

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

Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pelas culturas de cana-de-açúcar e de arroz

Fernanda Latanze Mendes

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

**Piracicaba
2010**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Fernanda Latanze Mendes
Engenheiro Agrônomo

Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubo verde e aproveitamento desse nutriente pelas culturas de cana-de-açúcar e de arroz

Orientador:
Prof. Dr. **TAKASHI MURAOKA**

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

**Piracicaba
2010**

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

Mendes, Fernanda Latanze

Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubo verde e aproveitamento desse nutriente pelas culturas de cana-de-açúcar e de arroz / Fernanda Latanze Mendes. -- Piracicaba, 2010.

116 p. : il.

Tese (Doutorado) -- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.

1. Adubo verde 2. Arroz 3. Brachiaria 4. Cana-de-açúcar 5. Crotolária 6. Diluição isotópica 7. Estilosante 8. Fósforo 9. Guandu 10. Radioisótopos I. Título

CDD 633.61
M538e

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

Aos meus pais, Antonio Luis e Maria Aparecida, pelo amor incondicional, exemplo de vida e que por tantas vezes renunciaram seus sonhos para realizarem os meus;

Aos meus irmãos, Adriana e Augusto, pelo amor, amizade e incentivo;

Ao meu esposo, Roney, pelo seu amor, apoio, dedicação, e que não mede esforços para me acompanhar;

A esses meus queridos, que acreditam em mim e que são capazes que compreender minhas ausências em vários momentos de suas vidas,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por iluminar meu caminho;

Ao Prof. Dr. Takashi Muraoka, pela orientação, confiança, oportunidade e amizade;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e à Coordenação do Programa de Pós-Graduação (PPG) em Solos e Nutrição de Plantas pela oportunidade de realização do curso;

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), por permitir o uso das instalações do laboratório de Fertilidade do Solo para realização deste trabalho;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos para o curso de doutorado;

À IAEA (International Atomic Energy Agency) pela concessão de recursos financeiro do projeto nº. 13779/RO.

Aos professores: Godofredo César Vitti, Paulo Cesar Ocheuze Trivelin (CENA), Marisa de Cassia Piccolo (CENA), Carlos Tadeu dos Santos Dias, Antonio Roque Dechen e Murilo de Melo pelos ensinamentos transmitidos durante as disciplinas cursadas e durante o estágio de docência;

Aos professores Dr. Luís Ignácio Prochnown (ESALQ/USP), Dra. Raffaella Roseto (APTA/IAC) e Prof. Dr. Jorge de Castro Kiehl, pelas preciosas discussões no exame de qualificação;

À Usina da Barra, Grupo COSAN, na pessoa do Engenheiro Agrônomo Gleuber Mariano Teixeira, pela disponibilização e envio dos toletes de cana-de-açúcar;

À Embrapa Arroz e Feijão pelo fornecimento de arroz;

À Sementes Piraí, na pessoa do Engenheiro Agrônomo José Aparecido Donizeti Carlos, pela disponibilização das sementes de adubos verdes;

À Sementes Matsuda pelo fornecimento das sementes de adubos verdes;

Às funcionárias da Secretária do Departamento de Solos, Nancy e Marta, e de Pós-Graduação da ESALQ/USP pela prontidão nos serviços prestados;

Aos funcionários do Laboratório de Fertilidade de Solos (CENA/USP), Marileuza, Sandra e João, pelo auxílio nas análises e grande amizade;

Aos funcionários da biblioteca da ESALQ e CENA, pela contribuição para realização deste trabalho;

Às funcionárias do CENA, Henriqueta e Fernanda, pelo carinho e palavra amiga;

Aos amigos e colegas de orientação: Alinne, Anderson, Denis, Diogo, Edson, Felipe, Freddy, Fernando, Héctor, Rodrigo e Zaqueu, pelo companheirismo e colaboração;

Ao Vinícius pela distinta amizade, críticas construtivas e auxílio em no desenvolvimento dos experimentos;

À minha querida amiga Tatiana Marsola pelo companheirismo, pelas sugestões e críticas construtivas na elaboração da tese;

A todos que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	13
2 DESENVOLVIMENTO	15
2.1 Revisão Bibliográfica	15
2.1.1 Adubação verde	15
2.1.2 Fósforo e adubo verde	17
2.1.3 Eficiência de absorção de fósforo pelas plantas	19
2.1.4 Fósforo orgânico	20
2.1.5 Uso de radioisótopos.....	22
2.1.6 Cana-de-açúcar.....	24
2.1.6.1 Adubação verde na cultura da cana-de-açúcar.....	25
2.1.6.2 Reforma de canaviais	26
2.1.7 Arroz.....	27
2.1.7.1 Adubação verde na cultura do arroz	28
2.1.8 Perdas de solo e conservação	29
2.2 Materiais e métodos	30
2.2.1 Caracterização do solo.....	30
2.2.2 Diluição isotópica do ³² P.....	31
2.2.3 Experimentos	33
2.2.3.1 Experimento I: Identificação e seleção de espécies de adubos verdes mais eficientes em absorver fósforo.....	33
2.2.3.2 Experimento II: Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pela cultura da cana-de-açúcar. ...	36
2.2.3.3 Experimento III: Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pela cultura do arroz.....	41
2.2.4 Análise estatística dos dados	45
2.3 Resultados e discussão.....	48

2.3.1 Experimento I. Identificação e seleção de espécies de adubos verdes mais eficientes em absorver fósforo	48
2.3.2 Experimento II: Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pela cultura da cana-de-açúcar..	54
2.3.2.1 Parte aérea	54
2.3.2.2 Raiz	67
2.3.3 Experimento III: Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pela cultura do arroz.....	75
3 CONCLUSÕES.....	87
REFERÊNCIAS	89
APÊNDICES	105

RESUMO

Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pelas culturas de cana-de-açúcar e de arroz

A integração das espécies de adubos verdes, que imobilizam P, com a aplicação de fontes minerais fosfatadas é uma das medidas agronômicas mais promissoras para melhorar a disponibilidade de P para a cultura principal, com o objetivo de recuperar a fertilidade do solo, aumentar a matéria orgânica do solo e assim, otimizar eficiência de fertilizantes minerais. Os objetivos deste trabalho foram selecionar entre as espécies de adubos verdes mais eficientes em absorver o P na forma menos disponível e pela marcação isotópica destas plantas com ^{32}P , quantificar o aproveitamento deste nutriente proveniente dos adubos verdes e do fertilizante mineral pela cultura da cana-de-açúcar e do arroz, determinando suas reais contribuições como fonte de P. O estudo foi desenvolvido três fases, em amostras de Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico, com baixo teor de P, em casa-de-vegetação no CENA/USP. O primeiro experimento foi realizado com a finalidade de identificar e selecionar entre as 25 espécies de adubos verdes (AV) mais eficientes em absorver P através de métodos de diluição isotópica. As plantas foram cultivadas em delineamento inteiramente casualizado com três repetições. Com os resultados (13 variáveis) das 25 espécies de adubo verde realizou-se análise estatística de componentes principais (PCA) e de agrupamento hierárquico (AHA) visando agrupar os mais similares. A PCA foi explicada pelas duas primeiras componentes, definidas como P acumulado na planta e o valor L, resultando em três grupos, sendo o primeiro a espécies mais eficiente em absorver o P menos disponível, portanto, há diferença entre as espécies quanto à absorção. A partir desses grupos foram selecionadas algumas espécies de adubos verdes para avaliar o aproveitamento do P (AP) do adubo verde e do superfosfato triplo (SFT) pela raiz e parte aérea da cana-de-açúcar (experimento II) e pela parte aérea do arroz (experimento III) através da técnica da diluição isotópica. Para a cana-de-açúcar, foram selecionados braquiária ruziziensis, crotalária juncea, guandu anão, estilosante cv. Campo grande e para o arroz, a crotalária juncea e guandu anão e quatro doses de SFT (0; 30; 60 e 120 mg/vaso de P). Em média, os AVs apresentaram baixo aproveitamento, sendo 0,1 % pela raiz da cana; 0,8% pela parte aérea da cana e 2,0% pelo arroz. Para SFT, o AP pela raiz da cana foi de 1,0%; 9,9% pela parte aérea e 4,0% pelo arroz. Assim, o AP do SFT é superior aos dos adubos verdes para as duas culturas, independente das espécies de adubos verdes. Obtêm-se maior aproveitamento do SFT para ambas as culturas, na dose de 30 mg/vaso de P. O P do adubo verde não é suficiente para suprir a total demanda da cultura principal, mas favorece a absorção do P pela cultura quando associada ao SFT.

Palavras-chave: Diluição isotópica; Valor L; Superfosfato triplo; Adubo verde- ^{32}P ; Braquiária; Crotalária; Guandu; Estilosante

ABSTRACT

Efficiency of phosphorus uptake by several species of green manure and use of this nutrient by crops of sugar cane and rice

Integration of green manures species, which immobilize P, with supplying mineral P sources is one of the most promising agronomic practices for improving the availability of P for the main crop in order to recover soil fertility, increasing soil organic matter and thus optimize the efficiency of mineral fertilizers. The objectives of this work was to select among the green manure species the most efficient in absorbing the less available form of P, and by isotopic labeling of this plants, quantify the use of this nutrient from the green manures and mineral fertilizer by the sugar cane and rice crops, determining their real contributions as a P source. It was developed in three phases, in dystrophic Typical Hapludox, low-P, in the greenhouse in CENA / USP. The first experiment was conducted to identify and select the green manure species the more efficient one in absorbing P by isotopic dilution technique. The plants were grown in a completely randomized design with three replications. With 25 species of green manures and 13 variables statistical analysis of principal components (PCA) and hierarchical clustering (HCA) were carried out in order to group the most similar ones. The PCA was explained by the first two components, defined as plant accumulated P and the L value, resulting three groups, and the white lupin being the most efficient in absorbing less available P, so there is difference between species on the ability to absorb the less available form of soil P absorption. From these groups some species of green manure were selected to evaluate the P use efficiency (PUE), from green manure and triple superphosphate (TSP), both labeled with ^{32}P , by sugar cane (experiment II) and rice plant (experiment III) through the isotopic dilution technique. Brachiaria, sunnhemp, dwarf pigeon pea, stylosante cv. campo grande were selected for sugar cane and sunnhemp and dwarf pigeon pea for rice, and four rates of TSP (0, 30, 60 and 120 mg P/ pot). On average, the AVs had low PUE, begin 0.1% by the root of sugar cane, 0.8% by shoot of sugar cane and 2.0% by rice. For TSP, the PUE by sugar cane roots were 1.0%, 9.9% by shoots and 4.0% by rice plants. Thus PUE of TSP is greater than that of green manure for both crops, regardless of green manure species. The highest PUE of TSP for both crops was obtained at rate of 30 mg P/pot. The green manure P is not sufficient to meet total demand for the main crop, but improves the absorption of P by the crop when associated with SFT.

Keywords: Isotope dilution; L value; Triple superphosphate; Green manure- ^{32}P ; Brachiaria; Sunnhemp; Pigeon pea: Stylosante

1 INTRODUÇÃO

A crescente produção no século 21 é o artefato fundamental para o aumento da população. Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com área superior a sete milhões de hectares cultivados e produção de 571 milhões de toneladas na safra 2008/2009 (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA, 2010). A cana-de-açúcar é uma importante cultura para a economia brasileira e grande contribuinte na geração de divisas.

O Brasil também é o maior produtor mundial de arroz de terras altas (sequeiro) e o nono produtor mundial de arroz, considerando os dois sistemas de cultivo: irrigado e de terras altas, com produção de cerca de 12,6 milhões de toneladas na safra de 2008/2009 em uma área de 2,9 milhões de hectares (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2010). O arroz é o cereal mais importante para a segurança alimentar do mundo, em virtude de mais da metade da população mundial depender deste cereal para atender suas necessidades diárias de energia alimentar (FAO, 2010).

A maioria das lavouras de arroz de terras altas e parte da cana-de-açúcar estão localizadas na região dos Cerrados, cujos solos possuem baixa fertilidade natural, baixo conteúdo de matéria orgânica (FAGERIA, 1998) e a produtividade é limitada principalmente pela baixa disponibilidade de fósforo.

O sistema de cultivo mínimo empregado na cana-de-açúcar pode ocasionar compactação do solo e esgotar suas reservas dos compostos orgânicos e minerais. Sabe-se que, particularmente o P, acumula-se na camada superficial do solo dificultando, assim, o fornecimento desse nutriente para as plantas.

Visando a proteção superficial e o fornecimento de nutrientes ao solo, pode-se implantar a adubação verde previamente ao plantio da cultura principal ou da reforma do canavial. Esta prática é uma alternativa para melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo a partir da adição da matéria orgânica proporcionando a ciclagem dos nutrientes. Ressaltando que a reforma do canavial geralmente ocorre em uma época em que o solo fica desprovido de vegetação por vários meses, é freqüente a

ocorrência de erosão e perda de nutrientes por lixiviação (nitrogênio e potássio), volatilização (nitrogênio) e fixação (fósforo).

Práticas de manejo cultural (rotação, sucessão e consórcio), cultivo mínimo e plantio direto associado ao emprego de plantas de cobertura aumentam a diversidade de espécies vegetais, a quantidade e a qualidade dos resíduos vegetais e da matéria orgânica, além da agregação das partículas do solo. Assim, a permanência dos restos vegetais dos adubos verdes proporcionará aumento da matéria orgânica no solo e, conseqüentemente, maior fornecimento de fósforo às plantas.

Dessa forma, no sistema de cultivo mínimo e/ou plantio direto há acúmulo da matéria orgânica na superfície do solo devido à deposição de material vegetal. No entanto, pouco se conhece da real contribuição desse adubo verde quanto ao fornecimento de fósforo para a cultura principal.

Postula-se a hipótese que (i) há variação dentre as espécies vegetais para adubos verdes quanto à eficiência na absorção de fósforo do solo do “pool” menos disponível; (ii) os adubos verdes podem suprir à cultura subsequente, boa parte da quantidade de fósforo necessária; (iii) a aplicação do adubo verde com uma fonte fosfatada favorece o aproveitamento de P pela cultura de ambas as fontes.

O presente estudo tem como objetivo: (i) selecionar as espécies de adubos verdes mais eficientes em absorver P e, (ii) a partir da marcação isotópica destas plantas, quantificar o aproveitamento deste nutriente proveniente dos adubos verdes e do fertilizante mineral pela cultura da cana-de-açúcar e do arroz, determinando suas reais contribuições como fonte de P.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 Adubação verde

Na busca de agricultura menos agressiva ao ambiente introduz-se a adubação verde, que é definida como o cultivo de plantas, na mesma área ou em áreas vizinhas, para produzir grande quantidade de massa para ser, depois de completado seu ciclo vegetativo, incorporada (CALEGARI et al., 1993) ou deixada sobre o solo para agir como proteção e para atuar positivamente no sistema, visando, melhorar a saúde do solo, reduzir a poluição ambiental e melhorar a colheita (FAGERIA; BALIGAR; BAILEY, 2005).

As plantas de adubos verdes são de diferentes espécies de vegetais, como as leguminosas, os cereais, as brássicas e as gramíneas. As leguminosas agrupam um número muito grande de plantas, sendo superada apenas pelos cereais. Mais da metade da área cultivada no mundo são as leguminosas. As leguminosas tropicais contribuem com cerca de 35% da produção mundial de leguminosas, que é superior à dos cereais tropicais (30%), este menor do que os tubérculos (mandioca) (NORMAN; PEARSON; SEARLE, 1995).

O uso das leguminosas é bastante difundido na prática da adubação verde, pois possuem sistema radicular bem ramificado e profundo, capaz de extrair os nutrientes das camadas mais inferiores do solo (não prontamente disponíveis) e que são devolvidos à camada arável após a incorporação das plantas ao solo, aumentando a disponibilidade dos nutrientes para a cultura subsequente (ANDRADE, 1982) e promovendo reciclagem de nutrientes. O uso das leguminosas também promovem aumento do teor de matéria orgânica e nitrogênio no solo, as leguminosas proporcionando assim, diversos benefícios químicos, físicos e biológicos.

As leguminosas, quando utilizadas como adubo verde, têm a capacidade de utilizar os fosfatos insolúveis (BIN, 1983) e quando mineralizado liberam P disponível no

solo. Assim, em solos cultivados em que o adubo verde foi transformado, o reservatório de P disponível é consideravelmente enriquecido (HUNDAL; BISWAS; VIG, 1987).

As espécies de adubo verde podem aumentar a sustentabilidade dos sistemas de produção por reduzirem a erosão do solo e melhorar as propriedades físicas, através do aumento da matéria orgânica; aumento da retenção dos nutrientes (NZIGUHEBA; BÜNEMANN, 2005; BURLE et al., 2006); maior capacidade de troca de cátions efetiva do solo; favorecimento da produção de ácidos orgânicos, que são importante para a solubilização de minerais; diminuição dos teores de Al trocável através da complexação pelos compostos orgânicos, capacidade de reciclagem e mobilização de nutrientes lixiviados ou pouco solúveis que estejam nas camadas mais profundas do perfil (CALEGARI et al., 1993).

O adubo verde favorece os atributos físicos, químicos e biológicos do solo que são descritas segundo CALEGARI e colaboradores (1993). De forma geral, as qualidades físicas do solo são beneficiadas pelo incremento da matéria orgânica, promovendo melhoria na estrutura do subsolo visto que as raízes aprofundam criando melhor ambiente para o desenvolvimento da cultura.

Os adubos verdes ainda em desenvolvimento, ou seja, previamente à incorporação, exercem presença marcante sobre a proteção do solo, contra os fatores ambientais, sobretudo radiação solar e impacto das gotas de chuvas, que destroem os agregados do solo obstruem os poros superficiais pelo acúmulo de argilas, reduzindo a capacidade de infiltração de água e favorecendo o escoamento horizontal do excesso de água. Esta proteção minimiza sensivelmente a variação térmica e perdas por erosão, regula o armazenamento e a evaporação de água do solo; suprime ou diminui a infestação de plantas daninhas principalmente gramíneas e propicia aumento na capacidade de retenção de água do solo.

O adubo verde contribui na melhoria das características químicas do solo, pois proporciona maior disponibilidade através da reciclagem e mobilização de formas pouco assimiláveis para formas mais disponíveis às culturas; maior capacidade de troca de cátions efetiva; favorece a produção de ácidos orgânicos, importantes para a solubilização de minerais; diminui os teores de Al trocável através da complexação,

incrementa a capacidade de reciclagem e mobilização de nutrientes lixiviados ou pouco solúveis que estejam nas camadas mais profundas do perfil.

A atividade biológica do solo é beneficiada adição da matéria orgânica pois, supre os microrganismos presentes com as substâncias orgânicas e inorgânicas necessárias ao desenvolvimento, estabelecendo maior crescimento de determinados organismos microbianos, intensificando processos bioquímicos, que resultam na melhoria da capacidade produtiva dos solos. Este efeito provém desde a liberação de nutrientes antes indisponíveis, absorção de nutrientes e água devidos a fungos micorrízicos, até a melhoria das condições físicas do solo pela proliferação de minhocas (LUZ et al., 2005).

Associadas a esses benefícios proporcionados, a adubação verde exerce melhoria na produtividade do solo e comprova que a prática vem constituindo excelente complemento da adubação mineral em solos com limitações de fertilidade.

2.1.2 Fósforo e adubo verde

Estima-se que a adubação verde pode aumentar a biodisponibilidade do P (BÜNEMANN et al., 2004; BAH et al., 2006). A integração das espécies de plantas em rotação de cultura que imobilizam o P é uma das medidas agrônômicas mais promissoras para melhorar a disponibilidade de P para as culturas (HORST et al., 2001). Isso requer que os adubos verdes tenham acesso às frações de P no solo indisponíveis a cultura subsequente.

O adubo verde pode aumentar a nutrição fosfatada de colheitas sucessivas por vários mecanismos. As espécies de adubos verdes podem através dos ânions orgânicos (STRUTHERS; SIELING, 1950) e das enzimas fosfatase (EVANS; CONDON, 2009) diminuir a atividade do Al^{3+} em soluções de solos ácidos (LE MARE; PEREIRA; GOEDERT, 1987) e converter o P indisponível nativo no solo ou residual dos fertilizantes em formas químicas mais disponíveis para próximas culturas.

O P inorgânico (P_i) da adubação verde pode ser liberado rapidamente (FRIESEN; BLAIR, 1988), mas é provável que alguns deles podem ser inicialmente imobilizados pela biomassa microbiana (McLAUGHLIN et al., 1988).

Os processos de decomposição, que são simulados quando os resíduos dos adubos verdes são incorporados ao solo, podem aumentar a disponibilidade do P pelo aumento de CO_2 , na forma H_2CO_3 na solução do solo, resultando na dissolução de minerais primários (HAVLIN et al., 2005), como o P mineral do solo (SHARPLEY; SMITH, 1989).

Nos solos com alta capacidade de fixação de P, os componentes orgânicos liberados durante a decomposição podem aumentar a disponibilidade de P pela quebra dos sítios de adsorção de P (EASTERWOORD; SARTAIN, 1990) ou via troca aniônica (KAFKAFI et al., 1988). Alguns ácidos aniônicos, entretanto, podem resultar num decréscimo da densidade da partícula do solo e aumentar a agregação do solo e retenção da umidade. Todos esses fatores podem ajudar no aumento da absorção do P das culturas sucessivas pelos efeitos no aumento do crescimento das micorrizas na raiz (MacRAE; MEHUYS, 1985).

Os adubos verdes também podem aumentar a disponibilidade de P em duas circunstâncias: (i) durante seu crescimento pela modificação das propriedades do solo e mobilização do P; (ii) depois da decomposição, quando o P orgânico do adubo verde torna-se o P mais acessível para a cultura sucessora (NZIGUHEBA; BÜNEMANN, 2005).

Durante o crescimento dos adubos verdes, estes podem mobilizar algumas formas de P indisponíveis devido à exsudação de compostos na rizosfera que solubilizam P (SCHILLING et al., 1998; KIRK; SANTOS; SANTOS, 2000; VANCE; UHDE-STONE; ALLAN, 2003).

A incorporação de resíduos das plantas no solo também pode aumentar o conteúdo de P do solo (LI, MAHLER, EVERSON, 1990; VANLAUWE et al., 2000). Especialmente os adubos verdes que apresentam alta eficiência em absorver P, promovem o acúmulo de quantias relativamente altas de P, mesmo em solos pobres deste mineral. A liberação deste nutriente depende da decomposição dos resíduos, processo complexo que depende do conteúdo do P no solo, quantidade e relação C:P do adubo verde, taxas de mineralização do P e do ciclo do P no solo (DORADO et al., 2003; BÜNEMANN et al., 2004; OBERSON, JONER, 2005; MARSOLA, 2008).

O suplemento de matéria orgânica no solo, proveniente dos adubos verdes, é considerado o fator mais importante para aumento da produtividade das plantas (TARAFDAR, CLAASSEN, 2003; RICHARDSON et al., 2005), pois afeta positivamente as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo.

Como observado, os adubos verdes podem interferir na disponibilidade de P nos sistemas de cultivos. Porém, os adubos verdes não conseguem suprir por completo as necessidades das culturas, requerendo o complemento de fertilizantes inorgânicos.

2.1.3 Eficiência de absorção de fósforo pelas plantas

Com a finalidade de quantificar a eficiência dos nutrientes provenientes dos adubos verdes para a cultura principal utiliza como parâmetro a eficiência de utilização do nutriente (EU), definida como a produção por unidade de nutriente aplicado, e a eficiência de absorção (EA), que é a quantidade de nutriente absorvido por unidade de nutriente aplicado (MOLL; KAMPRATH; JACKSON, 1982).

A EA, comumente denominada de aproveitamento ou recuperação dos nutrientes pelas plantas é influenciada por fatores relacionados ao solo, ao manejo da adubação (fertilizantes), as práticas de cultivo, ao clima e as plantas (espécies, variedades, cultivares) (BALIGAR; FAGERIA; HE, 2001).

O aproveitamento dos nutrientes aplicados como fertilizantes pelas plantas é baixa em muitos solos, sendo que a estimativa, para o ano de aplicação do fertilizante, é de 50% ou menos para N, menos que 10% para P e ao redor de 40% para K (BALIGAR; BENNETT, 1986 a,b). Essas baixas eficiências ocorrem devido a significantes perdas de nutrientes, por exemplo, lixiviação, erosão, emissão de gases e fixação pelo solo. Essas perdas podem potencialmente contribuir para a degradação do solo e prejudicar a qualidade da água.

A EU deve ser o resultado da interação positiva entre absorção, transporte, redistribuição e metabolismo, ou seja, quanto maior a EU maior a eficiência da espécie ou variedade em converter o nutriente absorvido no produto desejado (MALAVOLTA, 2006).

A eficiência agronômica dos fertilizantes fosfatados pode ser afetada pelas propriedades do solo, fontes de P e métodos de aplicação, e pelas espécies vegetais (CHIEN; MENON, 1995). Hocking et al. (1997), utilizando a técnica da diluição isotópica de ^{32}P , compararam a capacidade de diferentes espécies vegetais (canola, tremoço branco, guandu, soja, girassol e trigo) em absorver P da fração pouco disponível do solo e concluíram que o tremoço branco e soja foram as espécies mais e menos eficiente, respectivamente. Muraoka et al. (2006), usando essa mesma técnica, compararam 22 espécies de plantas e observaram que o tremoço, arroz, eucalipto, algodão e guandu foram as mais eficientes em absorver P pouco disponível de um solo pobre deste nutriente da região do Cerrado. Além disso, esses autores classificaram a Crotalaria juncea, o feijão caupi e soja como espécies pouco eficientes em absorver o P do solo.

Essa diferença na capacidade de absorver formas de P menos disponíveis do solo é função de pelo menos três propriedades distintas: (i) capacidade fisiológica para absorver P de soluções diluídas, (ii) exsudação de ácidos orgânicos que promovem a solubilização do P adsorvido e (iii) maior desenvolvimento do sistema radicular, que resulta em maior exploração do volume de solo (LONERAGAN, 1978; RICHARDSON, 2009).

2.1.4 Fósforo orgânico

A matéria orgânica do solo constitui-se de raízes e microorganismos, que representam 4% do C orgânico total, e por resíduos vegetais e húmus em diferentes fases de decomposição, que contribuem com 98% do C orgânico total. O húmus é formado por substâncias não-húmicas e húmicas. As substâncias húmicas podem ser divididas em ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e humina que se encontram adsorvidos às partículas de argila formando complexos ou então ligados a íons, tornando-se mais resistentes a biodegradação (KIEHL, 1960; MENDONÇA; OLIVEIRA, 2000; PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

O fósforo orgânico está localizado principalmente na fração ácido fúlvico e ligado às formas de éster de ácido ortofosfórico e outras estruturas de mono e diéster (MENDONÇA; OLIVEIRA, 2000; MARSOLA, 2008). A adsorção competitiva pelos sítios ativos do solo entre o P e os ácidos húmicos, fúlvicos e os orgânicos de baixo peso molecular resultam no aumento da concentração de P na solução do solo (PAVINATO; ROSOLEN, 2008).

As proporções relativas de fósforo orgânico e inorgânico variam em função de fatores físicos, químicos e biológicos do sistema solo. Solos com alto teor de humus apresentam grandes quantidades de P orgânico, portanto, os processos de decomposição são muito importantes para a nutrição de plantas (DIEST; BLACK, 1959; BIELESKI; FERGUSON, 1983). A figura 1 representa a rota do P orgânico no solo.

