

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

FERNANDA LATANZE MENDES

***Efeito do volume de terra no desenvolvimento das plantas de feijão
e milho, na absorção do fósforo e no valor L (^{32}P)***

PIRACICABA

2006

FERNANDA LATANZE MENDES

Engenheira Agrônoma

Efeito do volume de terra no desenvolvimento das plantas de feijão e milho, na absorção do fósforo e no valor L (³²P)

Dissertação apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Takashi Muraoka

PIRACICABA

2006

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Seção Técnica de Biblioteca – CENA/USP

Mendes, Fernanda Latanze

Efeito do volume de terra no desenvolvimento das plantas de feijão de milho, na absorção do fósforo e no valor L (^{32}P)/ Fernanda Latanze Mendes; orientador Takashi Muraoka. - - Piracicaba, 2006. 106 f. : fig.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Diluição isotópica 2. Fertilidade do solo 3. Fósforo na planta 4. Isótopos radioativos I. Título

CDU 631.81.031:621.039.8

Aos meus pais, Cida e Luis, pelo exemplo de vida e dedicação na minha educação.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida.

Ao ínclito orientador, Prof. Dr. Takashi Muraoka, pelos ensinamentos e dedicação nestes anos de convivência, ao qual o resultado se deu neste trabalho de pesquisa.

Aos Profs. Drs. Décio Barbin e Sônia Maria De Stefano Piedade pela compreensão e orientação nas análises estatísticas.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) pela oportunidade da realização do curso de Mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

A todos os funcionários do Laboratório de Fertilidade de Solos e Nutrição de Plantas: Fernanda, Henriqueta, João, Marileuza, Sandra, pela amizade e contribuição para o enriquecimento deste trabalho.

As bibliotecárias do CENA, em especial a Marília, que revisou a dissertação vindo a contribuir as formalidades que o trabalho exige.

Aos meus pais que nunca mediram esforços para minha formação profissional e aos meus queridos irmãos, Adriana e Augusto, pela compreensão e carinho.

Ao querido Roney, pelo constante apoio, compreensão e incentivo, sempre com carinho e amor desde a graduação.

As amigas de sempre, Francine e Fábíola, pela amizade e por compreender minhas ausências.

Aos colegas do Laboratório de Fertilidade de Solos e Nutrição de Plantas e aos amigos da “salinha”: Héctor, Freddy, Zaqueu, Dênis, Vinícius, Felipe, Anderson, Edson, Raul, Rodrigo e Maju, pelo convívio e colaboração.

Em especial a amiga Tatiana, pelas valiosas contribuições e auxílio no desenvolvimento do trabalho, além de seu companheirismo em todos os momentos.

Aos amigos do curso de pós-graduação: Paula, Carlos, Gean, Márcio, Alessandra, Daniela, Carol, pela amizade e horas de estudos.

A todos que contribuíram de alguma forma na realização deste trabalho, que reflete dedicação intensa a pesquisa, o meu muito obrigado.

**“Toda força é fraca se não
unida”.**
La Fontaine

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Esquema da marcação de terra com o radioisótopo - ^{32}P . 32
- Figura 2- Efeito do volume de terra na produção de matéria seca nas plantas de feijão desenvolvidas em solos adubados (F_2) ou não (F_1) e colhidas aos 30 (E_1) e 50 (E_2) dias. 42
- Figura 3- Efeito do volume de terra na concentração de P nas plantas de feijão desenvolvidas em solos adubados (F_2) ou não (F_1) e colhidas aos 30 (E_1) e 50 (E_2) dias. 44
- Figura 4- Efeito no volume de terra no conteúdo de P total nas plantas de feijão desenvolvidas em solos adubados (F_2) ou não (F_1) e colhidas aos 30 (E_1) e 50 (E_2) dias. 46
- Figura 5- Efeito do volume de terra no valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L nas plantas de feijão desenvolvidas em solos adubados (F_2) ou não (F_1) e colhidas aos 30 (E_1) e 50 (E_2) dias. 48
- Figura 6- Efeito do volume de terra no valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- P_s) nas plantas de feijão desenvolvidas em solos adubados (F_2) ou não (F_1) e colhidas aos 30 (E_1) e 50 (E_2) dias. 51
- Figura 7- Comparação de valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- P_s) para as plantas de feijão cultivadas em solo não adubado e colhidas aos 30 dias (E_1F_1). 54
- Figura 8- Comparação de valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- P_s) para plantas de feijão cultivadas em solo adubado colhidas aos 30 dias (E_1F_2). 55
- Figura 9- Comparação de valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- P_s) para plantas de feijão cultivada em solo não adubado e colhidas aos 50 dias (E_2F_1). 55
- Figura 10- Comparação do valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- P_s) para plantas de feijão cultivadas em solo adubado e colhidas aos 50

- dias (E_2F_2). 66
- Figura 11- Efeito do volume de terra no rendimento de massa seca nas plantas de milho desenvolvidas em solos adubados (F_2) ou não (F_1) e colhidas aos 30 (E_2) e 50 (E_1) dias. 61
- Figura 12- Efeito do volume de solo na concentração de P nas plantas de milho desenvolvidas em solos adubados (F_2) ou não (F_1) e colhidas aos 30 (E_1) ou 50 (E_2) dias. 63
- Figura 13- Efeito do volume de terra no conteúdo de P nas plantas de milho cultivadas em solo adubado (F_2) e não (F_1) adubado e colhidas aos 30 (E_1) ou (E_2) 50 dias. 65
- Figura 14- Efeito do volume de solo no valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L nas plantas de milho desenvolvidas em solos adubados (F_2) ou não (F_1) e colhidas aos 30 (E_1) ou 50 (E_2) dias. 67
- Figura 15- Efeito do volume de terra no valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) obtidas em plantas de milho cultivadas em solos adubados (F_2) ou não (F_1) e colhidas aos 30 (E_1) ou 50 (E_2) dias. 70
- Figura 16- Comparação de valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) para as plantas de milho cultivadas em solo não adubado e colhidas aos 30 dias (E_1F_1). 73
- Figura 17- Comparação do valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) para as plantas de milho cultivadas em solo adubado e colhidas aos 30 dias (E_1F_2). 74
- Figura 18- Comparação do valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) para as plantas de milho cultivadas em solo não adubado e colhidas aos 50 dias (E_2F_1). 75
- Figura 19- Comparação do valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) para as plantas de milho cultivadas em solo adubado e colhidas aos 50 dias (E_2F_2). 76
- Figura 20- Efeito do volume de terra na produção de matéria seca de plantas de feijão com (a) e sem (b) adubação fosfatada 80

- Figura 21– Efeito do volume de terra no conteúdo de P total de plantas (parte aérea e raiz) de feijão com (a) e sem (b) adubação fosfatada. 81
- Figura 22– Efeito do volume de terra na produção de matéria seca de plantas de milho com (a) e com (b) adubação fosfatada. 85
- Figura 23– Efeito do volume de terra no conteúdo de P total de plantas (parte aérea e raiz) de milho com (a) e sem (b) adubação fosfatada. 86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Análise química do Latossolo Vermelho-amarelo	31
Tabela 2- Descrição das variáveis estudadas dentro dos diferentes volumes de terra.	35
Tabela 3 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do feijão, produzidos em diferentes volumes de terra.	38
Tabela 4 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do feijão, produzidos em diferentes volumes de terra.	39
Tabela 5 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do feijão, desdobrando a somatória dos quadrados visando ao estudo de volume de terra dentro de cada uma das 4 combinações entre época e fertilidade, produzidos em diferentes volumes de terra.	40
Tabela 6 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do feijão, desdobrando a somatória dos quadrados visando ao estudo de volume de terra dentro de cada uma das 4 combinações entre época e fertilidade, produzidos em diferentes volumes de terra.	40
Tabela 7 - Equação de regressão ajustada para produção de massa seca para plantas de feijão entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.	43
Tabela 8 - Equação de regressão ajustada para a concentração de fósforo nas plantas de feijão entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.	45
Tabela 9 - Equação de regressão ajustada para o conteúdo de P total nas plantas de feijão entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.	47
Tabela 10- Equação de regressão ajustada para o valor L calculado sem descontando o P proveniente das sementes das plantas de feijão entre os	

diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.	49
Tabela 11- Efeito do volume de terra no valor L calculado sem descontar o P proveniente das sementes das plantas de feijão dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.	49
Tabela 12- Efeito do volume de terra no valor L calculado descontando o P proveniente das sementes das plantas de feijão dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.	52
Tabela 13 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do milho, produzidos em diferentes volumes de terra.	57
Tabela 14 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do milho, produzidos em diferentes volumes de terra.	58
Tabela 15 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do milho desdobrando a somatória dos quadrados visando ao estudo de volume de terra dentro de cada uma das 4 combinações entre época e fertilidade, produzidos em diferentes volumes de terra.	59
Tabela 16 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do milho desdobrando a somatória dos quadrados visando ao estudo de volume de terra dentro de cada uma das 4 combinações entre época e fertilidade, produzidos em diferentes volumes de terra.	59
Tabela 17 - Equação de regressão ajustada para a produção de massa seca para plantas de milho entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.	61
Tabela 18 - Equação de regressão ajustada para a concentração de fósforo nas plantas de milho entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.	63
Tabela 19- Equação de regressão ajustada para o conteúdo de P total nas plantas de milho entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis	

épocas de colheita e níveis de fertilidade.	66
Tabela 20 - Equação de regressão ajustada para o valor L calculado sem descontar o P proveniente das sementes das plantas de milho entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.	68
Tabela 21- Efeito do valor L calculado sem descontar o P proveniente das sementes das plantas de milho entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.	68
Tabela 22 - Equação de regressão ajustada para o valor L calculado descontando o P proveniente das sementes das plantas de milho entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.	71
Tabela 23- Efeito do valor L calculado descontando o P proveniente das sementes das plantas de milho entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.	71
Tabela 24 – Efeito da adubação fosfatada no rendimento de matéria seca e no conteúdo de P total comparando-se plantas de feijão cultivadas em solos adubados e sem adubação.	77
Tabela 25 – Efeito do volume de terra no rendimento de matéria seca e conteúdo de P total para plantas de feijão cultivadas em solo adubado e sem adubação.	78
Tabela 26 - Efeito da adubação fosfatada no rendimento de matéria seca e no conteúdo de P total comparando-se plantas de milho cultivadas em solos adubados e sem adubação.	83

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
INTRODUÇÃO	1
DESENVOLVIMENTO	4
1 REVISÃO DE LITERATURA	4
1.1 Fósforo na Planta	4
1.1.1 Mecanismo de absorção do fósforo pela raiz	5
1.2 Fósforo no Solo	7
1.3 Tamanho do Vaso	8
1.4 Isótopos do Fósforo	12
1.5 Uso de Técnicas Isotópicas (Valor L)	14
1.6 Fósforo na Semente e seu Efeito no Desenvolvimento das Plantas	18
1.7 Estudo do Valor L para Diferentes Espécies de Plantas	22
1.8 Estudos Relacionados ao Volume de Raiz	23
2 MATERIAIS E MÉTODOS	30
2.1 Características do Solo	31
2.2 Experimento 1: Valor L	32
2.2.1 Aplicação de ³² P	32
2.2.2 Cultivo das plantas	32
2.2.3 Análise de planta	33
2.2.4 Delineamento estatístico	35
2.3 Experimento 2: relação raiz x parte aérea	35
2.3.1 Análise de plantas	36

2.3.2 Cálculos	36
a) Rendimento das plantas devido a adubação com fósforo	36
b) Rendimento das plantas em função do aumento do volume de terra	37
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
3.1- Cultura do Feijão	38
3.1.1- Produção de massa seca	41
3.1.2- Concentração de P	43
3.1.3- Conteúdo de P total	45
3.1.4- Valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente	47
3.1.5- Valor L calculado descontando o P proveniente da semente	51
3.1.6- Efeito do P na planta proveniente da semente na determinação do valor L	53
3.2- Cultura do Milho	57
3.2.1- Produção de massa seca	60
3.2.2- Concentração de P	62
3.2.3- Conteúdo de P total	64
3.2.4- Valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente	66
3.2.6- Efeito do fósforo proveniente da semente na determinação do valor L	72
3.3 Experimento para Estudo de Raiz e Parte Aérea	76
3.3.1 Cultura do feijão	76
3.3.1.1 Efeito da adubação com fósforo	76
3.3.1.2 Volume de terra	78
3.3.2 Cultura do milho	82
3.3.2.1 Efeito da adubação com fósforo	82
3.3.2.2 Volume de terra	83
3.4 Principais resultados	87
4 CONCLUSÕES	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
APÊNDICE	105

RESUMO

Mendes, L. F. **Efeito do volume de terra no desenvolvimento das plantas de feijão e milho, na absorção do fósforo e no valor L (^{32}P)**. 2006. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

Estudou-se em casa-de-vegetação o efeito do volume de terra no desenvolvimento das plantas de feijão e milho, na absorção de fósforo pelas culturas e na determinação do P isotopicamente trocável (Valor L), em função do período de desenvolvimento dessas culturas e dois níveis de fertilidade do solo quanto ao fósforo. Avaliou-se também o efeito do P na planta proveniente da semente no cálculo do Valor L (L: valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente e L (-Ps): valor L calculado descontando o P proveniente da semente). O estudo foi realizado com Latossolo Vermelho-amarelo em vasos plásticos contendo: 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 12,0 e 18,0 L de terra; com e sem adubação de P (50 mg kg^{-1} terra de P) e colhendo as plantas em dois períodos: 30 e 50 dias após a germinação. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com 3 repetições no esquema fatorial $7 \times 2 \times 2$. As variações nos períodos de colheita e níveis de fertilidade são representadas por: E_1F_1 (30 dias, sem adubação), E_1F_2 (30 dias, adubado), E_2F_1 (50 dias, sem adubação) e E_2F_2 (50 dias, adubado). A concentração de P nas plantas não foi um parâmetro adequado para estabelecer o estado nutricional das plantas e os vasos de 0,5 e 1,0 L tiveram desenvolvimento prejudicado e conseqüentemente no conteúdo de P, não sendo também adequados para determinação do valor L. Houve efeito do P na planta proveniente da semente no valor L para volumes de terra menor que 4,0 L para plantas de feijão e 8,0 L para plantas de milho. O volume de terra de 2,0 L é recomendado para estudos do valor L e L (-Ps) em plantas de feijão para as seguintes variáveis: E_1F_1 , E_1F_2 , E_2F_1 e em plantas de milho para E_1F_1 e E_2F_1 . Para valor L e L (-Ps) em plantas de feijão para E_2F_2 e em plantas de milho para E_1F_2 e E_2F_2 , recomenda-se o volume de terra de 4,0 L. A maior produção de massa seca e de conteúdo de P em plantas de feijão E_1F_2 foram obtidos com 12,0 L. Vasos com volume de terra de 13,0 L são os indicados para avaliação do desenvolvimento em plantas de milho E_1F_2 e E_2F_1 . Com 14,0 L de terra obteve-se o maior conteúdo de P e massa seca em plantas de feijão

E_1F_2 e conteúdo de P em plantas de milho E_1F_1 . O volume de terra de 15,0 L é indicado para conteúdo de P em plantas de milho E_1F_2 . Para a obtenção da máxima produção de massa seca em feijão em ambos os solos e épocas (E_2F_1 e E_2F_2) e milho no solo adubado e 50 dias (E_2F_2), assim como para conteúdo de P para feijão no E_2F_1 e E_2F_2 e milho E_2F_2 , há necessidade de se usar vaso com volume de terra maior que 18,0 L.

Palavras-chave: ensaios em vasos, P isotopicamente trocável, conteúdo de P na planta, P proveniente da semente, raízes.

ABSTRACT

Mendes, L. F. **Effect of soil volume on bean and corn plant growth, P uptake and L value (^{32}P)**. 2006. 105 f. Dissertation (Master) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

The effect of soil volume on the growth of bean and corn crop, phosphorus uptake and isotopically exchangeable P (L value), as affected by the plant growing period and two soil P fertility level were studied in green house. The effect of seed derived P in the plant on the L value (L: L value calculated without discounting the seed derived P and L (-Ps): L value calculated discounting the seed derived P) was also evaluated. The study was carried out in plastic pots containing: 0.5; 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 12.0 and 18.0 L of Red Yellow Latosol, with and without P addition (50 mg kg^{-1} soil P) and harvesting the plants in two periods: 30 and 50 days after seeding. The experimental design was completely randomized with 3 replications in $7 \times 2 \times 2$ factorial scheme. The variations in harvest period and soil P fertility level are presented as: E_1F_1 (30 days, without P application), E_1F_2 (30 days, with P), E_2F_1 (50 days, without P) and E_2F_2 (50 days, with P). The plant P concentration was not an adequate parameter for establishing the plant nutritional state. The plants of 0.5 and 1.0 L pots had their growth limited, which consequently affected the P content, therefore also not being adequate for the L value determination. There was effect of seed derived P on L value for soil volumes smaller than 4.0 L for bean plants, and 8.0 L for corn plants. The 2.0 L soil volume is recommended for L and L (-Ps) values studies with bean plants to the following variables: E_1F_1 , E_1F_2 , E_2F_1 and with corn plants to E_1F_1 and E_2F_1 . For L and L (-Ps) values in beans plants to E_2F_2 and with corn plants to E_1F_2 and E_2F_2 , the 4.0 L soil volume is recommended. The highest dry matter weight and P content in E_1F_2 bean plants were obtained with 12.0 L soil volume. Pots with 13.0 L soil are indicated for growth evaluation of E_1F_2 and E_2F_1 corn plants. The highest P content and dry matter weigh of E_1F_2 bean plants and E_1F_1 corn plants P content were obtained with 14.0 L soil volume. The 15.0 L soil volume is suggested for the P content study with E_1F_2 corn plants. For obtaining maximum dry matter yield of bean plants in both soils and growth periods (E_2F_1 and E_2F_2) and of corn in P

fertilized soil harvesting at 50 days (E_2F_2), as well as for P content of E_2F_1 and E_2F_2 bean plants and E_2F_2 corn plants, pots with larger soil volume than 18.0 L should be used.

Keywords: Pot experiments, isotopically exchangeable P, plant P content, seed derived P, roots.

INTRODUÇÃO

É comum a realização de trabalhos experimentais agrônômicos em vasos, para estudos de diversas naturezas, principalmente nutricionais e avaliação de fertilizantes.

A planta necessita de um ambiente adequado para o seu bom desenvolvimento, o meio deve apresentar características físicas, químicas e biológicas adequadas, tanto para a parte aérea como para o sistema radicular.

Considerando que as raízes exploram um certo volume de solo, é de se esperar que o comportamento da planta (seu crescimento, desenvolvimento e produção), seja afetado pela dimensão desse volume. Esse efeito do volume de solo deve variar também com a espécie da planta.

A principal função das raízes é suprir as plantas com nutrientes inorgânicos e para que isso ocorra depende de dois fenômenos complexos: disponibilidade de nutrientes no solo e nutrientes adquiridos pelas plantas.

A disponibilidade de nutrientes no solo envolve os aspectos químicos desses nutrientes; como a principal forma de absorção do P no solo e a concentração necessária do mesmo para suprir a planta; além do local onde o nutriente é distribuído no solo e a sua mobilidade no solo.

Provavelmente o uso de vasos em experimentos de nutrição de plantas é tão antigo quanto a própria história dos estudos de nutrição vegetal. Van Helmont no século XVII (Gauch, 1972) foi o pioneiro usando um tubo contendo aproximadamente 100 kg de terra, concluindo erroneamente que o ganho de peso no salgueiro, após cinco anos, provinha apenas da água e não do solo. Desde então grandes nomes como Liebig, Sachs (século XIX), Hoagland, Arnon (séculos

XIX e XX) e mais recentemente no século passado Gauch, Russell, Epstein e Marchner, fizeram suas descobertas, quase sempre em experimentos conduzidos em vasos. Estes experimentos são importantes, pois possibilitam a elucidação problemas de difícil solução em condições de campo. A principal vantagem do uso de vasos é o controle das condições ambientais como temperatura, luz e água bem como a possibilidade de abordar um maior número de variáveis.

Porém, o ensaio em vasos implica em mudanças nas condições físicas do solo (Ribeiro, 1994), dificultando a manutenção da estrutura original deste solo. Provavelmente, o fator mais limitante no desenvolvimento vegetativo é o volume de terra em função do tamanho do vaso utilizado.

São várias as quantidades de terra usadas nos experimentos em casa de vegetação, podendo variar de 100g a até 300 kg, sendo o mais comum entre 1 a 3 kg. Na realidade, pouco ou nenhum critério tem sido seguido para a escolha do volume de terra, com exceção de alguns casos. Normalmente quando o volume é pequeno, via de regra, ocorre em função da disponibilidade da terra ou também em estudos que exigem grande quantidade de vaso.

Surpreendentemente, apesar de muitas informações sobre a nutrição vegetal e eficiência de fertilizantes, entre outras, terem sido obtidas em estudos realizados em vasos, poucos trabalhos foram dedicados à questão sobre o real efeito do volume de terra no desenvolvimento da planta. Portanto, dependendo desse efeito, alguns ou muitos dos resultados da literatura podem estar superestimado.

Outra situação que faz com que sejam usados vasos de pequeno volume é quando o material a ser estudado é caro ou exige certos cuidados, por exemplo, quando o estudo é feito usando técnicas radioisotópicas que requerem cuidados no manuseio. Nestes estudos, também pode-se dizer que são poucos os dados quanto

ao efeito do volume de terra nos resultados.

Almeja-se, usando a técnica da diluição isotópica (valor L), estudar o efeito do volume de terra na avaliação da disponibilidade do fósforo do solo para distintas espécies vegetais, em função da época de desenvolvimento das mesmas e nível de fertilidade de fósforo do solo.

Objetivou-se neste trabalho estudar o efeito do volume de terra no desenvolvimento das plantas de feijão e milho e na absorção de fósforo, avaliando a disponibilidade de fósforo no solo visando a técnica isotópica (Valor L), em função da época de desenvolvimento dessas culturas em dois níveis de fertilidade do solo quanto ao fósforo. Estudou-se também o efeito do P proveniente da semente no cálculo do Valor L, uma que poucas informações existem a respeito. Porém, neste presente estudo não tem como objetivo comparar parâmetros de valor L entre as diferentes culturas.

Como hipóteses deste trabalho espera-se que o volume de terra usado em experimento em vasos afete tanto o desenvolvimento da planta como a avaliação do valor L de P e que esses efeitos variem com a época de colheita, assim, como o nível de fertilidade de fósforo do solo.

DESENVOLVIMENTO

1 REVISÃO DE LITERATURA

1.1 Fósforo na Planta

Todos os organismos vivos têm fósforo na sua composição. Nos tecidos de plantas o fósforo é responsável por cerca de $0,4 \text{ g kg}^{-1}$ da massa úmida e $3,0 \text{ g kg}^{-1}$ da massa seca (BIELESKI; FERGUSON, 1983).

O fósforo é absorvido da solução do solo pelas plantas, principalmente na forma do íon H_2PO_4^- . No ambiente celular adquire papel primordial no metabolismo e fisiologia, estando onipresente durante todo o metabolismo das plantas (EPSTEIN, 2005), sendo essencial na cadeia fotossintética, compondo moléculas de ATP, fosfolipídios das membranas, faz parte das moléculas de ácidos nucleicos (DNA e RNA) e coenzimas. Geralmente, mais de 50% do fósforo presente nos tecidos das plantas está na forma inorgânica variando entre 5,0 e 20 mM (BIELESKI; FERGUSON, 1983).

O fósforo é móvel nos tecidos da planta e fica concentrado nas áreas mais ativas de crescimento pelo fato deste elemento estar fortemente ligado aos processos metabólicos da planta (STAUFFER; SULEWSKI, 2004).

A fixação do P inorgânico no solo faz com que o solo apresente um baixo reservatório do P disponível à planta. A absorção do fósforo inorgânico do solo pela planta é constante e realizada por vários sistemas de transportes através das membranas celulares. A manutenção do P_i no citoplasma é essencial para as reações fotossintéticas que envolvem enzimas fosfatadas, no qual o equilíbrio das espécies de P depende da combinação do transporte de membrana e das trocas

intracelulares de compostos de fósforo (SCHACHTMAN; REID e AYLING, 1998). Assim, as formas de fósforo, suas quantidade e localização na célula podem mudar de acordo com a espécie da planta e a disponibilidade de fósforo no solo.

1.1.1 Mecanismo de absorção do fósforo pela raiz

Para absorver fósforo necessário para o desenvolvimento das culturas, o sistema radicular precisa acessar este nutriente encontrados na solução do solo através de mecanismos específicos.

