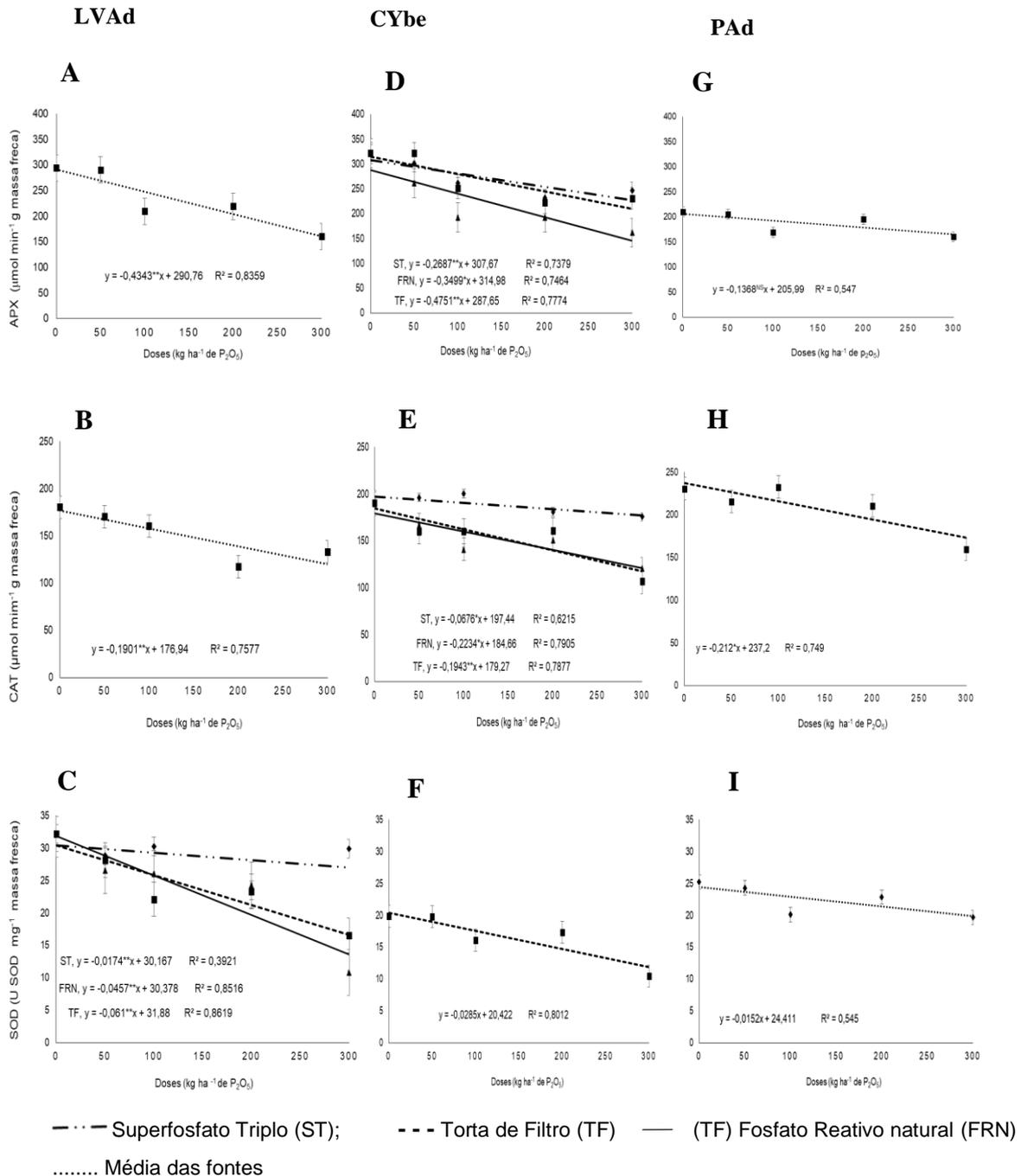
Para atividade enzimática da CAT também foi verificado efeito para as fontes, as de menor solubilidade (FRN e TF) promoveram redução nas atividades enzimáticas nos solos CYbe na primeira e segunda socaria com redução de 61,9% e 58,8% para o FRN e TF na primeira socaria e de 42,2% e 38,5% respectivamente na segunda socaria (Tabela 4). Nos demais solos não foi verificado efeito da adubação sobre atividade dessa enzima. Para a SOD só foi verificado efeito da adubação corretiva na segunda socaria da cana-de-açúcar no LVAd neste as fontes de menor solubilidade em água (FRN e TF) também promoveram redução na atividade das enzimas, 45,4% e 31% respectivamente.