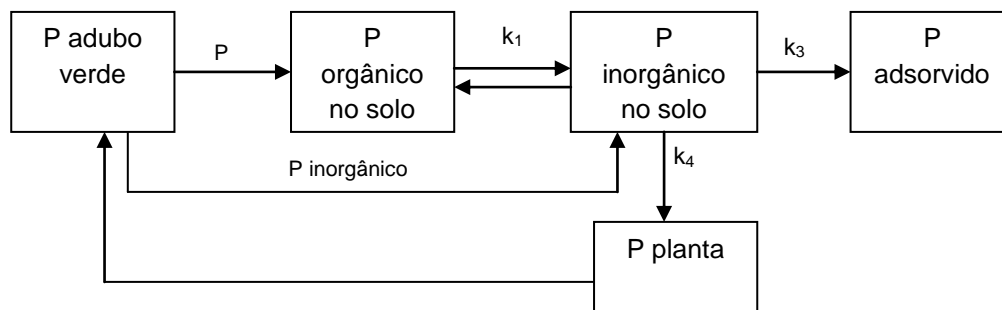


Figura 1 – Fluxo de fósforo do adubo verde no solo e absorção pela planta. k_1 : mineralização, k_2 : imobilização, k_3 : fixação, k_4 : absorção (adaptado de BLAIR; BOLAND, 1978)

A mineralização é catalisada pela enzima fosfatase, produzida em plantas, fungos e bactérias e localizada principalmente na rizosfera. O tipo da enzima varia de acordo com o pH do solo e o composto a ser degradado, denominando-se fosfatase ácida, com pH ótimo na faixa de 4 a 6 e fosfatase básica na faixa de 9 a 11 (STEWART; TIESSEN, 1987; NOVAIS; SMYTH, 1999; TURNER; MCKELVIE; HAYGARTH, 2002).

O pH do solo, o ácido orgânico (como o cítrico e málico) e a persistência destes ácidos no solo interferem na eficiência em absorver P disponível as plantas (KIRK, 1999). Esses ácidos são exsudados pelas raízes das plantas que auxiliam na solubilização dos fosfatos ligados a Fe ou Al, deixando, assim, o íon fosfato em estado solúvel (LI et al, 2009).

A disponibilidade de P do solo para as plantas é afetada diretamente pela exsudação desses ácidos pelas raízes, que solubilizam compostos inorgânicos de P e afetam a cinética de adsorção e sorção através da acidificação da rizosfera pelo excesso de absorção de cátions absorvidos pela planta e a liberação de prótons H⁺ para manter o equilíbrio das cargas (GAHOONIA; NIELSEN, 1992; HINSINGER, 2001; RICHARDSON, 2009).

A principal fonte de ácidos orgânicos no solo é a decomposição da matéria orgânica. Estudos conduzidos por Silva et al. (1997) demonstram essa importância da matéria orgânica na diminuição da adsorção de fósforo no solo. Foi avaliada a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAF) em solo submetida a diferentes manejos rotacionados com cultivo de milho. Os tratamentos em ordem decrescente de adsorção máxima foram: solo descoberto > guandu > crotalária > mucuna preta > braquiária > cerrado nativo. A adsorção de fósforo é inversamente proporcional ao teor de matéria orgânica do solo e à taxa de decomposição dos resíduos vegetais. No cultivo em solo descoberto, grande parte da matéria orgânica sofre oxidação, liberando os sítios para adsorção de fosfatos. Por outro lado, o manejo com adubo verde e cerrado nativo, devido ao maior teor de matéria orgânica, possibilitou menor adsorção de fósforo pelas partículas de solo.

A utilização de técnicas de cultivo que propiciem melhoria nas características físicas e aumento no teor de matéria orgânica do solo é essencial para uma maior disponibilidade de P para plantas cultivadas.

2.1.5 Uso de radioisótopos

A eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados, nas formas minerais ou orgânicas, depende da taxa de liberação de fósforo para as plantas (SCHACHTMAN; REID; AYLING, 1998). As transformações de fósforo orgânico em formas biologicamente disponível são complexas no ecossistema, tornando difíceis as medições diretas da disponibilidade deste nutriente (DALAL, 1979; FRIESEN; BLAIR, 1988).

Uma melhor avaliação da mineralização do fósforo no solo é obtida com o uso de técnicas isotópicas empregando o radioisótopo ^{32}P . As principais técnicas utilizadas são a marcação direta, na qual se marca a fonte de P, como por exemplo, o superfosfato triplo ou adubo verde, e a diluição isotópica, na qual se marca o P inorgânico do solo com ^{32}P . O uso de isótopos como traçadores permite determinar o fósforo proveniente do fertilizante (%Pppf), do adubo verde (%Pppav) e do solo (%Ppps) pela cultura principal (FARDEU; GUIRAUD; MAROL, 1996), permitindo avaliar os efeitos dos tratamentos, mesmo que não haja diferença nas respostas sendo esta a grande vantagem do uso da técnica de diluição isotópica (MURAOKA, 1991).

A técnica do valor L foi inicialmente desenvolvida para determinar a disponibilidade de determinado nutriente no solo usando o isótopo do próprio nutriente, isto é, sem adição de quaisquer agentes estranho, como no caso de extratores. O valor L é definido como a quantidade do nutriente determinado no solo e na solução do solo disponível para a planta, que é trocável como o íon quimicamente idêntico adicionado ao solo, medida através da absorção do mesmo nutriente pela planta (LARSEN, 1967). O íon quimicamente idêntico somente pode ser um isótopo do próprio elemento.

Braum e Helmke (1995) constataram que o valor L serve também para avaliar a capacidade que uma espécie, no caso tremoço branco, tem em absorver fósforo do solo que está na forma indisponível para a soja. Posteriormente, Hoking et al (1997) usaram a técnica para comparar a habilidade de diferentes culturas em acessar o fósforo do solo na forma menos solúvel. No Brasil, Fernandes e Muraoka (2002) utilizaram essa técnica para comparar 30 principais híbridos de milho cultivados no Cerrado, conseguindo identificar três grupos distintos em relação à capacidade de absorção de P menos disponível do solo. Raposo (2003) verificou, usando essa técnica, que na soja também ocorre diferenças entre cultivares quanto à capacidade de absorção de fósforo do solo.

O procedimento envolve mistura uniforme de fonte de ^{32}P com o solo a ser cultivado. As plantas absorvem o P da solução, ou seja, o ^{32}P "diluído" e o ^{31}P lábil. A análise destas permitem quantificar o P total absorvido e, pela atividade específica (S) ou pelo valor L calculado, quantifica-se o ^{32}P absorvido (LARSEN, 1967). Plantas com menores atividades específicas, conseqüentemente maiores valor L, significam que têm

maior quantidade de P proveniente da fonte menos solúvel do solo, sendo, portanto, mais eficientes em absorver o nutriente do solo desse “pool” (HOCKING et al., 1997).

O radioisótopo ^{32}P é utilizado em estudos de fertilidade do solo e ciclagem de desse nutriente, contribuindo enormemente em pesquisas no Brasil (MURAOKA, 1991; SCIVITTARO; BOARETTO; MURAOKA, 1997; FERNANDES, MURAOKA, 2002; MENDES, 2006; MARSOLA, 2008; FRANZINI; MURAOKA; MENDES, 2009) e no exterior (HUNDAL; BISWAS; VIG, 1987; HOCKING et al., 1997; GARG; BAHL, 2008; NACHIMUTHU et al., 2009) . A principal limitação ao uso de ^{32}P é sua meia vida curta (14,3 dias) que dificulta a condução de experimentos de longa duração. Entretanto, esta característica é vantajosa do ponto de vista ambiental, pois o decaimento rápido evita o acúmulo de lixo radioativo. A emissão de partículas β^- de alta energia (1,71 MeV) representa um perigo considerável, exigindo cuidados adicionais no seu manuseio, porém, tem a vantagem de ser detectada por efeito Cerenkov, dispensando o uso de solução cintiladora (VOSE, 1980).

2.1.6 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar ocupa lugar de destaque na agricultura mundial por sua importância econômica e social, sendo uma das espécies mais cultivadas no mundo, alcançando mais de 80 países.

O Brasil é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar do mundo, atendendo aos mercados internos e externos de açúcar, atuando como gerador de divisas e, também, tendo como meta substituir alguns derivados de petróleo pelo etanol nacional (MURAOKA et al., 1995).

2.1.6.1 Adubação verde na cultura da cana-de-açúcar

A adubação verde em áreas de expansão da cultura canavieira, geralmente em solos de baixa fertilidade, é de fundamental importância para recuperar e manter a fertilidade para alcançar produções econômicas. Essa prática tem papel de destaque como condicionadoras de solo, fornecedores de nutrientes, além de exercer controle contra nematóides de galhas (*Meloidogyne javanica* e *M. incógnita*), predominantes no Estado de São Paulo (MIYASAKA, 1984), e plantas daninhas (BALIGAR; FAGERIA, 2007).

Em áreas de reforma, pode-se optar pelo plantio de plantas condicionadoras do solo, ao invés de se optar por manter a área em pousio, durante o intervalo entre o último corte (início de novembro) e o plantio (março).

O estudo com adubos verdes na cultura da cana-de-açúcar no estado de São Paulo iniciou-se por Souza (1953), que constatou a produção de grande quantidade de massa verde pela crotalária juncea. Em outro estudo para avaliar o rendimento da cana-de-açúcar após o cultivo de crotalária juncea e mucuna preta, observou-se que a crotalária resultou maior produção da cultura em relação à mucuna. Entretanto, observou-se que, em outra região, as duas espécies apresentaram rendimentos semelhantes, mas nem sempre superior ao guandu, labe labe e vegetação nativa (CARDOSO, 1956).

A prática da adubação verde com leguminosas na cultura da cana-de-açúcar é recomendada durante a reforma do canavial (CARDOSO, 1956), proporcionando as seguintes vantagens: não implica na perda de um ano agrícola; não interfere na germinação da cana; apresenta custos relativamente baixos; promove aumentos significativos nas produções de cana e de açúcar em pelo menos dois cortes; protege o solo contra erosão e evita a multiplicação de ervas daninhas.

2.1.6.2 Reforma de canaviais

No Estado de São Paulo, no período de 1977 a 2006, houve grande aumento na área de cultivo da cana-de-açúcar, praticamente triplicando a área colhida (UNICA, 2007). Essa expansão tornou-se motivo de atenção, em relação aos impactos ambientais da comunidade internacional (BOLONHEZI; MONTEZUMA, 2008).

A área de renovação de canaviais atualmente é estimada em um milhão de hectares, cerca de 15% da área total (BOLONHEZI, 2007; LANDELL, 2008), com tendência ao aumento dessas áreas visando o aspecto econômico e ambiental, em razão da crescente consciência ecológica mundial (SODRÉ, 2008).

No Estado de São Paulo são cultivados 3,8 milhões de hectares, correspondendo a mais da metade dos sete milhões de hectares cultivados no Brasil, predominantemente no sistema convencional de preparo do solo. O sistema de plantio direto na renovação dos canaviais está sendo cada vez mais adotado na região de Piracicaba, no estado de São Paulo (BOLONHEZI; MONTEZUMA, 2008; LANDELL, 2008).

A produtividade atual da cana é de aproximadamente de 90 t ha⁻¹ (UNICA, 2010), principalmente no Estado de São Paulo e Paraná, nos quais se constata aumento do número de cortes por plantio, de três para seis, sendo muito significativo do ponto de vista da sustentabilidade econômica (LANDELL, 2008).

Assim, tem-se a preocupação constante com a recuperação ou a manutenção da fertilidade dos solos para obtenção de rendimentos econômicos, tanto de açúcar quanto de energia renovável oriunda da cana. A partir disso, recomenda-se há pelo menos cinco décadas, a prática da adubação verde, sobretudo com a utilização de leguminosas, por ocasião da reforma do canavial, após o quarto ou quinto corte e antes do plantio de ano-e-meio, para estabelecer a cobertura vegetal no solo quando em pousio (MASCARENHAS et al., 2008).

2.1.7 Arroz

O arroz é um dos mais importantes cereais em termos de valor econômico, considerado o cultivo alimentar de maior importância em muitos países em desenvolvimento, principalmente na Ásia e Oceania, onde vivem 70% da população total dos países em desenvolvimento e cerca de dois terços da população subnutrida mundial (FISCHER, 1998).

Estimativas indicam que a população consumidora de arroz está crescendo 1,8% ao ano e, conseqüentemente a produção aumentará de 560 milhões de t ano⁻¹ a 850 milhões de t ano⁻¹ em 2025, para atingir essa produtividade é necessário aplicar as tecnologias que afetam a utilização de nutrientes pela cultura do arroz. (FISCHER, 1998).

O arroz representa um dos alimentos com melhor balanceamento nutricional, fornecendo 20% da energia e 15% da proteína per capita necessária ao homem. Esse cereal adapta-se a diferentes condições edafoclimáticas e, é considerado a espécie com maior potencial para o combate a fome no mundo (NAVES; BASSINELLO, 2006).

O Brasil está entre os dez principais produtores mundiais de arroz, com cerca de 11 milhões de toneladas, sendo que o consumo brasileiro de 11,7 milhões de toneladas (CONAB, 2010). O cultivo de arroz no Brasil é realizado em dois grandes ecossistemas, (i) várzeas, ou seja, irrigado por inundação controlada, responsável por 69% da produção nacional (GUIMARÃES et al., 2006) e (ii) terras altas, que engloba o de sequeiro e o com irrigação suplementar por aspersão, caracterizado pela condição aeróbia de desenvolvimento radicular.

A maioria das lavouras de arroz de terras altas está localizada na região dos cerrados brasileiros. Essa região é caracterizada pelo predomínio de solos com baixa fertilidade natural e elevada saturação por alumínio, além da ocorrência de períodos curtos de estiagem, denominados veranicos.

O cultivo de arroz de terras altas corresponde a 65,2% da área total cultivada no Brasil, e contribui com 40,9% da produção nacional (YOKOYAMA, 2002). Esse resultado é explicado pela baixa produtividade (2000 kg ha⁻¹) do sistema de cultivo de

terras alta que ocupa a maior área e geralmente em solos de baixa fertilidade, com pouca aplicação de calcário e fertilizantes.

O fósforo é um dos principais nutrientes para a cultura do arroz e sua deficiência pode afetar a planta provocando redução no crescimento, no perfilhamento, no sistema radicular e, conseqüentemente, na produtividade (FAGERIA; 1999) devido à elevada fixação de P no solo e severa acidez do solo. Assim, resulta em baixa taxa de aproveitamento de P nesses solos (GUPTA; O'TOOLE, 1986).

2.1.7.1 Adubação verde na cultura do arroz

A maioria das lavouras de arroz de terras altas está localizada na região dos Cerrados, cujos solos possuem baixa fertilidade (FAGERIA; OLIVEIRA; STONE, 2003). A adubação verde apresenta potencial para aumentar a matéria orgânica do solo, proporcionando simultaneamente altos rendimentos em grãos (AULAKH et al., 2001).

O arroz possui sistema radicular fasciculado e superficial que explora o solo continuamente na mesma profundidade, diminuindo o estoque de nutrientes na camada arável (0-20 cm). Com a monocultura do arroz, ocorre a degradação da estrutura do solo, compactando-o e reduzindo a porosidade. A adubação verde pode suprir parte das exigências nutricionais do arroz e minimizar os efeitos prejudiciais da monocultura com relação à manutenção da produtividade do solo.

Estudo de aproveitamento de P no arroz pela crotalária, feijão-de-corda e sesbânia demonstra que a contribuição de P pelos resíduos vegetais depende da taxa de mineralização, que, por sua vez, é aumentada devido à baixa relação C: P e alto teor de P dos adubos verdes (HUNDAL; BISWAS; VIG, 1987).

2.1.8 Perdas de solo e conservação

O manejo inadequado do solo e a monocultura podem, ao longo do tempo, trazer sérias conseqüências, exaurindo-o de suas reservas orgânicas e minerais, transformando-o em terras de baixa fertilidade e erodindo grande parte do solo podendo tornar a área imprópria para o cultivo (ANDRADE, 1982).

A degradação dos solos nas áreas de cultivo, principalmente com cana-de-açúcar, é resultado da erosão. Essas perdas estão relacionadas a diversas variáveis, entre elas o tipo de solo, o manejo para a conservação, a época de plantio e o preparo do solo (ROSSETTO, 2004), principalmente nos solos tropicais, onde existem condições favoráveis à ocorrência deste fenômeno (ANDRADE, 1982).

No Brasil, a cana-de-açúcar ocupa área de destaque na agricultura, sendo cultivada sucessivamente no mesmo solo por vários anos. Nessas lavouras, após o último corte econômico do talhão ocorre a destruição de suas soqueiras e novo plantio da cana, muitas vezes menosprezando a rotação de culturas ou adição de matéria orgânica ao solo. A única preocupação restringe-se ao emprego da adubação mineral, o que eleva o custo de produção devido ao aumento do preço desses insumos. Além disso, devido ao manejo da cultura, têm surgido ainda problemas de compactação de solo. Assim, com o passar do tempo, a tendência é que ocorra queda da fertilidade, resultando em menores rendimentos na cultura (ANDRADE, 1982).

Dos diversos recursos de que podemos implantar para melhorar as características químicas, físicas e microbiológicas destes solos, ressalta em importância e viabilidade sustentável dos solos, a adição de matéria orgânica sob forma de adubação verde.

A produção de massa vegetal do adubo verde é um aspecto de grande importância, pois algumas espécies apresentam grande crescimento vegetativo, gerando enorme quantidade de massa, na qual haverá decomposição e reciclagem dos nutrientes.

A atividade canavieira, quando utiliza as práticas de conservação do solo e de aptidão agrícola, é considerada como atividade agrícola altamente conservadora do

solo (ROSSETTO, 2004). Vale salientar, que mesmo empregando a adubação verde, o solo deve ser bem manejado para que não ocasione problemas de perdas por erosão.

2.2 Materiais e métodos

O presente projeto foi desenvolvido por meio de três experimentos, sendo: Experimento I - Identificação e seleção de espécies de adubos verdes mais eficientes em absorver fósforo; Experimento II - Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pela cultura da cana-de-açúcar; Experimento III - Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pela cultura do arroz.

Nos itens a seguir, são descritos os experimentos bem como o detalhamento dos procedimentos adotados nas avaliações e nas caracterizações das espécies de adubos verdes e superfosfato triplo utilizados.

2.2.1 Caracterização do solo

O solo utilizado nos experimentos, classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico (EMBRAPA, 1999), foi coletado à profundidade de 0 a 0,2 m no município de Piracicaba-SP. As amostras de terra contendo 280 g kg⁻¹ de argila, 70 g kg⁻¹ de silte e 650 g kg⁻¹ de areia (CAMARGO; MONIZ; VALADARES, 1986), foram secas ao ar, posteriormente passadas em peneiras de malha de 4 mm e as propriedades químicas (Tabela 1) foram determinadas de acordo com os métodos analíticos descritos por Raji et al. (2001).

Tabela 1 – Características químicas do solo utilizado no experimento

pH ¹	MO	P ²	K ³	Ca ⁴	Mg ⁴	H+Al ⁵	SB	CTC	V
	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmol _c dm ⁻³ -----			-----			%
4,7	14	3	1,0	6,7	2,9	23,7	10,5	34,2	31

P, K, Ca e Mg - extração com resina; 1- Determinado em CaCl₂; 2- Espectrofotometria pelo método azul de molibdênio; 3- Fotometria de chama; 4- Espectrofotometria de absorção atômica; 5- SMP.

2.2.2 Diluição isotópica do ³²P

A atividade específica (DI; CONDRON; FROSSARD, 1997), fósforo isotopicamente trocável (valor L, LARSEN, 1952), o fósforo na planta proveniente do adubo verde e do SFT, a quantidade de fósforo na planta e o aproveitamento de fósforo (ZAPATA, 1990; DI; CONDRON; FROSSARD, 1997) foram calculados conforme as seguintes equações:

Atividade específica (S)

$$S = \frac{{}^{32}\text{P}}{{}^{31}\text{P}} \quad (1)$$

onde,

S: atividade específica do radioisótopo (DPM μg⁻¹ P);

³²P: atividade do radioisótopo na planta (DPM);

³¹P: conteúdo de P na planta (μg de P planta⁻¹)

DPM: desintegrações por minuto

Fósforo isotopicamente trocável

$$L = X \left[\left(\frac{S_o}{S_f} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

onde,

L: valor L (mgP kg⁻¹ solo);

S₀: atividade específica da solução aplicada (DPM µgP⁻¹);

S_f: atividade específica da planta (DPM µgP⁻¹);

X: quantidade de ³²P adicionado (mgP kg⁻¹);

Fósforo na cultura principal proveniente do adubo verde ou do SFT

$$\%P_{ppav \text{ ou } ppSFT} = \frac{S_{cultura}}{S_{av \text{ ou } SFT}} \times 100 \quad (3)$$

$$\%P_{ppsolo} = P_{total \text{ cultura}} - (\%P_{ppav} + \%P_{ppSFT}) \quad (4)$$

onde,

S_{cultura} = atividade específica da cultura principal (DPM µg⁻¹ P);

S_{av ou SFT} = atividade específica do adubo verde ou do SFT (DPM µg⁻¹ P);

Quantidade de fósforo na cultura

$$QP_{ppav \text{ ou } SFT \text{ ou } solo} = \frac{\%P_{ppav \text{ ou } SFT \text{ ou } solo} \times P_{total \text{ cultura}}}{100} \quad (5)$$

onde,

QP_{ppav ou SFT ou solo} = quantidade de P na cultura principal proveniente do adubo verde ou do SFT, ou do solo, ou do SFT+solo (mg);

Aproveitamento do fósforo

$$AP(\%) = \frac{QP_{ppav \text{ ou } SFT} \times 100}{P_{av \text{ ou } SFT}} \quad (6)$$

onde,

AP = aproveitamento de P (%);

P_{av} = P total aplicado na forma de adubo verde ou de SFT (mg).

2.2.3 Experimentos

Todos os experimentos foram desenvolvidos em casa de vegetação do Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, latitude S 22°42'30", longitude W 47°38'01" e altitude 554m.

2.2.3.1 Experimento I: Identificação e seleção de espécies de adubos verdes mais eficientes em absorver fósforo

Descrição das espécies de adubos verdes

Para a seleção dos adubos verdes mais eficientes em absorver fósforo foram estudadas 25 espécies (Tabela 2).

Tabela 2 - Espécies de adubos verdes avaliadas

NOME COMUM	NOME CIENTÍFICO
Braquiária ruzizensis	<i>Brachiaria ruzizensis</i>
Braquiária brizantha cv. Marandú	<i>Brachiaria brizantha</i>
Braquiária brizantha cv. Xaraés	<i>Brachiaria brizantha</i>
Calopogônio cv. comum	<i>Calopogonium muconoides</i>
Capim colonião	<i>Panicum maximum</i>
Crotalaria breviflora cv. comum	<i>Crotalaria breviflora</i>
Crotalaria juncea cv. IA-KR-1	<i>Crotalaria juncea</i>
Crotalaria mucronata cv. comum	<i>Crotalaria mucronata</i>
Crotalaria ochroleuca cv. comum	<i>Crotalaria ochroleuca</i>
Crotalaria spectabilis cv. comum	<i>Crotalaria spectabilis</i>
Estilosante cv. Campo Grande	<i>Stylosanthes guianensis</i>
Estilosante cv. Mineirão	<i>Stylosanthes guianensis</i>
Feijão de porco	<i>Canavalia ensiformis</i>
Feijão guandu cv. fava larga	<i>Cajanus cajan</i>
Feijão guandu anão cv. IAPAR 43	<i>Cajanus cajan</i>
Girassol cv. IAC-larama	<i>Helianthus annuus</i>
Girassol cv. IAC-Uruguai	<i>Helianthus annuus</i>
Labe-Labe cv. rongal	<i>Dolichos lablab</i>
Leucena cv. cunninghan	<i>Leucaena leucocephala</i>
Milheto cv. BN2	<i>Pennisetum glaucum</i>
Mucuna anã cv. comum	<i>Mucuna deeringiana</i>
Mucuna cinza cv. comum	<i>Mucuna cinereum</i>
Mucuna preta cv. comum	<i>Mucuna aterrima</i>
Sesbânia	<i>Sesbania virgata</i>
Tremoço branco cv. comum	<i>Lupinus albus</i>

Cultivo dos adubos verdes

As plantas foram cultivadas em vasos de plásticos revestidos com sacos plásticos contendo 2,5 kg de terra fina seca ao ar (TFSA). O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado com três repetições para cada espécie, totalizando 72 vasos.

A marcação do P do solo foi realizada com a aplicação de uma solução com o radioisótopo ^{32}P (74 MBq/vaso), livre de carregador e 200 mL kg^{-1} de água destilada. Após a aplicação dessa solução, o solo foi incubado durante 20 dias para atingir o equilíbrio isotópico $^{32}\text{P}/^{31}\text{P}$.

Seis sementes das espécies que apresentam tamanhos maiores (crotalária, feijão de porco, feijão guandu, girassol, labe labe, leucena, mucuna, soja perene e tremoço branco) e doze sementes das demais espécies foram semeadas em cada vaso e o desbaste foi realizado para duas plantas por vaso após 7 dias da germinação.

O nitrogênio e o potássio foram aplicados em todos os vasos nas doses de 100 mg kg^{-1} de N e K, na forma de uréia e cloreto de potássio, respectivamente. Os vasos foram regados diariamente com água destilada e o solo mantido a 70% da sua capacidade de retenção de água.

Aos 30 dias as plantas dos experimentos foram pulverizadas com inseticida (Deltamethrin) e acaricida (Abamectina) para evitar possíveis infestações de pragas.

As plantas foram cortadas aos 53 dias após a semeadura, secas em estufa com circulação forçada de ar a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ por 72 horas, pesadas e moídas em moinho tipo Willey (peneiras de 20 mesh).

Após a digestão com a mistura dos ácidos nítrico e perclórico, determinaram-se a atividade do ^{32}P por efeito Cerenkov (VOSE, 1980) em contador de cintilação em meio líquido (AWERBUCH; AVINIMELICH, 1970) e a concentração de P por espectrofotometria pelo método do vanadato/molibdato (SARRUGE; HAAG, 1974) medida através do sistema de Análise por Injeção em Fluxo (FIA) utilizando $0,25 \text{ mol L}^{-1}$ HClO_4 como solução transportadora (SILVA et al., 1998).

A concentração de K foi determinada por espectroscopia de emissão em fotômetro de chama, o S pelo método turbidimétrico e o Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn por espectrofotometria de absorção atômica.

Foram calculadas as atividades específicas (Equação 1), matéria seca e valores L (Equação 2) de cada espécie.

Os dados de P acumulado nas plantas e valor L das espécies de adubo verde foram dispostos na forma de matriz, que foi submetida à análise estatística de Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise de Agrupamento Hierárquico (AHA).

2.2.3.2 Experimento II: Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pela cultura da cana-de-açúcar

Com base nos resultados do experimento I (Item 2.3.1) foram selecionadas quatro espécies de adubos verdes (crotalária juncea, braquiária ruzizensis, guandu anão e estilosante campo grande). Os tratamentos para estudar o aproveitamento do P na planta proveniente do adubo verde e do superfosfato triplo (SFT) pela cana-de-açúcar estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Descrição dos tratamentos para avaliar o aproveitamento do P na planta proveniente do adubo verde, do superfosfato triplo (SFT) e do solo pela cana-de-açúcar

Tratamento	Adubo verde	Dose P** (mg kg ⁻¹)
Crotalária*	³² P-crotalária	0
Crotalária*+30	³² P-crotalária	30
Crotalária*+60	³² P-crotalária	60
Crotalária*+120	³² P-crotalária	120
Crotalária+30*	crotalária	30 (³² P-SFT)
Crotalária+60*	crotalária	60 (³² P-SFT)
Crotalária+120*	crotalária	120 (³² P-SFT)
Braquiária*	³² P-braquiária	0
Braquiária*+30	³² P-braquiária	30
Braquiária*+60	³² P-braquiária	60
Braquiária*+120	³² P-braquiária	120
Braquiária+30*	braquiária	30 (³² P-SFT)
Braquiária+60*	braquiária	60 (³² P-SFT)
Braquiária+120*	braquiária	120 (³² P-SFT)
Guandu*	³² P-feijão guandu	0
Guandu*+30	³² P-feijão guandu	30
Guandu*+60	³² P-feijão guandu	60
Guandu*+120	³² P-feijão guandu	120
Guandu+30*	feijão guandu	30 (³² P-SFT)
Guandu+60*	feijão guandu	60 (³² P-SFT)
Guandu+120*	feijão guandu	120 (³² P-SFT)
Estilosante*	³² P-estilosante	0
Estilosante*+30	³² P-estilosante	30
Estilosante*+60	³² P-estilosante	60
Estilosante*+120	³² P-estilosante	120
Estilosante+30*	estilosante	30 (³² P-SFT)
Estilosante+60*	estilosante	60 (³² P-SFT)
Estilosante+120*	estilosante	120 (³² P-SFT)

* marcado com ³²P.