A raiz intercepta o P presente na trajetória durante o crescimento, o qual causa a exploração de novas regiões do solo ainda não submetidas à absorção do P, portanto mais ricas que as anteriormente interceptadas. A idéia de que a absorção de P seja consequência apenas do crescimento das raízes não é verdadeira. Segundo Barber (1974) apenas de 0,1 a 2,0% do volume do solo explorado pelo sistema radicular é, de fato, ocupado pelas raízes (considerando 15 cm do perfil do solo). Pode-se verificar que a quantidade de fósforo na solução do solo acrescida do P lábil que o abastece não é suficiente para chegar à quantidade de P absorvido pelas plantas (NOVAIS, 1999), visto que apenas 3,5% do total de H_2PO_4^- é absorvido por interceptação radicular (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1983).

A água movimenta-se de um local de maior potencial hídrico para outro de menor potencial, decrescendo na seguinte seqüência: solução do solo > raízes > folhas > atmosfera. Assim, a solução do solo movimenta-se em direção a atmosfera, estabelecendo o fluxo transpiracional. O arraste da solução do solo até a raiz implica na interceptação do fósforo presente nesta solução, indicando a possível absorção de P pelas plantas. O volume de água transpirado durante o ciclo da cultura

multiplicado pelo fósforo da solução do solo resulta na potencial contribuição do fluxo de massa para com o P acumulado pela planta (NOVAIS, 1999). Segundo radicular (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1983), o fluxo de massa representa 2,6% do total de íons H_2PO_4^- absorvido pelas raízes.

Pode-se observar que a absorção de fósforo pelo crescimento da raiz somado ao fluxo de massa não é suficiente para suprir a demanda deste nutriente pelas culturas. Assim, o mecanismo de difusão ou fluxo difusivo, torna-se responsável pelos demais 94% do total de H_2PO_4^- absorvido pela raiz radicular (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1983). Este mecanismo é explicado, segundo Malavolta (2004), como sendo o processo a curta distância na solução do solo, a favor do gradiente de concentração.

Segundo Epstein (2005) a relativa imobilidade dos nutrientes no solo e sua baixa concentração na solução do solo são reação do complexo sistema radicular pelo qual uma grande superfície de raiz está intimamente em contato com o solo.

Um dos mecanismos de eficiência de P nas plantas para aumentar a sua disponibilidade e absorção em níveis de deficiência (PEARSON; RENGEL, 1997) é a alteração da geometria e arquitetura do sistema radicular (RENGEL, 1999), o que pode ser afetado pela limitação do volume de solo disponível as plantas em vasos menores.

De qualquer modo, aumentar a capacidade de converter nutrientes na forma não-disponível em formas disponíveis é muito importante para a eficiência de absorção, especialmente para nutrientes no qual o mecanismo de transporte nas raízes é a difusão, processo lento e freqüentemente limita a absorção dos nutrientes (RENGEL, 1999).

1.2 Fósforo no Solo

O fósforo é importante na manutenção dos solos agrícolas, pois, depois do nitrogênio, é o elemento mais limitante nos sistemas culturais de solos tropicais. Isto ocorre devido à sua complexa dinâmica no solo, baixa mobilidade e baixo aproveitamento pelos vegetais. O fósforo no solo pode ser encontrado tanto na forma orgânica como na inorgânica (mineral).

O processo de adsorção de fósforo no solo é o principal responsável pelos baixos teores de fosfatos solúvel na solução do solo. Embora o teor total de fósforo no solo seja em torno de 200 a 300 mg dm⁻³, menos de 1% deste total encontra-se em solução (NOVAES; SMYTH, 1999). Em solos ácidos a adsorção é geralmente atribuída aos óxidos e hidróxidos de Fe e Al e a matéria orgânica do solo (SANYAL; DATTA, 1991; NOVAES; SMYTH, 1999; RAIJ, 2004). A distribuição de P no solo pode ser representada pelos equilíbrios (TATE, 1984):



Na solução do solo encontra-se fósforo inorgânico (P_i) na forma H_3PO_4 ou dissociado em íons $H_2PO_4^-$ e HPO_4^{2-} . A forma do P_i na solução do solo varia de acordo com o pH, sendo que nos solos com pH entre 5,0 e 6,0, faixa adequada para a maioria das culturas, é predominante o íon monovalente ($H_2PO_4^-$), seguido de HPO_4^{2-} e H_3PO_4 (MARSCHNER, 1995). Nas plantas, o íon $H_2PO_4^{2-}$ é prioritariamente absorvido da solução do solo (SCHACHTMAN; REID e AYLING, 1998).

Alvarez et al. (1988), em estudos de metodologias para recomendações de adubação fosfórica, definiram que o nível crítico de fósforo corresponde à concentração do elemento na solução do solo ou no tecido da planta, abaixo do qual a taxa de crescimento ou a produção vegetal diminui significativamente,

demonstrando a necessidade de adubação complementar.

Barros e Novais (1996) reportaram que o nível crítico de P no tecido das plantas também depende do fator capacidade do solo (FCP), conhecido também como poder tampão do P no solo. Este fator é uma medida da capacidade do solo em manter um nível determinado do elemento na solução do solo (NOVAIS, 1999), levando em conta o fato de que as plantas absorvem apenas o P que se encontra na solução do solo. Como o fluxo de P para o interior das raízes da planta é uma função da concentração na solução do solo, o fluxo será menor quando o FCP for maior.

Grant et al. (2001) comentam que um grande número de estudos em várias espécies de plantas tem mostrado que o suprimento de P na fase inicial de desenvolvimento é fundamental para o ótimo rendimento da cultura. Nesse sentido, Mengel e Kirkby (2001) expressam que as raízes das plantas em seu estado inicial de crescimento necessitam absorver grandes quantidades de fosfato para garantir o rendimento das culturas.

1.3 Tamanho do Vaso

Na literatura o tamanho dos vasos utilizados nos experimentos são muito variáveis, desde 100g, como utilizado por Neubauer, citado por Malavolta (1967), até 220 L, usados por Trivelin et al. (2002a e b) em experimentos com cana-de-açúcar.

O tamanho do vaso (volume de terra) a ser utilizado deve variar em função da finalidade e duração do experimento, espécie de planta a ser cultivada e, também da facilidade de manuseio, transporte e reutilização dos vasos (RIBEIRO, 1994). Na realidade, na maioria das vezes, pouco ou nenhum critério tem sido seguido para a escolha do tamanho do vaso. Normalmente quando se utilizam pequenos volumes é

devido à disponibilidade de terra ou grande quantidade de vaso exigidos em alguns experimentos.

Provavelmente foram Cook e Millar (1946) os primeiros a preocuparem-se com o tamanho do vaso. Eles usaram vasos de 1, 2, 3 e 4 galões, respectivamente 3,8; 7,6; 11,4 e 15,2 L, comparando os resultados obtidos em vasos e no campo. Observaram que o tamanho do vaso e a quantidade de terra devem ser tão grande quanto possível, pois as diferenças entre tratamentos tendem a diminuir com a diminuição do tamanho dos vasos. Afirmaram também que a dosagem de nutrientes deve ser diversas vezes maior nos vasos do que no campo.

Armiger et al. (1958), num estudo para avaliar o efeito do tamanho e tipo do recipiente a ser utilizado em estudos de fertilidade do solo, consideraram a superfície da terra no vaso para o cálculo de dosagem de fertilizantes e concluíram que os vasos pequenos (um litro) também proporcionam resultados satisfatórios.

McClung; Freitas e Lott (1958) conduziram ensaios para o estudo do enxofre em vasos de três tamanhos concluindo que as variações de volume não alteraram fundamentalmente a resposta da planta, embora as quantidades de matéria seca tenham aumentado com o volume dos vasos. Estes resultados contrariam os obtidos por Armiger et al. (1958).

Essa aparente controvérsia foi novamente abordada por Baker e Woodruff (1962) estudando a relação entre o volume de terra por planta e a concentração de fósforo necessária para o ótimo crescimento do milho. Esses autores concordaram com Cook e Millar (1946), reafirmando que o volume de terra no vaso deve aproximar-se tanto quanto possível do volume de terra associado à planta no campo.

Gargantini e Soares (1973) verificaram o efeito do tamanho do vaso e da época de corte de plantas de trigo no estudo da ação dos nutrientes N, P e K

utilizando vasos de barro com capacidade de 0,6; 6 e 10 kg de terra. Os dados obtidos permitiram observar que em vasos de 0,6 kg é possível estudar a ação do nitrogênio e do fósforo colhendo-se as plantas aos 60 dias. Em vasos de 6 kg pode-se estudar o efeito do fósforo aos 30 dias após a germinação, enquanto o nitrogênio e o potássio podem ser avaliados somente a partir de 60 dias. Nos vasos de 10 kg observou-se que tanto na colheita do material verde como na de grão as respostas aos nutrientes foram dentro do esperado.

Para muitos autores o critério a ser adotado para o cultivo de plantas nos experimentos resume-se a escolha de uma determinada quantidade de terra que, de alguma forma, seja coerente com o tamanho da planta a ser utilizada. Seguem-se alguns exemplos como ilustração, porém em alguns artigos há um baixo número de referências bibliográficas, como é o caso de Barry; Moody e Compton (1986).

Pereira (1983) estudou o melhor tamanho de sacos plásticos, avaliando as capacidades volumétricas de 3, 4, 5, 7 e 9 L de terra para produção de mudas de porta-enxertos de seringueiras. O autor concluiu que os sacos com capacidade para 3 litros de terra permitem a produção de porta-enxertos de seringueiras com desenvolvimento equiparado ao daqueles produzidos nos sacos com capacidade para 9 litros de terra.

Barry; Moody e Compton (1986) avaliaram o efeito da variação da distribuição espacial do fertilizante fosfatado e a porcentagem do volume de terra adubado para a cultura do trigo em casa-de-vegetação, utilizando dois tipos de solo (Vertisol e Oxisol) em vasos com capacidade de 5,5 L de terra. Eles observaram que os tratamentos com Vertisol não apresentaram efeitos na absorção de P total e nem na absorção do adubo fosfatado quando aumentou a porcentagem do volume de terra adubada. Porém, nos tratamentos com Oxisol o aumento da disponibilidade do P

nos fertilizantes com o decréscimo do contato com a terra adubada em situação responsiva foi devido a maior concentração de P na solução e o aumento da proliferação da raiz na zona fertilizada. As altas concentrações de P foram mantidas nas menores porcentagens de volume de terra adubado devido à mesma quantidade de fósforo que se adicionou no volume de solo. A absorção de P nos solos não adubados foi inferior por causa da menor área de superfície em que o adubo foi colocado. Entretanto, no Oxisol, que apresentou uma extrema deficiência de P, a maior absorção do fertilizante ocorreu quando o fertilizante foi colocado no menor volume de terra, resultado este esperado, visto que a maior concentração do P está no menor volume de terra.

Para avaliar o efeito da adição de zinco a fertilizantes granulados na produção de matéria seca do milho, Korndörfer; Eimori e Tellechea (1987), empregaram vasos contendo 5,5 kg de terra seca com três plantas por vaso. Entretanto, nos estudos sobre avaliação de estirpes de *Bradyrhizobium* sp. em plantas de amendoim, em solo pré-cultivado com trigo e aveia, Lombardi et al. (1988) utilizaram vasos com 3 kg de terra.

Em trabalho para verificar a eficiência de extratores de micronutrientes na análise de solo, Bataglia e Raij (1989) conduziram experimento em vasos de plástico com capacidade para 2,0 litros de terra. Para avaliar a resposta de dois cultivares de soja em diferentes níveis de magnésio no solo, Rosolem et al. (1992) utilizaram vasos de 20 litros de terra, cultivando três plantas por vaso até a maturação fisiológica das plantas.

Os efeitos da calagem e da matéria orgânica sobre a dinâmica de Fe, Mn, Cu e Zn, num solo de várzea, e a disponibilidade desses micronutrientes para dois cultivares de arroz irrigado foram avaliados por Dynia e Barbosa Filho (1993).

Utilizaram como unidades experimentais vasos contendo 7,5 kg de terra que, após aplicação dos tratamentos, foram mantidos com lâmina de água em casa de vegetação.

Avaliando o comportamento de espécies e ecotipos de estilosantes, submetidos a diferentes níveis de saturação de alumínio, Martins; Amaral e Cóser (1993) empregaram vasos contendo o equivalente a 2,5 kg de terra seco a 105°C.

Ribeiro (1994) estudou o efeito de diferentes tamanhos de vasos (2, 4 e 6 L) sobre os atributos relacionados aos fatores determinantes do desenvolvimento de plantas de milho em vasos, comparado com aquelas cultivadas em campo. Concluiu-se que o volume de terra no vaso deve aproximar-se tanto quanto possível ao volume de terra associado à planta no campo, porém não relata qual seria o tamanho ideal.

Trivelin et al. (2002a e 2002b) e Oliveira et al. (2002) usaram vasos de 220 litros com aproximadamente 270 kg de terra para evitar ao máximo o efeito do tamanho do vaso nas plantas da cana. Porém, não se sabe se o tamanho de vaso utilizado foi suficiente para simular as plantas no campo ou se os vasos poderiam ter sido menores.

Os exemplos acima demonstram que não há um consenso quanto ao tamanho de vaso utilizado em diversos experimentos.

1.4 Isótopos do Fósforo

O fósforo possui os radioisótopos ^{32}P e ^{33}P , que têm permitido diversos estudos relacionados à nutrição de plantas e fertilidade do solo, contribuindo enormemente em pesquisas no Brasil (NEPTUNE et al., 1979; VOSE, 1980; BOARETTO; NEPTUNE; PATELLA, 1985; MURAOKA; BOARETTO, 1989;

BOARETO; MURAOKA, 1989; SALCEDO; BERTINO; SAMPAIO, 1990; SCIVITTARO; BOARETO; MURAOKA, 1997; NATALE et al., 1999; ALVAREZ et al., 2002).

O ^{33}P possui meia-vida de 25 dias e emite partículas β^- com baixa energia (0,249 MeV), o qual não pode ser detectado pelo efeito Cerenkov, que possui uma energia limiar de 0,263 MeV. Assim, é necessária a adição de solução cintiladora à base de tolueno (POP, POPOP, Triton X e Tolueno) nas amostras que são lidas em aparelho de cintilação líquida. Além do uso de solução cintiladora o radioisótopo ^{33}P é importando, encarecendo e dificultando sua aquisição.

A principal limitação ao uso do ^{32}P é sua curta meia vida, relativamente curta, de 14,3 dias, a qual efetivamente limita a duração dos experimentos. Entretanto, esta característica é vantajosa do ponto de vista ambiental, pois em poucos meses o ^{32}P decai, não produzindo lixo radioativo, minimizando o impacto ambiental. A emissão de partículas β^- de alta energia pelo ^{32}P (1,71 MeV) representa um perigo considerável, exigindo cuidados adicionais no seu manuseio. Porém, devido a essa característica este radioisótopo tem a vantagem de ser detectado por cintilação. Este fenômeno, chamado de Efeito Cerenkov, é produzido quando as partículas β^- com energia superior a 0,263 MeV passa por meio aquoso, dispensando o uso de solução cintiladora (VOSE, 1980).

A atividade do radioisótopo ^{32}P é determinada pelo número de partículas β^- emitidas, denominada desintegração por segundo (dps). A unidade internacional padrão da dps é o Bequerel (Bq). A estimativa da atividade do ^{32}P ao longo do tempo é dada pela equação (KAPLAN, 1978):

$$A = A_0 e^{-\frac{0,693 t}{T}} \quad (1)$$

onde:

- A: atividade final do radioisótopo (Bq);
- A_0 : atividade inicial do radioisótopo (Bq);
- e: logaritmo neperiano;
- t: decaimento em dias;
- T: meia vida do radioisótopo (14,3 dias).

Nas plantas a atividade do radioisótopo é representada pela atividade específica, dada por (DI; CONDRON; FROSSARD, 1997):

$$A_e = \frac{A}{P_{total}} \quad (2)$$

onde:

- A_e : atividade específica do radioisótopo ($\text{Bq g}^{-1} \text{ P}$);
- A: atividade do radioisótopo na planta (Bq);
- P_{total} : conteúdo de fósforo na planta (g kg^{-1}).

1.5 Uso de Técnicas Isotópicas (Valor L)

Os primeiros experimentos em vasos usando fertilizantes marcados com ^{32}P foram realizados há mais de meio século (DEAN et al., 1947; SPINKS; BARBER, 1947; FRIED; DEAN, 1952), cujo principal objetivo foi determinar a porcentagem do fósforo presente nas plantas proveniente de fertilizantes.

Muitas técnicas isotópicas podem ser aplicadas para a determinação do efeito imediato e residual dos fertilizantes fosfatados. Usando isótopos como traçadores, esse porcentual de utilização de fósforo pela planta derivada do fertilizante (%Pddf), pode ser determinada (FARDEU; GUIRAUD; MAROL, 1996) através do valor L (L de LARSEN, 1952), a qual permite 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 determinação do P isotopicamente trocável de um solo fundamenta-se na técnica da diluição isotópica. Através desta metodologia, determina-se a quantidade ou a concentração de um elemento ou composto não marcado por meio da mistura com o elemento ou composto marcado. Quando se adiciona o isótopo radioativo ^{32}P a um solo ocorre troca entre ^{32}P e ^{31}P adsorvido na forma lábil (WHITE, 1976) segundo o equilíbrio:



Em condição de equilíbrio:

$$\frac{^{32}\text{P}(\text{lábil})}{^{32}\text{P}(\text{solução})} = \frac{^{31}\text{P}(\text{lábil})}{^{31}\text{P}(\text{solução})}$$

Portanto:

$$^{31}\text{P}(\text{lábil}) = \left[\frac{^{32}\text{P}(\text{lábil}) \times ^{31}\text{P}(\text{solução})}{^{32}\text{P}(\text{solução})} \right]$$

O valor L pode ser 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; FARDEAU, 1996; FARDEU; GUIRAUD; MAROL, 1996).

O procedimento envolve mistura uniforme de fonte de ^{32}P com o volume de solo em que as plantas serão cultivadas. A planta absorverá o P da solução, ou seja, o ^{32}P “diluído” e o ^{31}P lábil. A análise da planta permite quantificar o P total absorvido e, pela atividade específica (Ae) calculada quantifica-se o ^{32}P absorvido (LARSEN, 1967).

Larsen (1952) foi o primeiro a sugerir que, quando o fertilizante fosfatado

marcado é adicionado ao solo em diferentes doses, a atividade específica determinada pela planta cultivada neste solo seria constante se a diluição isotópica atingisse o equilíbrio neste sistema (MURAOKA, 1991). O método de Gunnarson e Fredrikson (1953) é conceitualmente similar. A equação do valor L é similar a equação básica da diluição isotópica, portanto:

$$\text{Valor } L = X \left(\frac{S_0}{S_f} - 1 \right) \quad (3)$$

onde: S_0 = atividades específicas da solução aplicada

S_f = atividades específicas da planta

X = a quantidade do elemento marcado adicionado

A equação (3) pode ser escrita desta forma:

$$L = \frac{Y \times X_1}{Y_1} \quad (4)$$

onde: Y = é a quantidade de ^{32}P adicionado;

X_1 = quantidade de ^{31}P na planta;

Y_1 = quantidade de ^{32}P na planta;

X = quantidade de ^{31}P adicionada.

O valor L independe da quantidade de P usado para as determinações, porém são dependentes das condições experimentais, por exemplo, a espécie vegetal, o estágio fisiológico da planta, a interação entre os nutrientes, a matéria orgânica e o volume e a umidade do solo (NEPTUNE; MURAOKA, 1978; VOSE, 1980).

A grande vantagem do uso de radioisótopos em relação aos extratores químicos é a utilização do próprio elemento na forma radioativa, como exemplo, o ^{32}P em relação ao P sem a introdução de solução salina, complexante ou ácida.

Segundo Jose e Krishnamoorthy (1972) devido à dificuldade em determinar a

concentração de P-lábil na solução do solo, principalmente em solos com grande Fator Capacidade de P (FCP) e pobres em P (os mais intemperizados e argilosos), a utilização de carregador nesses solos faz com que os sítios de adsorção não ocupados pelo ^{31}P original do solo sejam ocupados pelo carregador (^{31}P) elevando o aumento da concentração de P na solução do solo facilitando a determinação do P-lábil. Quanto maior for a quantidade do carregador (^{31}P), maior será a diluição da forma radioativa. De acordo com Marsola (2003) a melhor dose de carregador para as plantas de crotalária, aveia-preta e milho foi de 50 mg kg^{-1} de solo.

Certas precauções são necessárias para determinar corretamente o valor L, uma delas é certificar-se que o ^{32}P adicionado entrou em equilíbrio isotópico com o solo. Para contornar ou reduzir tais problemas é conveniente a homogeneização tanto quanto possível na marcação do solo com radioisótopo.

Larsen em 1952 usou vasos com 25 kg de solo. Posteriormente (LARSEN; SUTTON, 1963), preocupado com o efeito do tamanho dos vasos na determinação do fósforo lábil do solo, realizou um estudo variando o tamanho da coluna de solo com 2, 4, 8 e 16 polegadas de altura e 5 polegadas de diâmetro. Concluiu-se que em condições limitantes de espaço os resultados poderiam ser superestimados.

Andersen; Gregers-Hansen e Nielsen (1961 apud LARSEN; SUTTON, 1963) também constataram um aumento no valor L quando usaram vasos pequenos, no qual resultou uma alta quantidade de fósforo removido por unidade de solo. Além disso, observaram um aumento linear no valor L com o tempo durante um período de crescimento de 3 a 4 meses. Esse último resultado é contrastante com o obtido por Larsen e Sutton (1963), que afirmam que o aumento no valor L do solo com o passar do tempo pode ser explicado postulando uma constante de mobilização do fósforo previamente não trocável com o esgotamento do fósforo pela colheita.

Entretanto, trabalhos posteriores realizados por diversos autores (LARSEN; GUNARY, 1964; FARDEAU, 1993; MOREL; PLENCHETTE, 1994) praticamente ignoram o volume de terra. Normalmente os estudos de avaliação da disponibilidade de P do solo por diluição isotópica, bem como outros estudos com isótopos, são realizados com vasos de pequeno volume. Este fato ocorre principalmente em função do custo e da proteção radiológica, pois são necessários cuidados pessoais na condução do experimento e armazenamento dos resíduos até o material atingir o nível de radiação permitido para descarte.

Assim, a maioria dos autores utilizaram vasos variando de 1 a 2 kg de solo (RUSSELL; MARAIS, 1957; LARSEN; COOKE, 1961; VOSE, 1980; HOCKING et al., 1997; FERNANDES; MURAOKA, 2002). Entretanto, Salcedo; Bertino e Sampaio (1991) compararam os resultados de valor E de seis solos com o P extraído pelo painço em vasos com 8 kg para cada solo.

1.6 Fósforo na Semente e seu Efeito no Desenvolvimento das Plantas

De acordo com Braum e Helmke (1995), o valor L tem a vantagem de ser menos influenciado pela contribuição do P proveniente da semente do que pela atividade específica de $^{32}\text{P}/^{31}\text{P}$ acumulada na planta, uma vez que a contribuição de P da semente é pequena em relação ao valor do P isotopicamente trocável.

Hens e Hocking (2004) conduziram um experimento em casa-de-vegetação para avaliar os benefícios das plantas de grão-de-bico, feijão fava, tremoço branco, canola e trigo avaliando a nutrição de P e o crescimento da canola. Este estudo foi realizado com três tipos de solo com baixo, médio e alto teor de P marcados com ^{32}P visando quantificar a dimensão do reservatório de fósforo no solo disponível para estas espécies. Concluíram que o valor L para feijão fava cultivado em solos com

baixos teores de fósforo estava comprometido devido a grande proporção do fósforo proveniente da semente em relação ao P absorvido na parte aérea, tornando o cálculo do valor L muito sensível para o valor estimado de P derivado da semente acumulado na parte aérea.

Segundo McLaughlin; Alston e Martin (1988) em experimento com trigo utilizando ^{32}P e ^{33}P para avaliar a eficiência de absorção de P proveniente da rotação de pastagem e trigo em diferentes épocas (07, 18, 32, 46, 61, 81 e 95 dias) comprovou que no início do crescimento das plantas, a atividade específica foi baixa devido a grande quantidade de P disponível à planta presente na semente. Isto ocorre pois, com o desenvolvimento da planta o sistema radicular começa a explorar as camadas do solo que continham fertilizantes com ^{32}P disponível. A Atividade específica nas plantas demonstrou que o fertilizante contribuiu significativamente na absorção do P pelas plantas de trigo, quando este está localizado próximo à superfície do solo.