As atividades enzimáticas tanto na primeira como na segunda socaria da cana-de-açúcar ajustaram-se ao modelo linear decrescente com incremento das doses de fosfato fornecidas na

adubação corretiva no preparo do solo para o plantio da cana planta (Figuras 5 e 6), os maiores teores de P nos solos reduziu o estresse oxidativo. APX e a CAT apresentaram as maiores atividades nas duas avaliações, quando comparadas a SOD (Figuras 5 e 6).



**Figura 5.** Atividade enzimática avaliada no solo LVAd (A, B e C), CYbe (D, E e F) e PAd (G, H e I) na primeira socaria socaria de cana-de-açúcar em relação a adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água. Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro). LVAd (LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico). CYbe (CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico) e PAd (ARGISSOLO AMARELO Distrófico).



**Figura 6.** Atividade enzimática avaliada no solo LVAd (A, B e C), CYbe (D, E e F) e PAd (G, H e I) na segunda socaria de cana-de-açúcar em relação a adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água. Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro). LVAd (LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico), CYbe (CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico) e PAd (ARGISSOLO AMARELO Distrófico).

A produtividade da biomassa seca da parte aérea (MSPA) e dos colmos (TCH) aumentaram nas três soqueiras e nos três solos com a correção dos teores de P nos solos, além da linha de plantio, o que demonstra efeito residual do P por quatro ciclos consecutivos.

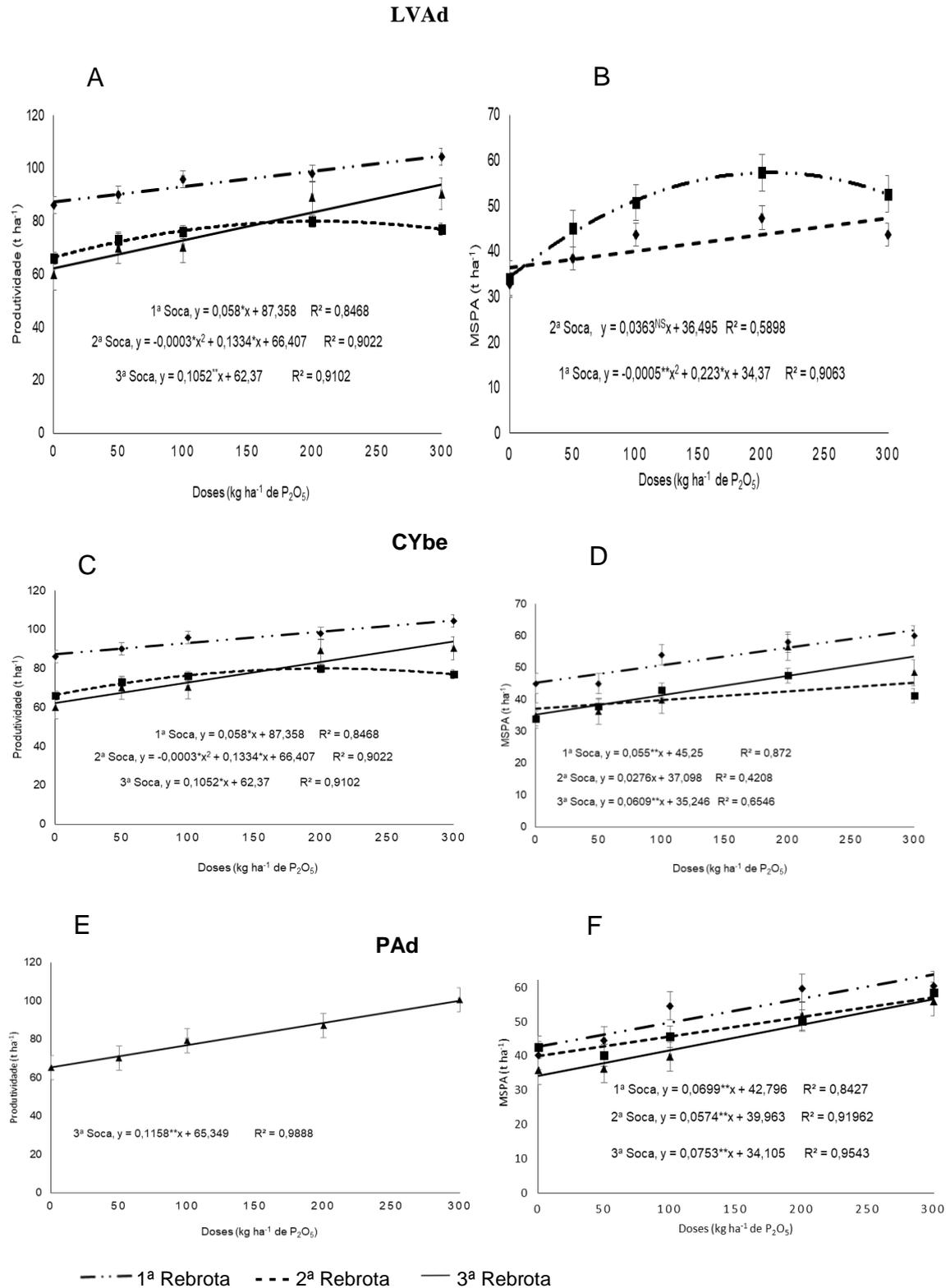
Não foi verificado efeito das fontes de P aplicadas na adubação corretiva sobre a produtividade de colmos (TCH) e produção de massa seca (MSPA) em nenhum dos solos estudados (LVAd, CYbe e PAd) conforme os dados presentes na Tabela 5.