** As doses de P foram aplicadas na forma de SFT.

Superfosfato triplo

Utilizou-se superfosfato triplo com 42% de P_2O_5 e atividade específica de 60 KBq ^{32}P mg^{-1} de P, foram aplicados 75 mg de SFT para os tratamentos com dose de 30 mg kg^{-1} de P, 150 mg de SFT para dose de 60 mg kg^{-1} de P e 300 mg de SFT para dose de 120 mg kg^{-1} de P em vasos contendo 2,5 kg de solo.

Marcação do adubo verde com o radioisótopo

As plantas das espécies de adubos verdes foram produzidas em vasos de plásticos revestidos com sacos plásticos contendo 5 kg de TFSA com 10 repetições para cada espécie, sendo cinco não marcadas e cinco marcadas com o radioisótopo ^{32}P .

Em função do objetivo de determinar-se na cana-de-açúcar o P proveniente do adubo verde, do SFT e do solo, foram também produzidas plantas de adubo verde concomitantemente em amostras de terra do mesmo solo sem a marcação do radioisótopo.

A marcação do P do solo foi realizada com a aplicação de uma solução com o radioisótopo ^{32}P (74 MBq/vaso) com 20 mg/vaso de carregador, na forma de KH_2PO_4 e 200 mL kg^{-1} de água destilada. Após a aplicação dessa solução, o solo foi incubado durante 20 dias para atingir o equilíbrio isotópico $^{32}P/^{31}P$.

Dez sementes de crotalária juncea, feijão guandu anão, braquiária ruzizensis e estilosante cv. campo grande foram semeadas em cada vaso e o desbaste foi realizado para quatro plantas por vaso, no caso da crotalária e do guandu e, oito plantas para braquiária e estilosante.

O nitrogênio e o potássio foram aplicados nas doses de 200 mg kg^{-1} de N e K na forma de uréia e cloreto de potássio, respectivamente, em todos os vasos. Os vasos foram regados diariamente com água destilada e o solo mantido a 70% da sua capacidade de retenção.

Após 30 dias da germinação, as plantas dos experimentos foram pulverizadas com inseticida (Deltamethrin) e acaricida (Abamectina) para evitar possíveis infestações de pragas nas plantas.

As plantas foram cortadas rente ao solo aos 76 dias após a semeadura, foram trituradas em um triturador de resíduos orgânicos, secas em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C por 72 horas e pesadas.

As raízes dos adubos verdes foram lavadas em água deionizada para a remoção de terra, secas em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C por 72 horas, pesadas e cortadas em pedaços (+/- 3 cm).

Conforme a produção da MSPA e da MSR, a relação da produção dessas e a quantidade aplicada no campo, foram calculadas a quantidade de parte aérea e raiz que será adicionada nos vasos do experimento da cana-de-açúcar.

Quantidade de matéria seca do adubo verde incorporado ao solo

Nos cálculos da quantidade de adubo verde foram consideradas as produções de 13 t ha⁻¹ de crotalária, 7 t ha⁻¹ de guandu, 14 t ha⁻¹ de braquiária e 8 t ha⁻¹ de estilosante aplicados em campo (CALEGARI et al, 1993). Sendo a densidade do solo de 1,2 kg dm⁻³ e a capacidade de 2,5 kg de solo por vaso no experimento utilizando cana-de-açúcar, foram adicionados por vaso, tanto para os tratamentos com adubo verde marcado como os não marcados: 13,5 g de MSPA(matéria seca da parte aérea) e 4 g de MSR (matéria seca da raiz) de crotalária; 15 g de MSPA e 12 g de MSR de braquiária; 7,5 g de MSPA e 3,5 g de MSR de guandu e 8 g de MSPA e 3 g de MSR de estilosante.

Para uma melhor homogeneização da aplicação destes adubos verdes ao solo foram misturados primeiramente a MSPA e MSR e depois incorporados ao solo, para que a decomposição desse material seja mais rápida em relação à adição de adubo verde na forma de cobertura do solo.

Preparo das mudas de cana-de-açúcar

Os toletes de cana-de-açúcar, variedade RB 867515, com gemas vegetativas foram fornecidos pelo Grupo COSAN – Usina da Barra, previamente tratados termicamente a 52 °C por 30 minutos.

Os toletes foram conduzidos no ambiente de casa-de-vegetação, em bandejas plásticas, contendo uma mistura de areia e vermiculita. Os toletes foram mantidos nestas condições até formarem mudas com dois pares de folhas totalmente abertas por aproximadamente 40 dias. Foram selecionadas as mudas com tamanhos semelhantes e de boa aparência.

Aproveitamento do P do adubo verde pelas plantas de cana-de-açúcar

Realizou-se calagem em função da análise química de terra (item 2.2.1), aplicando-se calcário com PRNT de 110% para elevar a saturação por bases a 60% para a cana-de-açúcar (VITTI et al., 2006).

Duas mudas de cana-de-açúcar foram transplantadas em vasos plásticos revestidos com sacos plásticos contendo 2,5 kg de TFSA. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com três repetições para cada tratamento, totalizando 87 vasos.

O nitrogênio e o potássio foram aplicados nas doses de 350 mg kg⁻¹ de N (sulfato de amônio) e 350 mg kg⁻¹ de K (cloreto de potássio). Os micronutrientes B, Cu, Mo e Zn foram aplicados adicionando 10 mL vaso⁻¹ na forma de solução nutritiva (SARRUGE, 1975). As plantas foram regadas diariamente com água destilada e o solo mantido a 70% da sua capacidade de retenção durante todo o experimento.

As plantas foram colhidas aos 54 dias após o plantio e separadas em parte aérea (folhas + colmos) e raiz. Foram pesadas e moídas em moinho tipo Willey (peneiras de 20 mesh).

Após a digestão das amostras vegetais com a mistura dos ácidos nítrico e perclórico, a atividade do ³²P foi determinada em contador de cintilação em meio líquido

(AWERBUCH; AVINIMELICH, 1970) por efeito Cerenkov (VOSE, 1980). A concentração de P foi determinada por colorimetria pelo método metavanadato, (SARRUGE; HAAG, 1974), e determinado através do sistema de Análise por Injeção em Fluxo – FIA (SILVA, 1998). Com os dados de MSPA e da MSR e de concentração de P, calculou-se o conteúdo de P na MSPA (P acumulado).

A partir do cálculo da atividade específica, segundo a equação 1 foi calculada a porcentagem de P absorvido pela cana-de-açúcar proveniente do adubo verde ou do fertilizante – SFT ($\%P_{ppSFT}$) ou calculada segundo a equação 3 e proveniente do solo ($\%P_{ppsolo}$) calculada pela diferença entre o P_{ppav} e P_{ppSFT} segundo a equação 4 (Item 2.2.2).

2.2.3.3 Experimento III: Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pela cultura do arroz

A partir dos resultados obtidos quanto à eficiência em absorver P (Item 2.3.1) foram utilizadas neste experimento as espécies de crotalária e feijão guandu. Os tratamentos para estudar o aproveitamento do P na planta proveniente do adubo verde, do SFT e do solo pelo arroz estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Descrição dos tratamentos para avaliar o aproveitamento do P na planta proveniente do adubo verde, do superfosfato triplo (SFT) e do solo por plantas de arroz

Tratamento	Adubo verde	Dose P** (mg kg ⁻¹)
Controle	-----	0
30*	-----	30 (³² P-SFT)
60*	-----	60 (³² P-SFT)
120*	-----	120 (³² P-SFT)
Crotalária*	³² P-crotalária	0
Crotalária*+30	³² P-crotalária	30
Crotalária*+60	³² P-crotalária	60
Crotalária*+120	³² P-crotalária	120
Crotalária+30*	crotalária	30 (³² P-SFT)
Crotalária+60*	crotalária	60 (³² P-SFT)
Crotalária+120*	crotalária	120 (³² P-SFT)
Guandu*	³² P-feijão guandu	0
Guandu*+30	³² P-feijão guandu	30
Guandu*+60	³² P-feijão guandu	60
Guandu*+120	³² P-feijão guandu	120
Guandu+30*	feijão guandu	30 (³² P-SFT)
Guandu+60*	feijão guandu	60 (³² P-SFT)
Guandu+120*	feijão guandu	120 (³² P-SFT)

* marcado com ³²P.

** As doses de P foram aplicadas na forma de SFT.

Preparo do superfosfato triplo

Utilizou-se superfosfato triplo com 42% de P₂O₅ e atividade específica de 60 KBq mg⁻¹ de P. Foram aplicados 25 mg de SFT para os tratamentos com dose de 30 mg kg⁻¹ de P, 50 mg de SFT para dose de 60 mg kg⁻¹ de P e 100 mg de SFT para dose de 120 mg kg⁻¹ de P em vasos contendo 1,5 kg de solo.

Marcação dos adubos verdes com ^{32}P

As espécies de adubos verdes foram conduzidas em vasos plásticos revestidos com sacos plásticos contendo 5 kg de TFSA com 10 repetições para cada espécie, destas cinco não marcadas e cinco marcadas com o radioisótopo ^{32}P .

Em função do objetivo de determinar-se no arroz o P proveniente do adubo verde, do SFT e do solo, também serão produzidas plantas de adubo verde concomitantemente em amostras de terra do mesmo solo sem a marcação do radioisótopo.

A marcação do P do solo foi realizada com a aplicação de uma solução com o radioisótopo ^{32}P (74 MBq/vaso) com 200 mg/vaso de carregador, na forma de KH_2PO_4 e 200 mL kg^{-1} de água destilada. Após a aplicação dessa solução, o solo foi incubado durante 20 dias para atingir o equilíbrio isotópico $^{32}\text{P}/^{31}\text{P}$.

Dez sementes de crotalária juncea e de feijão guandu anão foram semeadas em cada vaso e o desbaste foi realizado para quatro plantas por vaso.

O nitrogênio e o potássio foram aplicados em todos os vasos nas doses de 200 mg kg^{-1} de N e K como uréia e cloreto de potássio, respectivamente. As plantas foram regadas diariamente com água destilada e o solo mantido a 70% da sua capacidade de retenção.

As plantas dos experimentos foram pulverizadas com inseticida (Deltamethrin) e acaricida (Abamectina) para evitar possíveis infestações de pragas nas plantas.

As partes aéreas dos adubos verdes foram cortadas aos 76 dias após a semeadura, foram trituradas em um triturador de resíduos orgânicos, secas em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C por 72 horas e pesadas para determinação da MSPA.

As raízes dos adubos verdes foram coletadas aos 76 dias após a semeadura, lavadas em água deionizada para a remoção do solo, secas em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C por 72 horas, pesadas para determinação da MSR e cortadas em pedaços (+/- 3 cm).

Conforme a produção de MSPA e da MSR, a relação da produção dessas e a quantidade aplicada no campo, foram calculadas a quantidade de parte aérea e raiz que será adicionada nos vasos do experimento com a cultura do arroz.

Quantidade de matéria seca do adubo verde incorporado ao solo

Considerando 13 t ha^{-1} de crotalária e 7 t ha^{-1} de guandu (CALEGARI et al., 1993) aplicados em campo, a densidade do solo de $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$ e a capacidade de $1,5 \text{ kg}$ de solo por vaso para a cultura do arroz, foram adicionados por vaso, tanto para os tratamentos com adubo verde marcado como os não marcados: $8,1 \text{ g}$ de MSPA e $2,4 \text{ g}$ de MSR de crotalária; e, $4,5 \text{ g}$ de MSPA e $2,1 \text{ g}$ de MSR de guandu.

Para uma melhor homogeneização da aplicação destes adubos verdes ao solo foram misturados primeiramente a MSPA e MSR e depois incorporados ao solo, para que a decomposição desse material seja mais rápida em relação à adição de adubo verde na forma de cobertura do solo.

Aproveitamento do P do adubo verde pelas plantas de arroz

Em função da análise química de terra (Item 2.2.1) realizou a calagem, aplicando-se calcário com PRNT de 110% para elevar a saturação por bases a 60% para o arroz (RAIJ et al., 1997).

Foram semeadas seis sementes de arroz cultivar BRSMG Conai, em vasos plásticos revestidos com sacos plásticos contendo $1,5 \text{ kg}$ de TFSA. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com três repetições para cada tratamento, totalizando 54 vasos. Após uma semana foram desbastadas permanecendo duas plantas por vaso.

O nitrogênio e o potássio foram aplicados nas doses de 100 mg kg^{-1} de N (sulfato de amônio), 100 mg kg^{-1} de N (uréia) e 200 mg kg^{-1} de K (cloreto de potássio). Os micronutrientes B, Cu, Mo e Zn foram aplicados pela adição de 10 mL vaso^{-1} de solução

nutritiva (SARRUGE, 1975). As plantas foram regadas diariamente com água destilada e o solo mantido a 70% da sua capacidade de retenção durante todo o experimento.

As plantas foram colhidas aos 35 dias após o plantio e separadas em parte aérea e raiz. Foram pesadas para determinação da MSPA e da MSR e moídas em moinho tipo Willey (peneiras de 20 mesh).

As determinações de P total, ^{32}P e aproveitamento do P da planta de arroz pelo adubo verde ou SFT foram realizadas conforme descritas no experimento II (item 2.2.3.2).

2.2.4 Análise estatística dos dados

No experimento I, onde foram selecionadas as espécies de adubos verdes mais eficientes em absorver o fósforo, empregou-se o pacote estatístico SAS[®] - “Statistical Analysis System” (SAS INSTITUTE, 1996) para realização de agrupamentos binários para definição dos grupos de acordo com o grau de similaridade apresentado entre as amostras (BEEBE; KOWALSKI, 1987). Foram utilizados comandos PROC PRINCOMP e PROC CLUSTER – método de Average, respectivamente para Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise de Agrupamento Hierárquico (AHA).

Para os experimentos II e III, que avaliaram a eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubo verde e aproveitamento desse nutriente pelas culturas da cana-de-açúcar e do arroz, a análise estatística dos resultados foi realizada de acordo com os quadros de análise de variância apresentados na Tabela 5, utilizando o pacote estatístico SAS[®], o SISVAR[®] versão 4.0 (FERREIRA, 2000) e o SigmaPlot[®] versão 10 (SYSTAT SOFTWARE Inc, 2006). Os dois primeiros foram utilizados para a análise de variância, correlações e para o desdobramento das interações significativas, enquanto que o SigmaPlot[®] foi utilizado conjuntamente para as análises de regressão para as doses de fósforo, obtendo-se as respectivas significâncias dos parâmetros das equações ajustadas.

Tabela 5 - Quadro da análise de variância dos experimentos

Fonte de Variação	Graus de Liberdade
- Experimento II -	
Espécies de adubo verde	7
Dose de fósforo	3
Espécies de adubo verde X doses de fósforo	21
Tratamento	27
Resíduo	64
Total	95
- Experimento III -	
Espécies de adubo verde	4
Dose de fósforo	3
Espécies de adubo verde X doses de fósforo	12
Tratamento	17
Resíduo	40
Total	59

Na análise de regressão relacionaram-se as variáveis dependentes: produção de MSPA e MSR, teor de P acumulado na MSPA e na MSR, P na planta proveniente do adubo verde ou do SFT, quantidade de P na planta proveniente do adubo verde ou do SFT e aproveitamento de P em função das doses de fósforo na forma de SFT. Para descrever as relações entre os parâmetros estudados foram testados os seguintes modelos:

Modelos Polinomiais

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (7)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \varepsilon \quad (8)$$

Em que:

Y: variável analisada;

X: dose de fósforo;

β_0 : ponto de interceptação da regressão com o eixo y;

β_1 : coeficiente angular da regressão;

β_2 : coeficiente da regressão quadrática;

ε : termo de erro para a regressão proposta.

Modelos exponenciais

$$Y = \beta_1 e^{-\beta_2 X} + \varepsilon \quad (9)$$

$$Y = \beta_1 \left(\frac{\beta_2}{X - \beta_3} \right) + \varepsilon \quad (10)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 e^{-\beta_2 X} + \varepsilon \quad (11)$$

Em que:

Y: variável analisada;

X: dose de fósforo;

β_1 : parâmetro correspondente ao ponto de estabilidade (Y mínimo) da regressão não linear;

β_0 , β_2 e β_3 : parâmetros de regressão não linear do modelo;

ε : termo de erro para a regressão proposta.

Modelo Peak Gaussian

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \left[-0.5 \left(\frac{X - X_0}{\beta_2} \right)^2 \right] + \varepsilon \quad (12)$$

Em que:

Y: variável analisada;

X: dose de fósforo;

X_0 : valor de X para Y máximo;

β_0 : valor mínimo de Y;

β_1 : amplitude da variável dependente (Y máximo – Y mínimo);

β_2 : parâmetro relacionado à largura do pico, na metade de Y máximo;

ε : termo de erro para a regressão proposta.

Modelo Sigmoidal

$$Y = \frac{\beta_1}{1 + e^{\left(-\frac{X - \beta_2}{\beta_3}\right)}} + \varepsilon \quad (13)$$

Em que:

Y: variável analisada;

X: dose de fósforo;

β_1 : parâmetro correspondente ao ponto de estabilidade (Y máximo) da regressão não linear;

β_2 e β_3 : parâmetro de regressão não linear do modelo.

Para a escolha do modelo adequado foram considerados aspectos de ordem teórica e de aplicação prática (ALVAREZ, 1994). O modelo que apresentou o maior coeficiente de determinação e o menor desvio padrão da média foi o ajustado. Para cada modelo de regressão, foi avaliada a significância dos estimadores dos parâmetros da equação considerando-se as probabilidades de 1% e 5% e, não significativo, sendo representados respectivamente pelos símbolos **, * e ^{ns}.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Experimento I. Identificação e seleção de espécies de adubos verdes mais eficientes em absorver fósforo

Para seleção dessas espécies utilizou-se o método de análise por componentes principais (PCA), o qual proporciona estudo multivariado dos dados experimentais obtidos facilitando a visualização da correlação entre amostras e variáveis. Os métodos de análise por agrupamento hierárquico (AHA) foi usado com o objetivo de verificar as semelhanças entre as amostras com base nos teores de P acumulado na planta e o

valor L determinados para as diversas espécies de adubo verde, através do cálculo de similaridade (calculada utilizando a distância Euclideana entre as amostras).

Foram aplicadas a PCA e a AHA à matriz de dados gerada (25x13) com os resultados obtidos dos adubos verdes. O pré-processamento usado foi o auto-escalamento. Neste pré-processamento centram-se os dados na média e dividem-se cada um pelo desvio padrão, de forma que todas as variáveis - massa seca, conteúdo de P, P acumulado, atividade específica e valor L, Ca acumulado, Mg acumulado, S acumulado, Cu acumulado, Fe acumulado, Mn acumulado e Zn acumulado - passam a ter a mesma importância, ou seja, o mesmo peso.

A AHA definiu três grupos (Figura 2), a saber:

- Grupo 1 (G1): formado pelo tremoço.
- Grupo 2 (G2): reúne o estilósante mineirão e o campo.
- Grupo 3 (G3): composto pelas espécies feijão de porco, leucena, crotalária mucronata, crotalária breviflora, mucuna preta, mucuna cinza, mucuna anã, labe labe, girassol uruguai, girassol iarama, crotalária juncea, milho, capim colônia, braquiária xaraes, feijão guandu anão, feijão guandu fava larga, sesbânia, crotalária ochroleuca, crotalária spectabilis, calopogônio, braquiária marandú e braquiária ruzizensis.

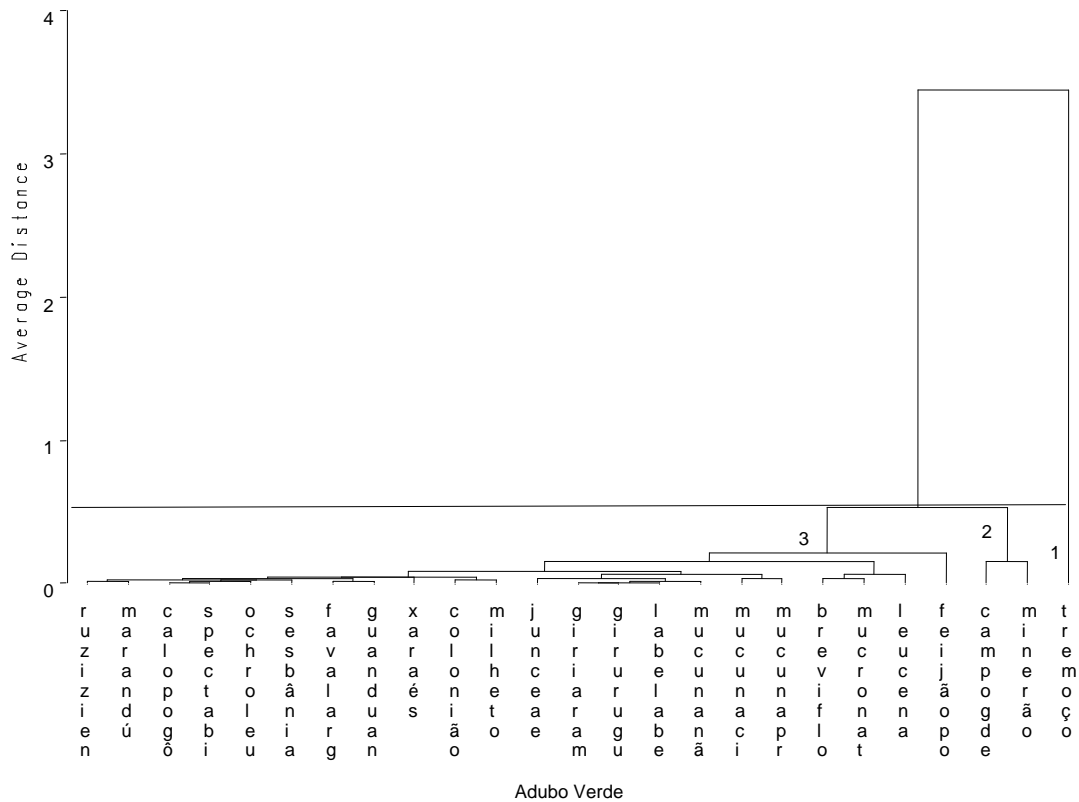


Figura 2 - Dendrograma obtido pelo método hierárquico do vizinho mais próximo com base na distância de 0,5, para as espécies de adubo verde. Análise de Agrupamento Hierárquico (AHA) – Método Average – para variáveis, P acumulado na matéria seca da parte aérea (MSPA) e valor L

A PCA explica os agrupamentos por meio das duas primeiras componentes, que representam 76,25% da variância entre os dados analisados (Figura 2.). O modelo que melhor explica os agrupamentos é aquele definido pela PCA-Eixo 1 e pela PCA-Eixo 2. A PCA-Eixo 1 indica que 63,85% da variância total entre as amostras é definida pelo P acumulado. A PCA-Eixo 2, com 12,39% da variância total, é definida pelo valor L.

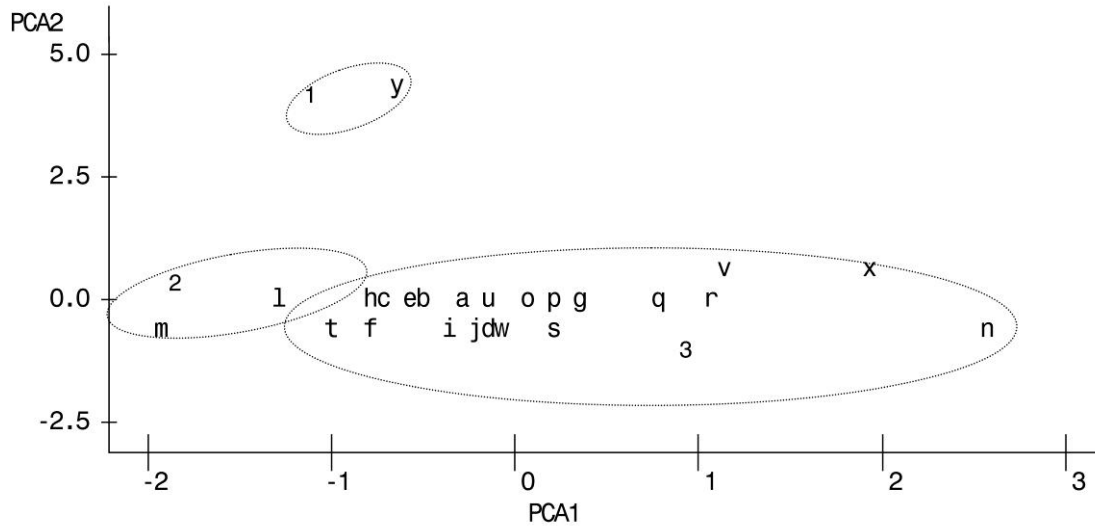


Figura 3 - Análise de componentes principais (PCA). Plano de elipses e dispersão de pontos dos grupos das espécies de adubos verde

As leguminosas e as gramíneas são utilizadas como plantas de cobertura. No entanto, devem ter algumas características desejáveis para os seus efeitos benéficos para obter êxito na cultura principal e facilitar o sistema de cultivo (FAGERIA; BALIGAR; BAILEY, 2005). As espécies a serem utilizadas como adubos verdes devem proporcionar produção de biomassa suficiente para cobrir a área da superfície e melhorar o rendimento da cultura principal, como fornecedora de nutrientes, além de ser compatível com o manejo da cultura principal. (BALIGAR; FAGERIA, 2007).

Os conhecimentos da dinâmica de decomposição de resíduos vegetais das plantas condicionadoras e dos seus efeitos na disponibilidade de fósforo no solo, em formas mais prontamente disponíveis, são importantes para se recomendar o uso dessas plantas seja em cobertura (plantio direto), seja com incorporação (adubação verde) (CARVALHO, 2005).

Entretanto, a incorporação dos resíduos dos adubos verdes ao solo resulta em maiores benefícios em relação a sua manutenção na superfície do solo (ALCÂNTARA et al., 2000). Outros estudos apresentaram resultados positivos da incorporação de resíduos vegetais sobre os parâmetros de fertilidade, os quais são atribuídos à decomposição mais acelerada, conseqüentemente, à liberação mais rápida de nutrientes (DE-POLLI; CHADA, 1989; ALCÂNTARA et al., 2000), sobretudo, o fósforo limitante no solo de Cerrado.

As espécies de adubos verdes podem relativamente converter o P indisponível nativo no solo ou residual dos fertilizantes em formas químicas mais disponíveis para próximas culturas. O tremoço pode absorver mais P do solo que alfafa, trevo, ervilha, ervilhaca e trigo desenvolvidos em solos com deficiência em P (BRAUM; HELMKE, 1995; CAVIGELLI; THIEN, 2003).