A fração de fósforo do solo que passou por uma diluição isotópica com o ^{32}P pode ser estimada pela medida da atividade específica das plantas cultivadas em solo marcado como foi visto anteriormente (Item 1.4). De acordo com Brookes (1982), assumindo que se atingiu o equilíbrio isotópico e que as plantas absorveram ^{31}P e ^{32}P em proporção do solo, tem-se:

$$\frac{{}^{32}\text{P}_{\text{solo}}}{{}^{31}\text{P}_{\text{solo}}} = \frac{{}^{32}\text{P}_{\text{planta}}}{{}^{31}\text{P}_{\text{planta}}} \quad (5)$$

$$\therefore {}^{31}\text{P}_{\text{solo}} = \frac{{}^{31}\text{P}_{\text{planta}} \times {}^{32}\text{P}_{\text{solo}}}{{}^{32}\text{P}_{\text{planta}}} \quad (6)$$

Onde ${}^{31}\text{P}_{\text{solo}}$ é a quantidade de fósforo no solo que sofreu diluição isotópica

com a adição do ^{32}P . A equação 6 assume que todo o P absorvido pela planta é derivado do solo porém, certa quantidade é oriunda da semente. Então a equação 6 pode ser melhor expressa por:

$${}^{31}\text{P}_{\text{solo}} = \frac{({}^{31}\text{P}_{\text{planta}} - {}^{31}\text{P}_{\text{semente}}) \times {}^{32}\text{P}_{\text{solo}}}{{}^{32}\text{P}_{\text{planta}}} \quad (7)$$

No cálculo do valor L, subtrai-se a quantidade acumulada de P na planta derivado do solo pela quantidade de P proveniente da semente (HOCKING, 1980), conforme equação 7, a qual demonstra que quando a absorção de P do solo pela planta é baixa, o fósforo proveniente da semente pode causar um valor L muito alto. No entanto, poucos trabalhos levam em consideração o efeito do P da semente para a determinação do valor L.

Larsen e Gunary (1964) estimaram a contribuição do P proveniente da semente no P total absorvido pela parte aérea do centeio cultivado em vermiculita na ausência de fósforo. Observaram que a contribuição do P proveniente da semente para o P total na parte aérea do centeio é constante, sem levar em conta a condição do P presente no solo.

Marais; Deist e Heyns (1969) sugeriram que maiores quantidades de fósforo da semente foram mobilizadas para o crescimento das plantas cultivadas em solo adubado com fósforo, em contradição às condições de deficiência estudadas por Larsen e Gunary (1964). Russell; Russell e Marais (1957) concluíram que o valor L pode ser o único confiável pois a quantidade total de P da semente translocado para as plantas são subtraídos do total de P absorvido pela planta.

Sutton e Larsen (1963), em experimento com ^{32}P livre de carregador, avaliaram o valor L somente no quarto corte de centeio para evitar o efeito do P da semente, enquanto Larsen e Sutton (1963), em experimento para avaliar a relação

entre o volume de solo e a absorção de P, consideraram medidas de valor L depois do primeiro corte, novamente para que o efeito do teor de P da semente não interferisse nos resultados.

Brookes (1982) determinou valor L em um solo com baixo teor de P, com centeio em 3 épocas de corte, a cada 32 dias. Concluiu que os resultados de valor L obtidos na primeira colheita foram irreais devido à pequena quantidade de P proveniente da semente, pois em solos com baixo teor de fósforo, o P da semente tem grande influência no valor L, aumentando a quantidade de carregador e reduzindo o efeito do P da semente na determinação do valor L em solos que apresentam baixa concentração de fósforo.

Diferentes procedimentos tem sido adotados para evitar o efeito do fósforo proveniente da semente quando se determina o valor L, porém existem poucos trabalhos que estudam esse efeito, ou que correlaciona o P da semente com a análise de P absorvido pela parte aérea.

A fonte de P absorvido pelas plantas pode ser deduzida considerando a atividade específica do P absorvido, como detalhou McLaughlin e Alston (1986). McLaughlin; Alston e Martin (1988), estudando a dinâmica da absorção do fósforo pelo trigo utilizando os radioisótopos ^{32}P e ^{33}P , concluíram que no início do desenvolvimento das plantas a atividade específica de ambos radioisótopos foram muito menores, presumidamente devido a grande quantidade de fósforo presente na planta proveniente da semente. Como as plantas se desenvolveram e os sistemas radiculares começaram a explorar a camada do solo contendo o fertilizante com ^{32}P trocável, a atividade específica máxima do ^{32}P nos tecidos das plantas ocorreu entre 46 e 61 dias, quando aproximadamente 26% do P absorvido pelas plantas foi derivado do fertilizante.

Para auxiliar a diminuição do efeito da semente pelo maior peso da planta, segundo Muraoka (1991) duas medidas podem ser tomadas: homogeneização uniforme do solo com o elemento marcado e amostragem da planta após um período suficientemente longo.

Um outro cuidado a ser tomado é quanto à quantificação da contribuição do nutriente em estudo proveniente da semente. Em experimento semelhante para estudar a porcentagem do nutriente proveniente da semente, Muraoka; Neptune e Nascimento Filho (1981) avaliaram plantas de feijão com 15 dias de idade. Concluíram que cerca de 9% do zinco da parte aérea é proveniente da semente, correspondendo a aproximadamente 60% do total do zinco da semente.

1.7 Estudo do Valor L para Diferentes Espécies de Plantas

Em estudo com diferentes espécies de plantas, segundo Braum e Helmke (1995), os diferentes valores L para cada espécie foi devido aos diferentes reservatórios de P no solo e não devido à diferença na absorção do fósforo, assim como também não existe nenhuma relação entre o valor L e absorção de P.

As espécies de plantas diferenciam na eficiência de P quando cultivadas em solos com baixa disponibilidade de P (CARADUS, 1994; RANDALL, 1995; MAMO; RICHTER; HOPPENSTEDT, 1996; TROLOVE et al., 1996a,b). Segundo Rengel (1999) as espécies C4 mostram ser similares quanto à eficiência de P quando comparadas às plantas C3, entretanto as monocotiledôneas são mais eficientes que as dicotiledôneas porque a deficiência de P tem maior efeito sobre as ramificações (dicotiledôneas) que os perfilhos (monocotiledôneas).

Segundo Larsen (1952), embora a concentração de P nas plantas e a quantidade de P acumulada serem diferentes, a atividade específica de ^{32}P nas

plantas pode ser comparada se absorvem P do mesmo reservatório.

Recentemente a metodologia do valor L tem sido empregada em estudos de diferenciação entre espécies, cultivares e híbridos de plantas em relação à capacidade de absorção de fósforo menos disponível do solo (HOCKING et al., 1997; FERNANDES; MURAOKA, 2001; RAPOSO, 2003). Estes dados foram obtidos através da medida da atividade específica do P absorvido pelas plantas em estudo. A vantagem dessa técnica é a possibilidade de medir diretamente a capacidade de absorção de P pouco disponível, por diferentes plantas, não dependendo do cálculo de parâmetros de eficiências utilizados em trabalhos realizados com metodologias convencionais.

1.8 Estudos Relacionados ao Volume de Raiz

A qualidade das plantas pode ser definida com base nas suas características internas, denominada classificação fisiológica e características externas, denominada classificação morfológica. Segundo Sturion (1981 apud PEREIRA, 1983) e Machado (2000), a classificação morfológica é a mais usada, pois leva em consideração a relação entre as partes aérea e subterrânea, a produção de massa seca e úmida das partes aérea e raiz e a idade das plantas.

As mudanças morfológicas das raízes ocorrem em resposta a vários fatores edáficos, incluindo disponibilidade de água, nutrientes e impedimentos físicos (MILLER, 1938), como volume de solo disponível para o desenvolvimento das plantas.

Em estudos realizados com *Finus* sp, Ball (1976 apud PEREIRA 1983) constatou o enovelamento das raízes de mudas formadas em sacos plásticos

pequenos, sendo a causa principal da ruptura basal do tronco das plantas, alguns anos após o plantio no campo.

Föhse; Claassen e Jungk (1991) confirmam que a diferença entre espécies na absorção de fósforo foi devida, principalmente, à morfologia do sistema radicular. As estratégias desenvolvidas pelas plantas para uma alta eficiência na absorção diferem entre espécies (FÖHSE; CLAASSEN; JUNGK, 1998). Sob limitado suprimento de P, as raízes das plantas mostram-se drenos preferenciais de fotossintatos, quando comparadas à parte aérea. Xu et al. (2002 apud ALVAREZ 2004), pesquisando efeito de doses de P em *Eucalyptus grandis* x *urophylla*, observaram maior relação de biomassa raiz/parte aérea sob deficiência de P e diminuição dessa relação com doses crescentes do nutriente. O crescimento radicular foi favorecido em solos deficientes em nutrientes, notadamente em N e P (MARSCHNER et al., 1996), como estratégia para extrair o máximo do nutriente presente no solo (CLARKSON, 1985). Concordando com esses enunciados, Machado (2000) observou que plantas de milho submetidas a estresse de P apresentaram uma inibição no seu crescimento total e um aumento relativo no sistema radicular, significando que a redução no crescimento da parte aérea acontece antes da redução no crescimento das raízes.

Do ponto de vista da morfologia da raiz, plantas com maior quantidade de raízes secundárias ou pêlos absorventes exploram maior volume de solo e, portanto, absorvem maior quantidade de nutrientes. As modificações na rizosfera como mudanças de pH, concentração iônica, potencial redox, atividade microbiana, presença de micorrizas e densidade e umidade do solo podem ser provocadas pelas próprias raízes, que envolvem a absorção seletiva de íons e de água e a liberação de exsudatos. Esses fatores alteram o fluxo e a absorção de nutrientes pelas raízes

e, com isso, a eficiência da adubação fosfatada (MARSCHNER, 1995; MENGEL; KIRKBY, 2001).

Em experimento de campo com o objetivo de estudar a fonte de P absorvido pelo trigo, McLaughlin; Alston e Martin (1988) concluíram que no início do crescimento das plantas a absorção de ^{32}P pode ser influenciada grandemente pela distribuição das raízes. Como as plantas se desenvolveram e a massa das raízes nos vasos aumentou, as raízes compensaram a distribuição irregular dos isótopos, diminuindo então a variabilidade entre as plantas. A tendência de absorção dos radioisótopos pelas plantas inteiras foi similar à absorção do ^{31}P .

A habilidade das raízes das plantas em absorver nutrientes sob condições de baixa disponibilidade depende dos seguintes fatores: o estado nutricional das plantas, a morfologia do sistema radicular, a translocação e o crescimento da parte aérea (SIQUEIRA; ANDRADE; FAQUIN, 2004).

A capacidade fisiológica de sistemas radiculares de menores tamanhos pode ser o fator limitante para o transporte de água e nutrientes para a parte aérea. Em condições de experimento bem controlado, a restrição de raízes em pequenos recipientes tem mostrado que a limitação do desenvolvimento das plantas é devido aos seguintes parâmetros: área foliar, números de folhas, altura da planta e produção de biomassa. (COOPER, 1972; RICHARDS; ROWE, 1977; CARMI; HEUER, 1981; CARMI; Van STADEN, 1983; CARMI et al., 1983; RUFF et al., 1987; ROBBINS; PHARR, 1988; PETERSON; KRIZEK, 1992).

O volume do recipiente pode afetar o desenvolvimento da planta através da nutrição e transpiração (BROUWE; DE WINT, 1968; HAMEED; REID; ROWE, 1987) ou através da fisiologia da raiz e parte aérea (AUNG, 1974; JACKSON, 1993). Em alguns casos, o confinamento da raiz em vasos com pequeno volume de solo não

causam a deficiência de nutrientes (CARMI; HEUER, 1981; ROBBINS; PHARR, 1988) ou déficit hídrico (KRIZEK et al., 1985; RUFF et al., 1987). Entretanto a restrição causada pelo estresse na raiz pode diminuir o suprimento de produção de substâncias na raiz com o desenvolvimento da parte aérea, causando um desbalanço no crescimento das raízes e parte aérea (CARMI; HEUER, 1981; PETERSON; REINSEL; KRIZEK, 1991a, b).

Estudos de Bar-Tal; Bar-Yosef e Kafkafi (1990, 1993) sugerem que a nutrição das plantas pode ser afetada pelo volume de solo disponível, diretamente através da redução do comprimento e área superficial da raiz que absorvem nutrientes ou indiretamente através da quantidade de água (HAMEED; REID; ROWE, 1987) e nutrientes (HUMPHRIES, 1958; BROUWER; DE WIT, 1968; MUSTSAERS, 1983; HANSON; DIXON; DICKSON, 1987; BAR-TAL; BAR-YOSEF; KAFKAFI, 1990) disponíveis para um médio crescimento.

As informações disponíveis quanto à influência da relação raiz/parte aérea no total de nutrientes absorvidos e atividade da raiz é um tanto quanto duvidosa, pois, segundo Jungk e Barber (1975), o total de fósforo absorvido pelas plantas de milho depende somente da profundidade da raiz e não do tamanho da parte aérea, enquanto que Edwards e Barber (1976) observaram que o total de P absorvido pelas raízes de soja (inteira e cortadas) foi similar, assim o P absorvido por unidade de peso de raiz foi maior em plantas que tiveram suas raízes cortadas.

Segundo Bar-Tal (1999), a redução do volume disponível para o desenvolvimento das raízes pode causar dois efeitos na nutrição das plantas: (1) as raízes terem uma restrição fisiológica, resultando uma redução do volume de raiz, profundidade e área superficial, e (2) crescimento em um pequeno volume leva a um aumento na necessidade de renovar e restringir fornecimentos de nutrientes e água.

As análises dos efeitos previamente mencionados em muitos sistemas de desenvolvimento podem causar diferentes resultados e conclusões pelos experimentos serem conduzidos de maneiras diferentes.

Bar-Yosef; Imas e Levkovitz (1995) estudaram o efeito do volume de vaso (10 e 20 L) no desenvolvimento de plantas de tomate e absorção de nutriente. O desenvolvimento das plantas aumentou quando se aumenta o volume do vaso. A concentração de N, P, K, Ca e Mg nos tecidos das plantas não foram afetados pelo volume do vaso, mas a absorção por planta foi maior em vasos de 20 L. O aumento da taxa de absorção de N e P nos vasos de 20 L é maior devido a maior taxa de absorção de N e P por unidade de raiz e o seu maior sistema radicular quando comparado ao vaso de 10 L.

Em estudo mais detalhado do efeito do volume do vaso na nutrição de plantas de tomate, Bar-Yosef et al. (1997), utilizando vasos de 5, 10, 20 e 40 L, concluíram que a produção de matéria seca e absorção de nutrientes, especialmente P e K, aumentaram com o aumento do volume do vaso. A taxa de absorção dos nutrientes, especialmente o P, foi muito menor em vasos de 5 L que nos demais volumes. Como não houve efeito significativo no peso da raiz, a redução na absorção de P e K à medida que o volume diminuiu resultou principalmente na diminuição da taxa de absorção de P e K por unidade de área de raiz, concluindo que essa taxa aumenta com o aumento do volume do vaso.

A absorção de P pelas plantas é proporcional à densidade das raízes; assim, o incremento da área superficial da massa radicular aumenta a habilidade da planta em acessar e absorver o P do solo. Segundo Grant et al. (2001) tem-se observado que a relação raiz/parte aérea da planta aumenta quando existe deficiência de P no início do seu desenvolvimento. Isto significa que a redução no crescimento, por

efeito da deficiência de P, geralmente é maior na parte aérea da planta que nas raízes, permitindo desta forma manter pelo menos o crescimento radicular para encontrar e extrair P do solo. Um dos mecanismos para aumentar a absorção de P em condições de baixo suprimento de P é o aumento da densidade radicular.

Os experimentos agronômicos com um adequado fornecimento de água e nutrientes indicam que os pequenos sistemas radiculares podem ser suficientes para obter um máximo desenvolvimento. Há estudos com tamanhos de sistemas radiculares e habilidade destes para absorção dos nutrientes que questionam se podem ser o fator limitante na nutrição da planta. De acordo com Bar-Tal (1999), alguns estudos demonstram que a nutrição da planta é afetada pelo menor desenvolvimento das raízes em menores volumes de solo, mas em outros estudos esse efeito não é obtido. No estudo anterior, reduziu a absorção do nutriente por unidade de peso de raiz ou por volume conforme diminuiu o volume do vaso. A eficiência das raízes aumenta conforme diminui o seu tamanho, contanto que estes volumes não afetem o poder tampão para manejar a concentração de nutrientes e satisfazer a demanda destes para a planta. Teoricamente, a restrição das raízes abaixo do nível crítico pode afetar a nutrição da planta, mas na prática, outros fatores como absorção de água e restrição dos hormônios de crescimento podem controlar a absorção dos nutrientes. De Willigne e Van Noordwijk (1987) concluíram que absorção de água é o primeiro fator limitante quando o crescimento das raízes é restrito.

Segundo Bar-Tal (1999), quando se usa pequeno volume de solo a habilidade do meio em suprir os nutrientes em proporções requeridas é restringida, promovendo uma redução na eficiência aparente da raiz em absorver os nutrientes. De fato, os volumes dos vasos e os tamanhos das raízes são muito maiores que o

tamanho crítico das raízes para absorver nutrientes de fontes ilimitadas.

O tamanho das raízes, por sua vez, é afetado pela disponibilidade de nutrientes, pois, segundo Glass (2002), a privação de nutriente geralmente reduz o crescimento absoluto das raízes e da parte aérea, embora aumente a relação raiz/parte aérea, a translocação dos nutrientes das raízes para a parte aérea é bloqueada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA em casa de vegetação e as análises de solo e planta foram realizadas no Laboratório de Fertilidade do Solo deste Centro.

O estudo foi realizado com amostra de um Latossolo Vermelho-amarelo da região de Piracicaba, inteiramente casualizado, com 3 repetições, com feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) cv Tybatan - IAC e milho (*Zea mays L.*) híbrido simples Pioneer - 30P70. Os tamanhos dos vasos avaliados foram com 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 12,0 e 18,0 L de terra ou 0,55; 1,1; 2,2; 4,4; 8,8; 13,2 e 19,8 kg de terra, respectivamente. Foram usados vasos plásticos de mesmo formato e pintado externamente com tinta alumínio.

Foram realizados dois experimentos concomitantes: Experimento 1: utilizando o radioisótopo ^{32}P para determinação do valor L e outro, Experimento 2: sem o fósforo marcado, para estudo de raiz e parte aérea das culturas.

Os experimentos foram realizados com e sem adubação de P (50 mg kg^{-1} terra de P) e dois períodos de desenvolvimento para o Experimento 1 (30 e 50 dias após a semeadura) e somente um (50 dias) para o Experimento 2.

Optou-se por utilizar o mesmo solo com níveis diferentes de fósforo do solo (adubado e não adubado) em vez de solos diferentes para que pudessem ser mantidas as mesmas características químicas e físicas do solo, para evitar que diferenças quanto a concentração de nutrientes e físicas interferissem na absorção de fósforo do solo pela planta.

O experimento 1 foi realizado com duas épocas de colheitas: 30 e 50 dias com a finalidade de avaliar o efeito do período de desenvolvimento das plantas na determinação do fósforo isotopicamente trocável, esperando-se obter melhores

resultados nas plantas colhidas aos 50 dias por terem estado um maior período de tempo em contato com o solo.

Foram realizadas comparações entre o valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente (L) e o valor L calculado descontando o P proveniente da semente (L (-Ps)), com a finalidade de estudar a partir de qual volume de terra o valor L não sofre mais efeito do P proveniente da semente.

2.1 Características do Solo

As características químicas do solo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Análise química do Latossolo Vermelho-amarelo

Solo	prof.	pH	MO	P	S	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V
	cm	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³		-----		mmol _c dm ⁻³	-----			%
LVA	0 - 20	4,7	14	3	9	1,0	6,7	2,9	23,7	10,5	34,2	31

Raij et al. (1987)

O solo tem a classe textural médio argiloso, de acordo com a EMBRAPA (1999), com 66% de areia, 6% de silte e 28% de argila (análises realizadas no Laboratório de Solos da ESALQ).

Após a coleta do solo, este foi seco, peneirado em malha de 2 mm para a remoção das impurezas (galhos, raízes, etc) e homogeneizado. Encheram-se os vasos com o peso de terra, para uma melhor precisão, de acordo com a densidade desta terra (1,1 g cm⁻³) respeitando o volume de terra proposto a partir dos diferentes tamanhos de vasos.

Em função da análise do solo foi realizada calagem aplicando-se calcário calcinado com 110% de PRNT, com a finalidade de aumentar a saturação por base,

de 30,78% para 60%.

2.2 Experimento 1: Valor L

2.2.1 Aplicação de ^{32}P

Soluções do radioisótopo ^{32}P com atividade de $3,7 \text{ MBq L}^{-1}$ terra mais 10 mg L^{-1} terra de ^{31}P carregador (KH_2PO_4) foram aplicadas juntamente com 200 mL L^{-1} terra de água destilada. A aplicação de ^{32}P nos vasos está esquematizada na figura 1. As quantidades de terra presente nos vasos foram divididas em camadas para melhor homogeneização, assim o ^{32}P e o carregador foram aplicados em superfície proporcionalmente ao volume de terra em cada camada. Após a aplicação, os vasos foram mantidos por 20 dias para atingir o equilíbrio isotópico.

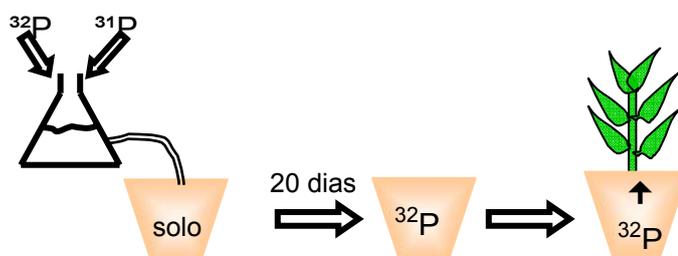


Figura 1. Esquema da marcação de terra com o radioisótopo - ^{32}P .

2.2.2 Cultivo das plantas

Semeou-se cinco sementes por vaso, tanto do milho como do feijão que germinaram seis dias após a semeadura. O desbaste foi realizado uma semana depois, deixando duas plantas por vaso, independente do tamanho do vaso. Para o

controle fitossanitário das culturas foi aplicada inseticida à base de deltamethrim.

Aplicou-se sulfato de amônio $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ e cloreto de potássio (KCl) em cobertura aos 12 dias após sementeira, em dose de 10 mL/vaso de solução contendo 100 mg/vaso de N e 175 mg/vaso de K. Após 15 dias aplicou-se 10 mL/vaso de solução nutritiva contendo micronutrientes: boro, manganês, zinco, cobre, ferro e molibdênio.

Os vasos foram irrigados com água destilada diariamente com a finalidade de manter uma umidade adequada na terra, próximo da capacidade de campo de 70%.

Aos 30 e 50 dias após a sementeira, as plantas dos vasos respectivos foram cortadas rente à superfície do solo. O segundo corte estava inicialmente previsto para 60 dias, mas foi antecipado para 50 dias devido ao surgimento de vagens nas plantas de feijão nos vasos de maiores tamanhos (12,0 e 18,0 L) o que poderia acarretar na redistribuição do P das folhas e flores para as vagens, interferindo nos resultados esperados.

2.2.3 Análise de planta

As plantas e porções de sementes de feijão e milho foram secas em estufa com circulação de ar a 60°C por 72 horas e depois pesadas e moídas em peneiras de 20 mesh. Pesou-se 0,500 g de amostra para digestão nítrico-perclórica com 6 mL de solução de ácido nítrico e perclórico na proporção 1:5 (v/v) e completou-se o volume para 50 mL com água destilada (SARRUGE; HAAG, 1974). As sementes foram digeridas inteiras (porções de 3 sementes secas) conforme a metodologia mencionada para análise da parte aérea.

Determinou-se a concentração de fósforo total pelo método de colorimetria

do metavanadato, o qual se baseia na formação de um composto amarelo do sistema vanadomolibdofosfórico. A concentração de P foi medida através do sistema de Análise por Injeção em Fluxo – FIA (SILVA, 1998). Neste extrato realizou-se também a contagem da atividade de ^{32}P determinada por efeito Cerenkov em contador de cintilação em meio líquido Wallac (AWERBUCH; AVINIMELICH, 1970). Os dados foram usados para calcular a atividade específica do ^{32}P ($\text{Bq } \mu\text{g}^{-1} \text{ P}$) das amostras vegetais de acordo com a equação 2.