**Tabela 5.** Produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e colmos (TCH) na primeira, segunda e terceira soca de cana-de-açúcar após adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd). Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro).

Fonte	MSPA (Mg ha <sup>-1</sup> )								
	1ª soca			2ª soca			3ª soca		
	LVAd	CYbe	PAd	LVAd	CYbe	PAd	LVAd	CYbe	PAd
ST	43,3	55,3	55,3	48,3	42,1	42,9	34,5	38,7	40,2
FRN	46,2	53,2	45,1	52,7	42,3	48,7	39,9	45,2	43,1
TF	39,2	50,1	46,9	45,3	38,1	47,5	35,3	46,4	45,9
Média	42,9	49,1	49,3	48,7	40,8	46,0	36,5	41,1	43,0
Controle	32,8	45,2	37,1	34,1	34,0	38,1	35,8	34,4	35,8
F <sub>Fonte</sub>	16,83 <sup>NS</sup>	34,64 <sup>NS</sup>	17,69 <sup>NS</sup>	65,48 <sup>NS</sup>	12,61 <sup>NS</sup>	1,44 <sup>NS</sup>	8,45 <sup>NS</sup>	1,53 <sup>NS</sup>	5,12 <sup>NS</sup>
F <sub>Doses</sub>	4,04*	12,24*	23,05*	23,05*	23,02*	5,04*	17,74 <sup>NS</sup>	10,02*	2,65*
F <sub>FxD</sub>	6,38*	16,62 <sup>NS</sup>	4,83 <sup>NS</sup>	42,53 <sup>NS</sup>	5,49*	8,54 <sup>NS</sup>	3,33 <sup>NS</sup>	1,42 <sup>NS</sup>	11,34 <sup>NS</sup>
CV (%)	11,1	9,8	8,9	13,4	10,4	14,2	9,2	12,4	14,4
Produção de colmos (Mg ha <sup>-1</sup> )									
ST	85,8	98,3	-	98,3	78,1	-	71,1	75,5	74,5
FRN	76,2	86,3	-	89,6	89,9	-	88,7	88,9	86,3
TF	75,9	81,1	-	82,3	80,1	-	75,4	70,2	70,5
Média	79,3	88,5	-	90,06	82,7	-	78,6	78,2	77,10
Controle	64,1	86,1	-	66,1	66,0	-	60,1	65,6	62,5
F <sub>Fonte</sub>	4,08 <sup>NS</sup>	8,64 <sup>NS</sup>	-	23,86 <sup>NS</sup>	4,34 <sup>NS</sup>	-	11,45 <sup>NS</sup>	2,56 <sup>NS</sup>	7,76 <sup>NS</sup>
F <sub>Doses</sub>	8,83*	3,45*	-	6,52*	6,03*	-	2,04*	12,04*	3,05*
F <sub>FxD</sub>	11,49 <sup>NS</sup>	1,73 <sup>NS</sup>	-	19,87 <sup>NS</sup>	1,10 <sup>NS</sup>	-	4,52 <sup>NS</sup>	4,41 <sup>NS</sup>	1,62 <sup>NS</sup>
CV (%)	16,0	18,12	-	10,3	10,3	-	12,3	10,69	13,21

<sup>NS</sup> não significativo; \* significativos a 5% de probabilidade; \*\* significativos a 1% de probabilidade. **Obs.:** - Produção perdida por incêndio em campo experimental.