Quando as plantas são utilizadas como adubo verde, o P presente na fração solúvel está prontamente disponível no solo e facilmente absorvido por plantas subseqüentes. Por outro lado, essa fração pode ser rapidamente adsorvida as partículas de argila, acumulando-se na fração não-lábil ou pouco lábil, interferindo na absorção imediata do P (NOVAIS; SMYTH, 1999).

A produção de massa vegetal do adubo verde é um aspecto de grande importância, pois algumas espécies apresentam grande crescimento vegetativo. Em estudo comparando feijão guandu, feijão de porco, mucuna preta, mucuna rajada, crotalária juncea e crotalária paulina, verificou-se que feijão guandu e crotalária juncea foram às espécies que mais se destacaram na produção de massa verde e matéria seca (KIEHL, 1960).

Em outro estudo com diferentes adubos verdes, também observou que o feijão guandu apresentou maior potencial para penetração de raízes no solo, maior produção de massa seca e maior quantidade de nutrientes imobilizados (ALVARENGA, 1993).

Em estudo para avaliar a decomposição dos resíduos vegetais sob cultivo de milho em sucessão a plantas de cobertura, em plantio direto e com incorporação dos resíduos, a mucuna cinza apresentou produções mais elevadas de matéria seca em relação ao nabo forrageiro e o feijão guandu. Entretanto, a mucuna cinza e o milheto apresentaram menores concentrações de P na parte aérea em relação ao nabo-forrageiro quando incorporado ao solo (CARVALHO et al., 2008).

Estudo comparando a capacidade de reciclagem e mobilização dos nutrientes entre leguminosas e gramíneas, utilizadas como adubo verde, observaram que o guandu e a crotalária juncea apresentaram melhores resultados em comparação a braquiária, devido à maior produção de biomassa e das maiores concentrações de nutrientes na biomassa (ALCÂNTARA et. al., 2000).

O tremoço, o guandu e o estilosante são espécies bem adaptados em solos ácidos deficientes em P (LI et al., 2009; WANG et al., 2007; AE et al., 1993; GARDNER; BARBER; PARBERY, 1983). As raízes do tremoço secretam grandes quantidades de ácido orgânicos, entre eles, o ácido cítrico pelos protéoides das raízes (GARDNER; BARBER; PARBERY, 1983; DINKELAKER; RÖMHELD; MARSCHNER, 1989; JOHNSON; VANCE; ALLAN, 1996; KEERTHISINGLE et al., 2002; SHANE et al., 2008) e o guandu libera o P dos fosfatos de Fe e Al através da secreção pelas raízes dos ácidos piscídico, malônico e oxálico (OTANI; AE; TANAKA, 1996; HOCKING, et al., 1997; HOCKING; RANDAL, 2001). As raízes dos estilosantes exsudam citrato e liberam o P dos fosfatos de Fe e Al (LI et al., 2009). Esses ácidos orgânicos solubilizam o P fixado aumentando assim a absorção de P pela planta subsequente (MARSCHNER et al., 1986; LI et al., 2009;), tornando essas espécies resistentes à deficiência de P no solo

Nesse estudo, o guandu não foi classificado como uma das espécies mais eficientes em absorver P menos disponível (Figura 3). Entretanto, a vantagens de ser cultivado como cobertura é a sua tolerância a altas temperaturas e à seca, a eficiência na utilização de nutrientes em solos de baixa fertilidade e são livres de doenças e insetos (BALIGAR; FAGERIA, 2007).

A partir dos resultados obtidos pela PCA e AHA neste estudo (Figura 2 e 3), concluiu-se que o tremoço foi a espécie de adubo verde mais eficiente em absorver o P do solo, seguido dos estilosantes. As demais espécies se enquadram no mesmo grupo, não diferenciando quanto à absorção de P quando as variáveis escolhidas para a identificação desses grupos foram P acumulado e valor L.

Vale a ressalva que para a escolha das espécies agrupadas no grupo 3 é necessário o conhecimento do manejo da cultura principal que ser cultivada, evitando possíveis futuros problemas, como por exemplo, cana-de-açúcar com mucuna, esta pode apresentar sementes dormentes que podem geminar em épocas impróprias, prejudicando a colheita da cultura principal.

2.3.2 Experimento II: Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pela cultura da cana-de-açúcar

O P aplicado nos vasos na forma de adubo verde, tanto para o experimento com a parte aérea e com a raiz da cana-de-açúcar (Tabela 6), foi calculado baseado na quantidade de adubo verde aplicado no campo e a quantidade de matéria seca obtidas na fase de produção e marcação dos adubos verdes, conforme descritas no item 2.2.3.2.

Tabela 6 - Quantidade de fósforo aplicado por vaso pela adição de adubos verde

Adubo verde	Raiz	Parte Aérea	
		Inteira	
mg/vaso (P)			
Braquiária ruziziensis	21,9	40,5	62,4
Crotalária juncea	12,4	50,3	62,7
Estilosante campo	12,5	45,2	57,7
Guandu anão	45,9	54,4	100,3

2.3.2.1 Parte aérea

Produção de matéria seca da parte aérea

O peso de MSPA da cana-de-açúcar foi afetado significativamente pelas doses de fósforo, exceto a crotalária + SFT. No entanto, o comportamento dos adubos verdes foi diferente entre eles (Figura 4). O modelo ajustado para a braquiária + SFT foi o linear, para o estilosante + SFT foi o *Peak Gaussian*, enquanto o guandu + SFT ajustou o modelo exponencial (Tabela 7).

Para todas as interações estudadas, as doses de P foram superiores em resposta ao tratamento sem adição de P na forma de SFT, porém não houve diferença entre as doses de P (Tabela 8).

Tabela 7 - Equações de regressões para peso de matéria seca da parte aérea da cana-de-açúcar cultivada com diferentes adubos verdes e doses de P, na forma de superfosfato triplo

Adubo verde	Equação	R ²
Braquiária	$\hat{y} = 10,35 + 0,06 \cdot x$	0,94
Estilosante	$\hat{y} = 16,71 \cdot e^{\left[-0,5 \left(\frac{x-0,95^{ns}}{132,71^{ns}}\right)^2\right]}$	0,72
Guandu	$\hat{y} = 10,56 + 6,32(1 - 0,95 \cdot x)$	0,98

*: ns Significativo ao nível de 5% e não significativo, respectivamente.

O tratamento da braquiária + SFT apresentou aumento da produção de MSPA da cana com o acréscimo da dose de fósforo. O estilosante + SFT apresentou maior produção próximo a dose de 60 mg/vaso de P e depois uma estabilidade na produção, ou seja, doses superiores a 60 mg/vaso não influenciam a produção de MSPA da cana-de-açúcar. O guandu + SFT apresentou seu ponto máximo próximo a dose de 60 mg/vaso de P e a partir dessa dose observou-se decréscimo na produção.

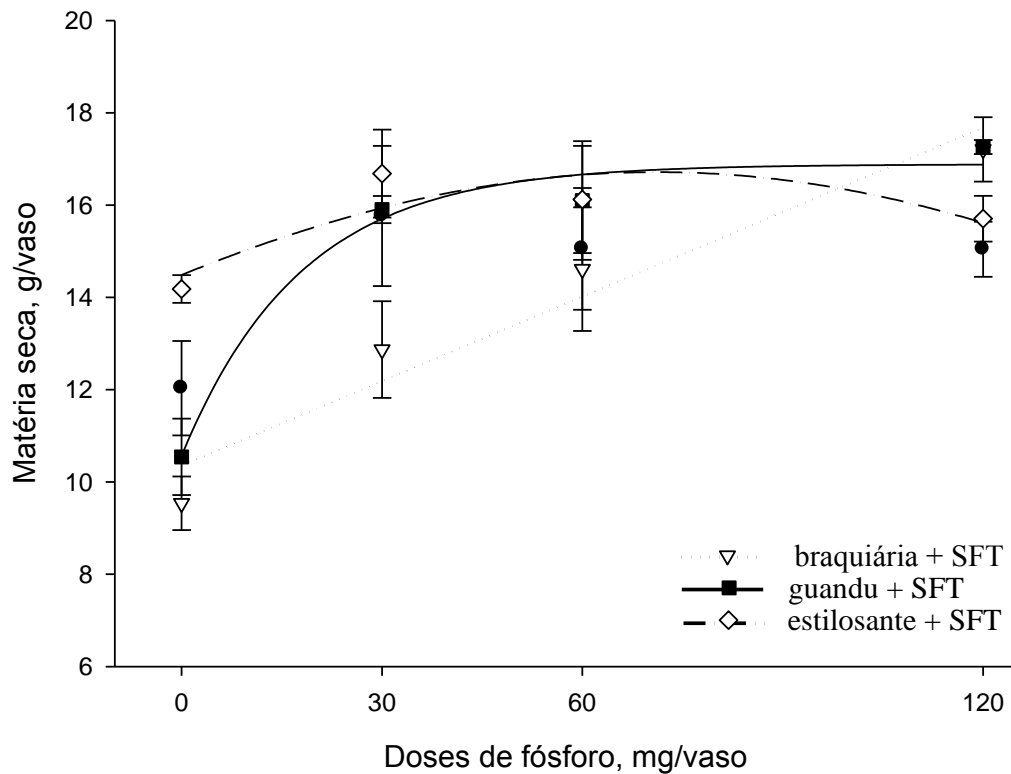


Figura 4 - Matéria seca da parte aérea da cana-de-açúcar cultivada com diferentes adubos verdes e doses de P, na forma de superfosfato triplo

Tabela 8 - Desdobramento da interação entre adubo verde e doses de fósforo, sobre a matéria seca da parte aérea das plantas de cana-de-açúcar⁽¹⁾

Adubo verde	Doses de fósforo				Média do adubo verde
	0	30	60	120	
----- matéria seca (g/vaso) -----					
Braquiária	9,54 Bc	12,87 Bbc	14,62 Aab	17,21 Aa	13,56 B
Crotalária	12,03 ABb	15,77 ABa	15,06 Aab	15,05 Aab	14,48 AB
Estilosante	14,18 Aa	16,68 Aa	16,12 Aa	15,71 Aa	15,67 A
Guandu	10,56 Bb	18,13 Aa	16,10 Aa	17,26 Aa	15,51 A
Média das doses	11,58 b	15,86 a	15,47 a	16,31 a	14,80 ⁽²⁾

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ média geral

Considerando as médias dos adubos verdes a braquiária apresentou a menor produção de MSPA da cana, enquanto que o estilosante e o guandu responderam com a maior produção de MSPA. Para as médias das doses de P, as adições de SFT favorecem a produção de MSPA, o que já era esperado, porém não há diferença entre as doses.

O desdobramento da interação adubo verde e SFT demonstrou que para o estilosante, a produção de MSPA da cana-de-açúcar nos tratamentos sem adição de P, foi superior estatisticamente aos demais adubos verdes. As leguminosas foram superiores a gramínea na produção de MSPA quando adicionou 30 mg/vaso de P. Para as doses acima de 60 mg/vaso de P não houve diferença entre os adubos verde.

Fósforo acumulado na parte aérea da cana-de-açúcar

O fósforo acumulado na parte aérea da cana-de-açúcar foi significativo para todos os adubos verdes independente da dose de P aplicado na forma de SFT. Entretanto, o comportamento observado da crotalária + SFT e do guandu + SFT foram diferentes aos da braquiária + SFT e do estilosante + SFT. O modelo de regressão ajustado para a crotalária + SFT foi o *Peak Gaussian*, para o guandu + SFT foi o linear e para braquiária + SFT e o estilosante + SFT foi a hipérbola (Tabela 9). Para todas as interações analisadas, as doses de P foram maiores para os tratamentos com $120 > 60 = 30 > 0$ mg/vaso de P na forma de SFT (Tabela 10).

Tabela 9 - Equações de regressões para o fósforo acumulado na matéria seca da parte aérea da cana-de-açúcar cultivada com diferentes adubos verdes e doses de P, na forma de superfosfato triplo

Adubo verde	Equação	R ²
Braquiária	$\hat{y} = 9,26 + \frac{10,86^{**}x}{48,91 + x}$	0,99
Crotalária	$\hat{y} = 17,76^{**} e^{\left[-0,5\left(\frac{x-115,44^{**}}{111,18^{**}}\right)^2\right]}$	0,99
Estilosante	$\hat{y} = 14,54 + \frac{5,47^*x}{26,27 + x}$	0,99
Guandu	$\hat{y} = 9,69 + 0,11^{**}x$	0,99

* ** Significativo ao nível de 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Todos os tratamentos apresentaram aumento do fósforo acumulado com o acréscimo de P até a dose máxima (Figura 5). O guandu + SFT aumentou de forma linear até 120 mg/vaso de P (Tabela 9).

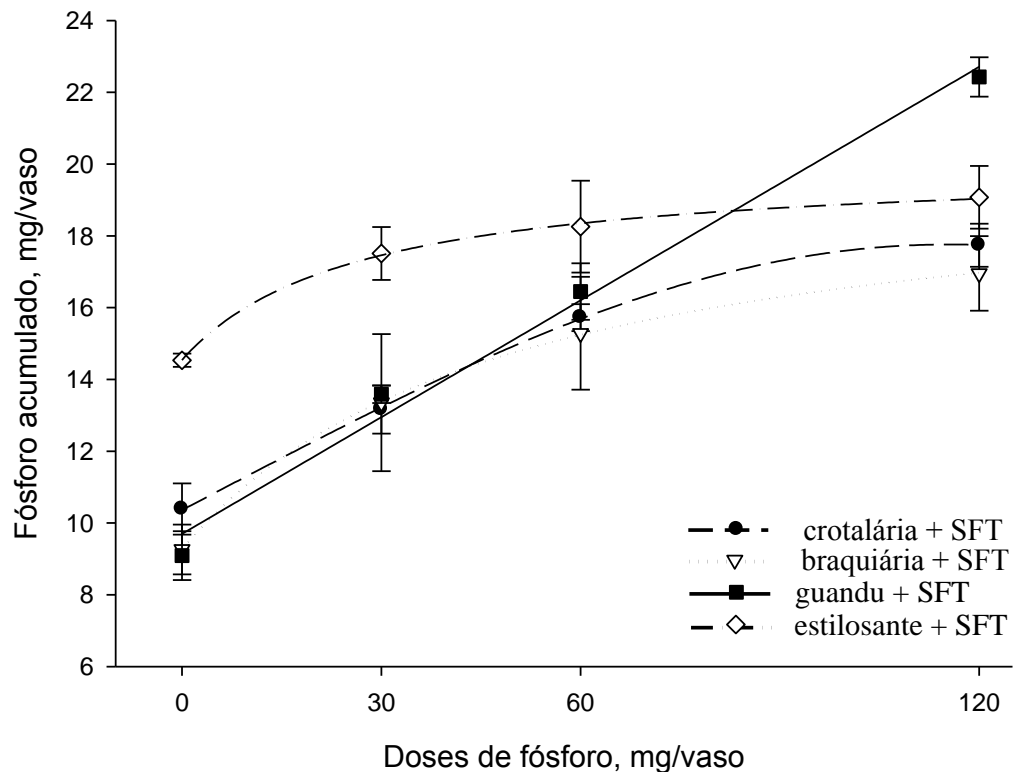


Figura 5 - Fósforo acumulado na matéria seca da parte aérea da cana-de-açúcar cultivada com diferentes adubos verdes e doses de P, na forma de superfosfato triplo

Tabela 10 - Desdobramento da interação entre adubo verde e doses de fósforo, sobre o fósforo acumulado na matéria seca da parte aérea da cana-de-açúcar⁽¹⁾

Adubo verde	Doses de fósforo				Média do adubo verde
	0	30	60	120	
----- fósforo acumulado (mg/vaso) -----					
Braquiária	9,26 Bc	13,36 Bb	15,29 Aab	16,96 Ba	13,72 C
Crotalária	10,39 Bc	13,16 Bbc	15,73 Aab	17,74 Ba	14,26 BC
Estilosante	14,54 Ab	17,51 Aab	18,26 Aa	19,08 ABA	17,35 A
Guandu	9,09 Bc	15,38 ABb	16,45 Ab	22,43 Aa	15,84 AB
Média das doses	10,82 c	14,85 b	16,43 b	19,05 a	15,29 ⁽²⁾

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ média geral

Considerando o desdobramento da interação entre adubo verde e doses de P sobre o fósforo acumulado na MSPA da cana-de-açúcar, o estilosante apresentou maior média entre os adubos verdes, seguido do guandu, da crotalária e braquiária (Tabela 10). Para as médias das doses de P, as adições de SFT favoreceram a produção de MSPA, tendo a dose de 120 mg/vaso apresentado maiores médias nos teores de P acumulado.

A crotalária diferiu do estilosante no fósforo acumulado em consequência do menor conteúdo de P total, observando-se que as tendências na absorção de P foram congruentes com as mudanças na MSPA (Tabela 8), pois o fósforo acumulado tem relação direta entre a produção de MSPA e o conteúdo de P na cana.

Observa-se que, exceto a dose de 60 mg/vaso de P, todas as doses de P na forma de SFT apresentaram diferença entre os adubos verdes.

Fósforo na parte aérea da cana-de-açúcar quanto à origem

O fósforo na parte aérea da cana-de-açúcar proveniente do fertilizante fosfatado foi 59,01% em média maior que o proveniente do solo (54,43%) e do adubo verde (0,86%). Quando se aumenta a dose de P aplicado no solo, há uma diminuição do AP_{SFT} e aumento do AP_{solo} , isso ocorre porque em solos tropicais intemperizados há rápida adsorção das espécies de fósforo nas partículas de argila, tornando-as indisponíveis para as plantas (NOVAIS; SMYTH, 1999).

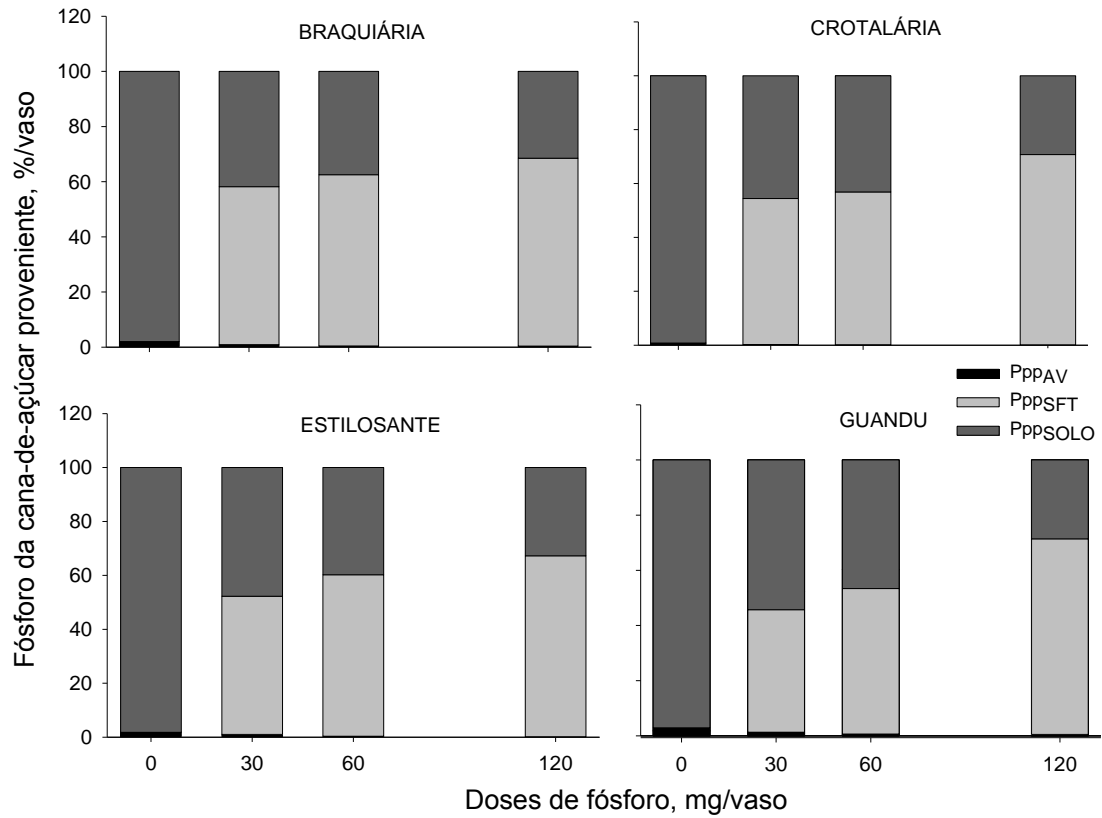


Figura 6 – Participação relativa de cada fonte de P (adubo verde, superfosfato triplo e solo) no conteúdo do P na parte aérea da cana-de-açúcar

Tabela 12 - Desdobramento da interação entre adubo verde e doses de fósforo, sobre o fósforo na cana-de-açúcar proveniente do adubo verde, do superfosfato triplo e do solo⁽¹⁾ (Continua)

Adubo verde	³² P	Doses de fósforo				Média do adubo verde
		0	30	60	120	
----- fósforo proveniente, mg/vaso -----						
Braquiária	adubo verde	0,77 Ba	0,26 Ba	0,14 Ea	0,10 Ca	0,32 C
	SFT		54,17 Ab	56,73 ABCb	70,63 Aa	60,51 AB
	solo	99,21 Aa	45,57 Ab	43,13 BCDb	29,27 Bb	54,30 AB
Crotalária	adubo verde	2,03 Ba	0,92 Ba	0,42 Ea	0,38 Ca	0,94 C
	SFT		57,25 Ba	62,10 Aa	68,01 Aa	62,49 A
	solo	97,97 Aa	41,83 Ab	37,47 Db	31,50 Bb	52,19 B
Estilosante	adubo verde	2,92 Ba	1,31 Ba	0,66 Ea	0,51 Ca	1,35 C
	SFT		44,42 Ab	52,73 ABCDb	70,90 Aa	56,02 AB
	solo	97,09 Aa	54,27 Ab	46,62 ABCDb	28,59 Bc	56,64 AB
Guandu	adubo verde	1,79 Ba	1,03 Ba	0,34 Ea	0,17 Ca	0,84 C
	SFT		51,23 Ab	59,90 ABab	67,07 Aa	59,40 AB
	solo	98,21 Aa	47,73 Ab	39,76 CDbc	32,75 Bc	54,61 AB
Média das doses		50,00 a	33,33 b	33,33 b	33,33 b	36,37 ⁽²⁾

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ média geral

Aproveitamento do fósforo pela parte aérea da cana-de-açúcar

O aproveitamento do fósforo pelo adubo verde (AP_{av}) e do fertilizante fosfatado (AP_{SFT}) pela parte aérea da cana-de-açúcar foi calculada (Equação 6) considerando: a porcentagem de fósforo na parte aérea da cana-de-açúcar proveniente do adubo verde ($\%Ppp_{av}$), do SFT ($\%Ppp_{SFT}$) (Equação 3) e do solo ($\%Ppp_{solo}$) (Equação 4); e a quantidade de fósforo na parte aérea da cana-de-açúcar proveniente do adubo verde ($QPpp_{av}$), do SFT ($QPpp_{SFT}$) e do solo ($QPpp_{solo}$) (Equação 5). Esse parâmetro indica a eficiência das plantas de cana em absorver P do material vegetal ou do SFT aplicado no solo.

Tabela 13 - Equações de regressões para o aproveitamento do fósforo pela cana-de-açúcar cultivada com diferentes adubos verdes e doses P, na forma de superfosfato triplo (Continua)

Adubo verde	³² P	Equação	R ²
Braquiária	adubo verde	$\hat{y} = 0,17 \times 0,99^{**x}$	0,88
	SFT	$\hat{y} = 23,39 \times 0,98^{**x}$	0,90
Crotalária	adubo verde	$\hat{y} = \frac{0,77^{**}x}{44,29 + x}$	0,99
	SFT	$\hat{y} = \frac{5,05^*x}{-17,97 + x}$	0,99
Estilosante	adubo verde	$\hat{y} = 1,29e^{(-0,01^*x)}$	0,93
	SFT	$\hat{y} = 21,06 \times 0,99^{**x}$	0,94
Guandu	adubo verde	$\hat{y} = 1,22e^{(-0,02^*x)}$	0,96

** Significativo ao nível de 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

A partir da análise da variância da regressão polinomial obtiveram-se valores de F significativo para os modelos exponenciais para braquiária, estilosante e guandu, enquanto para crotalária o melhor ajuste foi à hipérbole.

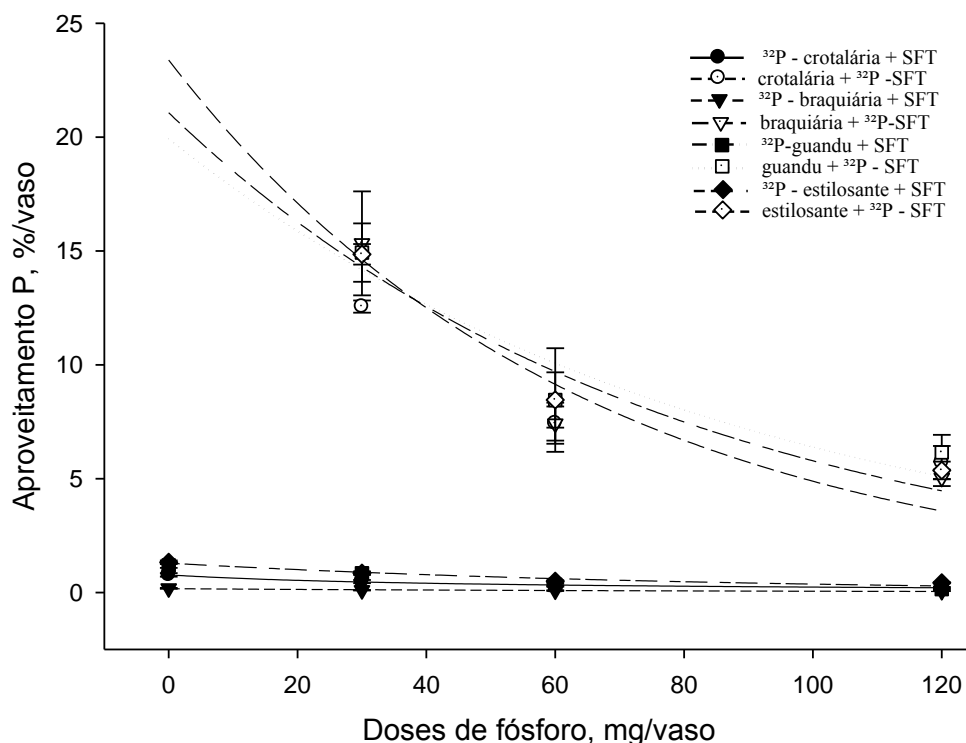


Figura 8 – Efeito das doses de superfosfato triplo no aproveitamento (Ap) do fósforo dos adubos verdes e do próprio superfosfato (na presença do adubo verde) pelas plantas de cana-de-açúcar

Todos os tratamentos apresentaram decréscimo do aproveitamento de P quando aumentou a dose de P, porém essa queda é mais nítida quando o P era proveniente do SFT (Figura 8). Embora não se conheça trabalho na literatura no qual se avaliou, pelo método direto, o aproveitamento de P do fertilizante pela cana-de-açúcar, no presente experimento, pode-se dizer que o maior valor obtido (15,34%) é alto se comparado com os resultados obtidos por Neptune et al (1979) com feijoeiro em campo, onde o máximo obtido foi de 8,15%. Nota-se, entretanto, que com doses maiores de SFT os valores caíram para menos de 6,15% (Tabela 14).