O fósforo isotopicamente trocável (valor L) foi calculado a partir das equações 8 e 9:

$$\text{Valor } L = X \left(\frac{S_0}{S_f} - 1 \right) \quad (8)$$

onde: S_0 = atividades específicas da solução aplicada

S_f = atividades específicas da planta

X = dose de carregador ^{31}P aplicado

Para o cálculo do valor L descontando o teor de P proveniente da semente foi através da equação 9:

$$\text{Valor } L = \left(Y \frac{(X_T - Z)}{Y_T} - X \right) \quad (9)$$

onde: Y = atividade de ^{32}P da solução;

X_T = conteúdo de P total na planta;

Y_T = atividade de ^{32}P na planta;

X = dose de carregador ^{31}P aplicado

Z = conteúdo de P total proveniente da semente.

Considerou-se 60% a fração do fósforo da semente de milho e feijão (Z) que migrou para a planta (BROOKES, 1982).

2.2.4 Delineamento estatístico

Os dados foram submetidos à análise de variância, segundo o delineamento inteiramente casualizado com 3 repetições no esquema fatorial 7x2x2. Para o valor L realizou-se também o teste de Tukey a 5% de probabilidade a fim de comparar as médias entre os volumes de terra.

O experimento resultou das combinações entre 7 volumes de terra, duas épocas de colheita e dois níveis de fertilidade de P no solo para as plantas de feijão e milho. As variações entre épocas de colheita e níveis de fertilidade estão descritas na Tabela 2

Tabela 2- Descrição das variáveis estudadas dentro dos diferentes volumes de terra.

	Época de colheita (dias)	Níveis de Fertilidade
E ₁ F ₁	30	sem adubação
E ₁ F ₂	30	sem adubação
E ₂ F ₁	50	adubado
E ₂ F ₂	50	adubado

2.3 Experimento 2: relação raiz x parte aérea

Este experimento foi conduzido concomitante com o anterior, sendo a diferença apenas a ausência de ³²P e único período de desenvolvimento (50 dias).

2.3.1 Análise de plantas

As plantas foram colhidas aos 50 dias após a semeadura, cortando-as rente à superfície do solo e separando as raízes das partes aéreas. Os sistemas radiculares foram lavados em água corrente até o total desprendimento da terra. As partes aéreas e as raízes das plantas foram embaladas separadamente em sacos de papel e levados para secar em estufa de circulação forçada de ar a 60°C por 72 horas. Após este período, determinou-se a massa seca das plantas que foram moídas em peneiras de 20 mesh para a determinação do P total como descrita no Experimento 1.

2.3.2 Cálculos

a) Rendimento das plantas devido a adubação com fósforo

Comparou-se a produção de massa seca e conteúdo de P total entre as plantas adubadas e não adubadas. O rendimento foi calculado segundo a equação:

$$Rend_x (\%) = [(X_A - X_{SA}) * 100] - X_A \quad (10)$$

onde:

$Rend_x (\%)$ = rendimento da produção de massa seca ou do conteúdo de P total das plantas;

X_A = produção de massa seca ou conteúdo de P total das plantas cultivadas em solos adubados;

X_{SA} = produção de massa seca ou conteúdo de P total das plantas cultivadas em solo não adubado.

b) Rendimento das plantas em função do aumento do volume de terra

Comparou-se a produção de massa seca e conteúdo de P total das plantas cultivadas em solos adubados e não adubados devido ao incremento do volume de terra. O rendimento foi calculado segundo a equação:

$$\text{Rend}_{X_{V_1-V_2}} (\%) = [(X_{V_1} - X_{V_2}) * 100] - X_{V_2} \quad (11)$$

onde:

$\text{Rend}_{X_{V_1-V_2}} (\%)$ = rendimento da produção de massa seca ou do conteúdo de P total nas plantas cultivadas em solos adubados ou não adubados em função do aumento de terra ($V_2 - V_1$);

X_{V_1} = produção de massa seca ou conteúdo de P total das plantas cultivadas em solos adubados ou não adubados cultivadas em volume de terra menor;

X_{V_2} = produção de massa seca ou conteúdo de P total nas plantas, cultivadas em solos adubados ou não adubados, cultivadas em volume de terra maior.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1- Cultura do Feijão

A tabela 3 apresenta a análise de variância, com os quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para produção de massa seca, concentração de P e conteúdo de P total. Na tabela 4 são apresentados a análise de variância, com os quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para o valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) das plantas de feijão.

Observa-se nessas tabelas que as causas de variação apresentaram efeito significativo para os parâmetros estudados.

Tabela 3 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do feijão, produzidos em diferentes volumes de terra.

Causas de variação	G.L.	massa seca (g)	concentração P (g kg ⁻¹)	conteúdo P total (mg)
Vaso	6	248,8836 **	0,9428 **	1589,798 **
Fertilidade	1	248,1090 **	4,5064 **	2404,6288 **
Vaso x Fertilidade	6	4,7521	0,1358 **	102,1072 **
Época	1	1619,9432 **	26,4992 **	1953,3333 **
Vaso x Época	5	91,0524 **	0,1824 **	326,9291 **
Fertilidade x Época	1	33,1027 **	0,1233	97,9067 **
Vaso x Fertilidade x Época	5	1,4167	0,0810	13,8200
Resíduo	52	2,2842	0,0383	9,1829
C.V.		16,21	8,58	15,29

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste "F"

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste "F"

Tabela 4 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do feijão, produzidos em diferentes volumes de terra.

Causas de variação	G.L.	L (mg kg ⁻¹ terra)	L (- Ps) (mg kg ⁻¹ terra)
Vaso	6	8533,2632 **	1013,5893 **
Fertilidade	1	3513,0293 **	10043,9722 **
Vaso x Fertilidade	6	1207,4189 **	149,8081 **
Época	1	6051,8920 **	6334,7589 **
Vaso x Época	5	191,8999 **	158,0904 **
Fertilidade x Época	1	9701,3396 **	8075,8484 **
Vaso x Fertilidade x Época	5	112,3220 *	78,7932
Resíduo	50	37,9169	40,1025
C.V.		17,31	24,09

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste "F"

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste "F"

Conforme os resultados obtidos verificou-se que não houve significância para interação tripla para o feijão nos casos das variáveis: produção de massa seca, concentração de P, conteúdo de P total e valor L calculado descontando o P proveniente da semente (L (- Ps)), mas a fim de padronizar a metodologia, uma vez que houve significância para interação tripla para o milho em todos os casos das variáveis (Tabela 5 e 6), foi mantido o mesmo estudo, ou seja, volume de terra dentro de cada combinação: época e fertilidade.

Tabela 5 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do feijão, desdobrando a somatória dos quadrados visando ao estudo de volume de terra dentro de cada uma das 4 combinações entre época e fertilidade, produzidos em diferentes volumes de terra.

Causas de Variação	G.L.	massa seca (g)	concentração P (g kg ⁻¹)	conteúdo P total (mg)
Vasos d. E ₁ F ₁	6	12,20 **	0,71 **	141,40 **
Vasos d. E ₁ F ₂	6	30,79 **	0,18	374,12 **
Vasos d. E ₂ F ₁	5	147,74 **	0,16	524,41 **
Vasos d. E ₂ F ₂	5	197,51 **	0,33 **	1228,00 **
Fertilidade (F)	1	251,57 **	4,41 **	2404,63 **
Época (E)	1	1619,94 **	26,50 **	1953,33 **
Interação F x E	1	33,10 **	0,12 **	97,91 **
Resíduo	52	2,28	0,04	9,18
C.V.		16,21	8,58	15,29

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste "F"

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste "F"

Tabela 6 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do feijão, desdobrando a somatória dos quadrados visando ao estudo de volume de terra dentro de cada uma das 4 combinações entre época e fertilidade, produzidos em diferentes volumes de terra.

Causas de Variação	G.L.	L (mg kg ⁻¹)	L (- Ps) (mg kg ⁻¹)
Vasos d. E ₁ F ₁	6	7662,49 **	393,49 **
Vasos d. E ₁ F ₂	6	1703,28 **	536,01 **
Vasos d. E ₂ F ₁	5	90,38	17,31
Vasos d. E ₂ F ₂	5	778,27 **	525,76 **
Fertilidade (F)	1	3513,03 **	10043,97 **
Época (E)	1	6051,89 **	6334,76 **
Interação F x E	1	9701,34 **	8075,85 **
Resíduo	50	37,92	40,10
C.V.		17,31	24,09

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste "F"

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste "F"

Realizou-se o desdobramento da somatória dos quadrados (Tabela 5 e 6) visando ao estudo de volume de terra dentro de cada uma das 4 combinações entre época e fertilidade, a saber: E_1F_1 , E_1F_2 , E_2F_1 e E_2F_2 (Tabela 2). Como se trata de fator quantitativo (volume de terra) optou-se pelo estudo de regressão polinomial, este dando as regressões de 1º ao 6º grau. Entretanto, são de interesse prático apenas as regressões linear e quadrática, reunindo-se, portanto os demais graus em desvios de regressão. Quando os desvios apresentaram F não significativos foram mantidos os valores de F da regressão linear e quadrática feitos com o resíduo da análise quando os desvios foram significativos. Foram realizados novos testes F da regressão linear e quadrática com desvio de regressão com a finalidade de saber se a regressão linear e/ou a quadrática são significativamente superior a desvio face os resultados obtidos. Foram estabelecidas equações de regressão linear se somente esta foi significativa e quadrática se ambas significativas ou somente a quadrática foi significativa, quando não houve significância não se estabeleceu equação de regressão para a variável.

Quando na regressão quadrática foi significativo determinou-se o ponto de máximo, ou seja, que volume de terra condiciona o maior produção de massa seca, concentração de P e conteúdo de P total. Para o valor L, o melhor volume de terra a ser utilizado foi quando na regressão quadrática determinou o ponto de mínimo.

3.1.1- Produção de massa seca

Observa-se na figura 2 o aumento da produção de massa seca com o aumento do volume de terra independente das plantas serem ou não adubadas e colhidas aos 30 ou 50 dias.

As plantas cultivadas em terra sem adubação fosfatada e colhidas aos 30

dias produziram menos massas secas quando comparada as demais. Este resultado era esperado visto que tiveram o menor tempo de desenvolvimento sob um solo pobre em concentração de P.

A diferença de 20 dias entre as duas épocas de colheitas promoveu maior desenvolvimento das plantas, conseqüentemente maior produção de massa seca . O efeito do conteúdo de P maior para produção de massa seca também é notório, uma vez que os maiores valores foram obtidos no solo adubado e colhidas aos 50 dias.

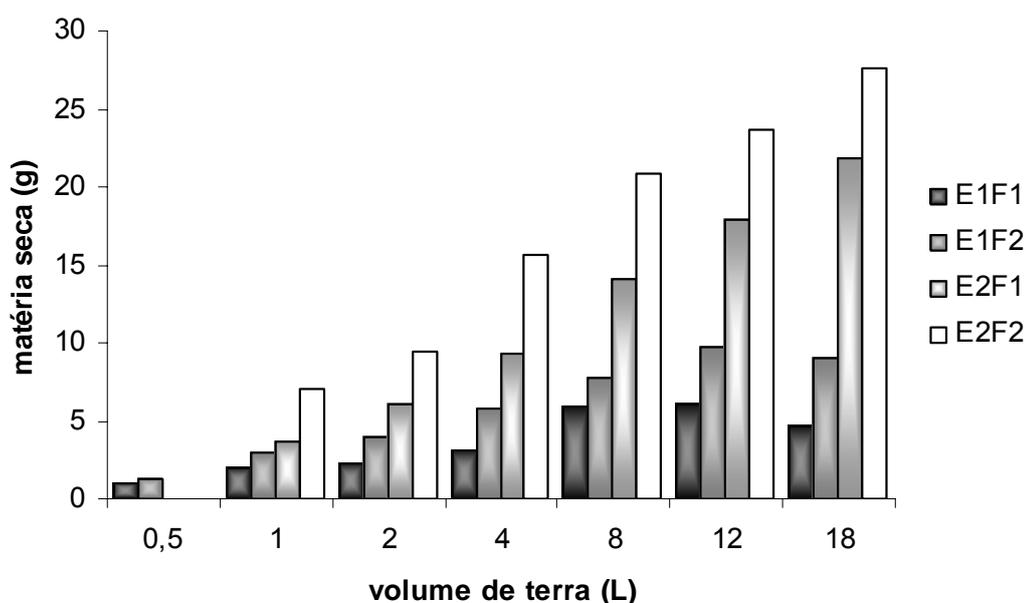


Figura 2- Efeito do volume de terra na produção de matéria seca nas plantas de feijão desenvolvidas em solos adubados (F_2) ou não (F_1) e colhidas aos 30 (E_1) e 50 (E_2) dias.

A partir da análise da variância da regressão polinomial obteve valores de F significativo na forma quadrática para todos os casos. As equações de regressão correspondentes estão apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 - Equação de regressão ajustada para produção de massa seca para plantas de feijão entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.

	Equação
Vasos d. E ₁ F ₁	$y = -0,0381x^2 + 0,9260x + 0,6319$ **
Vasos d. E ₁ F ₂	$y = -0,0404x^2 + 1,1678x + 1,4220$ **
Vasos d. E ₂ F ₁	$y = -0,0322x^2 + 1,6977x + 2,5432$ **
Vasos d. E ₂ F ₂	$y = -0,0689x^2 + 2,4596x + 5,2694$ **

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste "F"

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste "F"

Equações válidas para $X \in [0,5; 18,0]$

Como as regressões quadráticas foram significativas determinou-se o ponto de máximo, ou seja, o volume de terra que condicionaria a maior produção de massa seca para as combinações entre épocas de colheita e níveis de fertilidade. Resultou-se assim, no volume de terra de 12,0 L para as plantas de feijão em solo não adubados e colhidas aos 30 dias; e no volume de terra de 14,0 L para plantas cultivadas em solo adubado colhidas aos 30 dias. Para as plantas de feijão cultivadas em solo não adubado colhidas aos 50 dias o volume de terra de 18,0 L proporcionou a máxima produção de matéria seca. Há necessidade de realizar um estudo com volumes de terra superiores a de 18,0 L para plantas cultivadas em solo não adubado colhida aos 50 dias, pois este parece não ter sido suficiente para suprir as exigências nutricionais das plantas visto que a produção de massa seca das plantas teve incremento crescente até esse volume.

3.1.2- Concentração de P

Na figura 3 observa-se o efeito do aumento do volume de terra e o período de desenvolvimento das plantas na concentração de P nas plantas de feijão.

As plantas colhidas aos 30 dias independentes de serem solo adubado ou não apresentam maior concentração de P em relação às colhidas aos 50 dias. De

acordo com Marin-Prével; Gagnard e Gautier (1984), o fósforo faz parte do grupo de nutrientes cujo teor na planta decresce com a idade. Fageria; Barbosa Filho e Stone (2004) relatam que o teor de fósforo na planta de feijão diminui até 40 dias após o plantio, ficando estável ou com pequeno aumento na faixa de 40 a 63 dias após o plantio, havendo depois uma diminuição linear até a maturação fisiológica.

Em ambos os períodos de desenvolvimento, as plantas cultivadas em solos adubados tiveram concentrações mais altas de P em relação às do solo não adubado, o que já era de se esperar.

As plantas tiveram o desenvolvimento crescente até o volume máximo de terra (18,0 L) em ambos os solos, indicando que seria necessário vasos ainda maiores para atingir o máximo desenvolvimento.

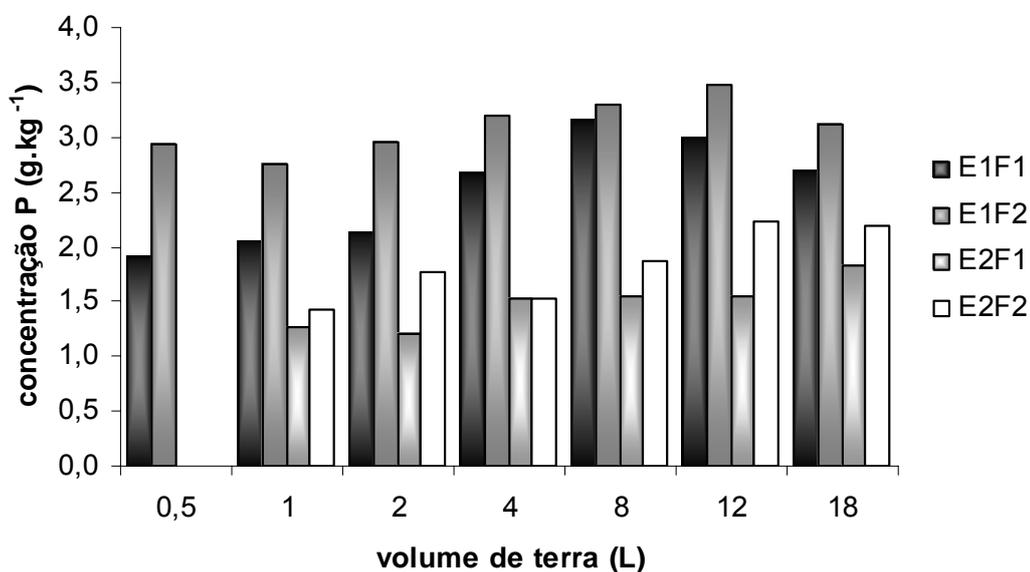


Figura 3- Efeito do volume de terra na concentração de P nas plantas de feijão desenvolvidas em solos adubados (F₂) ou não (F₁) e colhidas aos 30 (E₁) e 50 (E₂) dias.

A análise da variância da regressão polinomial resultou em valores de F significativo para: Linear no caso de vasos d. E₂F₁ e E₂F₂ e Quadrática para os

demais casos. As equações de regressão correspondentes são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Equação de regressão ajustada para a concentração de fósforo nas plantas de feijão entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.

	Equação
Vasos d. E ₁ F ₁	$y = -0,0108x^2 + 0,2422x + 1,7986$ **
Vasos d. E ₁ F ₂	$y = -0,0448x^2 + 0,1086x + 2,7732$ **
Vasos d. E ₂ F ₁	$y = 0,02568x + 1,2745$ **
Vasos d. E ₂ F ₂	$y = 0,0451x + 1,4965$ **

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste "F"

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste "F"

Equações válidas para $X \in [0,5; 18,0]$

A máxima concentração de fósforo teria sido obtida utilizando-se volume de terra de 11,0 L para as plantas de solo não adubado e colhidas aos 30 dias. O volume de terra de 2,0 L apresentou a máxima concentração de P nas plantas em solo adubado e colhidas aos 30 dias.

Nota-se portanto que este parâmetro (concentração de P) não é adequado para estabelecer o estado nutricional da planta.

3.1.3- Conteúdo de P total

O parâmetro mais apropriado para estudar as características de desenvolvimento das plantas quanto à absorção do fósforo é o seu conteúdo na planta, pois considera a produção de massa seca e a concentração de P total de fósforo absorvida pela cultura.

Neste parâmetro nota-se o efeito das épocas de colheita e níveis de fertilidade de fósforo para diferentes volumes de terra estudado, assim como ocorreu para a produção de massa seca que está diretamente correlacionada com

o conteúdo de P total na planta.

As plantas de solo não adubado e colhidas aos 30 dias apresentaram os menores conteúdos de P total, por também apresentarem uma menor produção de massa seca (Figura 2), embora a concentração de P tenha sido sempre maiores, conforme apresentada na figura 4.

As plantas cultivadas em solo adubado colhidas aos 50 dias tiveram efeito positivo de volume de terra até o máximo (18,0 L).

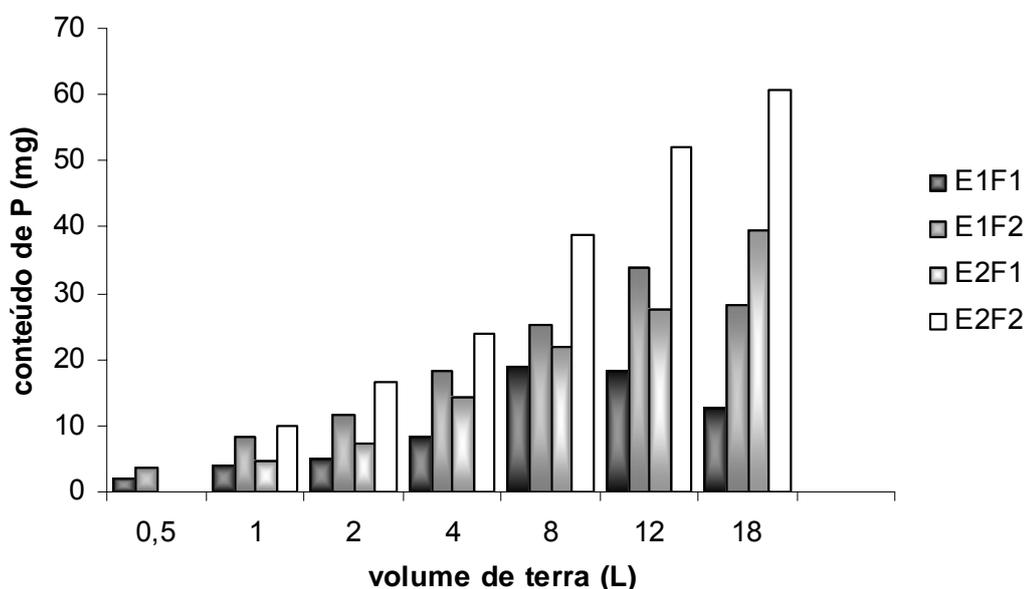


Figura 4- Efeito no volume de terra no conteúdo de P total nas plantas de feijão desenvolvidas em solos adubados (F_2) ou não (F_1) e colhidas aos 30 (E_1) e 50 (E_2) dias.

A partir da análise da variância da regressão polinomial obteve-se valores de F significativo para: Linear no caso de vasos d. E_2F_1 e Quadráticas para os demais casos. As equações de regressão correspondentes são apresentadas nas Tabela 9.

Tabela 9 - Equação de regressão ajustada para o conteúdo de P total nas plantas de feijão entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.

	Equação
Vasos d. E ₁ F ₁	$y = -0,1421x^2 + 3,2750x - 0,2509$ **
Vasos d. E ₁ F ₂	$y = -0,1498x^2 + 4,2460x + 3,0717$ **
Vasos d. E ₂ F ₁	$y = 1,9763x + 4,3086$ **
Vasos d. E ₂ F ₂	$y = -0,1206x^2 + 5,2609x + 5,3252$ **

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste "F"

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste "F"

Equações válidas para $X \in [0,5; 18,0]$

Quando as plantas foram colhidas aos 30 dias, o máximo conteúdo de P total foi obtido com 12,0 L em solo não adubado e seria obtido com 14,0 L no adubado.

O maior conteúdo de P total, tanto para plantas cultivadas em solo adubado e não adubado colhidas aos 50 dias seria obtida acima do volume de terra usados neste estudo.

3.1.4- Valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente

Observa-se na figura 5 o decréscimo do valor L com o aumento do volume de terra independentemente das plantas serem ou não cultivadas em solo adubado e colhidas aos 30 ou 50 dias.

As plantas cultivadas em volume de terra de 0,5 L apresentaram os maiores valores, provavelmente pelo seu menor desenvolvimento devido à limitação nutricional dos nutrientes e pela maior exploração do sistema radicular num menor volume de terra, que, tendo maior contato das raízes com a terra deve ter tido maiores efeitos na absorção de fósforo, por exemplo pela exsudação de ácidos orgânicos tais como que solubilizam P do solo encontrados na forma menos solúveis, superestimando a disponibilidade de P.

As plantas de feijão cultivadas em solo adubado e colhidas aos 50 dias (Figura 4) apresentaram os maiores valores por terem tido um maior período para se desenvolverem e absorverem o P disponível da terra independentes de serem ou não cultivadas em solo adubado, pois a quantidade de P fornecido na adubação foi igual para todos os volumes de terra, mantendo a mesma concentração de P por volume de terra.