A produtividade dos colmos apresentou resposta linear crescente para incremento das doses nos três solos estudados nos três ciclos anuais consecutivos das socarias de cana. A produção da MSPA também apresentou efeito residual nos três anos de cultivo, porém com ajuste quadrático para as doses, no solo LVAd com redução da produção nas maiores doses e com ganhos lineares no solo CYbe e PAd (Figura 7).



**Figura 7.** Produtividade de colmos e massa seca da parte aérea em LVAd (A e B), CYbe (C e D) e PAd (E e F) na primeira, segunda e terceira socaria de cana-de-açúcar após adubação fosfatada corretiva com fontes de P com solubilidade variada em água. Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro). LVAd (LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico), CYbe (CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico) e PAd (ARGISSOLO AMARELO Distrófico).

Na avaliação da qualidade do caldo da cana-de-açúcar não ocorreu diferença para as doses e fontes de P utilizadas na adubação corretiva, exceto na segunda rebrota no solo CYbe e na terceira no PAd (Tabela 6), na qual o maior teor de P da adubação proporcionou melhoras na percentagem aparente de sacarose contida no caldo (Pol).

**Tabela 6.** Percentagem de sacarose no caldo da cana-de-açúcar (Pol) na primeira, segunda e terceira soca em função da adubação fosfatada corretiva com fontes de solubilidade variada em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico (LVAd), CAMBISOLO FLÚVICO tb Eutrófico (CYbe) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico (PAd). Fontes: ST (Superfosfato triplo), FNR (Fosfato natural reativo) e TF (Torta de filtro).

1ª Soca									
Porcentagem de sacarose (Pol)									
Doses	LVAd			CYbe			PAd		
	ST	FRN	TF	ST	FRN	TF	ST	FRN	TF
0	12,4	12,4	12,4	15,5	15,5	15,5	-	-	-
50	14,8	14,4	13,2	16,2	15,4	15,6	-	-	-
100	15,1	15,7	15,3	15,3	15,6	16,0	-	-	-
200	15,2	14,5	14,6	16,7	15,2	16,4	-	-	-
300	15,9	15,1	15,2	16,4	15,9	16,9	-	-	-
2ª Soca									
0	11,8	11,8	11,8	12,9a	12,9a	12,9b	-	-	-
50	11,2	13,4	12,2	14,6a	15,0a	13,2b	-	-	-
100	13,5	12,4	11,6	14,9a	14,4a	14,4b	-	-	-
200	13,3	14,0	13,3	14,9a	16,1a	15,2ab	-	-	-
300	14,6	12,9	14,2	14,7a	16,3a	17,8a	-	-	-
3ª Soca									
0	12,2	12,2	12,2	14,4	14,4	14,4	12,1a	12,1b	12,1a
50	14,4	13,5	15,0	15,8	14,4	14,1	12,3a	12,9b	14,2a
100	13,0	13,0	13,5	16,1	14,9	15,2	14,8a	15,4ab	13,1a
200	15,1	14,4	15,2	14,2	14,4	15,0	15,3a	15,5ab	14,2a
300	14,3	15,3	13,2	14,9	13,6	14,3	14,5a	17,4a	13,9a
1ª Soc			2ª Soc				3ª Soc		
	LAVd	CYbe	PAd	LAVd	CYbe	PAd	LAVd	CYbe	PDd
F Dos	1,35 <sup>NS</sup>	3,52 <sup>NS</sup>		4,92 <sup>NS</sup>	12,72*		9,02 <sup>NS</sup>	7,12 <sup>NS</sup>	23,03*
F Fonte	0,76 <sup>NS</sup>	5,56 <sup>NS</sup>		8,43 <sup>NS</sup>	3,31 <sup>NS</sup>		0,89 <sup>NS</sup>	12,28 <sup>NS</sup>	11,23 <sup>NS</sup>
Fon X F Dos	0,98 <sup>NS</sup>	12,65 <sup>NS</sup>		0,26 <sup>NS</sup>	3,41 <sup>NS</sup>		3,32 <sup>NS</sup>	6,03 <sup>NS</sup>	4,59 <sup>NS</sup>
CV (%)	7,7	9,2		8,3	9,4		11,3	8,1	13,58

<sup>NS</sup> não significativo; \*, \*\* significativos a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente. **Obs.: - Produção perdida por incêndio em campo experimental.**