Tabela 14 - Desdobramento da interação entre adubo verde e doses de fósforo, sobre o aproveitamento do fósforo da matéria seca da parte aérea da cana-de-açúcar proveniente do adubo verde e do superfosfato triplo⁽¹⁾

Adubo verde	³² P	Doses de fósforo				Média do adubo verde
		0	30	60	120	
----- aproveitamento do fósforo (%) -----						
Braquiária	adubo verde	0,18 Aa	0,10 Ba	0,08 Ba	0,06 Ba	0,11 B
	SFT		15,34 Aa	7,42 Ab	5,04 Ab	9,26 A
Crotalária	adubo verde	0,77 Aa	0,48 Ba	0,29 Ba	0,23 Ba	0,44 B
	SFT		12,56 Aa	7,43 Ab	5,71 Ab	8,57 A
Estilosante	adubo verde	1,33 Aa	0,84 BA	0,50 Ba	0,43 Ba	0,78 B
	SFT		14,85 Aa	8,46 Ab	5,36 Ac	9,56 A
Guandu	adubo verde	1,19 Aa	0,85 Ba	1,00 Ba	0,25 Ba	0,82 B
	SFT		14,93 Aa	8,60 Ab	6,15 Ab	9,89 A
Média das doses		0,87 d	7,49 a	4,22 b	2,90 c	4,30 ⁽²⁾

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ média geral

O efeito da interação no aproveitamento do P devido à aplicação do adubo verde e do fertilizante fosfatado foi altamente significativo ($p \leq 0,001$). Para todas as interações testadas, as doses de P de 30 mg/vaso de P na forma de SFT foram superiores as demais (Tabela 14).

O aproveitamento de fósforo na cana-de-açúcar proveniente do SFT foi sempre superior ao do adubo verde, que não excedeu 0,82%, entretanto, não há diferença entre os adubos verdes. Provavelmente esse baixo APAV foi devido a curto período, 54 dias, de desenvolvimento da cana, que no campo a cultura se desenvolve um ano ou mais, se for cana de ano e meio, que acarreta em baixa mineralização desses P..

Esse baixo aproveitamento de P do adubo verde ($< 1\%$) pelas culturas principais também foi observado por Bah, Zaharah e Hussin (2006), que estudaram o aproveitamento do P do fosfato natural, do superfosfato triplo e do adubo verde (Gliricida, Imperata e Calopogonium) pela *Setaria Sphacelata* cultivada em solo tropical. Observaram também que a mineralização do P do adubo verde não foi o maior

contribuinte para a absorção de P pela Setaria, o mesmo comportamento para a cultura da cana-de-açúcar (Tabela 14).

O adubo verde melhorou a disponibilidade do P do SFT no tratamento adubo verde + SFT e do P do solo no tratamento sem adição de SFT (dose 0), enquanto grande parte do AP_{av} foi retido nas frações do solo, Al-P, Fe-P, frações orgânicas e biomassa microbiana (SANYAL; De DATTA, 1991; IYAMUREMYE; DICK, 1996). Bah et al (2003) observaram significativa redução na capacidade de sorção de P e aumento concomitante nas frações de Fe-P e Al-P de P em solo ácido tratado com adubo verde. Esses autores também observaram consumo considerável de resíduos de P da biomassa microbiana em solo tratado com combinação de fertilizantes inorgânicos e resíduos de planta. Possivelmente, isso corresponde com a utilização reduzida de AP_{av} observado na mistura AV + SFT, o que também se nota na tabela 10.

A solubilidade dos compostos de P com o Al ou Fe (Al-P, Fe-P) pode aumentar a pH enquanto os microorganismos produzem H⁺ extracelular, cuja associação com ácidos orgânicos, são capazes de dissolver minerais fosfatados suscetível (GOLDSTEIN, 1995; BAR-YOSEF et al., 1999; RICHARDSON et al., 2009;), incluindo os compostos pouco solúveis de Al-P e Fe-P (EVANS; CONDON, 2009).

A maior disponibilidade de P no solo devido à incorporação de materiais vegetais foi atribuída à liberação de P a partir das matérias em decomposição e a ação de outros produtos desse processo como (anions orgânicos e grupos hidroxila) no P nativo do solo (HUE; IKAWA; SILVA, 1994; IYAMUREMYE; DICK, 1996; NZIGUHEBA et al., 2000; HAYNES; MOKOLOBATE, 2001; KWABIAH et al., 2003; BAH; ZAHARAH; HUSSIN, 2006). Os resultados (Tabela 14) sugerem que a decomposição dos produtos podem ser os principais responsáveis pelo aumento na disponibilidade do P no solo (BAH; ZAHARAH; HUSSIN, 2006) nos tratamentos do AV (sem SFT, dose 0) e do AV + SFT.

O maior teor de P do guandu (20,3 g kg⁻¹) e do estilosante (9,8 g kg⁻¹) que da crotalária (6,8 g kg⁻¹) e braquiária (4,5 g kg⁻¹) pode ter aumentado a taxa de mineralização do P orgânico. Esse comportamento, também foi observado para o aproveitamento de P no arroz pelo feijão-de-corda, que apresentou maior teor de P em relação à sesbânia e crotalária. Concluiu-se que o teor de P dos resíduos vegetais

adicionados foi o aspecto mais importante para determinar a mineralização. (DALAL, 1979; FULLER et al., 1956; HUNDAL; BISWAS; VIG, 1987).

2.3.2.2 Raiz

Produção de matéria seca da raiz

A interação MSR x dose de P na forma de SFT foi significativa apenas para o guandu ($p < 0,05$) e o resultado se ajustou ao modelo linear de regressão (Tabela 15).

A produção de MSPA da parte aérea da cana-de-açúcar aumentou com o acréscimo da dose de P, não atingindo a produção máxima nas doses avaliadas (Figura 9). Corroborando com Marschner (1995), que afirma que o suprimento de nutrientes apresenta potencial para alterar o crescimento e a morfologia das raízes.

Tabela 15 - Equações de regressões para peso de matéria seca da raiz da cana-de-açúcar cultivada com diferentes adubos verdes e doses de P, na forma de superfosfato triplo

Adubo verde	Equação	R ²
Guandu	$\hat{y} = 2,80 + 0,01 \cdot x$	0,94

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

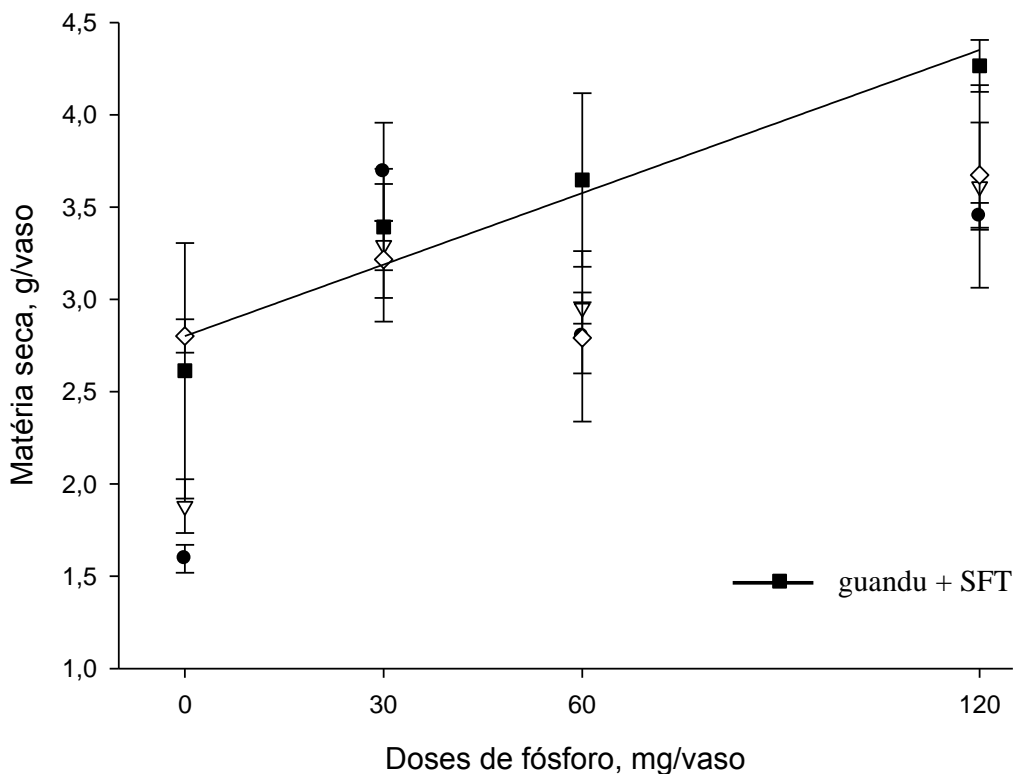


Figura 9 - Matéria seca da raiz da cana-de-açúcar cultivada com diferentes adubos verdes e doses de P, na forma de superfosfato triplo

Tabela 16 - Desdobramento da interação entre tratamento e doses de fósforo, sobre a matéria seca da raiz da cana-de-açúcar⁽¹⁾

Adubo verde	Doses de fósforo				Média do adubo verde
	0	30	60	120	
----- matéria seca (g/vaso) -----					
Crotalária	1,60 Ab	3,70 Aa	2,80 Aab	3,45 Aa	2,88 A
Braquiária	1,88 Ab	3,30 Aa	2,96 Aab	3,62 Aa	2,94 A
Guandu	2,62 Ab	3,33 Aab	3,65 Aab	4,27 Aa	3,47 A
Estilosante	2,80 Aa	3,22 Aa	2,80 Aa	3,67 Aa	3,12 A
Média das doses	2,23 c	3,39 ab	3,05 b	3,75 a	3,10 ⁽²⁾

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ média geral

Considerando o desdobramento da interação entre adubo verde e doses de P, observou-se que não houve diferença nas produções de MSR. Para todas as interações estudadas, as produções de MSR foram maiores em resposta aos tratamentos com 120 e 30 mg/vaso de P na forma de SFT. Observa-se que apenas o estilosante não alterou a produção de MSR quando teve um suplemente de P (Tabela 16).

Fósforo acumulado na raiz da cana-de-açúcar

O fósforo acumulado na raiz da cana-de-açúcar foi significativo ($p \leq 0,001$) apenas para o estilosante independente da dose de P aplicado na forma de SFT. O modelo de regressão ajustado para o estilosante + SFT foi o exponencial (Tabela 17). O aumento no fornecimento de P promoveu aumento no acúmulo de P (Figura 10).

Tabela 17 - Equações de regressões para o fósforo acumulado na matéria seca da raiz da cana-de-açúcar cultivada com diferentes adubos verdes e doses de P, na forma de superfosfato triplo

Tratamento	Equação	R²
Estilosante	$\hat{y} = 1,73 \times 1,0^{**x}$	0,75

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

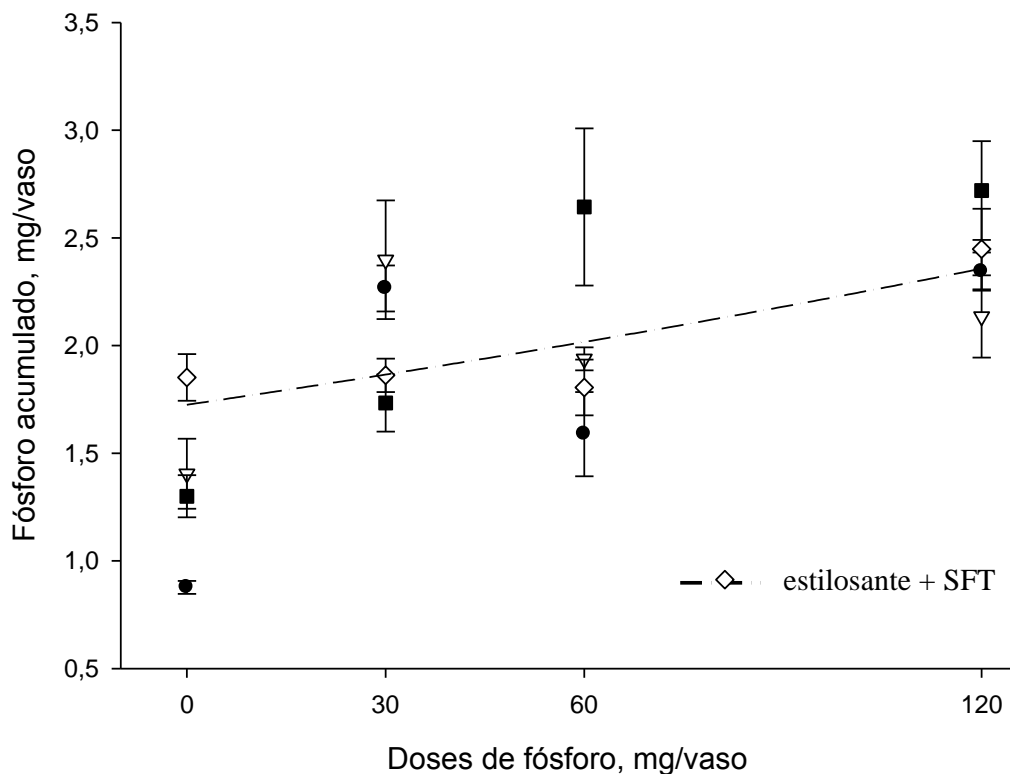


Figura 10 - Fósforo acumulado na matéria seca da raiz da cana-de-açúcar cultivada com diferentes adubos verdes e doses de P, na forma de superfosfato triplo

Tabela 18 - Desdobramento da interação entre adubo verde e doses de fósforo, sobre o fósforo acumulado na matéria seca da raiz da cana-de-açúcar⁽¹⁾

Adubo verde	Doses de fósforo				Média do adubo verde
	0	30	60	120	
----- fósforo acumulado (mg/vaso) -----					
Crotalaria	0,88 Bc	2,27 Aa	1,59 Bb	2,34 Aa	1,77 B
Braquiária	1,41 ABb	2,40 Aa	1,94 Bab	2,14 Aa	1,97 AB
Guandu	1,30 ABc	1,99 Ab	2,65 Aab	2,72 Aa	2,17 A
Estilosante	1,85 Aa	1,87 Aa	1,81 Ba	2,45 Aa	1,99 AB
Média das doses	1,36 c	2,13 ab	2,00 b	2,41 a	1,98 ⁽²⁾

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ média geral

Considerando a média dos adubos verdes no fósforo acumulado na MSR, verifica-se a melhor resposta à aplicação de guandu. Isso se deve ao maior conteúdo de P na parte aérea, uma vez que a produção de MSPA não apresentou diferença entre os adubos verdes e o P acumulado tem relação direta entre o conteúdo de P e a produção de MS.

Fósforo na raiz da cana-de-açúcar quanto à origem

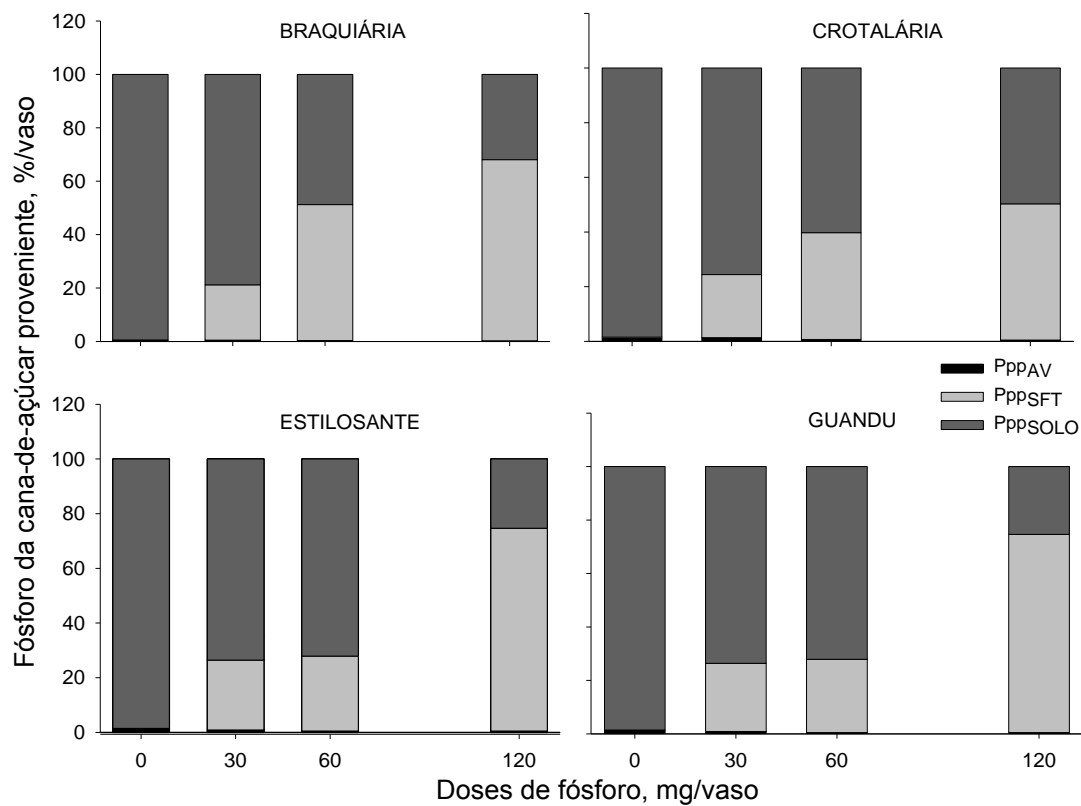


Figura 11 – Participação relativa de cada fonte de P (adubo verde, superfosfato triplo e solo) no conteúdo do P na raiz da cana-de-açúcar

Tabela 19 - Desdobramento da interação entre adubo verde e doses de fósforo, sobre o fósforo da matéria seca da raiz das plantas de cana-de-açúcar proveniente do adubo verde, do superfosfato triplo e do solo⁽¹⁾

Adubo verde	³² P	Doses de fósforo				Média do adubo verde
		0	30	60	120	
----- fósforo proveniente, mg/vaso -----						
Braquiária	adubo verde	0,56 Ba	0,46 Ca	0,33 Ea	0,23 Ga	0,40 E
	SFT		20,76 Bc	50,92 BCb	67,81 ABa	46,59 C
	solo	99,44 Aa	78,79 ab	48,75 BCc	31,95 EFa	64,73 AB
Crotalária	adubo verde	1,54 Ba	1,35 Ca	0,69 Ea	0,47 Ga	1,02 E
	SFT		23,09 Bc	39,07 CDb	49,84 CDa	37,33 D
	solo	98,46 Aa	75,56 Ab	60,24 ABc	49,69 CDa	70,99 A
Estilosante	adubo verde	1,85 Ba	1,48 Ca	0,84 Ea	0,47 Ga	1,16 E
	SFT		33,80 Bc	48,66 BCb	59,55 BCa	47,33 C
	solo	98,15 Aa	64,72 Ab	50,50 BCc	39,96 DEc	63,33 B
Guandu	adubo verde	1,44 Ba	0,87 Ca	0,46 Ea	0,49 Ga	0,81 E
	SFT		25,53 Bb	27,42 Db	74,16 Aa	42,37 CD
	solo	98,56 Aa	73,60 Ab	72,12 Ab	25,37 Fc	67,41 AB
Média das doses		50,00 a	33,33 b	33,33 b	33,33 b	36,36 ⁽²⁾

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ média geral

De maneira geral, a média do fósforo na MSR proveniente do solo para os tratamentos com adubo verde foi de 66,6%, 43,4% do SFT e o adubo verde contribuiu com 0,8%. Dentre estes resultados, nota-se que com a adição do P na forma de SFT na cana-de-açúcar cultivada com braquiária houve redução para 67,5% no P proveniente do solo e aumento para 47,0% com o SFT; o solo cultivado com crotalária sofreu uma queda de valor de 48,8% e acréscimo de 26,8% com SFT; para o estilosante, o P do solo reduziu 58,2% e aumentou 25,7% para o Ppp_{SFT}; e para o guandu, decresceu 73,2% de Ppp_{solo} e aumentou 48,6% para o Ppp_{SFT}. Para todos os adubos verdes, o Ppp_{av} se manteve constante (<1,0%) mesmo com adição de P na forma de SFT (Tabela 19).

Aproveitamento do fósforo pela raiz da cana-de-açúcar

Tabela 20 - Equações de regressões para o aproveitamento do fósforo da matéria seca da raiz da cana-de-açúcar cultivada com diferentes adubos verdes e doses de P, na forma de superfosfato triplo

Adubo verde	³² P	Equação	R ²
guandu	adubo verde	$\hat{y} = 0,15 - 0,001^{**}X$	0,99

**Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

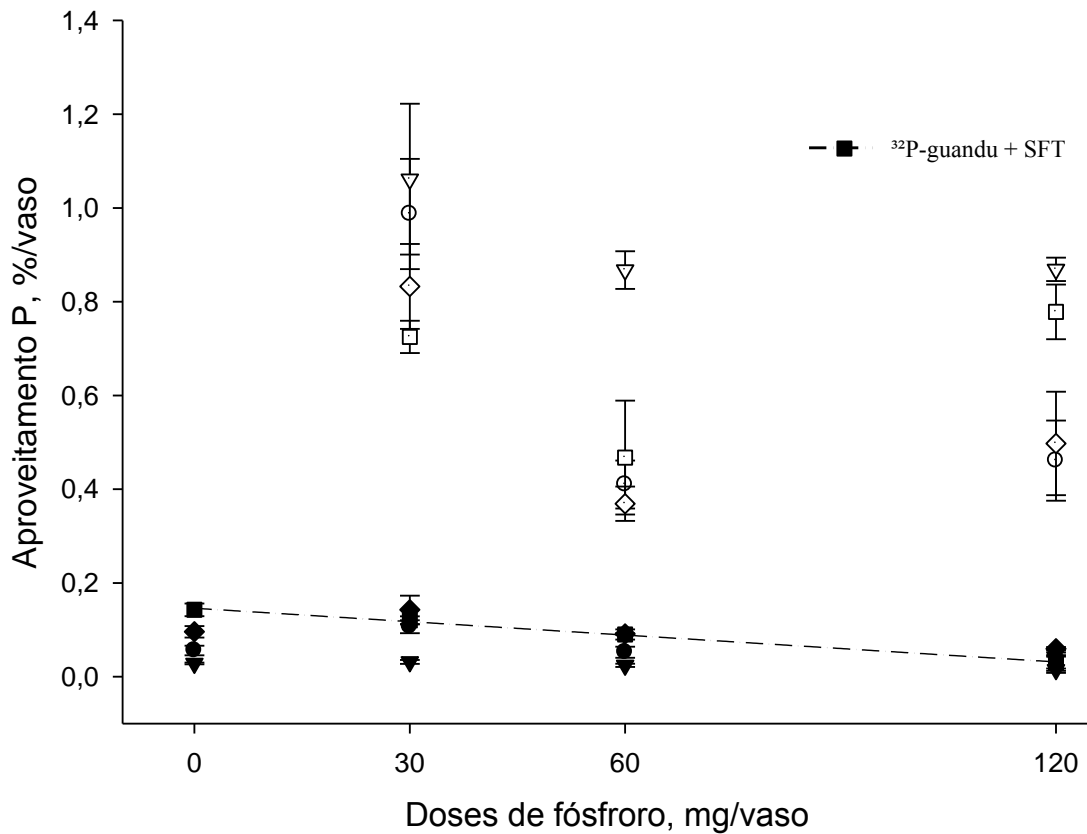


Figura 13 - Aproveitamento do fósforo acumulado na matéria seca da raiz da cana-de-açúcar cultivada com diferentes adubos verdes e doses de P, na forma de superfosfato triplo

Tabela 21 - Desdobramento da interação entre adubo verde e doses de fósforo, sobre o aproveitamento do fósforo da matéria seca da raiz das plantas de cana-de-açúcar proveniente do adubo verde e do superfosfato triplo⁽¹⁾

Adubo verde	³² P	Doses de fósforo				Média do adubo verde
		0	30	60	120	
----- aproveitamento do fósforo (%) -----						
Braquiária	adubo verde	0,03 Aa	0,03 Ca	0,03 Ca	0,02 Ea	0,03 C
	SFT		1,06 Aa	0,87 Aa	0,87 Aa	0,93 A
Crotalária	adubo verde	0,06 Aa	0,10 Ca	0,05 Ca	0,04 Ea	0,06 C
	SFT		0,99 Aa	0,41 Bb	0,46 Bb	0,62 B
Estilosante	adubo verde	0,10 Aa	0,14 Ca	0,09 Ca	0,06 Ea	0,10 C
	SFT		0,83 Aba	0,37 Bb	0,50 Bb	0,57 B
Guandu	adubo verde	0,14 Aa	0,12 Ca	0,09 Ca	0,12 CDa	0,12 B
	SFT		0,73 Ba	0,47 Bb	0,36 BCb	0,52 B
Média das doses		0,08 c	0,50 a	0,30 b	0,30 b	0,32 ⁽²⁾

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ média geral

A eficiência de absorção do nutriente pela planta consiste em aumentar a capacidade de solubilizar nutrientes não-lábeis em formas mais disponíveis ou aumentar a capacidade de transportar nutrientes através da membrana plasmática. A solubilização dos nutrientes não disponíveis é de grande importância para a absorção eficiente, especialmente para os nutrientes transportados às raízes por difusão, processo relativamente lento, e limitante da absorção de P (RICHARDSON et al., 2009).

A secreção ou exsudação de componentes químicos pela rizosfera, alteração da geometria ou arquitetura do sistema radicular e associação com micronutrientes são prováveis mecanismos das plantas capazes de aumentar a disponibilidade e absorção de P em solos com deficiência desse nutriente (RENGEL, 1999), que com a limitação de P, toxicidade de Al, baixa disponibilidade de Fe e exposição aos metais pesados, as raízes aumentam a síntese e exsudação de vários ácidos orgânicos, principalmente malato e citrato (VANCE; UHDE-STONE; ALLAN, 2003; LI et al., 2009).

O aproveitamento do P pelas raízes (Tabela 21) de cana-de-açúcar proveniente dos adubos verdes e do SFT foram inferiores à parte aérea (Tabela 14). Provavelmente o P que foi absorvido pelas raízes foram translocados para a parte aérea.

2.3.3 Experimento III: Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pela cultura do arroz

O P aplicado por vaso na forma de adubo verde para o arroz (Tabela 22) foi calculado conforme quantidade de adubo verde aplicado no campo e o montante de matéria seca obtida na fase de marcação e produção dos adubos verdes (item 2.2.3.2).

Tabela 22 - Quantidade de nutriente aplicado por vaso pela adição de adubos verdes

Adubo verde	Raiz	Parte aérea	Inteira
		mg/vaso	
Crotalária juncea	4,46	18,10	22,56
Guandu anão	4,82	9,79	14,61

Produção de matéria seca da parte aérea

A produção de MSPA da parte aérea do arroz foi afetada significativamente pelas doses de fósforo e o comportamento dos adubos verdes foi diferente entre eles. O modelo ajustado para controle foi a hipérbole, para a crotalária + SFT foi o *Peak Gaussian*, enquanto o guandu + SFT ajustou o modelo linear (Tabela 23).