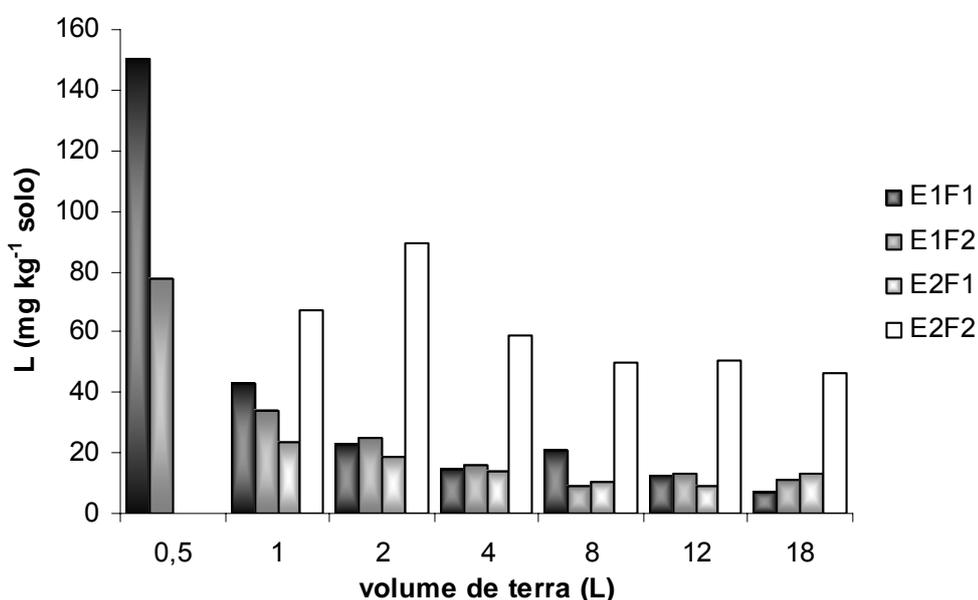


Figura 5- Efeito do volume de terra no valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L nas plantas de feijão desenvolvidas em solos adubados (F₂) ou não (F₁) e colhidas aos 30 (E₁) e 50 (E₂) dias.

O melhor volume de terra a ser utilizado para o parâmetro valor L é aquele que pela regressão quadrática equivale ao ponto de mínimo, ou seja, o volume de terra a partir do qual não tem efeito no valor L.

Realizada a análise da variância da regressão polinomial obteve-se valores de F significativo: Quadrática para os vasos d. E₂F₁ e os demais casos não tiveram valores de F significativo, não apresentando as equações de regressão.

As equações de regressão correspondentes são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10- Equação de regressão ajustada para o valor L calculado sem descontando o P proveniente das sementes das plantas de feijão entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.

	Equação
Vasos d. E ₁ F ₁	-----
Vasos d. E ₁ F ₂	-----
Vasos d. E ₂ F ₁	$y = 0,1166x^2 - 2,7723x + 25,0796$ *
Vasos d. E ₂ F ₂	-----

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste "F"

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste "F"

Equações válidas para X ∈ [0,5; 18,0]

As plantas de feijão de solo não adubado colhidas aos 50 dias foram as únicas que apresentaram valores de F significativos para a regressão quadrática, resultando no volume de 12,0 L de terra o mais adequado para este parâmetro.

Os resultados do teste de Tukey para valor L calculado sem descontar o P proveniente das sementes das plantas de feijão estão apresentados na tabela 11.

Tabela 11- Efeito do volume de terra no valor L calculado sem descontar o P proveniente das sementes das plantas de feijão dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.

volume de terra (L)	Valor L (mg kg ⁻¹ terra)							
	E ₁ F ₁		E ₁ F ₂		E ₂ F ₁		E ₂ F ₂	
0,5	150,15	a	77,57	a				
1,0	43,17	b	34,16	b	23,35	a	67,44	b
2,0	22,60	c	24,81	bc	20,06	a	89,55	a
4,0	14,32	cd	16,04	cd	14,26	a	58,69	bc
8,0	20,44	cd	9,32	cd	10,27	a	50,04	c
12,0	12,43	cd	13,36	cd	9,72	a	50,79	c
18,0	6,95	d	9,72	cd	12,63	a	46,42	c

As médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

(E1: 30 dias; E2: 50 dias; F1: sem adubar; F2: adubado)

Obteve-se um patamar constante, no qual as médias para o valor L (sem

descontar o P proveniente da semente) obtidas com plantas de feijão em solo não adubado colhidas aos 30 dias não se diferenciaram estatisticamente entre os volumes de terra de 2,0L e 12,0 L. Portanto, como para experimentos em casa-de-vegetação com material radioativo necessita-se otimizar o volume de terra e quantidade de radioisótopo a ser utilizado, o volume de terra de 2,0L torna-se o mais adequado para estas finalidades.

Para as plantas de solo não adubado colhidas aos 30 dias observa-se na tabela 11 que a partir do volume de 2,0L as médias para o valor L não se diferenciaram, concluindo-se que os vasos com volume de 2,0L de terra são os mais indicados para estudos de valor L calculado sem descontar o P proveniente das sementes.

Os resultados no solo não adubado colhidas aos 50 dias apresentaram significativa a regressão polinomial na forma quadrática, sendo o ponto mínimo no tratamento correspondente a 12,0 L. Porém em estudos com radioisótopos em semelhante volume de terra torna-se inviável devido aos cuidados quanto à proteção radiológica e também pelo maior custo do elemento marcado. Optou-se em avaliar este parâmetro também pelo teste de Tukey (Tabela 11), não havendo diferença significativa entre os volumes. Para o valor L recomenda-se o menor volume de terra possível a ser utilizado, que no caso seria o de volume de 1,0L, mas como, as plantas neste volume de terra tiveram o desenvolvimento vegetativo afetado (Figura 2) e menores conteúdos de P total (Figura 4), seria mais sensato a escolha do volume de terra de 2,0 L.

Na tabela 11 observa-se que as plantas em solo adubado e colhidas aos 50 dias não apresentaram diferenças entre as médias a partir do volume de terra de 4,0 L.

3.1.5- Valor L calculado descontando o P proveniente da semente

a) Conteúdo de P proveniente da semente

A fração do fósforo da semente de feijão (1,28 mg de P) que migrou para a planta corresponde a 60% do total de fósforo da semente. A partir da determinação do P proveniente da semente calculou-se os valores de L.

b) Valor L

Observa-se na figura 6 o efeito do volume de terra no valor L calculado descontando-se o P proveniente da semente em solo com ou sem adubação e colhidas aos 30 ou 50 dias.

As plantas de solo adubado e colhidas aos 50 dias apresentaram os maiores valores para os valores L com maior período de dias para seu desenvolvimento e absorver mais fósforo disponível na terra (Figura 6).

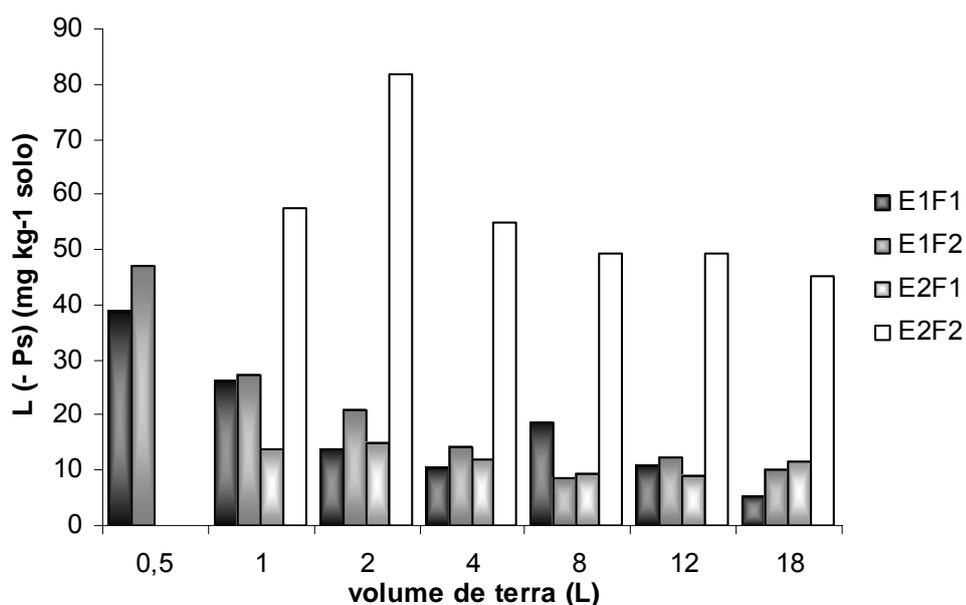


Figura 6- Efeito do volume de terra no valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) nas plantas de feijão desenvolvidas em solos adubados (F₂) ou não (F₁) e colhidas aos 30 (E₁) e 50 (E₂) dias.

Foi realizada a análise da variância da regressão polinomial obtendo-se valores de F não significativos para a determinação do valor L calculado descontando o fósforo proveniente das sementes de milho entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis: épocas de colheita e níveis de fertilidade.

Os resultados do teste de Tukey para valor L calculado descontando o P proveniente das sementes das plantas de feijão estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12- Efeito do volume de terra no valor L calculado descontando o P proveniente das sementes das plantas de feijão dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.

volume de terra (L)	Valor L (- Ps) (mg kg ⁻¹ terra)							
	E ₁ F ₁		E ₁ F ₂		E ₂ F ₁		E ₂ F ₂	
0,5	38,85	a	47,06	a				
1,0	26,08	b	27,25	b	13,93	a	57,39	b
2,0	13,84	cd	20,96	bc	14,82	a	81,83	a
4,0	10,62	cd	14,20	bc	12,03	a	54,96	b
8,0	18,82	c	8,53	c	9,33	a	49,29	b
12,0	10,83	cd	12,47	bc	8,80	a	49,29	b
18,0	5,22	d	8,87	c	11,64	a	45,20	b

As médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.
(E1: 30 dias; E2: 50 dias; F1: sem adubar; F2: adubado)

Nas plantas de feijão cultivadas em solo não adubado e colhidas aos 30 dias observa-se que as médias do valor L calculado descontando o P proveniente da semente não diferenciaram a partir do volume de terra de 2,0 L, resultando assim na escolha do volume de 2,0 L de terra para estudos do valor L nessas condições.

Para as plantas de solo adubado colhidas aos 30 dias observa-se que o valor L se mantém constante a partir do volume de terra de 1,0 L, porém pelos mesmos motivos discutidos no item 3.1.4, considera-se também o volume de terra de 2,0 L o mais adequado para estudos do valor L calculado descontando o P proveniente das

sementes.

As plantas em solo não adubado colhidas aos 50 dias (E_2F_1) não apresentaram diferenças significativas pelo teste de Tukey. Nesse caso, considerou-se o volume de 2,0 L como adequado, uma vez que os volumes inferiores apresentaram claramente que tiveram o desenvolvimento prejudicado.

No caso das plantas colhidas aos 50 dias em solo adubado, nota-se um aumento do valor L no volume de terra de 2,0 L, único valor diferente significativamente em relação aos demais, que não são diferentes entre si. Este comportamento é anormal e inexplicável. Considera-se, então mais conveniente optar-se pelo volume de 4,0 L como o mais adequado para essas plantas colhidas aos 50 dias cultivadas em solo adubado.

3.1.6- Efeito do P na planta proveniente da semente na determinação do valor L

Na figura 7 observa-se o efeito do P proveniente da semente na determinação do valor L. Para as plantas de feijão de solo não adubado colhidas aos 30 dias cultivadas em volume de terra de 0,5 L apresentaram as maiores diferenças entre os valores L sem considerar o P proveniente da semente e aqueles calculados descontando o P na planta proveniente da semente nos respectivos volumes de terra. Essas diferenças são visíveis até o volume de terra de 4,0 L, não se notando a partir de 8,0 L. Isso se deve ao maior desenvolvimento das plantas e vasos com maiores quantidades de terra e conseqüentemente maior quantidade de P absorvido da terra em relação ao P proveniente da semente. O P da semente, portanto não têm efeito na determinação do valor L para volumes de terra não adubada superiores a 8,0 L para condições de plantas de feijão colhidas aos 30 dias.

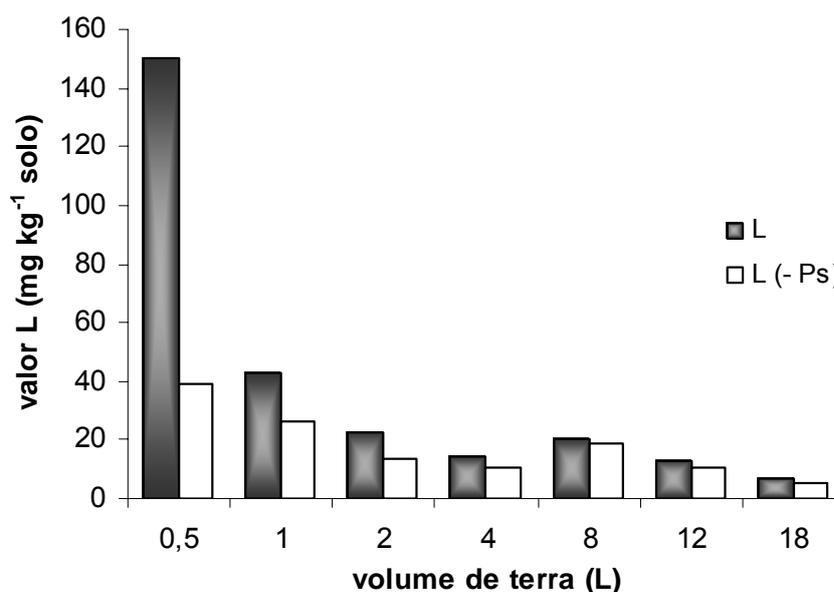


Figura 7- Comparação de valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) para as plantas de feijão cultivadas em solo não adubado e colhidas aos 30 dias (E₁F₁).

As plantas cultivadas em solo adubado e colhidas aos 30 dias apresentaram maior diferença entre os valores L calculado sem descontar o P proveniente da semente e respectivos valores L calculados descontando o P da semente nos volumes de terra de 0,5 L, mantendo essa diferença (embora não na mesma proporção) até o volume de terra de 2,0 L. A partir do volume de 4,0 L de terra esses parâmetros praticamente não apresentam diferenças entre si, concluindo então que o P da semente não tem efeito no valor L em solo adubado com volume superiores a 4,0 L determinado com plantas de feijão colhidas aos 30 dias (Figura 8).

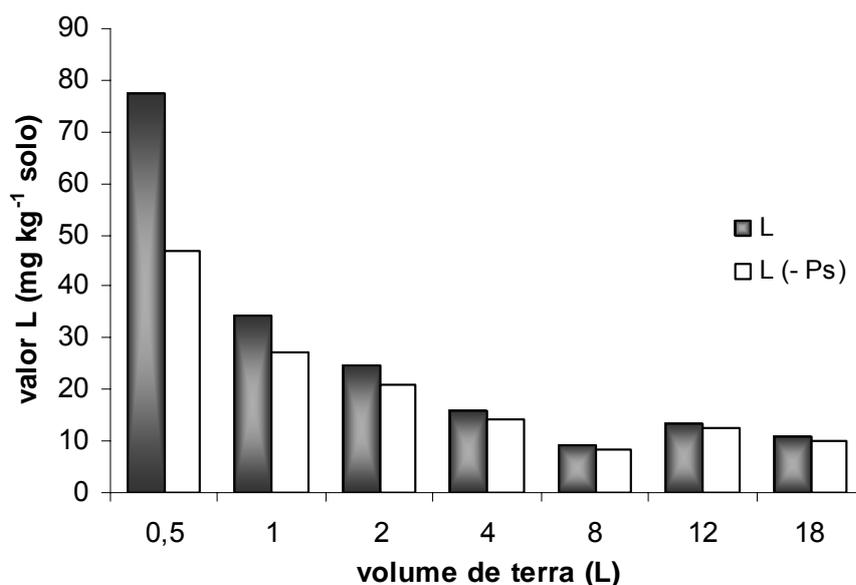


Figura 8- Comparação de valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) para plantas de feijão cultivadas em solo adubado colhidas aos 30 dias (E₁F₂).

As plantas cultivadas em solo não adubado e colhidas aos 50 dias o P da semente afetou o valor L até o volume de terra 2,0 L, a partir do volume de 4,0 L praticamente não mais se mostrou esse efeito (Figura 9).

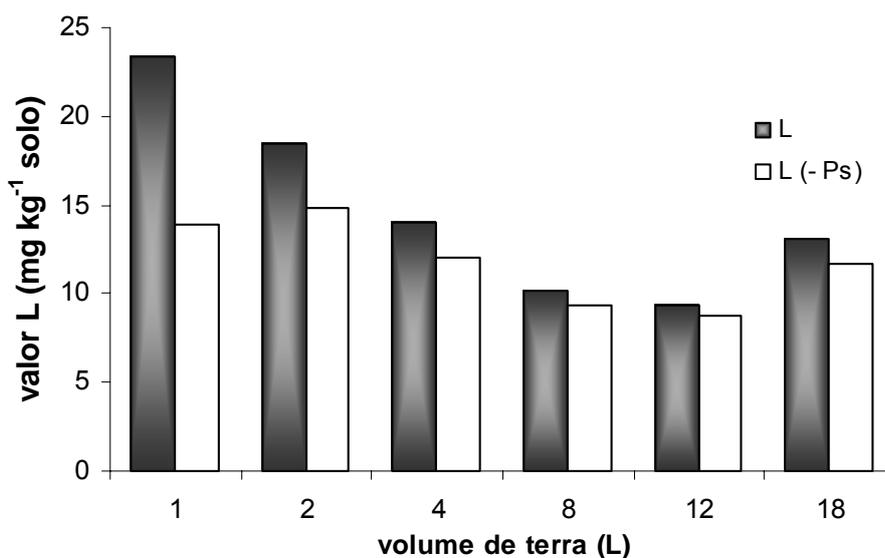


Figura 9- Comparação de valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) para plantas de feijão cultivada em solo não adubado e colhidas aos 50 dias (E₂F₁).

Em solo adubado e com plantas de feijão colhidas aos 50 dias nota-se (Figura 10) um pequeno efeito do conteúdo de P proveniente da semente no valor L. Essa diferença entre os valores é observada até o volume de terra de 4,0 L e pode se considerar que a partir do volume de 4,0 L de terra o efeito do P da semente praticamente não tem efeito no valor L.

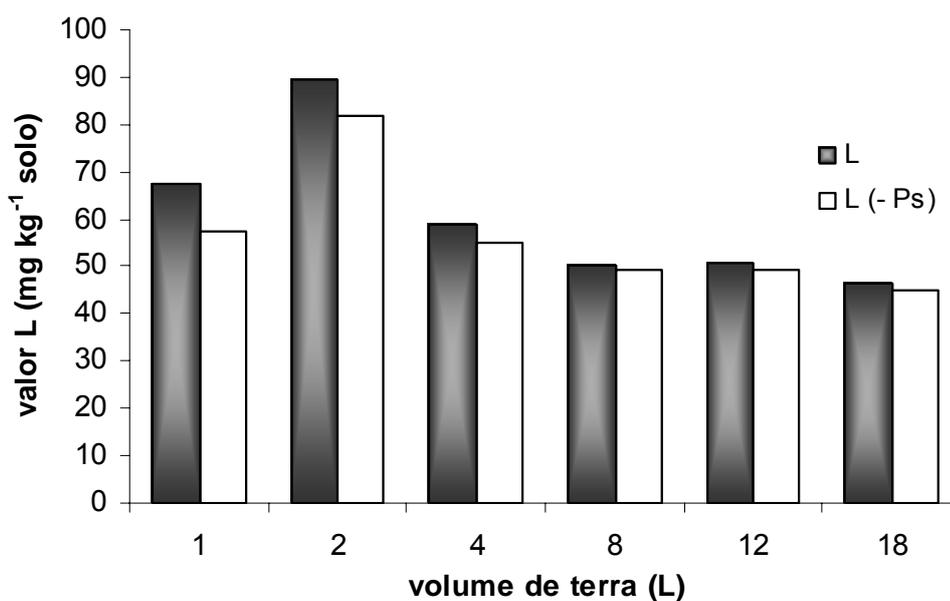


Figura 10- Comparação do valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) para plantas de feijão cultivadas em solo adubado e colhidas aos 50 dias (E₂F₂).

De maneira geral o conteúdo de P total proveniente da semente influenciou até 4,0 L de terra concordando com Braum e Helmke (1995), que afirmou que a contribuição de P da semente é pequena em relação ao valor do P isotopicamente trocável, exceto para o volume de terra de 0,5 L para as plantas de feijão não adubadas colhidas aos 30 dias.

Portanto, embora quando comparados isoladamente os dados do valor L sem descontar o P proveniente da semente ou calculado considerando o P da semente tenham dado 2,0 L o volume de terra a partir do qual não tenha efeito no valor L,

tendo observado que até 4,0 L a diferença desse efeito é considerável, recomenda-se usar o volume de 4,0 L de terra para a determinação do valor, dispensando assim a preocupação da contribuição do P proveniente da semente.

3.2- Cultura do Milho

A tabela 13 são apresentadas as análises de variância, com os quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para produção de massa seca, concentração de P e conteúdo de P total. Na tabela 14 são apresentados a análise de variância, com os quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para o valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) das plantas de milho.

Observa-se nessas tabelas que as causas de variação apresentaram efeito significativo para os parâmetros estudados.

Tabela 13 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do milho, produzidos em diferentes volumes de terra.

Causas de variação	G.L.	Massa seca (g)	Concentração P (g kg ⁻¹)	Conteúdo P total (mg)
Vaso	6	459,6160 **	1,4617 **	2093,3574 **
Fertilidade	1	454,3980 **	2,4961 **	2860,3170 **
Vaso x Fertilidade	6	15,3808 **	0,0390 *	105,4543 **
Época	1	2983,6952 **	20,7607 **	2264,3973 **
Vaso x Época	6	145,2544 **	0,0894 **	295,9415 **
Fertilidade x Época	1	93,1357 **	0,1409 *	185,0904 **
Vaso x Fertilidade x Época	6	9,3869 **	0,1072 **	23,1249 *
Resíduo	56	2,3711	0,0268	7,2494
C.V.		12,44	9,18	12,87

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste "F"

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste "F"

Tabela 14 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do milho, produzidos em diferentes volumes de terra.

Causas de variação	G.L.	L (mg kg ⁻¹ terra)	L (- Ps) (mg kg ⁻¹ terra)
Vaso	6	5585,4592 **	1914,9404 **
Fertilidade	1	57404,7374 **	55974,6667 **
Vaso x Fertilidade	6	1136,9884 **	1203,5098 **
Época	1	1039,8266 **	223,1714 *
Vaso x Época	6	522,9530 **	310,5076 **
Fertilidade x Época	1	248,1479	231,6005 *
Vaso x Fertilidade x Época	6	296,5085 *	291,1964 **
Resíduo	55	63,3281	48,6808
C.V.		16,57	17,27

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste "F"

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste "F"

Conforme os resultados obtidos (Tabelas 13 e 14) verificou-se que houve significância para interação tripla para o milho nos casos das variáveis: produção de massa seca, concentração de P, conteúdo de P total, valor L calculado sem descontar o P proveniente na semente (L) e valor L calculado descontando o P proveniente da semente (L (- Ps)).

A partir desses resultados realizou-se o desdobramento da somatória dos quadrados (Tabela 15) visando ao estudo de volume de terra dentro de cada uma das 4 combinações entre época e fertilidade. As regressões polinomiais foram obtidas conforme descritas para as plantas de feijão (Item 3.1).

Tabela 15 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do milho desdobrando a somatória dos quadrados visando ao estudo de volume de terra dentro de cada uma das 4 combinações entre época e fertilidade, produzidos em diferentes volumes de terra.

Causas de Variação	G.L.	Massa seca (g)	Concentração P (g kg ⁻¹)	Conteúdo P Total (mg)
Vasos d. E ₁ F ₁	6	24,69 **	0,61 **	157,44 **
Vasos d. E ₁ F ₂	6	26,97 **	0,48 **	311,84 **
Vasos d. E ₂ F ₁	6	211,09 **	0,33 **	597,41 **
Vasos d. E ₂ F ₂	6	366,88 **	0,28 **	1451,19 **
Fertilidade (F)	1	454,40 **	2,50 **	2860,32 **
Época (E)	1	2983,70 **	20,76 **	2264,40 **
Interação F x E	1	93,14 **	0,14 **	185,09 **
Resíduo	56	2,37	0,03	7,25
C.V.		12,43	9,18	12,88

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste “F”

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste “F”

Tabela 16 – Quadrados médios e coeficientes de variação obtidos para diversos parâmetros do milho desdobrando a somatória dos quadrados visando ao estudo de volume de terra dentro de cada uma das 4 combinações entre época e fertilidade, produzidos em diferentes volumes de terra.