#### 4.3.2 Discussão

O maior teor de P-disponível no solo, quando houve efeito para as fontes de P, foram verificados com adubação com as fontes de menor solubilidade. Esse resultado pode ser atribuído a liberação gradual do P no solo, o que contribui para o maior teor de P-disponível ao longo do tempo, e como foi visto no capítulo anterior os maiores teores de P na fração P-H<sub>2</sub>O pela a fonte ST (de alta solubilidade) foram verificados até os 12 meses após adubação, o que explica a maior disponibilidade de P pelas fontes de menor solubilidade. Resultados

semelhantes foram obtidos por Resende et al. (2006), avaliando fontes e modos de aplicação de fósforo no milho em solos do cerrado, os quais verificaram incremento no teor de P disponível até o terceiro cultivo tanto para as fontes mais solúveis, como para as de menor solubilidade. Esses pesquisadores também obtiveram o maior teor de P residual para o fosfato natural e atribuíram o resultado a liberação constante de P devido a menor solubilidade desta fonte. Silva (2015) avaliando a disponibilidade de fósforo aos 120 e 210 dias após adubação corretiva verificou que a fonte fosfato natural reativo, de baixa solubilidade, disponibilizou P semelhante a fonte superfosfato triplo (ST), está de alta solubilidade. Esses resultados mostram que o FRN é uma fonte com potencial para a adubação em áreas de cultivo de cana-de-açúcar por aumentar o teor de P disponível desde da cana-planta até as socarias.

A fonte FRN foi a que mais disponibilizou P nos solos (Figuras 4 A, E e G), porque essa apresenta como característica aumentar a solubilidade no decorrer do tempo quando os solos vão se tornando ácidos. Quanto maior o teor de argila do solo maior é o potencial tampão dos solos argilosos, os quais tendem a acidificar mais facilmente, condições essas que são favoráveis a ocorrência da solubilidade do fosfato natural reativo (NOVAIS; SMITH, 1999).

Nas três avaliações o comportamento das fontes foi linear em todas avaliações, mas o teor de P disponível nos solos diminui a partir da segunda socaria em todos os solos. Esses resultados são atribuídos a própria extração pela cana-de-açúcar, a qual para uma produção média de 120 toneladas extrai aproximadamente 40 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (OLIVEIRA et al., 2007). O P também pode formar precipitado com Fe, Al e Ca como foi visto no capítulo anterior e com o passar do tempo as próprias fontes de P encontram-se em menores concentrações no solo por grande parte já ter solubilizado.

Para o teor de P foliar não ocorreu diferença para as fontes de P, mais a concentração superior a 2,0 g kg<sup>-1</sup> de P nos tecidos das folhas é indicativo que a nutrição fosfatada foi adequada para suprir o metabolismo da cultura (MARINHO; ALBUQUERQUE, 1980). Santos et al. (2013) encontraram teores de P variando entre 2,5 a 2,8 g kg<sup>-1</sup> e consideraram adequados para a nutrição da cana-de-açúcar. Deste modo a elevação dos teores do P no solo não incrementaram a nutrição fosfatada, e os incrementos positivos na biomassa seca da parte aérea, na produtividade de colmos e a redução do estresse abiótico, se devem ao efeito indireto da adubação fosfatada que contribuiu para o melhor desenvolvimento do sistema radicular e maior absorção de água e nutrientes no geral.

É comum em pesquisas com adubação corretiva não se encontrar respostas no acúmulo de P no tecido foliar, principalmente nas primeiras rebrotas, pois a adubação de fundo de sulco supri nos ciclos iniciais a exigência nutricional da cultura. Oliveira et al. (2007), observaram

que o fósforo fornecido no fundo do sulco supriu a necessidade nutricional da cana planta e pode se estender para as soqueiras. Moura Filho et al. (2014), também estudando a nutrição da cana-de-açúcar em diferentes solos não encontraram diferenças para o teor de P nas folhas diagnosticas e atribuíram os resultados aos baixos teores de P requerido pela cana-de-açúcar.

Outro fenômeno que contribui para a ausência do teor de P nas folhas, com a adubação corretiva em pré-plantio é atribuído ao uso de fontes mais solúveis ou para as doses mais elevadas ocorrer a formação de precipitado e adsorção. Korndörfer e Alcarde (1992), não encontraram diferenças no teor de P no tecido de folhas de cana-de-açúcar ao comparar fontes de baixa solubilidade com fontes altamente solúveis e atribuíram os resultados a maior adsorção do P para as fontes mas solúveis.