Tabela 23 - Equações de regressão para peso de matéria seca de arroz cultivada com diferentes adubos verdes e superfosfato triplo

Adubo Verde	Equações	R ²
Controle	$\hat{y} = 0,69 + \frac{0,59 * x}{0,52 + x}$	0,99
Crotalária	$\hat{y} = 1,85 * e \left[-0,5 \left(\frac{x - 82,67}{74,22} \right)^2 \right]$	0,98
Guandu	$\hat{y} = 1,32 + 0,02 * x$	0,89

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

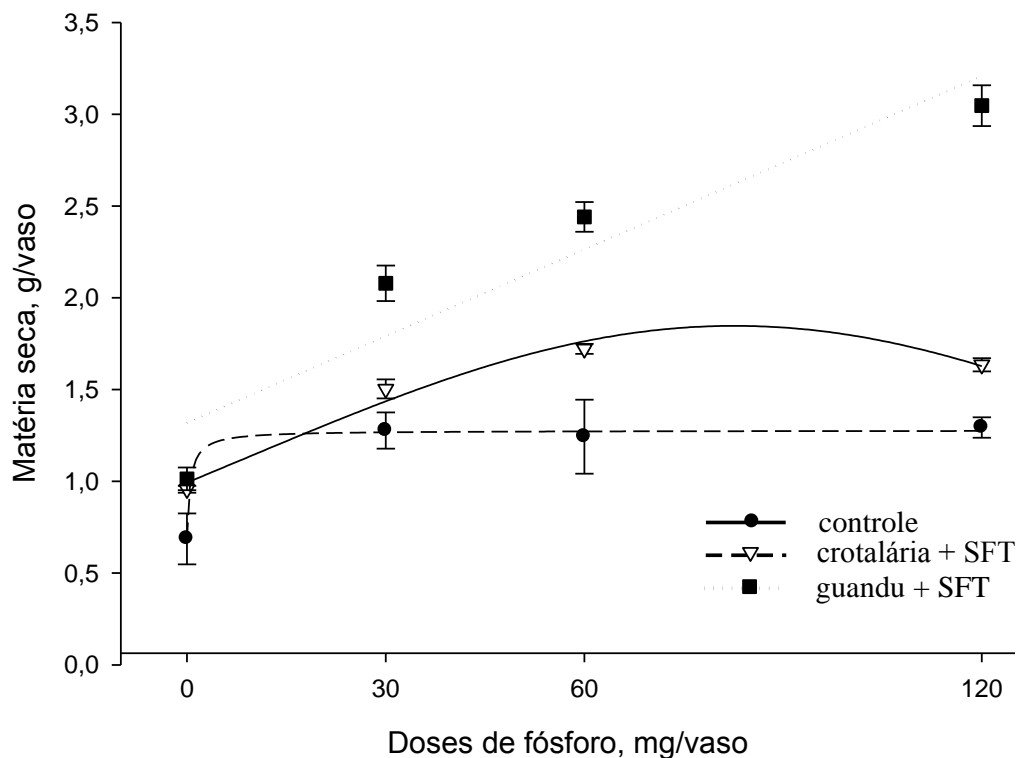


Figura 14 - Matéria seca da planta de arroz cultivada com efeito de diferentes adubos verdes e doses de superfosfato

No tratamento sem adição de adubo verde e SFT, a produção de matéria seca estabilizou a produção de matéria seca na dose 0,3 mg/vaso de P. A crotalária + SFT apresentou aumento do fósforo acumulado até determinada dose de P e manteve constante com o acréscimo de P. Para o guandu, a produção aumentou com o acréscimo de P pelo SFT (Figura 14).

Tabela 24 - Desdobramento da interação entre adubo verde e doses de fósforo, sobre a matéria seca da planta de arroz⁽¹⁾

Adubo verde	Doses de fósforo				Média do adubo verde
	0	30	60	120	
----- matéria seca (g/vaso) -----					
Controle	0,69 Ab	1,28 Ba	1,24 Ca	1,29 Ca	1,13 C
Crotalária	0,96 Ab	1,50 Ba	1,72 Ba	1,64 Ba	1,46 B
Guandu	1,01 Ac	2,08 Ab	2,44 Ab	3,05 Aa	2,15 A
Média das doses	0,89 c	1,62 b	1,80 ab	1,99 a	1,58 ⁽²⁾

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ média geral

O efeito da interação na matéria seca do arroz foi altamente significativo ($p \leq 0,001$). Observou-se maior média entre os adubos verdes para os tratamentos com guandu, seguido de crotalária e controle. Para todas as interações analisadas, as doses de P tiveram resposta linear e crescente até a dose de 60 mg/vaso (Tabela 24).

Observou-se também que no tratamento controle não houve diferença entre os adubos verdes, mas quando adicionado o SFT, o P apresentou efeito significativo sobre a MSPA. Entretanto, a maior produção de MSPA foi conseguida com a utilização de guandu seguido pela crotalária.

Hundal; Biswas e Vig (1987), estudando o aproveitamento do P pelo arroz proveniente dos adubos verdes, observaram que não houve diferença na produção de matéria seca do arroz quando utilizados crotalária, sesbânia e feijão-caupi. O uso de crotalária e feijão guandu também não apresentou diferença para o tratamento controle (sem adição de SFT), mas quando adicionado o SFT, o P apresentou efeito significativo sobre a MSPA (Tabela 24).

A produção de matéria seca é um dos principais parâmetros relacionado com a produtividade da cultura, sendo o fósforo um dos nutrientes capazes de aumentar a matéria seca devido ao aumento no número de perfilhos e área foliar. A produção da MSPA aumentou com a adição das doses de P, seja na forma de adubo verde ou do SFT, aplicada no solo (FAGERIA; BALIGAR; BAILEY, 2005).

O arroz cultivar BRSMG Conai, quanto à eficiência de utilização de fósforo (FAGERIA; BARBOSA FILHO, 1981), foi considerado como não eficiente e responsivo (MATIAS, 2006; ROTILI, 2009;), ou seja, baixa produção sob baixo nível de fósforo (sem dose de SFT, apenas o P do solo), mas apresentaram apreciáveis aumentos na produção com doses altas de P (doses de 60 e 120 mg/vaso de P) (Tabela 24).

Fósforo acumulado

O fósforo acumulado no arroz foi significativo para todos os adubos verdes independente da dose de P aplicado na forma de SFT, entretanto, o comportamento observado do controle e da crotalária + SFT foram diferentes ao do guandu + SFT. O modelo de regressão ajustado para o controle e a crotalária + SFT foi o exponencial e para o guandu + SFT, o linear (Tabela 25). Para todas as interações testadas, as doses de P foram maiores em resposta ao tratamento com $120 > 60 = 30 > 0$ mg/vaso de P na forma de SFT (Tabela 10).

Tabela 25 - Equações de regressões para o fósforo acumulado na matéria seca da parte aérea do arroz cultivado com diferentes adubos verdes e doses de P, na forma de superfosfato triplo

Adubo verde	Equação	R²
Controle	$\hat{y} = 3,69 - 2,94 \cdot e^{(-0,02^{ns}x)}$	0,99
Crotalária	$\hat{y} = 4,54 e^{\left[-0,5 \left(\frac{x-97,0g^*}{62,5g^*}\right)^2\right]}$	0,99
Guandu	$\hat{y} = 1,54 - 0,03 \cdot x$	0,99

*; ns Significativo ao nível de 5% de probabilidade e, não significativo, respectivamente.

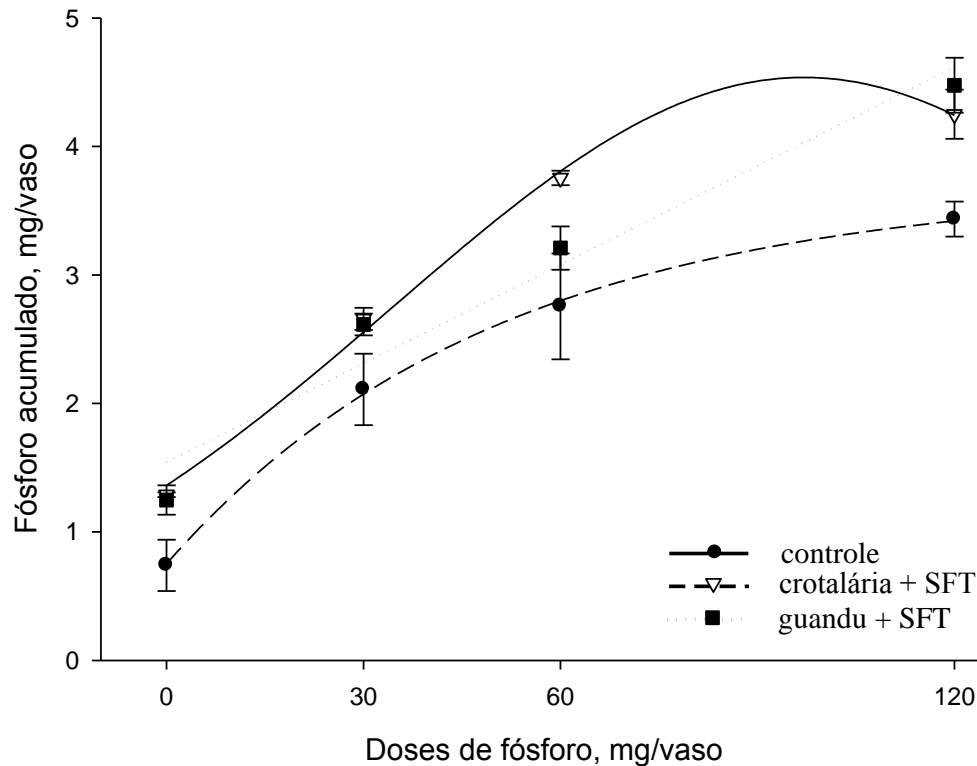


Figura 15 - Fósforo acumulado na matéria seca de arroz cultivada com diferentes adubos verdes e doses de P, na forma de superfosfato triplo

Para o tratamento sem adubo verde e SFT, o fósforo acumulado atinge o ponto máximo entre as doses de 60 e 120 mg/vaso.de P e segue em declínio até atingir a dose de 120 mg/vaso de P. Para a crotalária, a maior concentração de P acumulado está na dose de 97,0 mg/vaso de P (Tabela 25). O guandu acumulou P de forma crescente com o aumento do fornecimento de P (Figura 15).

Tabela 26 - Desdobramento da interação entre adubo verde e doses de fósforo, sobre o fósforo acumulado na planta de arroz ⁽¹⁾

Adubo verde	Doses de fósforo				Média do adubo verde
	0	30	60	120	
	----- fósforo acumulado (mg/vaso) -----				
Controle	0,74 Ac	2,11 Ab	2,76 Bab	3,43 Ba	2,25 B
Crotalária	1,29 Ac	2,66 Ab	3,76 Aa	4,25 Aa	2,98 A
Guandu	1,25 Ac	2,61 Ab	3,21 ABb	4,48 Aa	2,89 A
Média das doses	1,09 d	2,46 c	3,24 b	4,05 a	2,71 ⁽²⁾

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ média geral

Considerando o desdobramento da interação adubo verde e doses de P para o P acumulado, observou-se que a crotalária e o guandu apresentaram maiores médias em relação ao tratamento testemunha. Em relação às doses, pode se observar que a dose de 120 mg/vaso de P foi superior as demais.

Fósforo no arroz quanto à origem

O fósforo no arroz proveniente do superfosfato triplo foi 87,7% em média, maior que o proveniente do solo (25,7%) e do adubo verde (15,5%).

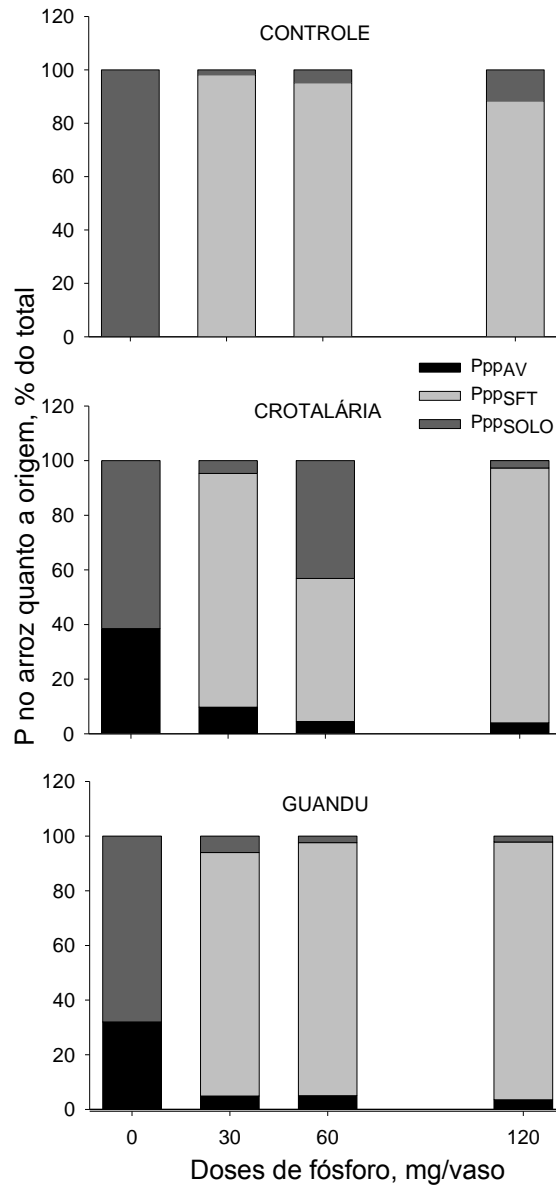


Figura 16 – Participação relativa de cada fonte de P (adubo verde, superfosfato triplo e solo) no conteúdo do P na parte aérea do arroz (em %)

Tabela 27 - Desdobramento da interação entre adubo verde e doses de fósforo, sobre o fósforo da planta de arroz proveniente do adubo verde, do superfosfato triplo e do solo⁽¹⁾

Adubo verde	³² P	Doses de fósforo				Média do adubo verde	
		0	30	60	120		
----- fósforo proveniente, mg/vaso -----							
adubo verde							
Controle	SFT		98,15 Aa	95,17 Aab	88,40 Ab	93,90 A	
	solo	100,00 Aa	1,85 Cc	4,83 Cbc	11,60 Bb	29,50 C	

		adubo verde	38,50 Ca	9,73 Cb	4,50 Cb	4,00 Bb	14,18 DE
Crotalária	SFT		85,56 Ba	52,35 Bb	93,32 Aa	77,07 B	
	solo	61,50 Ba	4,71 Cc	43,15 Bb	2,69 Bc	28,01 C	

		adubo verde	32,01 Ca	4,89 Cb	5,04 Cb	3,51 Bb	11,36 E
Guandu	SFT		89,08 ABA	92,58 Aa	94,34 Aa	92,00 A	
	solo	67,99 BA	6,02 Cb	2,38 Cb	2,16 Bb	19,64 D	
Média das doses			60,00 a	37,50 b	37,50 b	37,50 b	41,38 ⁽²⁾

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ média geral

O fósforo absorvido pelas plantas pode ser armazenado em seus tecidos na forma orgânica ou inorgânica. Quando o material vegetal é utilizado como adubo verde, o fósforo armazenado é liberado na solução do solo. Esse processo pode ser imediato ou em longo prazo, dependendo da quantidade de P orgânico e inorgânico presente no material vegetal. A fração inorgânica é prontamente disponível para plantas subseqüentes, devido à alta solubilidade na solução do solo, enquanto a fração orgânica necessita ser mineralizada para posterior absorção (TATE, 1984).

Isso condiz com os resultados apresentados na tabela 27, pois nos tratamentos sem adição de SFT, o Ppp_{av}, em média representou 35,25% da origem do P. Enquanto que nos tratamentos sem adição de adubo verde, o SFT colaborou com 93,9% do P absorvido pelo arroz. Com a adição do P na forma orgânica (adubo verde) mais SFT independente da dose de P, observou, em média, queda de 19,5% (Tabela 27).

Aproveitamento do fósforo pelo arroz

O aproveitamento do fósforo do adubo verde (AP_{av}) e do fertilizante fosfatado (AP_{SFT}) pelo arroz foi calculado (Equação 6) considerando a porcentagem de fósforo no arroz proveniente do adubo verde ($\%Ppp_{av}$), do SFT ($\%Ppp_{SFT}$) (Equação 3) e do solo ($\%Ppp_{solo}$) (Equação 4) e a quantidade de fósforo no arroz proveniente do adubo verde ($QPpp_{av}$), do SFT ($QPpp_{SFT}$) e do solo ($QPpp_{solo}$) (Equação 5). Esse parâmetro indica a eficiência das plantas de arroz em absorver P do material vegetal ou do SFT aplicado no solo.

Tabela 28 - Equações de regressões para o aproveitamento do fósforo do arroz proveniente do adubo verde marcado e do superfosfato triplo

Adubos verdes	^{32}P	Equação	R²
Crotalária	adubo verde	$\hat{y} = 3,15 \times 0,99^{**x}$	0,82
	SFT	$\hat{y} = 6,74 \times 0,99^{**x}$	0,95
Guandu	SFT	$\hat{y} = 8,09 \times 0,99^{**x}$	0,95

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

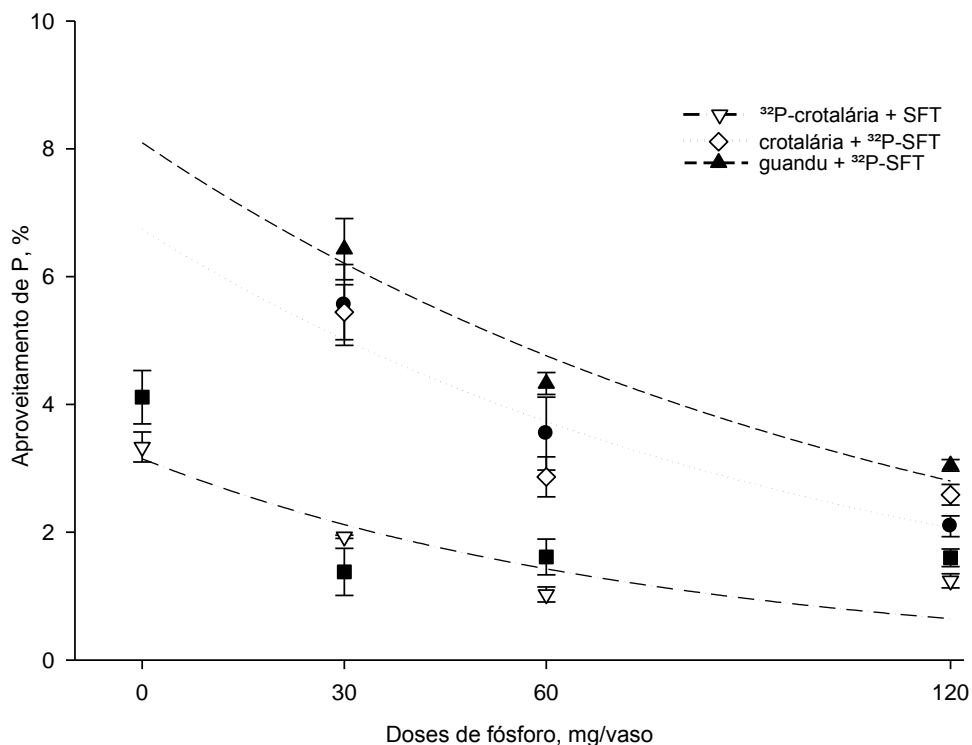


Figura 18 - Aproveitamento do fósforo acumulado na matéria seca da planta de arroz cultivada com diferentes adubos verdes e dose de P, na forma de superfosfato triplo

Tabela 29 - Desdobramento da interação entre adubo verde e doses de fósforo, sobre o aproveitamento do fósforo na planta de arroz proveniente do adubo verde e do superfosfato triplo⁽¹⁾

Adubos verdes	32P	Doses de fósforo				Média dos adubos verdes
		0	30	60	120	
----- aproveitamento do fósforo (%) -----						
Controle	adubo verde					
	SFT		5,56 Aa	3,54 BCb	2,09 ABCc	3,73 B
Crotalária	adubo verde	3,33 Aa	1,93 Bb	1,03 Eb	1,24 Db	1,88 C
	SFT		5,44 Aa	2,87 CDb	2,59 ABb	3,63 B
Guandu	adubo verde	4,11 Aa	1,38 Bb	1,61 DEb	1,60 CDb	2,18 C
	SFT		6,43 Aa	4,33 Ab	3,05 Ac	4,60 A
Média das doses		3,72 a	4,15 a	2,68 b	2,11 b	3,07 ⁽²⁾

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ média geral

O efeito da interação do adubo verde e do fertilizante fosfatado no aproveitamento do P pela cultura do arroz foi altamente significativo ($p \leq 0,001$). Para todas as interações avaliadas, a ausência de P e a dose de 30 mg/vaso de P na forma de SFT, apresentaram médias superiores as demais doses (Tabela 29).

O aproveitamento de P do SFT no tratamento guandu + SFT foi superior aos demais. O AP_{av} foi sempre inferior em relação ao SFT. Entretanto, quando não houve a adição do fertilizante mineral ao tratamento observou-se que o AP_{av} foi maior comparado com adubo verde mais doses de P (Tabela 29). Esse comportamento também foi observado na parte aérea (Tabela 14) e raiz (Tabela 21) da cana-de-açúcar.

A contribuição do P do adubo verde para a cultura do arroz (2,0%) foi superior que a cana-de-açúcar (0,54%). Observou-se o mesmo comportamento do AP_{av} quando adicionou-se ao tratamento doses de P na forma de SFT tanto para a cana-de-açúcar (Tabela 10) como para o arroz (Tabela 29).

Quando o P do adubo verde foi mineralizado, tornou-se prontamente disponível no solo e facilmente absorvido por plantas subseqüentes. Por outro lado, essa fração pode ser rapidamente adsorvida as partículas de argila, acumulando-se na fração não-lábil ou pouco-lábil, interferindo na absorção imediata do P (NOVAIS; SMYTH, 1999). Isso explica o baixo aproveitamento de P do adubo verde para as culturas da cana-de-açúcar (Tabela 10) e para o arroz (Tabela 29).

O baixo aproveitamento de P do adubo verde pelas culturas principais também foi observado por Baligar e Bennett (1986 a), que avaliaram a eficiência de absorção de N, P e K em solos tropicais e concluíram que essa baixa eficiência do P (<10%) foi devido à retenção de P pelas frações de argila e hidróxidos de ferro e alumínio. Bah, Zaharah e Hussin (2006), estudando o aproveitamento do P de fosfato natural, superfosfato triplo e adubos verdes (*Gliricida*, *Imperata* e *Calopogonium*) pela *Setaria Sphacelata*, observaram que a mineralização do P do adubo verde não foi o maior contribuinte para a absorção de P pela *Setaria*. Esse mesmo comportamento foi observado nesse experimento para a cultura do arroz (Tabela 29).

Alguns autores sugerem que grande parte do P foi retido nas frações do solo, Al-P, Fe-P, frações orgânicas e biomassa microbiana. Observaram também consumo considerável de resíduos de P da biomassa microbiana do solo tratado com

combinação de fertilizantes P inorgânico e resíduos de planta (BALIGAR; BENNETT, 1986a ; SANYAL; DE DATTA, 1991; GOLDSTEIN, 1995; IYAMUREMYE; DICK, 1996; BAR-YOSEF et al., 1999; BAH et al., 2003). Possivelmente, isso corresponde com a utilização reduzida de AP_{av} observado na mistura AV + SFT, o que também se nota na tabela 27.

A decomposição do material vegetal pode ser o principal responsável pelo aumento na disponibilidade do P no solo nos tratamentos do AV (sem SFT, dose 0) e do AV + SFT (Tabela 29). A maior disponibilidade de P no solo foi atribuída à liberação desse mineral a partir dos materiais em decomposição e a ação dos produtos desse processo, como os anions orgânicos e grupos hidroxila, no P nativo do solo (STRUTHERS; SIELING, 1950; HUE; IKAWA; SILVA, 1994; IYAMUREMYE; DICK, 1996; NZIGUHEBA et al., 2000; HAYNES; MOKOLOBATE, 2001; KWABIAH et al., 2003; BAH; ZAHARAH; HUSSIN, 2006).

3 CONCLUSÕES

- Há diferença entre as espécies de adubo verde quanto à eficiência em absorver o P menos disponível para a planta;
- O tremoço é a espécie de adubo verde mais eficiente em absorver P na forma menos disponível para a planta;
- O aproveitamento de fósforo pelo superfosfato triplo é maior em relação ao adubo verde;
- O fósforo do adubo verde não é suficiente para suprir a total demanda da cultura principal;
- A aplicação de adubo verde mais superfosfato triplo favorece o aproveitamento de fósforo pela cultura

REFERÊNCIAS

AE, N.; ARIHARA, K.; OKADA, K.; YOSHIHARA T.; OTANI, T.; JOHANSEN C. The role of piscidic acid secreted by pigeonpea roots grown in an Afisol with low-P fertility. In: RANDALL, P.J.; DELHAIZE, E.; RICHARDS, R.A.; MUNNS, R. (Ed.). **Genetic Aspects of Plant Mineral Nutrition**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. p.270-288.

ALCÂNTARA, F.A. de; FURTINI NETO, A.E.; PAULA, M.B. de; MESQUITA, H.A. de; MUNIZ, J.A. Adubação verde na recuperação da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Escuro degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p.277-288, 2000.

ALVARENGA, R.C. **Potencialidades de adubos verdes para conservação e recuperação de solos**. 1993. 112p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1993.

ALVAREZ V.; V.H. **Avaliação da fertilidade do solo: superfícies de resposta – modelos aproximativos para expressar a relação fator-resposta**. Viçosa: Imprensa Universitária, Universidade Federal de Viçosa, 3ª reimpressão, 1994. 75p.

ANDRADE, L.A.B. **Efeitos da incorporação de *Crotalaria juncea* L. sobre algumas características do solo e do desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 1982. 129p. (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.

AULAKH, M.S.; KHERA, T.S.; DORAN, J.W.; BRONSON, K.F. Managing Crop Residue with Green Manure, Urea, and Tillage in a Rice-Wheat Rotation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.65, n.3, p.820-827, 2001.

AWERBUCH, T.; AVNIMELICH, Y. Counting ³²P in plant tissues using the Cerenkov effect. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 33, n. 3, p. 260-264, 1970.

BAH, A.R.; ZAHARAH, A.R.; HUSSIN, A. Phosphorus uptake from green manures and phosphate fertilizers applied in an acid tropical soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v.37, p. 2077-2093, 2006.

BAH, A.R.; ZAHARAH, A.R.; HUSSIN, A.; HUSNI, M.H.A.; HALIMI, M.S. Phosphorus status of amended soil as assessed by conventional and isotopic methods.

Communications in Soil Science and Plant Analysis, Philadelphia, v.34, p. 2659-2681, 2003.

BALIGAR, V.C.; BENNETT, O.L. NPK-fertilizer efficiency. A situation analysis for the tropics. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 10, p. 147-164, 1986b.

BALIGAR, V.C.; BENNETT, O.L. Outlook on fertilizer use efficiency in the tropics. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 10, p. 83-96, 1986a.

BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K. Agronomy and physiology of tropical cover crops. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 30, p. 1287–1339, 2007.

BALIGAR, V.C.; FAGERIA; N.K.; HE, Z.L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 32, p. 921-950, 2001.

BAR-YOSEF, B.; ROGERS, C.D.; WOLFRAM, J.H.; RICHMAN, E. Pseudomonas cepacia-mediated rock phosphate solubilization in kaolinite and montmorillonite suspensions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, p.1703–1708, 1999.

BEEBE, K.R.; KOWALSKI, B.R. An introduction to multivariate calibration and analysis. **Analytical Chemistry**, Oxford, v.59, p. 1007, 1987.

BIELESKI, R.L.; FERGUSON, I.B. Physiology and metabolism of phosphate and its compounds. IN: LAUCHLI, A.; BIELESKI, R.L. (Ed.). **Inorganic plant nutrition**. Berlin: Springer-Verlag, p. 422-449, 1983.

BIN, J. Utilization of green manure for raising soil fertility in China. **Soil Science**, Baltimore, v. 135, p. 65-69, 1983.

BLAIR, G.J.; BOLAND, O.W. The release of phosphorus from plant material added to soil. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.16, p.101-111, 1978.

BOLONHEZI, D. Uso de adubos verdes na renovação do canavial. In: SEGATO, S.V.; FERNANDES, C.; PINTO, A. de S. (Org.). **Expansão e renovação de canavial**. Ribeirão Preto: CP2, 2007. v.1, p.159-174.