Causas de Variação	G.L.	L (mg kg ⁻¹ terra)	L (- Ps) (mg kg ⁻¹ terra)
Vasos d. E ₁ F ₁	6	601,80 **	62,57 **
Vasos d. E ₁ F ₂	6	4487,87 **	2388,60 **
Vasos d. E ₂ F ₁	6	498,52 **	90,56 **
Vasos d. E ₂ F ₂	6	2104,95 **	1270,03 **
Fertilidade (F)	1	56629,29 **	55185,06 **
Época (E)	1	1003,74 **	212,81 **
Interação F x E	1	247,44 **	230,65 **
Resíduo	56	63,33	48,68
C.V.		16,57	17,27

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste “F”

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste “F”

3.2.1- Produção de massa seca

Observa-se na figura 11 o aumento da produção de massa seca com o aumento do volume de terra independente das plantas serem ou não cultivadas em solo adubado e colhidas aos 30 ou 50 dias.

O volume de terra de 0,5 L, independente da época de colheita e do nível de fertilidade, apresentou a menor produção de massa seca da parte aérea das plantas de milho por apresentar limitado espaço físico para o desenvolvimento e exploração do sistema radicular, como aconteceu com plantas de feijão. As plantas em vasos com 1,0 L tiveram também limitações no desenvolvimento e sintomas de deficiência de P.

A menor produção de massa seca foi obtida em plantas de milho colhidas aos 30 dias independente do nível de fertilidade em relação as colhidas aos 50 dias, devido aos 20 dias adicionais no desenvolvimento vegetativo, produzindo assim uma maior quantidade de massa seca.

As plantas de milho em solo não adubado colhidas aos 50 dias e de solo adubado colhidas aos 30 dias apresentaram a mesma produção de massa seca quando cultivadas em volume de terra de 0,5 L. O mesmo efeito foi verificado no volume de terra de 8,0 L em plantas de solo não adubado colhidas aos 30 e 50 dias.

O aumento no peso da planta em solo adubado foi crescente até no volume máximo de terra utilizado (18,0 L), indicando que para não ter limitação de volume de terra para o bom desenvolvimento da planta de milho, seria necessário vaso ainda maior.

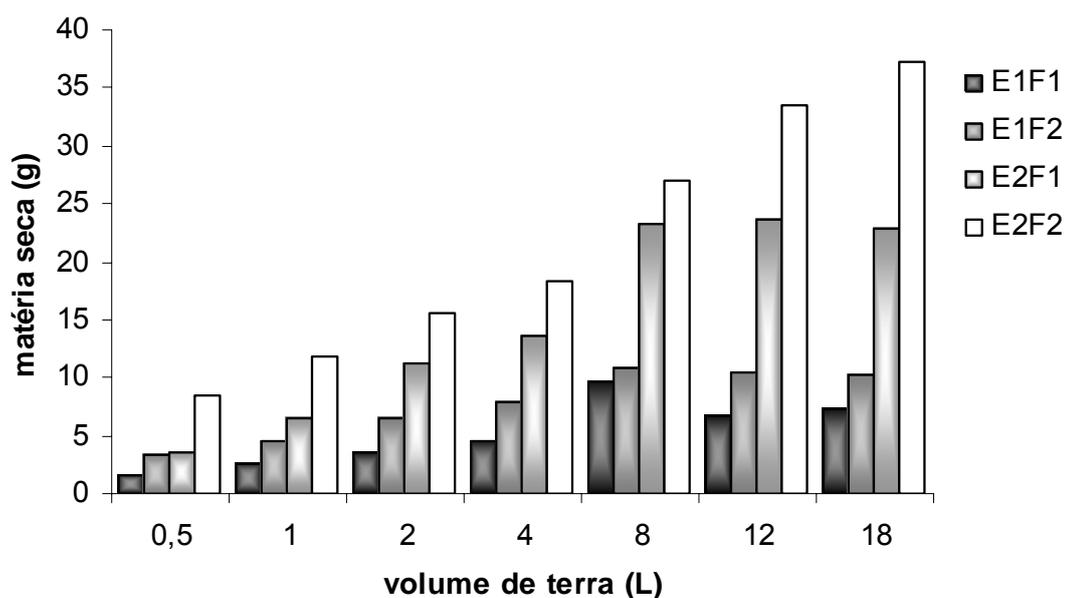


Figura 11- Efeito do volume de terra no rendimento de massa seca nas plantas de milho desenvolvidas em solos adubados (F₂) ou não (F₁) e colhidas aos 30 (E₂) e 50 (E₁) dias.

A análise da variância da regressão polinomial deu valores de F significativo para: Linear no caso de vasos d. E₁F₁ e Quadrática para os demais casos. As equações de regressão correspondentes são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Equação de regressão ajustada para a produção de massa seca para plantas de milho entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.

	Equação
Vasos d. E ₁ F ₁	$y = 0,3216x + 3,0580$ *
Vasos d. E ₁ F ₂	$y = -0,0479x^2 + 1,2382x + 3,4747$ **
Vasos d. E ₂ F ₁	$y = -0,1182x^2 + 3,1349x + 4,2083$ **
Vasos d. E ₂ F ₂	$y = -0,0679x^2 + 2,7906x + 9,2578$ **

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste "F"

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste "F"

Equações válidas para X ∈ [0,5; 18,0]

A variação de volume de terra estudada (0,5 a 18,0 L) não foi suficiente para determinar qual o volume de terra que condicionaria a maior produção de massa seca para as plantas cultivadas em solo não adubado colhidas aos 30 dias.

Nota-se, porém na figura 11 que o aumento ocorreu até 8,0 L, não tendo efeito para volumes maiores.

As plantas de milho com solo adubado quando colhidas aos 30 dias apresentariam a maior produção de massa seca utilizando-se vasos com volume de terra de 13,0 L. Para as plantas em solo não adubado colhidas aos 50 dias o volume de 13,0 L de terra apresentaria também a maior produção de matéria seca.

Para as plantas cultivada em solo adubado e colhidas aos 50 dias o valor de F foi significativo para a regressão quadrática, porém dando o valor máximo além de 18,0 L.

3.2.2- Concentração de P

Na figura 12 são apresentados os resultados da concentração de P nas plantas de milho em função do volume de terra, com e sem adubação e colhidas aos 30 ou 50 dias.

As plantas colhidas aos 30 dias independentes do nível de fertilidade do solo usado apresentam maior concentração de P em relação as colhidas aos 50 dias de solo adubado ou não, como ocorreu com o feijão no presente experimento.

Andrade; Haag e Oliveira (1975) já haviam observado esse fato, quando analisou plantas de 5 cultivares de milho a partir de 20 dias de idade, a cada 20 dias.

As plantas cultivadas em solo adubado e colhidas aos 30 dias e aos 50 dias apresentam a mesma concentração de P quando cultivadas em vaso com volume de terra de 0,5 L. Nos vasos de 18,0 L de terra, as plantas colhidas aos 50 dias apresentaram concentração de P ligeiramente superior do que as de 30 dias.

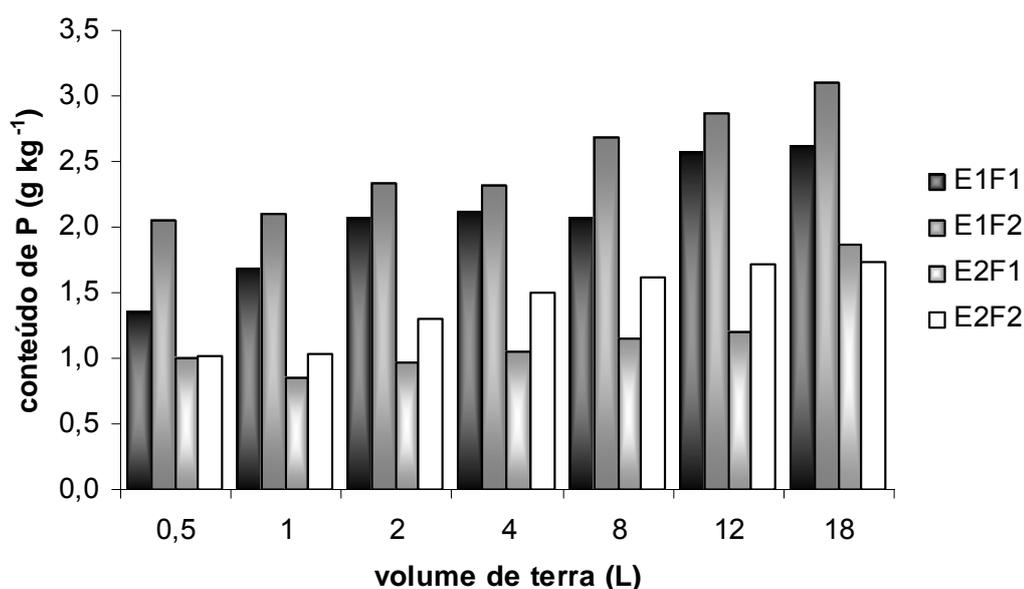


Figura 12- Efeito do volume de solo na concentração de P nas plantas de milho desenvolvidas em solos adubados (F₂) ou não (F₁) e colhidas aos 30 (E₁) ou 50 (E₂) dias.

A partir da análise da variância da regressão polinomial obteve-se valores de F significativo para: Linear no caso de vasos d. E₁F₁ e E₁F₂ e Quadráticas para os demais casos. As equações de regressão correspondentes são apresentadas nas Tabela 18.

Tabela 18 - Equação de regressão ajustada para a concentração de fósforo nas plantas de milho entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.

	Equação
Vasos d. E ₁ F ₁	$y = 0,0596x + 1,6793$ *
Vasos d. E ₁ F ₂	$y = 0,0638x + 2,0926$ **
Vasos d. E ₂ F ₁	$y = 0,0037x^2 - 0,0126x + 0,9506$ **
Vasos d. E ₂ F ₂	$y = -0,0038x^2 + 0,1068x + 1,0378$ **

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste "F"

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste "F"

Equações válidas para X ∈ [0,5; 18,0]

Em solo não adubado o volume que resultaria na maior concentração de P na planta colhida tanto aos 30 dias como 50 dias, pela equação está além do maior volume usado (18,0 L).

Em solo adubado, o volume que daria a maior concentração de P na planta aos 30 dias, pela equação, seria de 2,0 L e de 14,0 L para as plantas colhidas aos 50 dias.

Como já foi comentado anteriormente, este parâmetro não é adequado para estabelecer o melhor volume de terra a serem utilizados em experimentos em casa-de-vegetação, pois somente com a concentração de P não é possível afirmar que a planta absorveu mais ou menos fósforo, devido ao fator de diluição.

3.2.3- Conteúdo de P total

Observa-se na figura 13 o aumento do conteúdo de P nas plantas de milho com o aumento do volume da terra independente da época de colheita e níveis de fertilidade, sendo este, portanto o parâmetro mais apropriado para estudar o efeito do volume de terra no desenvolvimento das plantas relacionando com absorção do nutriente, pois considera a produção de massa seca e a concentração de P presente nas plantas.

As plantas cultivadas em volume de terra de 0,5 L apresentam os menores conteúdos de P quando comparados aos demais volumes de terra, independente da época de colheita e adubação.

Nota-se que o conteúdo de P é muito próximo para as plantas cultivadas em solo adubado colhidas aos 30 dias e não adubado colhidas aos 50 dias dentro de cada volume de terra de 8,0 e 12,0 L.

As plantas de milho de solo adubado colhidas aos 50 dias apresentam os maiores conteúdos de P total em relação as demais plantas em cada volume de terra. Todas as plantas, independentemente da época de colheita e do nível de fertilidade do solo, aumentaram o conteúdo de P com o aumento do volume de terra. Esses resultados já eram esperados uma vez que quanto mais favoráveis as condições, sejam nutricionais ou físicas, às plantas, melhor deve ser o seu desenvolvimento (Figura 13).

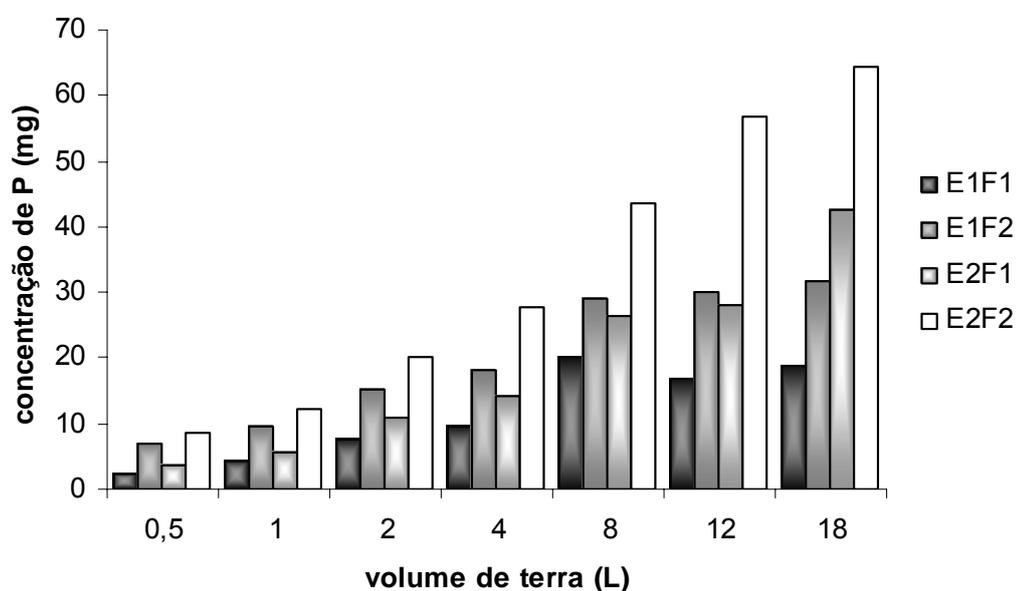


Figura 13- Efeito do volume de terra no conteúdo de P nas plantas de milho cultivadas em solo adubado (F_2) e não (F_1) adubado e colhidas aos 30 (E_1) ou (E_2) 50 dias.

Os valores de F da análise da variância da regressão polinomial foram significativos para: Linear no caso de vasos d. E_2F_1 e Quadráticas para os demais casos. As equações de regressão correspondentes são apresentadas nas Tabela 19.

Tabela 19- Equação de regressão ajustada para o conteúdo de P total nas plantas de milho entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.

	Equação
Vasos d. E ₁ F ₁	$y = -0,1001x^2 + 2,7211x + 1,5956$ **
Vasos d. E ₁ F ₂	$y = -0,1124x^2 + 3,4805x + 6,5729$ **
Vasos d. E ₂ F ₁	$y = -5,6043x + 2,14$ **
Vasos d. E ₂ F ₂	$y = -0,1457x^2 + 5,8047x + 7,4569$ **

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste "F"

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste "F"

Equações válidas para $X \in [0,5; 18,0]$

Pelas equações o volume de solo adubado de 18,0 L não foi suficiente para que as plantas colhidas aos 30 e 50 dias atingissem o máximo conteúdo de P total, o que pode ser constatar também pela figura 13.

Em solo não adubado, o maior conteúdo de P seria apresentado em volume de terra de 14,0 L quando colhidas aos 30 dias e em volume de terra de 15,0 L aos 50 dias.

3.2.4- Valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente

Na figura 14 são apresentados os resultados de valor L determinado com plantas de milho sem descontar o P proveniente da semente cultivadas em solo adubado ou não e colhidas aos 30 ou 50 dias.

Nota-se que os valores L para 0,5 L de solo adubado e não adubado com P são praticamente iguais quando as plantas foram colhidas aos 30 dias contrariando o que deveria ser. A causa provável é a limitação no desenvolvimento das plantas devido ao volume reduzido de terra.

As plantas de solo adubado e não adubado colhidas aos 50 dias cultivadas em volume de terra de 0,5 L apresentaram os maiores valores, superestimados para

este parâmetro, devido provavelmente ao exposto anteriormente para as plantas de feijão.

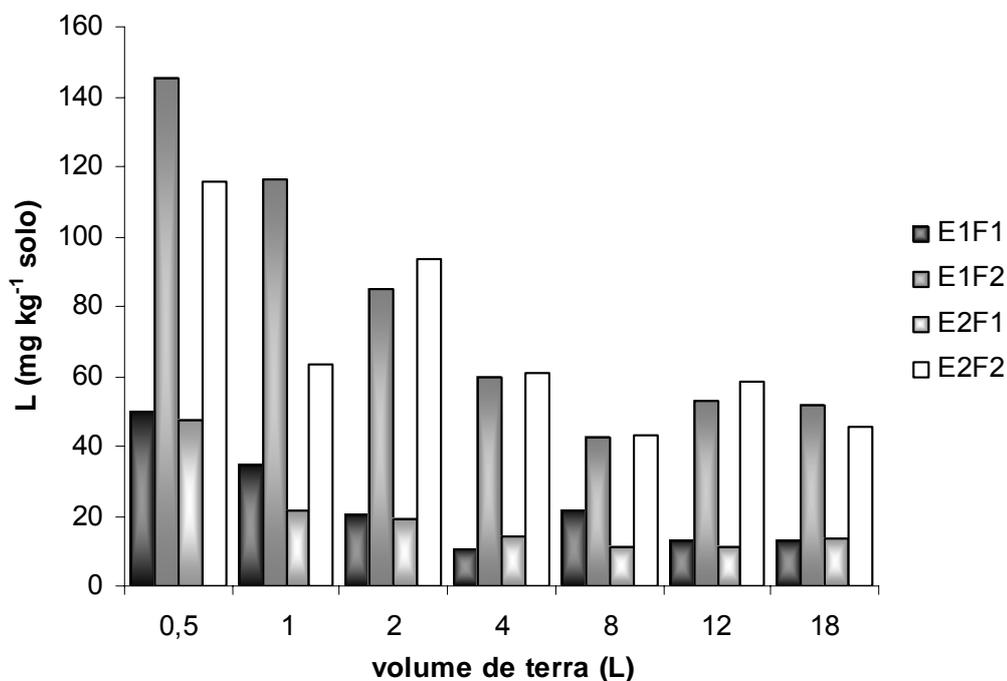


Figura 14- Efeito do volume de solo no valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L nas plantas de milho desenvolvidas em solos adubados (F₂) ou não (F₁) e colhidas aos 30 (E₁) ou 50 (E₂) dias.

Com a análise da variância da regressão polinomial obteve-se valores de F significativo para: Quadrática para os vasos d. E₁F₂ e os demais casos não tiveram valores de F significativo, não apresentando as equações de regressão. As equações de regressão correspondentes são apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 - Equação de regressão ajustada para o valor L calculado sem descontar o P proveniente das sementes das plantas de milho entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.

	Equação
Vasos d. E ₁ F ₁	-----
Vasos d. E ₁ F ₂	$y = 0,7521x^2 - 17,1321x + 132,2743$ **
Vasos d. E ₂ F ₁	-----
Vasos d. E ₂ F ₂	-----

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste "F"

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste "F"

Equações válidas para $X \in [0,5; 18,0]$

As plantas de milho cultivadas em solo não adubado colhidas aos 50 dias foram as únicas que apresentaram valores de F significativos para a regressão quadrática, resultando no volume de 12,0 L de terra o mais adequado para este parâmetro.

Tabela 21- Efeito do valor L calculado sem descontar o P proveniente das sementes das plantas de milho entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.

volume de terra (L)	Valor L (mg kg ⁻¹ terra)							
	E ₁ F ₁		E ₁ F ₂		E ₂ F ₁		E ₂ F ₂	
0,5	49,73	a	145,28	a	47,66	a	115,65	a
1,0	34,23	ab	116,42	b	21,46	b	63,26	c
2,0	20,33	bc	85,04	c	19,11	b	93,40	b
4,0	10,64	c	59,60	d	14,09	b	61,20	cd
8,0	21,36	bc	42,52	d	10,87	b	42,87	d
12,0	13,09	bc	52,88	d	10,82	b	58,33	cd
18,0	12,88	c	51,49	d	13,67	b	45,61	cd

As médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Comparando as médias dos resultados de diferentes volumes desses tratamentos (Tabela 21), observa-se que a partir do volume de terra de 1,0 L não houve diferença estatística entre as médias do valor L obtidas nos diferentes

volumes. Portanto, como para estudos com radioisótopos é sempre mais recomendável o uso de volume de terra menor pela maior dificuldade na realização de experimentos em vasos grandes (12,0 L) seria adequado o uso do volume de 2,0 L. Não se considerou o volume de 1,0 L pelos mesmos motivos já expostos anteriormente.

Em solo adubado e plantas colhidas aos 50 dias recomenda-se o volume de terra de 4,0 L, visto que a partir desse volume as médias do valor L não diferenciaram com o aumento do volume de terra.

Quando as plantas foram colhidas aos 30 dias, não houve diferença significativa de valores a partir do volume de 2,0 L para solo não adubado e 4,0 L para o adubado recomendando-se, portanto esses valores para as situações mencionadas.

3.2.5- Valor L calculado descontando o P proveniente da semente

a) Conteúdo de P proveniente da semente

A fração do fósforo da semente de milho (1,34 mg de P) que migrou para a planta corresponde a 60% do total de fósforo da semente. A partir da determinação do conteúdo de P total proveniente da semente calculou os valores de L.

b) Valor L

Na figura 5 observa-se o comportamento do valor L sem considerar o P da semente em função do aumento do volume de terra tanto em solo adubado como não adubado e colhidas aos 30 ou 50 dias.

As plantas tanto em solo não adubado como adubado e colhidas aos 30 dias

apresentam os menores valores de fósforo isotopicamente trocável quando comparadas as demais independente do volume de terra que foram cultivadas.

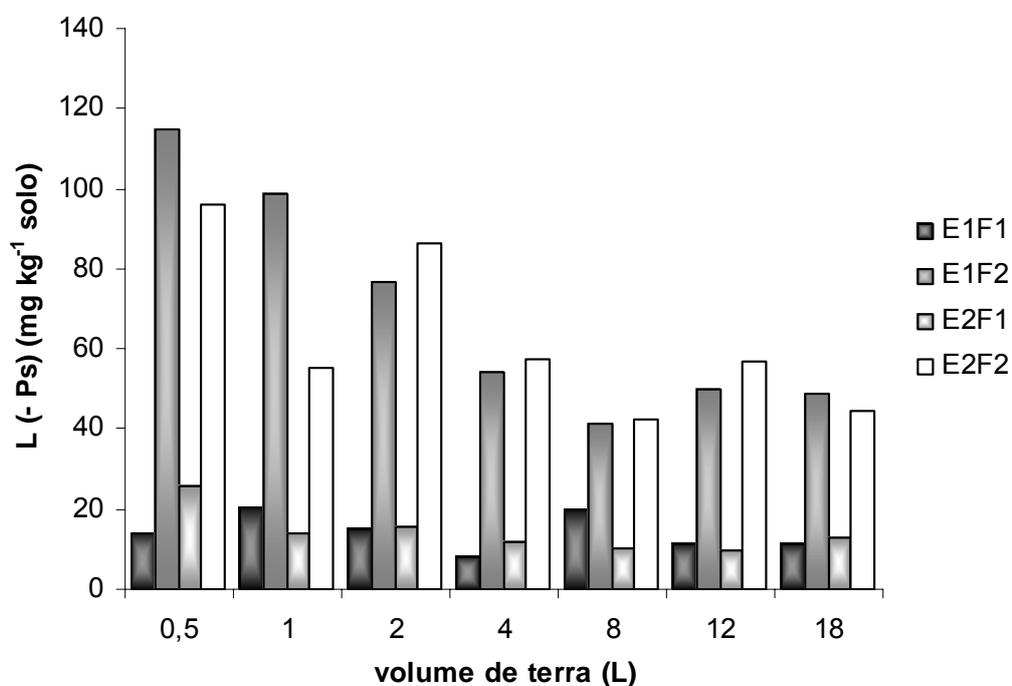


Figura 15- Efeito do volume de terra no valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) obtidas em plantas de milho cultivadas em solos adubados (F₂) ou não (F₁) e colhidas aos 30 (E₁) ou 50 (E₂) dias.

Pela análise da variância da regressão polinomial obteve-se valores de F significativo para: Quadrática para os vasos d. E₁F₂. A equação de regressão correspondente é apresentada na Tabela 22.

Tabela 22 - Equação de regressão ajustada para o valor L calculado descontando o P proveniente das sementes das plantas de milho entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.

	Equação
Vasos d. E ₁ F ₁	-----
Vasos d. E ₁ F ₂	$y = 0,5657x^2 - 12,7793x + 108,7392$ **
Vasos d. E ₂ F ₁	-----
Vasos d. E ₂ F ₂	-----

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste "F"

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste "F"

Equações válidas para $X \in [0,5; 18,0]$

O volume de terra mais adequado para determinação do fósforo isotopicamente trocável descontando o P proveniente da semente, pela equação, seria de 12,0 L para as plantas de milho em solo adubado colhidas aos 30 dias .