O menor estresse oxidativo para as plantas cultivadas nas parcelas que receberam adubação corretiva com P é atribuído aos maiores teores de P-disponível no solo, o qual respondeu linear ao incremento das doses de P (Figuras 4). Mesmo não sendo verificado efeito no teor de P foliar, mas a fosfatagem pode ter proporcionado efeitos indiretos possibilitando maior absorção de água e nutrientes para as plantas, plantas bem nutridas são mais eficientes na produção de fotossíntese e formação de açúcar (RENNENBERG; HERSCHBACH, 2013). Rossel et al. (2002) verificaram que o aumento na eficiência fotossintética proporciona menor estresse oxidativo.

As menores atividades enzimáticas, quanto houve efeito para as fontes foram verificadas para as fontes de menor solubilidade, porque essas mantiveram os maiores teores de P-disponível no solo, principalmente o FRN. Caione et al. (2013) avaliando o P residual disponibilizado pelas fontes fosfato natural reativo, farinha de osso e superfosfato triplo verificaram que as fontes de P de menor solubilidade disponibilizaram P constante no solo durante o período de três anos, enquanto que o superfosfato triplo só disponibilizou P na fase inicial do experimento.

A CAT e APX foram as enzimas que apresentaram as maiores atividades nas duas épocas de avaliação, mas as plantas que receberam P oriundo da adubação apresentaram menor atividade. Resultados semelhantes foram obtido por Silva (2015), avaliando o estresse oxidativo na cana-planta também verificou as maiores atividades para essas enzimas, embora os valores encontrados por esse pesquisador tenham sido inferiores aos obtidos nessa pesquisa. Em socaria de cana-de-açúcar o estresse oxidativo tende a ser maior do que em cana planta, pois nestas é frequente a ocorrência natural do maior estresse promovido pelas operações de colheita, tratos culturais promovendo a compactação do solo e danos as plantas. A própria cana-de-açúcar tende

a perder o vigor e a capacidade regenerativa no decorrer do tempo, esses fatores contribuem para o aumento do estresse oxidativo nas rebrotas.

Alta atividade enzimática também foi influenciada pelas condições ambientais, já que, as avaliações foram realizadas no mês de outubro época de seca e ocorrência de estresse hídrico no nordeste brasileiro. Azevedo (2013) também verificou maior atividade enzimática na cana-de-açúcar em época de baixa incidência de chuvas. Resultados semelhantes foram verificados por Reddy et al. (2004) e Shao et al. (2005) para as culturas de arroz e trigo.

Estresse oxidativo na época do déficit hídrico forma radicais superóxido ( $O_2^{\cdot-}$ ), contribuindo desta forma para o incremento da atividade das SOD, uma vez que está é a primeira linhagem de defesa nas células contra a formação dos radicais superóxidos. Por outro lado, o aumento da atividade da CAT é resultante da produção de  $H_2O_2$  oriundo tanto do estresse hídrico como das demais formas de estresse.

O aumento na produtividade da TCH e MSPA mostra a importância do efeito do P residual na adubação corretiva em plantio sobre a nutrição de plantas, por contribuir com a correção da fertilidade fosfatada na camada de até 0,20 m de profundidade (Figura 1) estimulando o desenvolvimento do sistema radicular além da linha de adubação do plantio, o que permite exploração de maior área de solo e conseqüentemente maior absorção da água e nutrientes. Resultados semelhantes foram obtidos por Caione et al. (2013) avaliando o efeito residual de fontes de fósforo sobre a produtividade da biomassa da cana-de-açúcar, os quais obtiveram incremento na produtividade em função do teor de P residual no solo. Segundo Santos et al. (2009), o P exerce grande importância na produtividade de socarias de cana por estimular o perfilhamento. Brown et al. (2012) explicam que o P tem efeito indireto sobre a produtividade das plantas por estimular o desenvolvimento das raízes primárias e aumentar o desenvolvimento das raízes laterais e finas facilitando a absorção de água e nutrientes. Resultados semelhantes foram obtidos por Lisboa et al. (2016) avaliando o efeito de duas fontes de P na adubação corretiva verificaram incremento na produtividade de colmos e biomassa da parte aérea e também atribuíram os resultados ao maior teor de P residual adubação corretiva. Garcia et al. (2009), avaliando o crescimento aéreo e radicular de arroz submetido a diferentes doses de fósforo, constataram que a massa seca do sistema radicular foi influenciada positivamente com o aumento das doses de fósforo, proporcionando incrementos no crescimento da parte aérea.

A não ocorrência do efeito da adubação corretiva sobre o Pol mostra que adubação de fundo de sulco foi suficiente para atender à exigência mínima requerida na qualidade industrial da cana-de-açúcar, Pol igual ou superior a 14 (RODRIGUES, 1995; RIPOLI; RIPOLI, 2004).