BOLONHEZI, D.; MONTEZUMA, M. **Rotação de culturas e a busca pela sustentabilidade econômica e ambiental em canaviais**. Disponível em: <<http://www.zoonews.com.br/noticias2/noticia.php?idnoticia=110623>>. Acesso em: 15 mai.2008.

BRAUM, S.M; HELMKE, P.A. White lupin utilizes soil phosphorus that is unavailable to soybean. **Plant and Soil**, The Hague, v. 176, p.95-100, 1995.

BÜNEMANN, E.; SMITHSON, P.C.; JAMA, B.; FROSSARD, E.; OBERSON, A. Maize productivity and nutrient dynamics in maize-fallow rotations in western Kenya. **Plant and Soil**, The Hague, v. 264, p.195-208, 2004.

BURLE, M.L; CARVALHO, A.M. ; AMABILE, R.F; PEREIRA, J. Caracterização das espécies de adubo verde. In: CARVALHO, A.M. de; AMABILE, R.F. **Cerrado: adubação verde**. Planaltina: EMBRAPA, Cerrados, 2006. 369p.

CALEGARI, A.; MONDARDO, A.; BULISANI, E.A.; WILDNER, L. do P.; COSTA, M.B.B. da; ALCÂNTARA, P.B.; MIYASAKA, S.; AMADO, J.T. Aspectos gerais da adubação verde. In: COSTA, M.B.B. (Coord.). **Adubação verde no sul do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1993. 346p.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; VALADARES, J.M. **Métodos de análise química, mineralogia e física de solos**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1986. 94 p. (Boletim Técnico, 78).

CARDOSO, E.M. **Contribuição para o estudo da adubação verde dos canaviais**. 1956. 109p. Tese (Doutorado na área de Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1956.

CARVALHO, A.M. de; BUSTAMANTE, M.M.C.; SOUZA JUNIOR, J.G.A.; VIVALDI, L.J. Decomposição de resíduos vegetais em latossolo sob cultivo de milho e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.2831-2838, 2008. Número especial.

CARVALHO, A.M. **Uso de plantas condicionadoras com incorporação e sem incorporação no solo:** composição química e decomposição dos resíduos vegetais; disponibilidade de fósforo e emissão de gases. Tese(Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

CAVIGELLI, M.A.; THIEN, J.S. Phosphorus bioavailability following incorporation of green manure crops. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.67, p.1186–1194, 2003.

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

COMPANHIA NACIONAL DE ABSTECIMENTO. Disponível em :<<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em:20 fev. 2010.

DALAL, R.C. Mineralization of carbon and phosphorus from carbon-14 and phosphorus-32 labelled plant material added to soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.43, p. 913-916, 1979.

DE-POLLI, H.; CHADA, S.S. Adubação verde incorporada ou em cobertura na produção de milho em solos de baixo potencial de produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.13, p.287-293, 1989.

DI, H. J; CONDRON, L. M.; FROSSARD, E. Isotope techniques to study phosphorus cycling in agricultural and forest soils: a review. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 24, p. 1-12, 1997.

DIEST, A. van; BLACK, C.A. Soil organic phosphorus and plant growth II. Organic phosphorus mineralized during incubation. **Soil Science**, New Brunswick, v. 87, n.1, p. 145-154, 1959.

DINKELAKER, B.; RÖMHELD, V.; MARSCHNER, H. Citric acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rhizosphere of white lupin (*Lupinus albus* L.).**Plant, Cell and Environment**, Oxford, v.12, n.3, p.285-292, 1989.

DORADO, J.; ZANCADA, M.; ALMENDROS, G.; LÓPEZ-FANDO, C. Changes in soil properties and humic substances after long-term amendments with manure and crop residues in dryland farming systems. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v.166, p.31–38, 2003.

EASTERWOOD, G.W.; SARTAIN, J.B. Clover residue effectiveness in reducing orthophosphate sorption on ferric hydroxide coated soil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.54, p.1345-1350, 1990.

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

EVANS, J.; CONDON, J. New fertilizer options for managing phosphorus for organic. **Crop & Pasture Science**, Victoria, v. 60, p. 152–162, 2009.

FAGERIA; N.K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, p.6-16, 1998.

FAGERIA, N.K. Nutrição mineral. In: VIEIRA, N.R.A; SANTOS, A.B. dos; SANTANA, E.P. (Ed.). **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antonio de Goiás: EMBRAPA Arroz e Feijão, 1999. p. 172-196.

FAGERIA, N.K.; BARBOSA FILHO, M.P. Avaliação de cultivares de arroz para maior eficiência na absorção de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.16, p. 777–782, 1981.

FAGERIA, N.K.; OLIVEIRA, I.P.; STONE, L.F. **Cultivo do Arroz de Terras Altas: .Adubação**. Goiás. EMBRAPA, Embrapa Arroz e Feijão, 2003. (Sistemas de Produção, 1)

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; BAILEY, B.A. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v.36, p.2733–2757, 2005.

FAO. **Situación Alimentaria Mundial**. Disponível em <<https://www.fao.org.br>> Acesso em: 03 mar. 2010.

FARDEU, J.C.; GUIRAUD, G.; MAROL, C. The role of isotopic techniques on the evaluation of the agronomic effectiveness of P fertilizers. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 45, p. 101-109, 1996.

FERNANDES, C.; MURAOKA, T. Absorção de fósforo por híbridos de milho cultivados em solo de cerrado. **Scientia agrícola**, Piracicaba, v.59, n.4, p. 781-787, 2002.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows versão 4.0 In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., São Carlos, 2000. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.

FISCHER, K.S. Toward increasing nutrient use efficiency in rice cropping systems: the next generation of technology. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.56, p.1-6, 1998.

FRANZINI, V.I.; MURAOKA, T.; MENDES, F.L. Ratio and rate effects of ³²P-triple superphosphate and phosphate rock mixtures on corn growth. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 66, n.1, p.71-76, 2009.

FRIESEN, D.K.; BLAIR, G.J. A dual radiotracer study of transformations of organic, inorganic and plant residue phosphorus in soil in the presence and absence of plants. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.26, p. 355-356, 1988.

FULLER, W.H.; NIELSON, D.R.; MILLER, R.W. Some factors influencing the utilization of P from crop residues. **Soil Science Society of American Proceedings**, Madison, v. 20, p. 218-224, 1956.

GAHOONIA, T.S.; NIELSEN, N.E. The effect of root induced pH changes on the depletion of inorganic and organic phosphorus in the rhizosphere. **Plant and Soil**, The Hague, v. 143, p. 185-191, 1992.

GARDNER, W.K.; BARBER, D.A.; PARBERRY, D.G. The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L. III. The probable mechanism by which phosphorus movement in the soil/root interface is enhanced. **Plant and Soil**, The Hague, v.70, p.107-124, 1983.

GARG, S.; BAHL, G.S. Phosphorus availability to maize as influenced by organic manures and fertilizer P associated phosphatase activity in soils. **Bioresource Technology**, Essex, v.99, p.5773-5777, 2008.

GOLDSTEIN, A.H. Recent progress in understanding the molecular genetics and biochemistry of calcium phosphate solubilization by gramnegative bacteria. **Biological Agriculture and Horticulture**, Husbrandry, v.12, p.185–193, 1995.

GUIMARÃES, C.M.; SANTOS, A.B dos; MAGALHÃES JÚNIOR, A. de; STONE, L.F. Sistemas de cultivo. In: SANTOS, A.B. dos; STONE, L.F.; VIEIRA, N.R. de A. **A cultura do arroz no Brasil**, 2006. p.53-96.

GUPTA, P.C.; O'TOOLE, J.C. **Upland rice**: a global perspective. Los Baños: International Rice Research Institute, 1986. 358 p.

HAVLIN, J.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil Fertility and Fertilizers**: an introduction to nutrient management .7th ed. New Jersey. 2005. 515 p.

HAYNES, R.J.; MOKOLOBATE, M.S. Ameliorations of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Drodrecht, v. 59, p.327-332, 2001.

HINSINGER, p. Bioavailability of inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, v. 237, p. 173-195, 2001.

HOCKING, P.J.; RANDALL, P.J. Better growth and phosphorus nutrition of sorghum and wheat following organic acid secreting crops. In: HORST, W. J.; SCHENK, M.K.; BÜRKERT, A. et al (Ed.) **Plant nutrition** food security and sustainability of agroecosystems through basic and applied research. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001. p.548-549. Completar editors.

HOCKING, P.J.; KEERTHISINGHE, G.; SMITH, F.W.; RANDALL, P.J. Comparison of the ability of different crop species to access poorly-available soil phosphorus. In: ANDO, T.; FUJITA K.; MATSUMOTO, K.H.; MORI, S.; SEKIYA, J. **Plant Nutrition - for sustainable food production and environment**. Kluwer Academic Publishers, 1997. p. 305-308.

HORST, W.J.; MANH, M.; JIBRIN, J.M.; CHUDE, V.O. Agronomic measures for increasing P availability to crops. **Plant and Soil**, The Hague, v. 237, p.211-223, 2001.

HUE, N.V.; IKAWA, H.; SILVA, J.A. Increasing plant-available phosphorus in an Ultisol with a yard-waste compost. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 25, p.3291-3303, 1994.

HUNDAL, H.S.; BISWAS, C.R.; VIG, A.C. The utilization by rice of P from different ³²P labelled green manures. **Biological Wastes**, England, v.22, p.97-105, 1987.

IYAMUREMYE, F.; DICK, R.P. Organic amendments and phosphorus sorption by soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 56, p. 139-185, 1996.

JOHNSON, J.F.; VANCE, C.P.; WEIBLEN, G. Root carbon dioxide fixation by phosphorus –deficient *Lupinus albus*, Contribution to organic acid exudation by proteoid roots. **Plant Physiology**, Minneapolis, v.112, p.19-30, 1996.

KAFKAFI, U.; BAR-YORSEF, B.; ROSENBERG, R.; SPOSITO, G. Phosphorus adsorption by kaolinite and montmorillonite: II. Organic anion competition. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.52, p.1585-1589, 1988.

KEERTHISINGHE, G.; HOCKING, P.J.; RYAN, P.R.; DELHAIZE, E. Effect of phosphorus supply on the formation and function of proteoid roots of white lupin (*Lupinus albus* L.). **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v.21, n.5, p. 467-478, 2002.

KIEHL, E.J. **Contribuição para o estudo da poda e da decomposição de adubos verdes**. Piracicaba: ESALQ, 1960. 113p. Tese de (Livre Docência – em Agronomia) - - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1960.

KIRK, G.J.D. A model of phosphate solubilization by organic anion excretion from plant roots. **European Journal Soil Science**, Madison, v.50, p.369-378, 1999.

KIRK, G.J.D.; SANTOS, E.E.; SANTOS, M.S. Phosphate solubilization by organic anion excretion from rice growing in aerobic soil: rates of excretion and decomposition, effects on rhizosphere pH and effects on phosphate solubility and uptake. **New Phytology**, Minneapolis, v. 142, p. 185-200, 2000.

KWABIAH, A.B.; STOSKOPF, N.C.; PALM, C.A.; VORONEY, R.P. Soil P availability as affected by the chemical composition of plant material: Implication of P-limiting agriculture in tropical Africa. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, Amsterdam, v. 100, p.53-61, 2003.

LANDELL, M.G. de A. Cana sustentável. Disponível em: <http://www.massey.com.br/portugues/campo/campo_assunto.asp?idedicao=69&ididassun=251>. Acesso em: 8 ago. 2008.

LARSEN, S. Isoionic exchange of phosphate in paddy soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 27, p. 401-407, 1967.

LARSEN, S. The use of ^{32}P in studies on the uptake of phosphorus by plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.4, n.1, p. 1-10, 1952.

LE MARE, P.H.; PEREIRA, J.; GOEDERT, W.T. Effects of Green manure on isotopically exchangeable phosphate in a dark-red latosol in Brazil. **European Journal of Soil Science**, Madison, v. 38, n. 2, p. 199-209, 1987.

LI, G.C.; MAHLER, R.L.; EVERSON, D.O. Effects of plant residues and environmental factors on phosphorus availability in soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v.21, p.471-491, 1990.

LI, X.F.; ZUO, F.H.; LING, G.Z.; LI, Y.Y.; YANG, P.Q.; TANG, X.L. Secretion of citrate from roots in response to aluminum and low phosphorus stresses in *Stylosanthes*. **Plant and Soil**, The Hague, v. 325, p. 219-229. 2009.

LONERAGAN, J.F. The physiology of plant tolerance to low phosphorus availability. In: JUNG G.A. (Ed.). Crop tolerance to suboptimal land conditions. Madison: American Society of Agronomy, 1978. p. 329-343. (Special Publication, 32).

LUZ, P.H. de c.; VITTI, G.C.; QUINTINO, T.A.; OLIVEIRA, D.B. de. **Utilização de adubação verde na cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ-USP/GAPE/Usina São Manoel, 2005. 53p.

MacRAE, R.J.; MEHUYS, G.R. The effect of green manuring on the physical properties of temperate-area soils. **Advances in Soil Science**, New York, v.3, p.71-94, 1985.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo. :Editora Agronômica Ceres, 2006. 638p.

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

MARSOLA, T. **Mineralização de fósforo do adubo verde e sua absorção por plantas de arroz**. 2008. 114p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

MASCARENHAS, H.A.A.; WUTKE, A.B.; TANAKA, R.T.; CARLINI-GARCIA, L.A.; BOLONHEZI, D. Leguminosas adubos verdes em áreas de renovação de canavial no Estado de São Paulo. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 124, p.14-18, 2008.

MATIAS, G.C.S. **Eficiência nutricional de fontes de fósforo com solubilidade variável em água em cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.)**. 2006. 93 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

McLAUGHLIN, M.J.; ALSTON, A.M.; MARTIN JK Phosphorus cycling in wheat pasture rotations. II. The role of the microbial biomass in phosphorus cycling. **Australian Journal of Soil Research**, Melbour, v. 26, p. 333–342, 1988.

MENDES, F.L. **Efeito do volume de terra no desenvolvimento das plantas de feijão e milho, na absorção do fósforo e no valor L (³²P)**. 2006. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

MENDONÇA, E.S.; OLIVEIRA, F.H.T. Fornecimento de nutrientes pela matéria orgânica do solo. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTA NO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1., 2000, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: Associação dos Engeheiros Agrônomos dos Campos Gerais, 2000. p. 70-81.

MIYASAKA, S. Histórico de estudos de adubação verde, leguminosas viáveis e suas características. In: FUNDAÇÃO CARGILL (Ed.). **Adubação verde no Brasil**. Campinas: Fundação Cargill, 1984. p.64-123.

MOLL, R.H.; KAMPRATH, E.J.; JACKSON, W.A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 562-564, 1982.

MONTECINOS, C. Manejo biológico del fósforo en el suelo. **Agroecología y Desarrollo**, Santiago de Chile, v.8, n.9, p 31-34, 1997.

MURAOKA, T. Uso de isótopo em fertilidade do solo. In: OLIVEIRA, A.J.; GARRIDO, W.E.; ARAUJO, J.D.; LOURENÇO, S. **Metodologia de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: EMBRAPA, SEA, 1991. p. 255-257.

MURAOKA, T.; ORLANDO FILHO, J.; BOARETTO, A.; AMBROSANO, E.J. Management of crop residues in sugarcane and cotton systems in Brazil. In: LEROY, R.D.B.; BLAIR, G.J.; CRASWELL, E.T. eds. *Soil Organic Management for Sustainable Agriculture*. **ACIAR Proceedings**, Canberra, Austrália, 56, p.27-31, 1995.

MURAOKA, T.; VILLANUEVA, F.C.A.; FERNANDES, C.; CORAZZA, E.J. Comparison of the ability of different plant species and corn hybrids to access poorly-available soil phosphorus in an oxisol of the cerrado region, Brazil. In: **MANAGEMENT PRACTICES FOR IMPROVING SUSTAINABLE CROP PRODUCTION IN TROPICAL ACID SOILS. Proceedings Series**, IAEA, p. 137-146, 2006.

NACHIMUTHU, G.; GUPPY, C.; KRISTIANSEN, P.; LOCKWOOD, P. Isotopic tracing of phosphorus uptake in corn from ³³P labeled legume residues and ³²P labeled fertilizers applied to a sandy loam soil. **Plant and Soil**, The Hauge, v.314, p.303-310, 2009.

NAVES, M. M. V.; BASSINELLO, P. Z. Importância na nutrição humana. In: SANTOS, A. B.; STONE L. F.; N. R. A. VIEIRA. 2 ed. **A cultura do Arroz no Brasil..** Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA, cap. 1, p. 17-31, 2006.

NEPTUNE, A.M.L.; MURAOKA, T.; STEWART, J.W.B. Efficiency of fertilizer phosphorus utilization by common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Carioca under different methods of applying phosphatic fertilizer. **Turrialba**, San José, v.29, p. 29-34, 1979.

NORMAN, M.J.T.; PEARSON, C.J.; SEARLE, P.G.E. **The ecology of tropical food crops**, 2nd ed. Melbourne: Cambridge University Press, 1995. 416 p.

NOVAIS, R.T.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

NZIGUHEBA, G.; BÜNEMANN, E.K. Organic phosphorus dynamics in tropical agroecosystems. In: TURNER, B.L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D.S. (Ed.) **Organic phosphorus in the environment**. cap. 11 2005. p. 243-268.

NZIGUHEBA, G.; MERCKYX, R. PALM, C.A.; RAO, M.R. Organic residues affect phosphorus availability and maize yields in a Nitisol of western Kenya. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 32, p. 328-339, 2000.

OBERSON, A.; JONER, E.J. Microbial turnover of phosphorus in soil. In: TURNER, B. L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. S. **Organic phosphorus in the environment**. Wallingford, Oxfordshire, UK: CABI Publishing , 2005. p.133–164.

ODHAIAMBO, J.J.O.; BOMKE, A.A. Grass and legume cover crop effects on dry matter and nitrogen accumulation. **Agronomy Journal**, Madison, v.93, p.299-307, 2001.

OTANI, T.; AE, N.; TANAKA, M. Phosphorus uptake mechanisms of crop growth in soils with low P status. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.42, p.553-560, 1996.

PAVINATO, P.S.; ROSOLEM, C.A. Disponibilidade de nutrientes no solo – decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 911-920, 2008.

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

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundação IAC, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAPOSO, R.W.C. **Eficiência de cultivares de soja na absorção e utilização de fósforo**. 2003. 75 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

RENGEL, Z. Physiological mechanisms underlying differential nutrient efficiency of crop genotypes. In: RENGEL, Z. (Ed). **Mineral nutrition of crops**: Fundamental mechanisms and implications. cap. 9, 1999. p. 226-266.

RICHARDSON, A.E.; GEORGE, T.S.; HENS, M.; SIMPSON, R.J. Utilization of soil organic phosphorus by higher plants. In: TURNER, B.L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D.S. **Organic phosphorus in the environment**. Wallingford Oxfordshire, UK: CABI Publishing, 2005. p.165–184.

RICHARDSON, A.E.; HOCKING, P.J.; SIMPSON, R.J.; GEORGE, T. Plant mechanisms to optimize access to soil phosphorus. **Crop & Pasture Science**, Victoria, v. 60, p. 124-143, 2009.

ROSSETTO, R. A cultura da cana, da degradação à conservação. **Visão Agrícola**, Piracicaba, n. 1, p. 80-85, 2004.

ROTILI, E.A. **Eficiência e resposta quanto ao uso de nitrogênio e fósforo de cultivares de arroz em solos de várzea irrigada e terras altas no sul do estado de Tocantins**. 2009. 91 p. Dissertação (Mestrado na área de Produção Vegetal) - Universidade Federal de Tocantins. Gurupi, 2009.

SANYAL, S.K.; DE DATTA, S.K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Advances in Soil Science**, New York, v. 16, p. 111-119, 1991.

SARRUGE, J.R. Soluções nutritivas. **Summa Phytopatologica**, Piracicaba, v.1,. p. 231-233, 1975.

SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. **Análises químicas em plantas**. Piracicaba:ESALQ, Departamento de Química, 1974. 57 p.

SAS INSTITUTE. **SAS user´s guide**: statistics. 4th ed. Cary, 1996.

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

SCHILLING, G.; GRANSEE, A.; DEUBEL, A.; LEZOVIC, G.; RUPPEL, S. Phosphorus availability, root exudates, and microbial activity in the rhizosphere. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 161, n.4, p. 456-478, 1998.

SCIVITTARO, W.B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E.; TRIVELIN, P.C.O. Utilização de nitrogênio de adubos verdes e mineral pelo milho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.34, p.917-926, 2000.

SHANE, M.W.; LAMBERS, H.; CAWTHRAY, G.R.; KUHN, A.J.; SCHURR, U. Impact of phosphorus mineral source (Al-P or Fe-P) and pH on cluster-root formation and carboxylate exudation in *Lupinus albus* L. **Plant and Soil**, The Hague, v.304, p.169-178, 2008.

SHARPLEY, A.N.; SMITH, S.J. Mineralization and leaching of phosphorus from soil incubated with surface-applied and incorporated crop residue. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 18, p. 101-105, 1989.

SILVA, F.V.; NOGUEIRA, A.R.A.; SOUZA, G.B.; ZAGATTO, E.A.G. A polyvalent flow injection system for multielemental spectrophotometric analysis of plant materials. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 370, p. 39-46, 1998.

SILVA, M.L.; CURI, N.; BLANCANEUX, P.; LIMA, J.M.; CARVALHO, A.M. Rotação adubo verde – milho e adsorção de fósforo em latossolo vermelho-escuro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.6, p.649-654, 1997.

SODRE, A. de A. Cana X alimentos. Disponível em:
<<http://www.asssomogi.com.br/artigos.php?id=6>>. Acesso em: 12 nov.2008.

SOUZA, D.F. A adubação verde e o problema dessa prática na lavoura canavieira paulista. 1953. 47 p. Tese de Doutorado (na área de Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1953.

STEWART, J.W.B.; TIESSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v.4, p.41-60, 1987.

STRUTHERS, P.H.; SIELING, D.H. Effect of organic anions on phosphate precipitation by iron and aluminum as influenced by pH. **Soil Science**, Baltimore, v. 69, p.205–221, 1950.

SYSTAT SOFTWARE Inc – SSI. **Sigmaplot for Windows, version 10**. 2006.
Disponível em: <http://www.systat.com/products/sigmaplot/>. Acesso em: 05 fev.2009.

TARAFDAR, J. C.; CLAASSEN, N. Organic phosphorus utilization by wheat plants under sterile conditions. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.39, p.25–29, 2003.

TATE, K. R. The biological transformation of P in soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 76, p. 245-256, 1984.

TURNER, B.L.; MCKELVIE, I.D.; HAYGARTH, P.M. Characterization of water-extractable soil organic phosphorus by phosphatase hydrolysis. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.34, p. 27-35, 2002.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-açúcar. Estatísticas. Disponível em: <www.portalunica.com.br/portalunica/files/referencia_estatisticas_producao_Brasil-7-Tabela-M>. Acesso em: 25 jun.2009.

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

VANLAUWE, B.; NWOKE, O.C.; DIELS, J.; SANGINGA, N.; CARSKY, R.J.; DECKERS, J.; MERCKX, R. Utilization of rock phosphate by crops and a representative toposequence in the Northern Guinea savanna zone of Nigeria: Response by *Mucuna pruriens*, *Lablab purpureus*, and maize. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.32, p.2063–2077. 2000.

VITTI, G.C.; MAZZA, J.A.; QUINTINO, T.A.; OTTO, R. Nutrição e adubação. In: RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. **Plantio da cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: ESALQ, 2006. p.102-144.

VOSE, P.B. **Introduction to nuclear techniques in agronomy plant biology**. London: Pergamon Press, 1980. 391 p.

WANG, B.L.; SHEN, J.B.; ZHANG, W.H.; ZHANG, F.S.; NEUMANN, G. Citrate exudation from white lupin induced by phosphorus deficiency differs from that induced by aluminum. **New Phytologist**, Oxford, v. 176, p. 581-589, 2007.

YOKOYAMA, L.P. O arroz no Brasil de 1985/86 a 1999/00: aspectos conjunturais. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 1. REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 7., 2002, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: EMBRAPA Arroz e Feijão, 2002. p. 96-99.

ZAPATA, F. Isotopic techniques in soil fertility and plant nutrition studies. IN: HARDARSON, G. (Ed.) **Use of Nuclear Technique in Studies of Soil-Plant Relationships**, Training Course Series, n. 2, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, p. 109-127, 1990.