Tabela 23- Efeito do valor L calculado descontando o P proveniente das sementes das plantas de milho entre os diferentes volumes de terra dentro das variáveis épocas de colheita e níveis de fertilidade.

volume de terra (L)	Valor L (- Ps) (mg kg ⁻¹ terra)							
	E ₁ F ₁		E ₁ F ₂		E ₂ F ₁		E ₂ F ₂	
0,5	14,02	a	114,85	a	25,89	a	95,88	a
1,0	20,13	a	98,44	a	13,93	a	55,06	b
2,0	14,83	a	76,62	b	15,46	a	86,57	a
4,0	7,82	a	54,44	c	11,82	a	57,58	b
8,0	19,78	a	41,14	c	10,08	a	42,30	b
12,0	11,23	a	50,07	c	9,80	a	56,68	b
18,0	11,22	a	48,90	c	12,96	a	44,46	b

As médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Como se observa, porém quando as médias não diferem estatisticamente entre si a partir do volume de terra de 4,0 L (Tabela 23), a recomendação recai sobre o volume de terra de 4,0 L para determinação do valor L calculado descontando o P proveniente das sementes.

Quando as plantas de solo adubado foram colhidas aos 50 dias as médias do valor L não se diferiram entre os volumes de terra de 1,0 L com os demais, excetos os de 2,0 L. Desconsiderando-se o volume de 1,0 L de terra, conforme já justificado, recomenda-se utilizar vasos com volume de terra de 4,0 L.

Como os valores L obtidos com plantas cultivadas em solo não adubado colhidas tanto aos 30 dias (E_1F_1) como aos 50 dias (E_2F_1) diferiram entre si significativamente pelo teste de Tukey, recomenda-se o uso de volume de 2,0L, seguindo-se a mesma consideração já apresentada.

3.2.6- Efeito do fósforo proveniente da semente na determinação do valor L

Na figura 16 são apresentados os resultados do efeito do P proveniente da semente na determinação do fósforo isotopicamente trocável. As plantas de milho cultivadas em volume de solo não adubado de 0,5 L e colhidas aos 30 dias apresentaram as maiores diferenças entre os valores L calculados descontando o P proveniente da semente ou não. Nota-se, que essas diferenças ocorrerem até o volume de terra de 4,0 L, embora nos demais também, porém pequenos, concluindo-se que o P da semente não interfere na determinação do valor L para volumes de terra superiores a 8,0 L para plantas de milho cultivadas em solo não adubado e colhidas aos 30 dias.

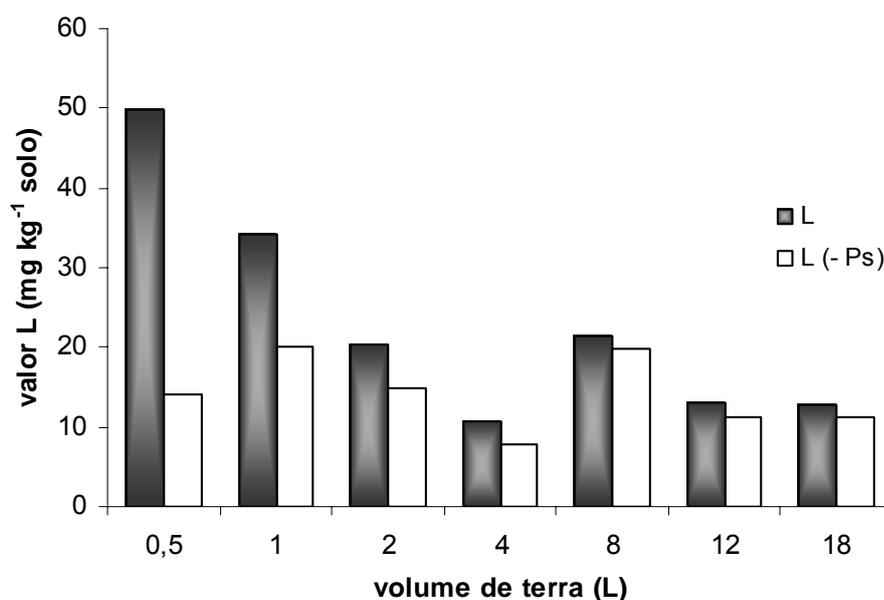


Figura 16- Comparação de valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) para as plantas de milho cultivadas em solo não adubado e colhidas aos 30 dias (E₁F₁).

Em solos adubados com plantas de milho colhidas aos 30 dias (Figura 17) as diferenças entre esses dois parâmetros são mantidas também até o volume de terra de 4,0 L. O P proveniente da semente de milho praticamente não afetou na determinação do valor L para volumes de terra superiores a 8,0 L.

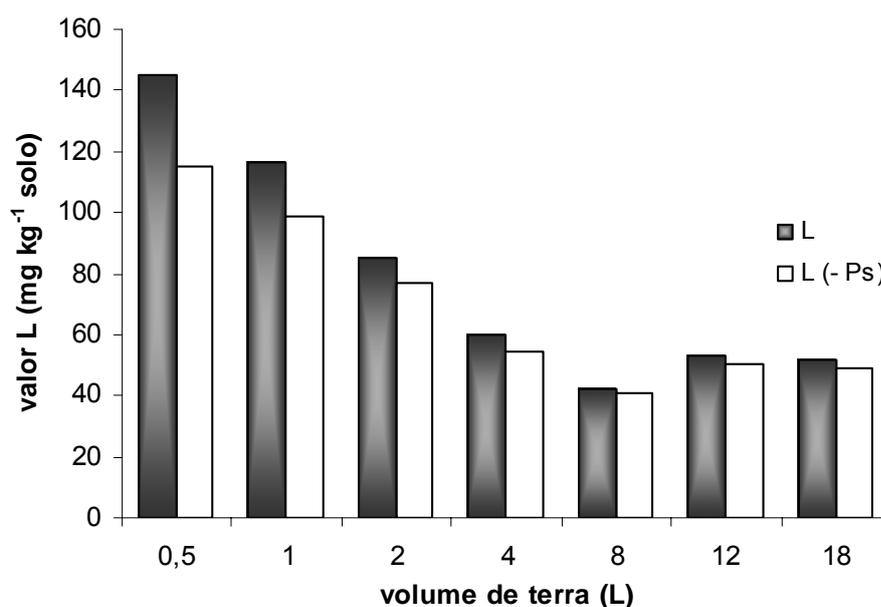


Figura 17- Comparação do valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) para as plantas de milho cultivadas em solo adubado e colhidas aos 30 dias (E_1F_2).

Na figura 18 observa-se que as plantas não adubadas colhidas aos 50 dias apresentaram maior diferença entre os valores L calculado sem descontar o P proveniente da semente e valor L calculado descontando o P proveniente da semente nos volumes de terra de 0,5 L, mantendo essa diferença (embora não na mesma proporção) até o volume de terra de 4,0 L.

As plantas cultivadas em volume de terra de 0,5 L apresentam maiores valores de fósforo isotopicamente tocáveis tanto em solo adubado como não adubado pelas razões já expostas anteriormente.

A partir do volume de 8,0 L de solo não adubado esses parâmetros não apresentam diferenças entre si, concluindo então que o conteúdo de P total da semente não interferem na determinação do valor L para volumes de terra superiores a 8,0 L para plantas de milho colhidas aos 50 dias.

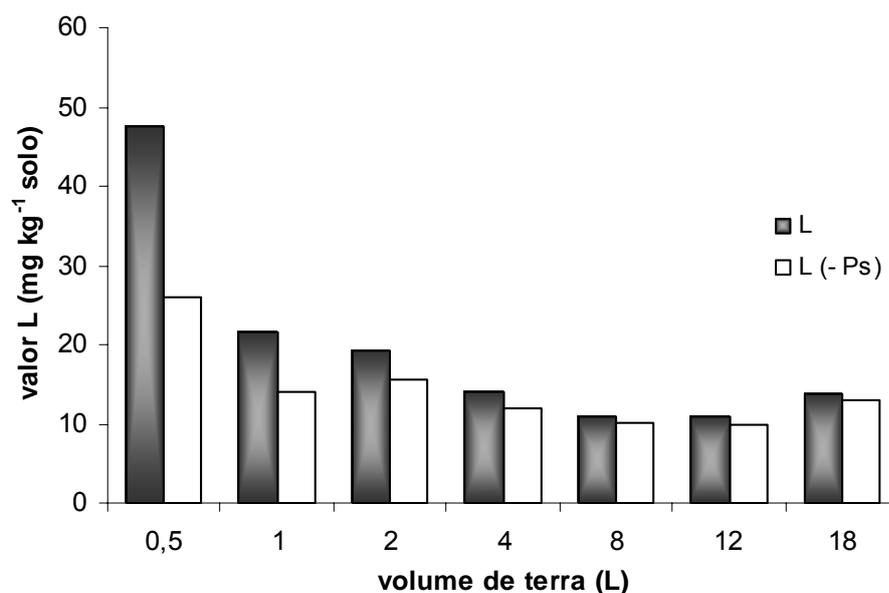


Figura 18- Comparação do valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) para as plantas de milho cultivadas em solo não adubado e colhidas aos 50 dias (E₂F₁).

Observa-se na figura 19 uma pequena diferença entre os parâmetros valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente e valores L respectivos descontando o P proveniente da semente obtidas com plantas de milho cultivadas em solo adubado colhidas aos 50 dias, até o volume de terra de 4,0 L. Plantas cultivadas em volume de terra superior a 8,0 L não apresentam o efeito da contribuição do P da semente.

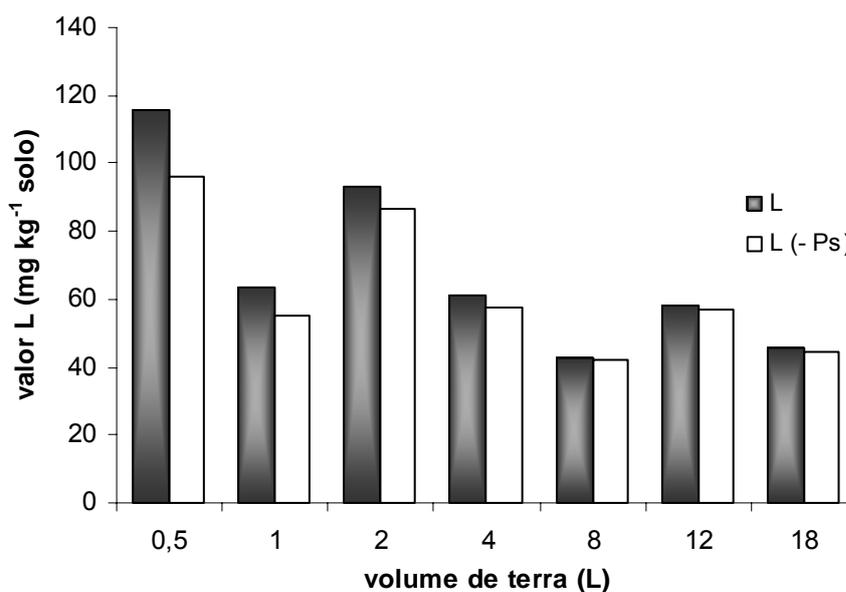


Figura 19- Comparação do valor L calculado sem descontar o P proveniente da semente – L e valor L calculado descontando o P proveniente da semente – L (- Ps) para as plantas de milho cultivadas em solo adubado e colhidas aos 50 dias (E₂F₂).

3.3 Experimento para Estudo de Raiz e Parte Aérea

3.3.1 Cultura do feijão

3.3.1.1 Efeito da adubação com fósforo

A adubação da terra com fósforo promoveu um aumento no rendimento da produção de massa seca e no conteúdo de P total na raiz e na parte aérea das plantas de feijão, independente do volume de terra.

Os vasos com volume de 18,0 L de terra apresentaram maiores ganhos em porcentagem quando os solos foram adubados, sendo 42,9% para massa seca da raiz e 55,5% na parte aérea. O conteúdo de P total apresentou para o volume de terra de 18,0 L um rendimento de 16,8% da raiz e 13,8% da parte aérea para solos adubados. Porém, volumes de terra de 8,0 L e 12,0 L apresentaram um significativo rendimento de conteúdo de P total quando as plantas de feijão foram cultivadas em

solos adubados com fósforo.

Na tabela 24 observa-se o ganho de produção de massa seca quando as plantas foram cultivadas em solos adubados, o que ocorreu de forma proporcional para a raiz e parte aérea somente nos vasos de 18,0 L de terra. Para o conteúdo de P total essa proporção foi obtida em volumes de terra de 12,0 e 18,0 L, salientando que a adubação foi satisfatória para a planta como um todo para o volume de terra de 18,0 L.

Observa-se nas figuras 20 e 21 tendência de aumento na produção de massa seca e o conteúdo de P total nas plantas de feijão cultivadas em solos adubados e não adubados. Estes resultados sugerem que plantas cultivadas num volume de terra adubada superior a 18,0 L tenham maior produção de massa seca e maiores conteúdo de P total. Não é possível afirmar, portanto, que os vasos com volume de terra de 18,0 L são suficientes para suprir as necessidades das plantas de feijão. Esses dados estão de acordo com os resultados encontrados por Baker e Woodruff (1962), que sugeriu que quanto maior volume de terra e quantidade de fósforo forem disponíveis, maior será o desenvolvimento da planta.

Tabela 24 – Efeito da adubação fosfatada no rendimento de matéria seca e no conteúdo de P total comparando-se plantas de feijão cultivadas em solos adubados e sem adubação.

Volume (L)	matéria seca		conteúdo de P total	
	----- rendimento (%) -----			
	raiz	parte aérea	raiz	parte aérea
1,0	31,5	49,3	15,1	20,1
2,0	22,9	39,2	14,2	32,1
4,0	21,9	18,6	7,9	37,1
8,0	0,0	33,8	29,3	15,4
12,0	17,7	41,5	18,9	20,7
18,0	42,9	55,5	16,8	13,8

3.3.1.2 Volume de terra

Na tabela 25 são apresentadas os valores dos rendimentos de massa seca e conteúdo de P total com o incremento de volume de terra para as plantas de feijão cultivadas em solo adubado e sem adubação. O maior rendimento de massa seca na parte aérea foi obtido quando se utilizou vasos de 8,0 L de solo adubado, que foi de 42,7%, embora o ganho de massa seca da raiz foi de apenas 15,2%.

Tabela 25 – Efeito do volume de terra no rendimento de matéria seca e conteúdo de P total para plantas de feijão cultivadas em solo adubado e sem adubação.

Volume (L)	----- solo adubado -----				----- solo sem adubação -----			
	matéria seca		conteúdo de P		matéria seca		conteúdo de P	
	----- rendimento (%) -----							
	Raiz	parte	Raiz	parte	raiz	parte	raiz	parte
1,0 – 2,0	13,4	30,7	0,0	10,0	23,0	42,3	0,0	0,0
2,0 – 4,0	23,5	2,9	0,0	25,1	24,6	27,4	5,0	19,1
4,0 – 8,0	15,2	42,7	17,9	0,0	44,1	29,5	0,0	15,5
8,0 – 12,0	37,1	18,0	0,5	6,9	9,4	7,3	13,3	0,7
12,0 – 18,0	23,8	24,7	5,6	0,0	0,0	0,8	8,0	0,0

Quando o volume de terra é superior a 4,0 L ocorreu um aumento na produção de massa seca e conteúdo de P total na raiz e parte aérea das plantas de feijão em solo adubado (Figura 20-a e 21-a). Na tabela 25 observa-se que o incremento de volume de 4,0 L para 8,0 L em solo adubado tem pouca interferência na produção de massa seca da raiz (15,2%), enquanto o incremento da parte aérea é superior (42,7%). Entretanto, observa-se que o volume de terra superior a 8,0 L não são viáveis pois o incremento na produção de massa seca e conteúdo de P total das plantas não apresentam a mesma proporção de aumento quando se aumenta o volume de terra. Maiores volumes de terra requerem maior espaço físico dentro da

casa-de-vegetação e isso nem sempre é possível.

Nas figuras 20-b e tabela 25 observa-se um nítido aumento na produção de massa seca na parte aérea das plantas sem adubação quando se aumenta o volume de terra de 4,0 L para 8,0 L, enquanto que para raiz houve um aumento discreto a partir de 8,0 L de terra. No solo sem adubação (Figura 20-b) a raiz e a parte aérea mantém um crescente aumento na massa seca até o volume de terra de 8,0 L. Porém a porcentagem de contribuição com o incremento do volume de 8,0 L para 12,0 L e de 12,0 L para 18,0 L não foi representativa, sendo assim esses volumes de terra não são indicados para cultivos de plantas de feijão em solos não adubados. Conclui-se então que a utilização de vasos com volume de 8,0 L de terra foi adequado para o desenvolvimento de plantas de feijão em solos com baixas concentrações de P.

O incremento do volume pouco interfere no conteúdo de P na parte aérea e raiz das plantas de feijão cultivadas em solo não adubado (Tabela 25). Observa-se que não houve aumento no conteúdo de P quando se cultivou plantas em vasos com volume de terra de 2,0 L em relação ao 1,0 L, concluindo que esses volumes de terra não se diferem quanto a esse parâmetro, porém não são os mais recomendados.

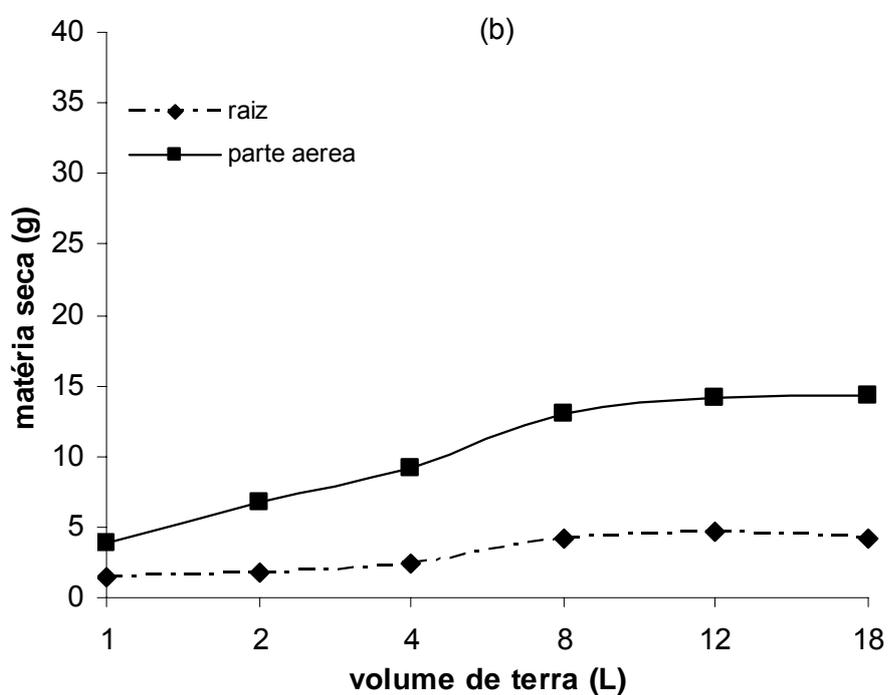
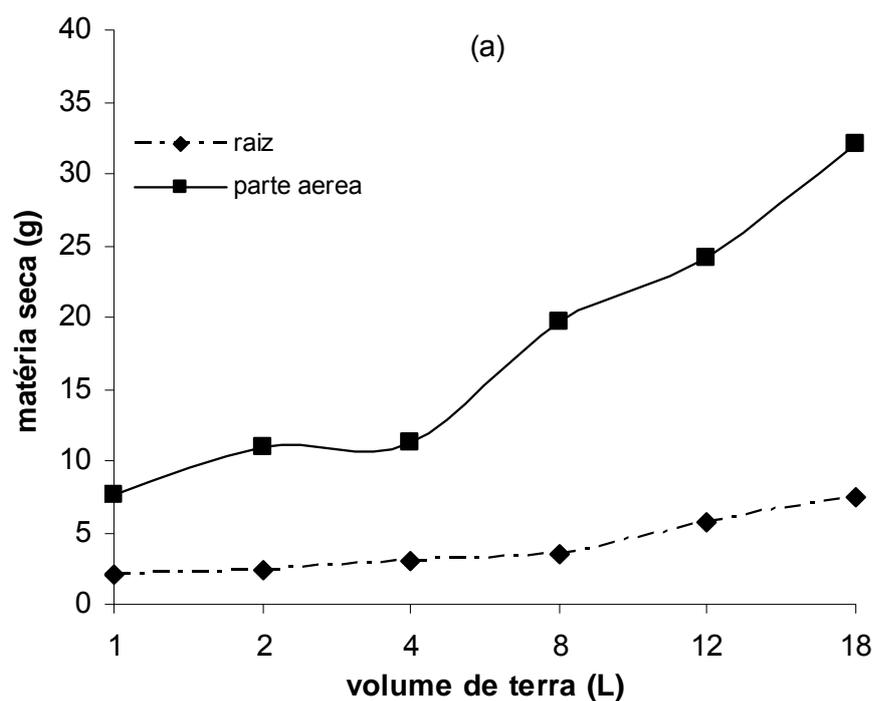


Figura 20– Efeito do volume de terra na produção de matéria seca de plantas de feijão com (a) e sem (b) adubação fosfatada

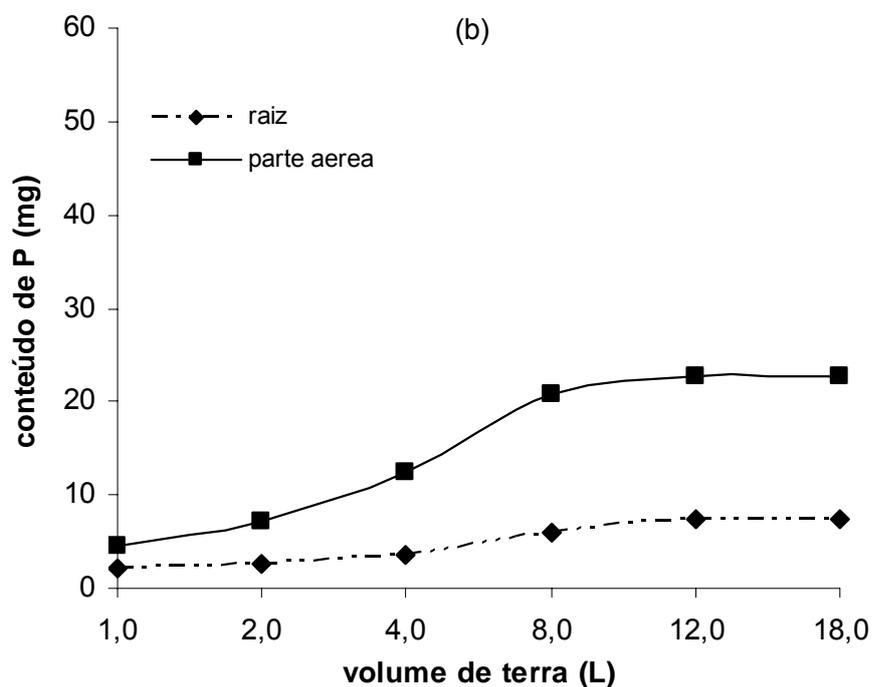
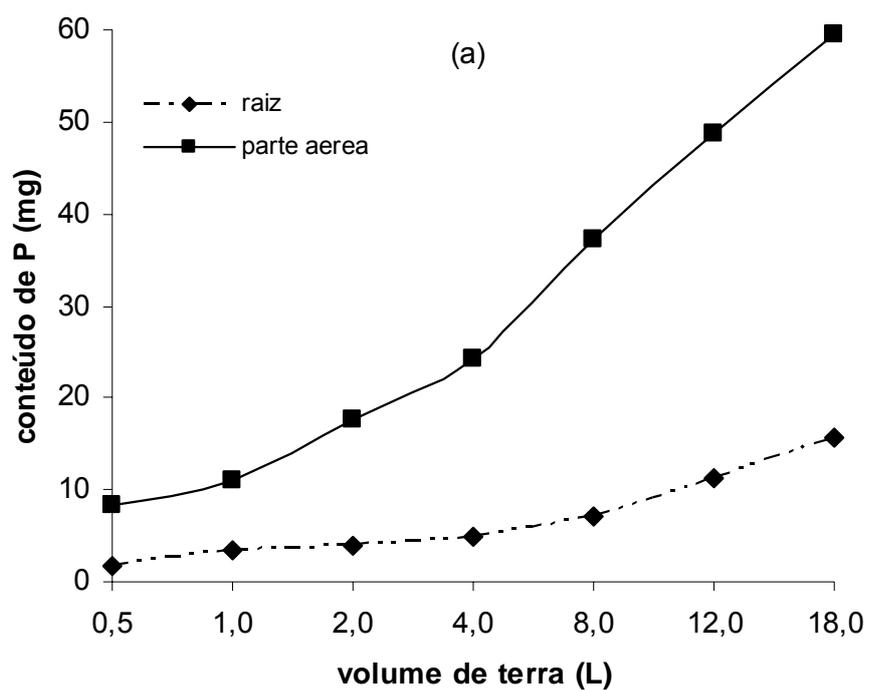


Figura 21– Efeito do volume de terra no conteúdo de P total de plantas (parte aérea e raiz) de feijão com (a) e sem (b) adubação fosfatada.