Meyer e Wood (2001), relatam que o efeito da fosfatagem sobre a qualidade do caldo da cana só apresenta resposta em solos com teor de P muito baixo, o que mostra que a adubação no fundo do sulco na implantação do experimento foi capaz de atender às exigências mínimas requeridas durante o cultivo da cana-de-açúcar.

#### **4 Conclusões**

Adubação fosfatada corretiva no preparo do solo para plantio da cana-de-açúcar aumenta o teor de P-disponível para as socarias de cana, reduz o estresse oxidativo das plantas e promove aumento na produtividade de biomassa da parte aérea e colmos.

As fontes de menor solubilidade em água, seja mineral ou orgânicas apresentam potencial para adubação corretiva de P.

## Referências

- AZEVEDO, V. M. **Ação combinada de fatores abióticos de estresses em cana-de-açúcar: variáveis fisiológica e bioquímicas**. 2013. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife-PE. 2013.
- ALBUQUERQUE, G. A. C.; MARINHO, M. L. Adubação na região Nordeste. In: ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação de cana-de-açúcar no Brasil**. 1. ed. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR, 1983. p. 351-368.
- BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 113, n.1, p.73-85, 1974.
- BROWN, L. K.; GEORGE, T. S.; THOMPSON, J. A. What are the implications of variation in root hair length on tolerance to phosphorus deficiency in combination with water stress in barley (*Hordeum vulgare*). **Revista Anatomia de Botânica**, Florianópolis, v. 110, n. 2, 319-28, 2012.
- BUSTOS, R.; CASTRILLO, G.; LINHARES F. A central regulatory system largely controls transcriptional activation and repression responses to phosphate starvation in *Arabidopsis*. **PLoS Genetics**, v. 6, n. 2, 1001-102, 2010.
- CAIONE, G.; FERNANDES, F. M; LANGE, A. Efeito residual de fontes de fósforo nos atributos químicos do solo, nutrição e produtividade de biomassa da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 8, n. 2, p.189-196, 2013.
- 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. **Scientific World Journal**, Amsterdam, v. 4, n. 2, p. 059-70, 2015.
- CHIMDI, A.; ESALA, M.; YLIVAINIO, K. Sequential Fractionation Patterns of Soil Phosphorus Collected from Different Land Use Systems of Dire Inchine District, West Shawa Zone, Ethiopia. **American-Eurasian Journal of Scientific Research**. Amsterdam, v. 9, n. 1, p. 51-57, 2014.
- CLARKSON, D. T.; CARVAJAL, T.; HENZLER. Root hydraulic conductance: Diurnal aquaporin expression. and the effects of nutrient stress. **Jornal Experimental de Botanica**, Florianópolis, v. 51, n.1, p. 61-70, 2000.
- DEFELIPO, B. V.; RIBEIRO, A. C. **Análise química do solo**. 2. ed. Viçosa: UFV, 1996. p.17.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavra, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- GARCIA, R. A.; GAZOLA, E.; MERLIN, A.; VILLAS BÔAS, R. L.; CRUSCIOL, C. A. C. Shoot and root growth of upland rice as affected by phosphorus fertilization and biostimulant. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 25, n. 1, p. 65-72, 2009.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide Dismutases: I. Occurrence in Higher Plants. **Journal of Plant Physiology**, Pearson, v. 59, n. 2, p. 309-314. 1977.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, Anadir, v. 48, n.12, p. 909-930, 2010.

HAVIR, E. A.; MCHALE, N. A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. **Revista Plant Physiology**, Uberlandia, v. 84, n. 2, p. 450-455, 1987.

LISBOA, L. A. M.; VIANA, R. S.; PASCOALOTO, I. M.; HEINRICH, R. Effects of the phosphating on the development of the sugarcane. **Revista Ciência e tecnologia**, Brasília, v. 8, n. 1, p. 31-41. 2016.

KARUPPANAPANDIAN, T.; MOON, J. C.; KIM, C.; MANOHARAN, K.; KIM, W. Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. **Australian Journal of Crop Science**, Austria, v. 5, n. 3, p. 709-725, 2011.

KORNDÖRFER, G. H.; ALCARDE, J. C. Acúmulo e teor de fósforo em folhas de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, n. 2, p.217-222, 1992.

MARINHO, M. L.; ALBUQUERQUE, G. A. C. Resposta da cana-de-açúcar a níveis de P e correlação com análise foliar. In: Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 1, 1979, Maceió. **Anais**. Maceió: STAB, v.2 p.328-333. 1980.