APÊNDICES

Apêndice A

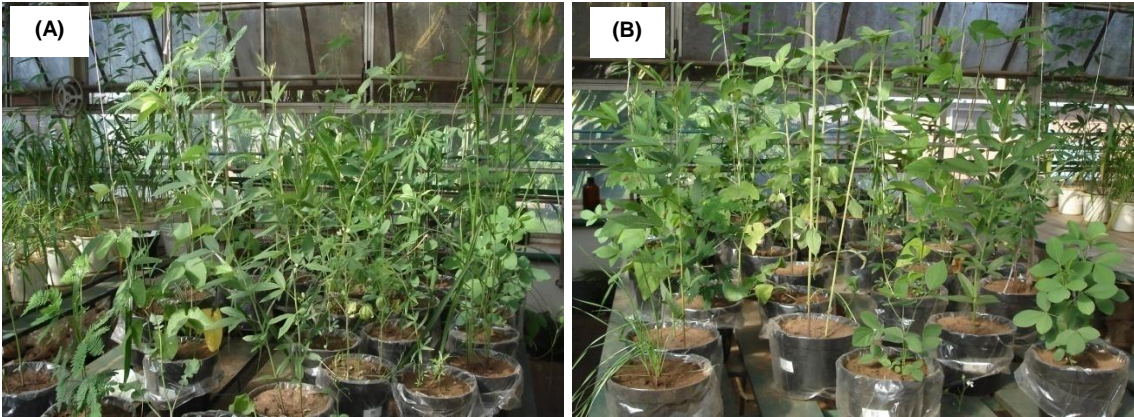


Figura 1A – Experimento da identificação e seleção dos adubos verdes quanto à absorção de P

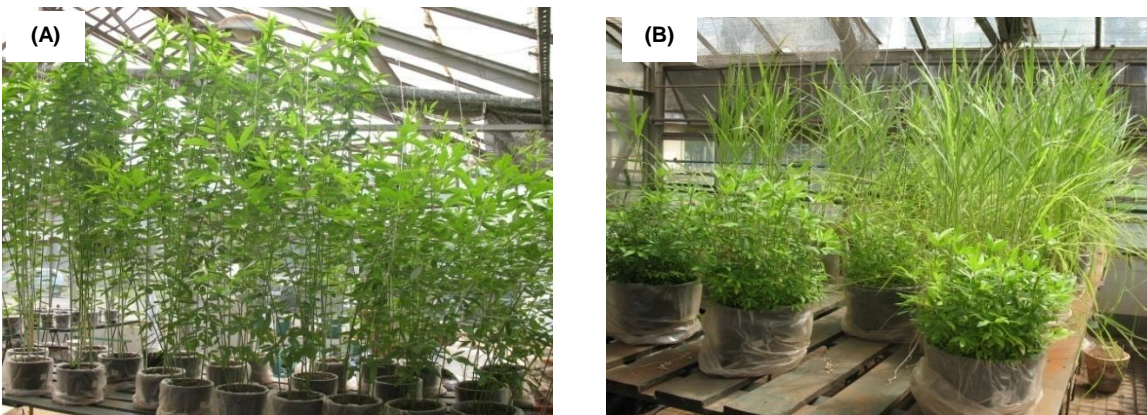


Figura 2A – Produção de adubos verdes: *Crotalaria juncea* e Guandu anão (A), *Braquiária ruziziensis* e Estilosante campo grande (B)



Figura 3A – Adubos verdes triturados: Braquiária ruziziensis (A), Crotalária juncea (B), Estilosante campo grande (C) e Guandu anão (D)



Figura 4A – Mudanças de cana-de-açúcar (A), transplante das mudanças de cana-de-açúcar (B), muda de cana-de-açúcar (C)

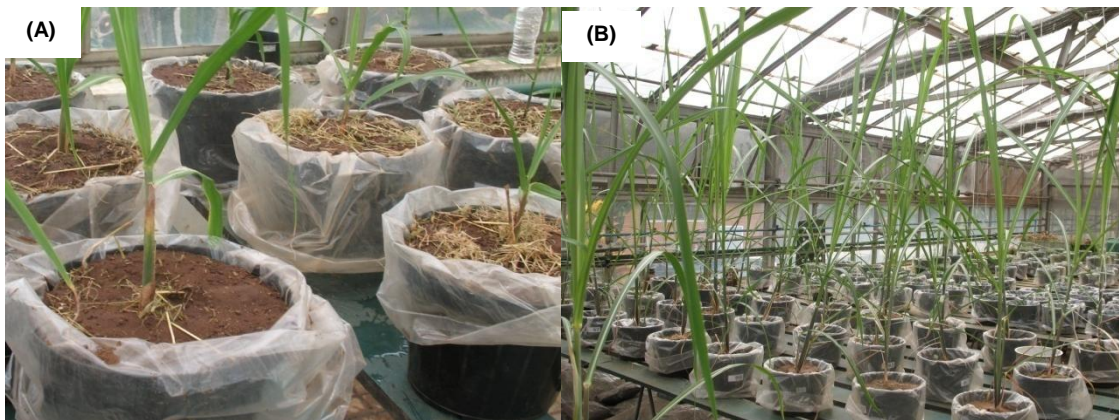


Figura 5A – Adubo verde incorporado no solo (A), cana-de-açúcar: adubo verde + SFT (B)

Apêndice B

Experimento I: Identificação e seleção de espécies de adubos verdes mais eficientes em absorver fósforo

Tabela B1 – Valores de matéria seca, P acumulado, atividade específica e valor L e os desvios-padrão das médias das diferentes espécies de adubo verde

Adubo verde	MS	P ac	S	L^{VI}
	g	mg	DPM μg^{-1} P	mg kg^{-1} solo P
Braquiária ruziziensis	3,37 \pm 0,05	3,57 \pm 0,12	138,33 \pm 14,83	3,14 \pm 0,47
Braquiária marandú	3,08 \pm 0,23	3,19 \pm 0,22	172,52 \pm 19,69	3,00 \pm 0,19
Braquiária xaraés	2,43 \pm 0,33	2,88 \pm 0,52	241,22 \pm 38,32	3,81 \pm 0,63
Calopogônio	3,50 \pm 0,17	4,41 \pm 0,03	140,23 \pm 3,56	2,74 \pm 0,30
Capim colônia	2,96 \pm 0,02	2,59 \pm 0,02	254,67 \pm 10,06	1,85 \pm 0,08
Crotalária breviflora	2,20 \pm 0,13	3,51 \pm 0,07	192,37 \pm 27,13	6,17 \pm 1,11
Crotalária junceae	6,26 \pm 0,11	4,99 \pm 0,31	80,56 \pm 5,61	1,02 \pm 0,07
Crotalária mucronata	2,10 \pm 0,05	2,57 \pm 0,10	184,08 \pm 6,96	6,84 \pm 0,22
Crotalária ochroleuca	3,43 \pm 0,18	3,95 \pm 0,17	140,07 \pm 7,35	2,89 \pm 0,23
Crotalária spectabilis	3,55 \pm 0,11	4,16 \pm 0,28	135,92 \pm 1,30	2,73 \pm 0,23
Estilosante c. grande	0,99 \pm 0,16	1,82 \pm 0,28	300,54 \pm 44,88	23,90 \pm 5,90
Estilosante minerão	0,60 \pm 0,13	1,09 \pm 0,33	1047,05 \pm 34,79	18,43 \pm 1,20
Feijão de porco	16,10 \pm 0,47	11,46 \pm 0,66	10,43 \pm 0,55	1,36 \pm 0,02
Guandu fava larga	4,73 \pm 0,13	4,87 \pm 0,11	88,11 \pm 1,53	2,24 \pm 0,22
Guandu anão	4,73 \pm 0,28	5,07 \pm 0,11	75,53 \pm 3,79	2,86 \pm 0,50
Girassol iarama	5,17 \pm 0,16	5,70 \pm 0,35	93,14 \pm 6,45	1,56 \pm 0,05
Girassol uruguai	5,30 \pm 0,12	5,61 \pm 0,32	84,44 \pm 2,89	1,68 \pm 0,12
Labe labe	5,24 \pm 0,28	5,94 \pm 0,04	84,34 \pm 4,34	1,78 \pm 0,20
Leucena	1,56 \pm 0,26	2,45 \pm 0,48	317,40 \pm 79,00	8,46 \pm 1,13
Milheto	3,79 \pm 0,24	3,32 \pm 0,28	150,92 \pm 9,08	1,99 \pm 0,29
Mucuna anã	7,37 \pm 0,61	6,30 \pm 0,37	46,36 \pm 2,26	1,61 \pm 0,37
Mucuna cinza	8,30 \pm 0,59	7,12 \pm 0,41	31,38 \pm 2,87	2,00 \pm 0,18
Mucuna preta	10,08 \pm 0,56	8,45 \pm 0,45	19,65 \pm 1,44	2,22 \pm 0,12
Sesbânia	3,86 \pm 0,27	4,10 \pm 0,17	96,42 \pm 8,57	3,53 \pm 0,36
Tremoço	1,77 \pm 0,24	1,66 \pm 0,19	17,25 \pm 1,71	127,71 \pm 29,53

^{VI} MS: matéria seca; P ac: P acumulado na MS; S: atividade específica; L: valor L.

Tabela B2 – Valores de Ca, Mg, K e S acumulados e os desvios-padrão das médias das diferentes espécies de adubo verde

Adubo verde	Ca ac	Mg ac	K ac	S ac¹⁾
	----- mg -----			
Braquiária ruziziensis	0,30 ± 0,11	0,28 ± 0,13	14,48 ± 4,85	0,12 ± 0,05
Braquiária marandú	5,03 ± 0,38	4,86 ± 0,38	167,27 ± 2,89	0,63 ± 0,05
Braquiária xaraés	2,74 ± 0,09	3,48 ± 0,08	152,95 ± 8,21	0,67 ± 0,06
Calopogônio	1,50 ± 0,04	1,86 ± 0,20	130,85 ± 6,29	0,66 ± 0,05
Capim colônia	11,16 ± 0,19	3,50 ± 0,06	122,50 ± 1,64	1,12 ± 0,01
Crotalaria breviflora	3,08 ± 0,25	2,27 ± 0,41	123,82 ± 14,98	0,58 ± 0,11
Crotalaria juncea	8,30 ± 0,60	2,43 ± 0,18	63,08 ± 1,91	0,71 ± 0,01
Crotalaria mucronata	14,62 ± 1,06	5,34 ± 0,57	183,00 ± 2,60	0,97 ± 0,05
Crotalaria ochroleuca	5,37 ± 0,32	2,33 ± 0,11	59,30 ± 2,70	0,66 ± 0,01
Crotalaria spectabilis	5,17 ± 0,09	3,28 ± 0,02	134,77 ± 1,32	0,91 ± 0,02
Estilosante c. grande	13,20 ± 0,40	2,99 ± 0,16	117,62 ± 3,10	1,00 ± 0,03
Estilosante minerão	5,89 ± 0,34	1,38 ± 0,12	43,79 ± 0,65	0,45 ± 0,02
Feijão de porco	2,33 ± 0,31	0,49 ± 0,06	26,23 ± 5,07	0,19 ± 0,03
Guandu fava larga	47,30 ± 2,61	12,95 ± 0,79	365,74 ± 5,18	1,27 ± 0,05
Guandu anão	12,90 ± 1,22	3,27 ± 0,15	101,29 ± 2,04	0,80 ± 0,01
Girassol iarama	13,52 ± 1,39	4,32 ± 0,83	121,76 ± 3,24	1,00 ± 0,09
Girassol uruguai	17,55 ± 1,71	9,13 ± 0,68	253,50 ± 7,87	0,76 ± 0,04
Labe labe	19,68 ± 1,21	13,36 ± 0,28	275,97 ± 2,25	0,87 ± 0,07
Leucena	16,13 ± 0,20	4,08 ± 0,02	156,70 ± 1,86	0,95 ± 0,02
Milheto	3,82 ± 0,49	1,57 ± 0,22	53,13 ± 3,78	0,78 ± 0,04
Mucuna anã	6,77 ± 0,43	5,48 ± 0,24	177,30 ± 6,02	0,57 ± 0,03
Mucuna cinza	27,60 ± 3,12	9,04 ± 0,62	129,48 ± 15,13	0,97 ± 0,04
Mucuna preta	24,43 ± 2,56	7,91 ± 1,24	149,24 ± 4,59	1,15 ± 0,03
Sesbânia	10,13 ± 0,56	3,70 ± 0,17	59,61 ± 4,53	0,96 ± 0,03
Tremoço	2,29 ± 0,08	0,92 ± 0,05	27,38 ± 3,80	0,28 ± 0,02

¹⁾ Ca ac: Ca acumulado na matéria seca (MS); Mg ac: Mg acumulado na MS; K ac: K acumulado na MS; S ac: S acumulado na MS.

Tabela A3 – Valores de Cu, Fe, Mn e Zn acumulados e os desvios-padrão das médias das diferentes espécies de adubo verde

Adubo verde	Cu ac	Fe ac	Mn ac	Zn ac ¹⁾
	----- mg -----			
Braquiária ruziziensis	0,81 ± 0,37	11,91 ± 5,99	8,15 ± 3,46	3,60 ± 1,53
Braquiária marandú	6,60 ± 0,12	112,62 ± 4,72	132,77 ± 7,64	42,21 ± 1,86
Braquiária xaraés	5,99 ± 0,21	86,07 ± 4,56	146,40 ± 4,44	36,87 ± 0,51
Calopogônio	6,19 ± 0,70	86,72 ± 15,83	110,09 ± 8,02	31,05 ± 2,62
Capim colônião	9,83 ± 0,28	163,43 ± 11,34	98,46 ± 2,74	32,85 ± 0,74
Crotalária breviflora	6,32 ± 0,34	99,33 ± 5,51	115,04 ± 15,07	35,40 ± 5,99
Crotalária juncea	8,63 ± 0,56	53,58 ± 2,46	74,59 ± 7,53	31,04 ± 2,10
Crotalária mucronata	11,79 ± 0,94	161,86 ± 9,30	161,90 ± 14,59	61,40 ± 0,03
Crotalária ochroleuca	6,76 ± 0,17	60,39 ± 0,89	130,37 ± 1,73	33,37 ± 0,07
Crotalária spectabilis	8,28 ± 0,22	84,38 ± 2,85	85,80 ± 1,81	45,17 ± 1,96
Estilosante c. grande	10,12 ± 0,24	133,45 ± 5,37	96,89 ± 3,24	46,61 ± 0,71
Estilosante minerão	3,71 ± 0,19	51,92 ± 2,88	51,43 ± 4,74	20,14 ± 3,21
Feijão de porco	2,20 ± 0,45	23,26 ± 0,81	14,69 ± 2,80	10,25 ± 1,25
Guandu fava larga	19,57 ± 0,17	535,84 ± 14,21	349,55 ± 2,02	94,26 ± 3,77
Guandu anão	19,10 ± 0,60	197,06 ± 5,94	152,72 ± 5,81	44,16 ± 1,06
Girassol iarama	19,33 ± 0,87	209,10 ± 25,00	174,14 ± 21,40	53,83 ± 1,47
Girassol uruguaí	27,11 ± 0,83	129,05 ± 18,71	305,75 ± 23,10	117,48 ± 1,40
Labe labe	19,40 ± 1,14	161,33 ± 19,87	341,82 ± 8,67	167,23 ± 0,40
Leucena	8,58 ± 0,02	242,06 ± 20,27	156,19 ± 2,97	72,10 ± 0,38
Milheto	6,03 ± 1,21	55,77 ± 12,70	45,25 ± 7,79	14,68 ± 1,80
Mucuna anã	11,47 ± 0,73	99,87 ± 5,34	99,09 ± 1,24	58,16 ± 1,11
Mucuna cinza	21,99 ± 0,80	312,75 ± 11,73	391,05 ± 42,22	96,31 ± 12,42
Mucuna preta	22,73 ± 1,19	334,12 ± 3,52	342,98 ± 9,36	88,16 ± 3,86
Sesbânia	1,89 ± 0,12	248,20 ± 16,66	65,40 ± 9,03	45,55 ± 6,53
Tremoço	1,89 ± 0,03	22,76 ± 2,36	26,71 ± 1,59	8,73 ± 0,29

¹⁾ Cu ac: Cu acumulado na matéria seca (MS); Fe ac: Fe acumulado na MS; Mn ac: Mn acumulado na MS; Zn ac: Zn acumulado na MS.

Apêndice C

Experimento II: Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pela cultura da cana-de-açúcar.

Parte aérea da cana-de-açúcar

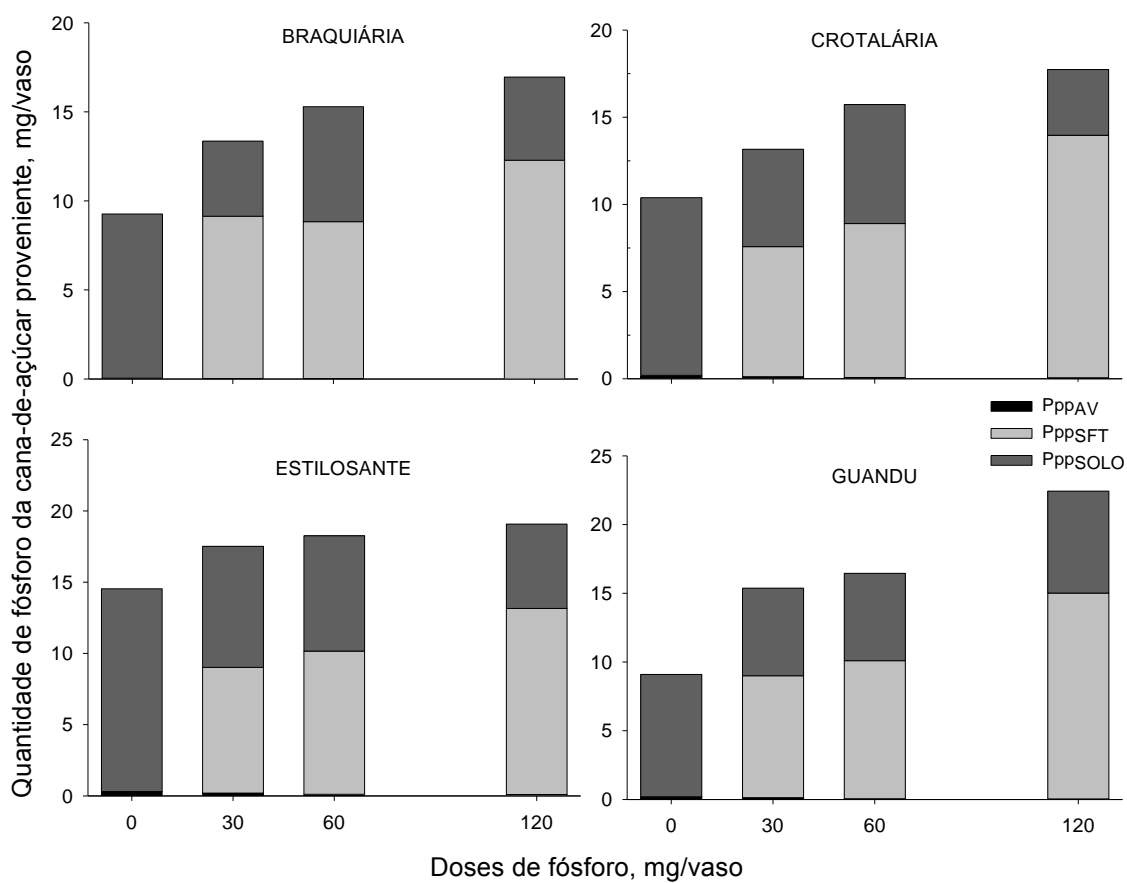


Figura 1C - Quantidade de fósforo acumulado na matéria seca da parte aera da planta de cana-de-açúcar cultivada sob adubo verde ou superfosfato triplo marcado com diferentes doses de fósforo

Tabela C1 - Desdobramento da interação entre adubo verde e doses de fósforo, sobre a quantidade de fósforo da matéria seca da parte aérea das plantas de cana-de-açúcar proveniente do adubo verde ou do superfosfato triplo (SFT) marcado⁽¹⁾

Adubo verde	³² P	Doses de fósforo				Média do adubo verde
		0	30	60	120	
----- quantidade fósforo, mg/vaso -----						
braquiária	adubo verde	0,04 Ca	0,02 Ca	0,02 Ba	0,02 Ca	0,03 D
	SFT		9,11 Ab	8,81 Ab	12,27 Aa	10,06 A
	solo	9,22 Ba	4,22 BCb	6,45 Aab	4,67 Bb	6,14 C
crotalária	adubo verde	0,19 Ca	0,13 Ca	0,07 Ba	0,06 Ca	0,11 D
	SFT		7,46 ABb	8,83 Ab	13,90 Aa	10,06 A
	solo	10,20 Ba	5,58 ABb	6,82 Aab	3,77 BCb	6,59 C
estilosante	adubo verde	0,31 Ca	0,20 Ca	0,12 Ba	0,10 Ca	0,18 D
	SFT		8,82 Ab	10,04 Aab	13,05 Aa	10,64 A
	solo	14,23 Aa	8,50 ABb	8,10 Ab	5,92 Bb	9,19 AB
guandu	adubo verde		0,14 Ca	0,05 Ba	0,04 Ca	0,11 D
	SFT	0,19 Ca	8,87 Ab	10,04 Ab	14,97 Aa	11,29 A
	solo	8,90 Ba	6,37 ABa	6,36 Aa	7,41 Ba	7,26 BC
Média das doses		5,41 ab	4,95 b	5,48 ab	6,35 a	5,56 ⁽²⁾

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ média geral

Raiz da cana-de-açúcar

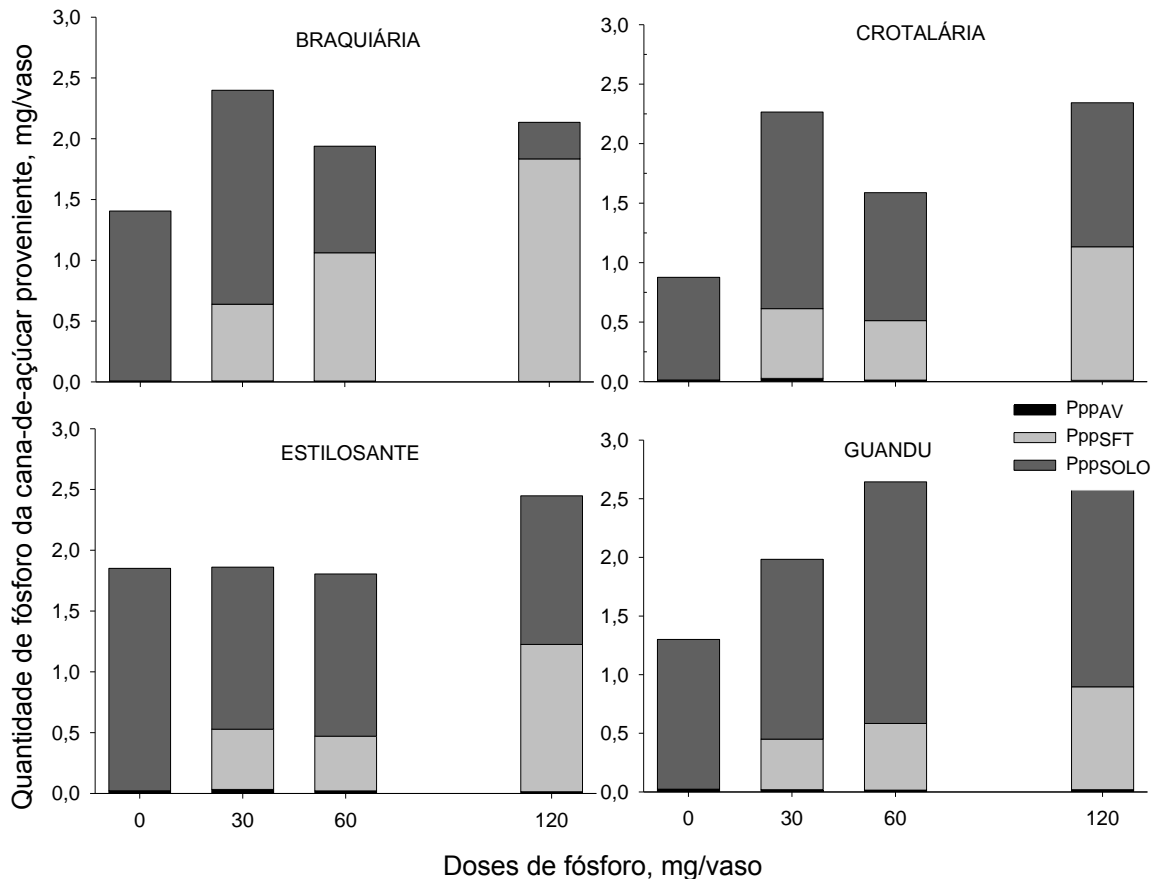


Figura 2C - Quantidade de fósforo acumulado na matéria seca da raiz da planta de cana-de-açúcar cultivada sob adubo verde ou superfosfato triplo marcado com diferentes doses de fósforo

Tabela 2C - Desdobramento da interação entre adubo verde e doses de fósforo, sobre a quantidade de fósforo da matéria seca da raiz das plantas de cana-de-açúcar proveniente do adubo verde ou do superfosfato triplo (SFT) ⁽¹⁾

Adubo verde	³² P	Doses de fósforo				Média do adubo verde
		0	30	60	120	
----- quantidade fósforo, mg/vaso -----						
braquiária	adubo verde	0,01 Ca	0,01 Ca	0,01 Ea	0,0 Da	0,01 E
	SFT		0,63 Bc	1,06 BCb	1,83 Aa	1,17 BC
	solo	1,40 ABa	1,76 Aa	0,88 BCDB	0,30 CDc	1,09 C
crotalária	adubo verde	0,01 Ca	0,02 Ca	0,01 Ea	0,01 Da	0,02 E
	SFT		0,59 BCb	0,50 CDEb	1,12 Ba	0,74 D
	solo	0,86 Bb	1,65 Aa	1,08 BCb	1,21 Bab	1,20 BC
estilosante	adubo verde	0,02 Ca	0,03 Ca	0,02 Ea	0,01Da	0,02 E
	SFT		0,49 BCb	0,45 DEb	1,21 Ba	0,72 D
	solo	1,83 Aa	1,33 Ab	1,33 Bb	1,22 Bb	1,43 AB
guandu	adubo verde	0,02 Ca	0,02 Ca	0,02 Ea	0,02 Da	0,02 E
	SFT		0,43 BCb	0,57 CDEab	0,88 BCa	0,63 D
	solo	1,28 Abc	1,53 Abc	2,06 Aa	1,82 Aab	1,67 A
Média das doses		0,68 a	0,71 a	0,68 a	0,80 a	0,71 ⁽²⁾

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ média geral

Apêndice C

Experimento III: Eficiência de absorção de fósforo por diversas espécies de adubos verdes e aproveitamento desse nutriente pela cultura do arroz.

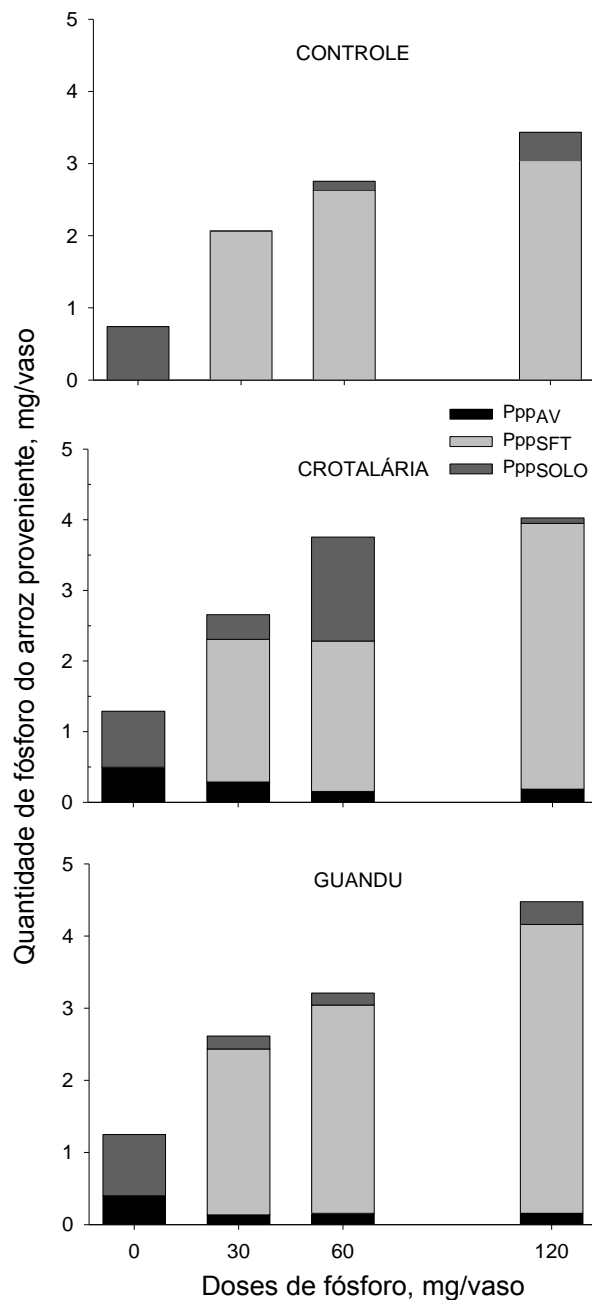


Figura 1D - Quantidade de fósforo acumulado na matéria seca da planta de arroz cultivada sob adubo verde ou superfosfato triplo marcado com diferentes doses de fósforo

Tabela D1 - Desdobramento da interação entre adubo verde e doses de fósforo, sobre a quantidade de fósforo da planta de arroz proveniente do adubo verde ou do superfosfato triplo (SFT)⁽¹⁾

Adubo verde	³² P	Doses de fósforo				Média do adubo verde
		0	30	60	120	
----- quantidade fósforo, mg/vaso -----						
adubo verde						
controle	SFT		2,06 Ab	2,63 ABa	3,04 Ba	2,58 B
	solo	0,74 Aa	0,01 Bb	0,13 Db	0,39 Cab	0,32 C
	adubo verde	0,49 Aa	0,29 Ba	0,15 Da	0,18 Ca	0,28 C
crotalária	SFT		2,02 Ab	2,13 BCb	3,76 Aa	2,64 B
	solo	0,79 Ab	0,35 Bbc	1,47 Ca	0,08 Cc	0,67 B
	adubo verde	0,40 Aa	0,13 Ba	0,16 Da	0,16 Ca	0,21 C
guandu	SFT		2,30 Ac	2,89 Ab	4,00 Aa	3,06 A
	solo	0,85 Aa	0,19 Bb	0,17 Db	0,31 Cab	0,38 BC
Média das doses		0,65 d	0,92 c	1,22 b	1,49 a	1,11 ⁽²⁾

⁽¹⁾ médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

⁽²⁾ média geral

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)