MEYER, J. H.; WOOD, R. A. The effects of soil fertility and nutrition on sugarcane quality: a review. **South African Sugar Technologists Association**, Lucapar, v.75, n. 4, p. 242-245, 2001.

MOURA FILHO, G.; ALBUQUERQUE, A. W.; MOURA, A. B.; SANTOS, A. C. I. D.; OLIVEIRA FILHO, M. D. S.; SILVA, L. C. D. Diagnose nutricional de variedades de cana-de-açúcar em argissolos. **Revista Agriambi**, Abuja, v.18, n. 1, p. 1102-1109, 2014.

NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Revista Plant Physiology**, Uberlandia v. 22, p. 1068-1072, 1981.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. (Eds.). Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Oxford: Viçosa, 1999. p. 72.

OLIVEIRA, R. I.; MEDEIROS, M. R. F. A.; FREIRE, C. S.; FREIRE, F. J.; SIMÕES NETO, D. E., OLIVEIRA, E. C. A. Nutrient partitioning and nutritional requirement in sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, Austria, v. 10, n. 1, p. 69-75, 2016.

OLIVEIRA, M. W. FREIRE, F. M. MACEDO, G. A. R.; FERREIRA, J. J. Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. **Informe agropecuario**, Belo Horizonte, v. 28, p. 30-43, 2007.

PARENTE, T. L.; CAIONI, S. C. LANGE, A.; CAIONI, C.; SILVA, A. C. S. YAMASHITA, O. Y.; NETO, A. L. Residual de fósforo em cana soca para produção de

forragem no norte de Mato Grosso. **Revista de Ciências Agroambientais**, Mato Grosso, v.14, n.1, p.157-162, 2016.

REDDY, A. R.; CHAITANYA, K. V.; VIVEKANANDAN, M.; Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. **Journal of Plant Physiology**, Munich, v.161, n. 11, p.1189-1202, 2004.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. 1. ed. Botucatu: Instituto de Biociências, 1995. p. 30.

RENNENBERG, H.; HERSCHBACH, C. Phosphorus nutrition of woody plants: many questions – few answers. **Plant Biology**, Lahore, v. 12, n.7, 2013.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. 1. ed. Piracicaba, 2004. p. 289-302.

ROSSEL, J. B.; WILSON, I. W.; POGSON, B. J. Global changes in gene expression in response to high light in Arabidopsis. **Plant Physiology**, Plant Physiology, v. 130, n. 3, p.1109 -1120, 2002.

SANTOS, D. H.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S. S.; FABRIS, L. B. Produtividade de cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, Campina Grande, v. 40, n. 4, p. 454-461, 2010.

SANTOS, E. F.; DONHA, R. M. A.; ARAÚJO, C. M. M.; JUNIOR, J. L.; CAMACHO, M. A. Normal nutrient ranges for sugarcane by the methods chm, dris and cnd and critical level by reduced normal distribution. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 37, n.6 p.1651-1658, 2013.

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

SHAO, H. B.; LIANG, Z. S.; SHAO, M. A.; WANG, B. C. Changes of antioxidative enzymes and membrane peroxidation for soil water deficits among 10 wheat genotypes a seedling. **Colloids Surface Biointerfaces**, Amsterdam, v. 42, n. p. 107-113, 2005.

SILVA, A. M. S. **Frações de fósforo inorgânico no solo em relação a fosfatagem e sua resposta no sistema antioxidativo e produtividade da cana-de-açúcar**. 2015. 89f. Dissertação de Mestrado (Ciências do solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2015.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 840-848, 2009.

VALE, D. W.; PRADO, R. M.; AVALHÃES, C. C.; HOJO, R. H. Omissão de macronutrientes na nutrição e no crescimento da cana-de-açúcar cultivada em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência Agrárias**, Recife, v. 6, n. 2, p.189-196, 2011.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, Astracã, v. 157, n. 4, p. 423-447, 2003.

WANG, X. D. U G.; MENG Y. The function of LPR1 is controlled by an element in the promoter and is independent of SUMO Ligase SIZ1 in response to low Pi stress in *Arabidopsis thaliana*. **Plant Cell Physiol**, Makoto, 51, 380–94, 2010.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os resultados do presente estudo fornece informações relevantes de cunho científico e também técnico prático que poderão auxiliar no manejo dos sistemas agrícolas. Nesse trabalho de tese foi possível conhecer a dinâmica do fósforo inorgânico em solos com diferentes textura em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, essa pesquisa dará suporte para futuros estudos sobre recomendação da adubação corretiva para o setor canavieiro na região Nordeste Brasileiro.