3.3.2 Cultura do milho

3.3.2.1 Efeito da adubação com fósforo

Pela tabela 26 verifica-se maior acréscimo pela adubação com P no rendimento de massa seca das plantas de milho nos vasos com 8,0 L de terra, com aumento de 59,5% na raiz e 38% na parte aérea. O conteúdo de P total nesse mesmo volume teve um aumento de 65,2% na raiz e 56,5% na parte aérea. Observa-se na figura 22 um aumento no conteúdo de P total da parte aérea em todos os volumes de terra estudados, sugerindo que vasos de 18,0 L não foram suficientes para suprir as necessidades das plantas de milho em solos não adubados.

Os vasos com volume de 1,0 L de terra apresentam ganho proporcional entre raiz e parte aérea na produção de massa seca e não apresentam ganho no conteúdo de P total. Entretanto, nos vasos com volume de 18,0 L de terra houve um decréscimo no rendimento de massa seca para raiz e parte aérea quando comparadas plantas cultivadas em solos adubados e sem adubação em relação a volume de terra de 12,0 L. (Tabela 26).

Tabela 26 - Efeito da adubação fosfatada no rendimento de matéria seca e no conteúdo de P total comparando-se plantas de milho cultivadas em solos adubados e sem adubação.

Volume (L)	matéria seca		conteúdo de P total	
	----- rendimento (%) -----			
	raiz	parte aérea	raiz	parte aérea
1,0	28,7	26,1	0,0	0,0
2,0	17,9	29,0	17,8	20,8
4,0	0,0	28,1	0,0	9,4
8,0	59,5	38,0	14,2	29,8
12,0	60,3	34,2	23,9	11,4
18,0	28,5	23,5	30,6	16,6

3.3.2.2 Volume de terra

Na tabela 27 são apresentadas o aumento do rendimento de massa seca e conteúdo de P total com o incremento de volume de terra. Observa-se que o aumento no volume de terra de 8,0 L para 12,0 L e de 12,0 para 18,0 L adubadas praticamente não representaram ganho representativo na produção de massa seca e conteúdo de P total da raiz e parte aérea das plantas de milho cultivadas em solos adubados com P.

Comparando-se vasos de 8,0 L com de 4,0 L, observa-se um ganho de 51,5% na produção de massa seca da raiz e 41,0% na parte aérea, enquanto o conteúdo de P total teve um aumento de 60,2% na raiz e 46,1% na parte aérea.

Para plantas de milho em solos não adubados o incremento de volume de terra de 8,0 L para 12,0 L não apresentou ganho significativo para produção de massa seca da raiz e parte aérea (Tabela 27). Conforme as figuras 22-b e 23-b o

volume de 8,0 L apresentou um significativo ganho de massa seca na parte aérea enquanto o maior conteúdo de P total foi encontrado nas plantas cultivadas em vasos com volume de 12,0 L. Observa-se nessas figuras que há necessidade de realizar estudo com volume de terra superior a 18,0 L para observar se o conteúdo de P total da parte aérea e da raiz continua aumentando com o incremento do volume de terra.

Tabela 27 – Efeito do volume de terra no rendimento de matéria seca e conteúdo de P total com o incremento de volume de terra para plantas de milho cultivadas em solo adubado e sem adubação.

Volume (L)	----- solo adubado -----				----- solo sem adubação -----			
	matéria seca		conteúdo deP		matéria seca		conteúdo deP	
	----- rendimento (%) -----							
	raiz	parte	raiz	parte	raiz	parte	Raiz	parte
1,0 – 2,0	0,0	31,0	3,0	25,1	8,8	28,2	0,0	0,0
2,0 – 4,0	16,9	20,6	0,0	0,9	37,6	21,5	15,3	13,3
4,0 – 8,0	51,5	41,0	18,1	8,6	0,0	31,6	1,5	0,0
8,0 – 12,0	0,0	0,0	22,9	14,7	0,0	4,6	13,1	32,5
12,0 – 18,0	0,0	5,3	26,9	11,3	22,8	18,6	19,9	5,7

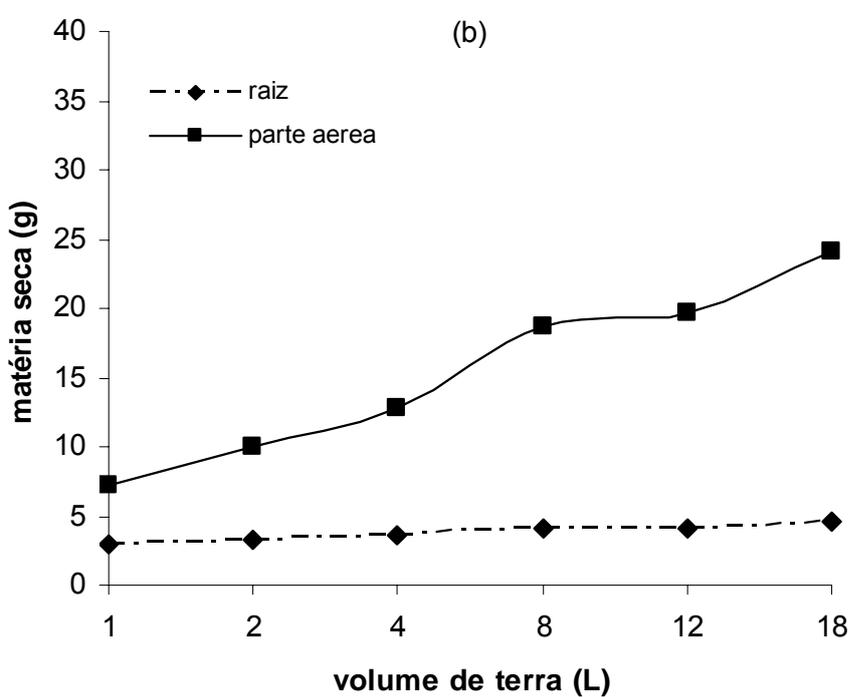
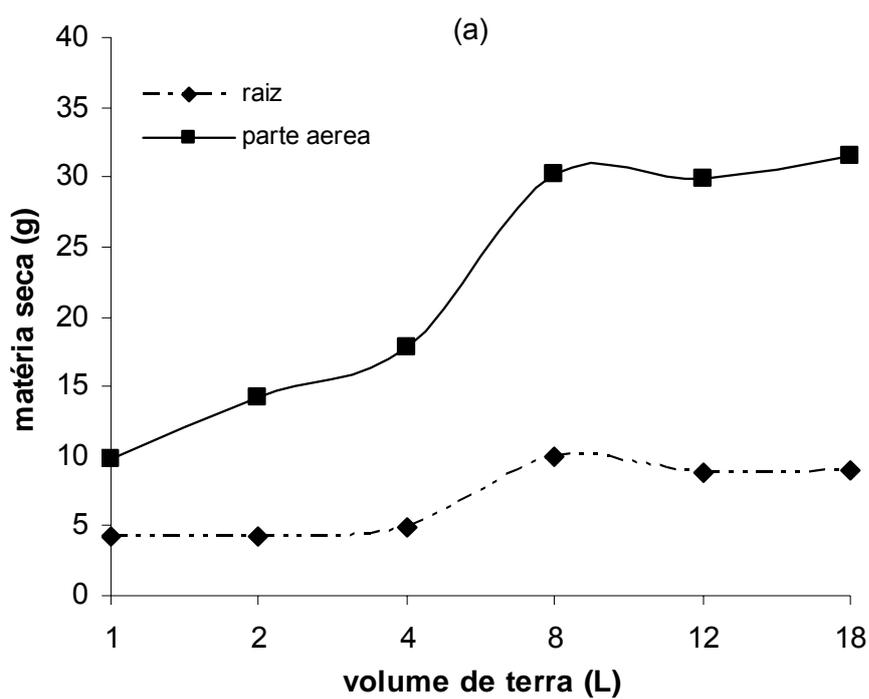


Figura 22– Efeito do volume de terra na produção de matéria seca de plantas de milho com (a) e com (b) adubação fosfatada.

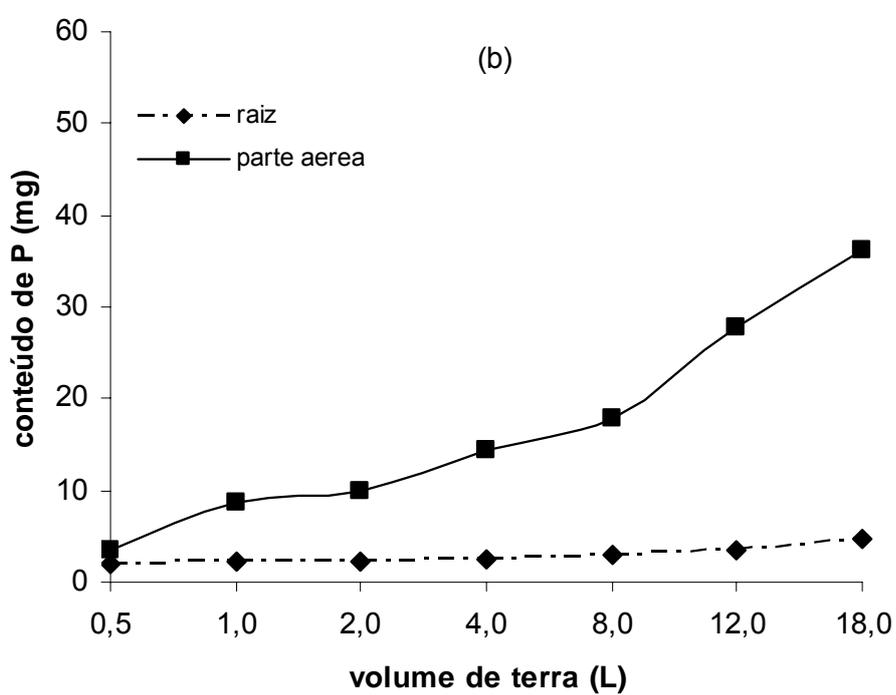
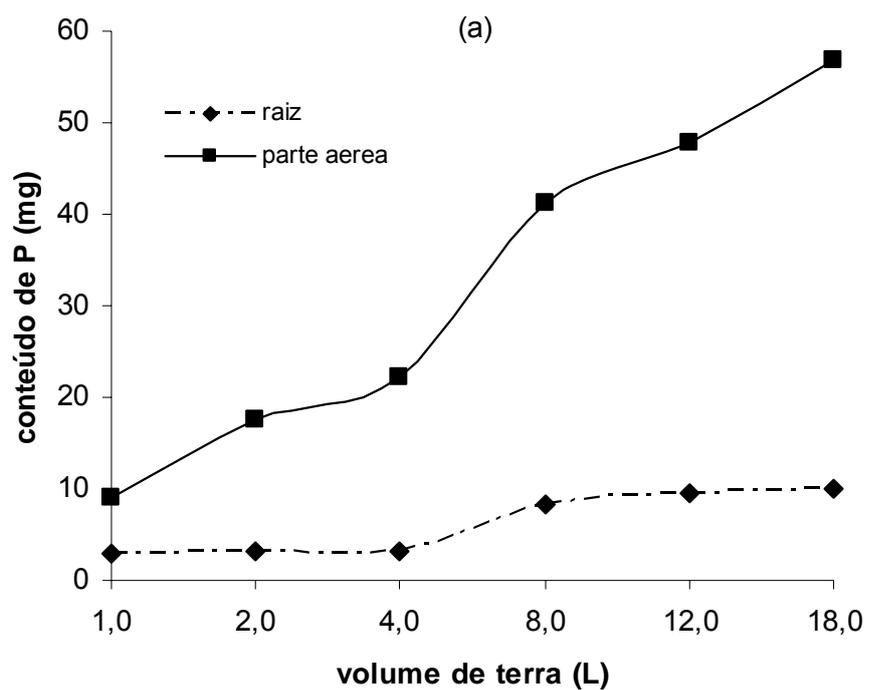


Figura 23– Efeito do volume de terra no conteúdo de P total de plantas (parte aérea e raiz) de milho com (a) e sem (b) adubação fosfatada.

3.4 Principais resultados

Volumes de terra menor que 1,0 L não são apropriados para estudos da nutrição fosfatada de feijão e milho e na avaliação do fósforo isotopicamente trocável determinando com essas culturas, independentemente da época de colheita e do nível de fertilidade do fósforo no solo.

A maior produção de matéria seca e conteúdo de P total para as plantas de feijão cultivadas em vaso não adubado foi de 12,0 L e para as cultivadas em vaso adubado foi de 14,0 L, ambas colhidas aos 30 dias. Para plantas cultivadas em solo adubado e colhida aos 50 dias o volume de terra de 18,0 L apresentou maior produção de massa seca. Para plantas cultivadas em solo adubado e não adubação colhidas aos 50 dias são necessários novos estudos considerando os parâmetros massa seca e conteúdo de P.

A máxima produção de matéria seca foi obtida em volume de terra de 13,0 L para plantas de milho cultivadas em terra adubada colhida aos 30 dias e para plantas não adubadas colhidas aos 50 dias recomenda-se volume de terra de 14,0 L. Para as plantas cultivadas em terras não adubadas colhidas aos 30 dias e as adubadas colhidas aos 50 dias o volume de terra de 18,0 L não foi suficiente para obter a máxima produção de massa seca e conteúdo de P total.

As plantas de milho cultivadas em terras não adubadas colhidas aos 30 dias apresentaram o máximo conteúdo de P quando desenvolvidas em volume de terra de 14,0 L e 16,0 L para as adubadas colhidas aos 30 dias. O volume de terra de 18,0 L não foi suficiente para que as plantas cultivadas em terras adubadas e não adubadas colhidas aos 50 dias atingissem o máximo conteúdo de P.

O volume de terra de 2,0 L proporcionou resultados satisfatórios para determinação do valor L calculado sem descontar e descontando o P proveniente

das sementes para as plantas de feijão cultivadas em terras adubadas e não adubadas colhidas aos 30 dias e não adubadas colhidas aos 50 dias. O volume de terra de 4,0 L proporcionou resultados satisfatórios para plantas cultivadas em terra adubada e colhida aos 50 dias.

Observou-se, porém, que o P na planta proveniente da semente afeta no cálculo do valor L para, de uma maneira geral, o volume de terra menor que 4,0 L para as plantas de feijão e 8,0 L para as plantas de milho.

Para determinação do valor L calculado sem descontar e descontando o P proveniente da semente, o volume de terra de 2,0 L é o mais indicado para condições de plantas cultivadas em terra não adubada colhidas aos 30 e 50 dias e em terra adubada colhida aos 30 dias. Para as plantas cultivadas em terra adubada colhida aos 50 dias recomenda-se o volume de terra de 4,0 L.

No estudo realizado para avaliar a relação raiz x parte aérea o efeito da adubação fosfatada no rendimento de matéria seca da parte aérea e da raiz ocorreu em volume de terra de 18,0 L e no volume de 12,0 L para conteúdo de P total em plantas de feijão colhidas aos 50 dias. Para as plantas de milho o melhor rendimento ocorreu em volume de terra de 8,0 e 12,0 L e o volume de 18,0 L não foi suficiente para avaliar o incremento no conteúdo de P total, concordando com Cook e Millar (1946) que as respostas das plantas a tratamentos estão relacionadas diretamente ao tamanho dos vasos.

4 CONCLUSÕES

O efeito do volume de terra nos estudos em vasos de nutrição vegetal ou de fertilidade de solo (valor L) é significativo para planta de feijão e milho, mesmo o volume de 18,0 L de terra pode não ser satisfatório em determinadas circunstâncias (nível de fertilidade do solo e estágio de desenvolvimento da planta).

O P na planta proveniente da semente tem efeito significativo na determinação do valor L quando as plantas são cultivadas em vasos com volume de terra menor que 4,0 L para as plantas de feijão e 8,0 L para as de milho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, E. C. de; FERNANDES, B.; NOVAES, R. F. de; CONDE, A. R. Efeito de faixas de potencial matricial sobre o crescimento do milho em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 9, n. 3, p. 271-276, 1985.

ALVAREZ, V. H. Avaliação da fertilidade do solo: metodologia. In: SIMPÓSIO DA PESQUISA NA UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, 1., 198, Viçosa. **Resumos ...** Viçosa: UFV, 1988. p.68-69.

ALVAREZ VILLANUEVA, F. C. **Eficiência de mudas de eucalipto na utilização do fósforo de fontes com solubilidades distintas**. 2004. 94 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

ALVAREZ V, F. C.; DUETE, R. R. C.; MURAOKA, T.; DUETE, W. L. C.; ABREU JUNIOR, C. H. Utilização de fósforo do solo e do fertilizante por tomateiro. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 1, p. 167-172, 2002.

ANDERSEN, A.; GREGERS-HANSEN, B.; NIELSEN, G. Determination of phosphate conditions of soils by means of radioactive phosphorus in pot experiments. **Acta Agriculture Scandinavica**, London, v. 11, p. 270-290. 1961.

ANDRADE, A. G.; HAAG, H. P.; OLIVEIRA, G. D. Acumulação diferencial de nutrientes por cinco cultivares de milho (*Zea mays L.*) I. Acumulação de Macronutrientes . **Anais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, Piracicaba, v. 32, p. 115-49, 1975a .

ARMIGER, W. H.; DEAN, L. A.; MASON, D. D.; KOCH, E. J. Effect of size and type of pot on relative precision, yields and nutrient uptake in greenhouse fertilizers experiments. **Agronomy Journal**, Madison, v. 50, p. 244-247, 1958.

AUNG, L. H. Root-shoot relationships. In: CARSON, E. A. (Ed.). **The plant root and its environment**. Charlottesville: University of Virginia Press, 1974. p. 29-61.

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

BAKER, D. E.; WOODRUFF, C. M. Influence of volume of soil per plant upon growth and uptake of phosphorus by corn from soils treated with different amounts of phosphorus. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 4, p. 409-412, 1962.

BALL, J.B. Recipientes de plástico y enrollamiento de raíces. **Unasyva**, Roma, v. 28, n. 111, p. 27, 1976.

BARBER, S.A. **Soil Nutrient Bioavailability: A mechanistic approach**. New York: John Wiley & Sons, 1995. 384 p.

BARBIN, D. **Planejamento de análise estatística de experimentos agrônomicos**. Araçatuba: Midas, 2003. 208 p.

BARROS, N. F.; NOVAIS R. F. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In: ATTIWIL, P. M.; ADAMS, M. A. (Ed.). **Nutrition of eucalyptus**. Melbourne: CSIRO, 1996, p. 335-355.

BARRY, G. A.; MOODY, P. W.; COMPTON, B. Effect of spacial distribution and soil volume fertilized on recovery of phosphorus fertilizer by wheat in a pot experiment. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 8, p. 307-311, 1986.

BAR-TAL, A. The significance of Root Size for Plant Nutrition in Intensive Horticulture. In: RENGEL, Z. (Ed.). **Mineral nutrition of crops: Fundamental mechanisms and implications**. Binghamton: Food Products Press, 1999. chap. 5, p. 15-139.

BAR-TAL, A.; BAR-YOSEF, B.; KAFKAFI, U. Pepper transplant response to root volume and nutrition in the nursery. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, p. 989-995, 1990.

BAR-TAL, A.; BAR-YOSEF, B.; KAFKAFI, U. Modeling pepper seedling growth and nutrient uptake as a function of cultural conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, p. 718-724, 1993.

BAR-YOSEF, B.; IMAS, P.; LEVKOVITZ, I. **The effects of pot volume, geometry and growth medium type on plant development**. An annual report. Bet Dagan, Israel: Ministry of Agriculture, 1995.

BAR-YOSEF, B.; ZILBER, A.; MARKOVITZ, A.; KEINAN, M.; LEVKOVITZ, I.; SURIANO, S. **The effect of pot volume, growth medium type and fertilization on**

the development of greenhouse tomato. An annual report. Bet Dagan, Israel: Ministry of Agriculture, 1997.

BATAGLIA, O. C.; RAIJ, B. van. Eficiência de extratores de micronutrientes na análise de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 13, n. 2, p. 205-212, 1989.

BIELESKI, R. L.; FERGUSON, I. B. Physiology and metabolism of phosphate and its compounds. In: PIRSON, A.; ZIMMERMANN, M. H. (Ed.). **Encyclopedia of plant physiology**. Berlin: Springer Verlag, 1983, v.15, p. 422-449.

BOARETTO, A. E.; NEPTUNE, A. M. L.; PATELLA, J. F. Efeito de fontes de N e de modos de aplicação do adubo fosfatado (^{32}P) sobre a porcentagem de utilização do fósforo do superfosfato simples pelo trigo (*Triticum aestivum* L.) **Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, v.42, p.107-117, 1985.

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

BROOKES, P.C. Correction for seed-phosphorus effects in L-value determinations. **Journal of Science of Food and Agriculture**, New York, v. 33, p. 329-335. 1982.

BROUWER, R.; DE WIT, C. T. A simulation model of plant growth with special attention to root growth and its consequences. In: **EASTER SCHOOL IN AGRICULTURAL SCIENCE**, 15., 1968, Nottingham. **Root growth**; proceedings... London: Butterworths, 1968. p. 224-242.

CARADUS, J. R. Selection for improved adaptation of White clover to low phosphorus and acid soils. **Euphytica**, New York, v. 77, n. 3, p. 243-250, 1994.

CARMI, A.; HESKETH, J. D.; ENOS, W. T.; PETERS, D. B. Interrelationships between shoot growth and photosynthesis as affected by root growth restriction. **Photosynthetica**, Praha, v. 17, p. 240-245, 1983.

CARMI, A.; HEUER, B. The role of roots in control of bean shoot growth. **Annals of Botany**, London, v. 48, p. 519-527, 1981.

CARMI, A.; Van STADEN, J. The role of roots in regulating the growth rate and

cytokinin content in leaves. **Plant Physiology**, Rockville, v. 73, p. 76-78. 1983.

CLARKSON, D. T. Adaptações morfológicas e fisiológicas das plantas a ambientes de baixa fertilidade. In: SIMPÓSIO SOBRE RECICLAÇÃO DE NUTRIENTES E AGRICULTURA DE BAIXOS INSUMOS NOS TRÓPICOS, Ilhéus, 1984. **Anais...** Ilhéus: CEPLAC; SBCS, 1985. p. 45-75.

COLOZZA, M. T.; MONTEIRO, F. A.; WERNER, J. C.; FANCELI, A. L. Limitações de fertilidade em solos de cinco localidades paulistas para o cultivo de centrosema. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, n. 2, p. 151-156, 1986.

COOK, R. L.; MILLAR, C. E. Some techniques which help to make greenhouse investigation comparable with field plot experiment. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.11, p. 298-304, 1946.

COOPER, A. J. The influence of container volume, solution concentration, pH and aeration on dry matter partition by tomato plants in water culture. **Journal of Horticultural Science**, London, v. 47, p. 341-347. 1972.

COSTA, N. L.; PAULINO, V. T.; SCHAMMAS, E. A. Produção de forragem, composição mineral e nodulação do guandu afetadas pela calagem e adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 13, n. 1, p. 51-58, 1989.

DALAL, R. C.; HALLSWORTH, E. G. Measurement of isotopic exchangeable soil phosphorus and interrelationship among parameters of quantity, intensity, and capacity factors. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, p. 81-86, 1977.

DEAN, L. A.; NELSON, W. L.; MACKENZIE, A. J.; ARMIGER, W. H.; HILL, W. L. Applications of radioactive tracer technique to studies on phosphatic fertilizer utilization by crops: Greenhouse experiments. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 12, p. 107-112, 1947.

DE WILLIGNE, P.; Van NOORDWIJK, M. **Roots, Plant Production and Nutrient Use Efficiency**. 1987. 282f Doctoral Thesis - Agricultural University Wageningen, Wageningen, Netherlands, 1987.

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.

DYNIA, J. F.; BARBOSA FILHO, M. P. Alterações de pH, Eh e disponibilidade de micronutrientes para arroz irrigado em um solo de várzea tratado com calcário e palha de arroz em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, n. 1, p. 67-74, 1993.

EDWARDS, J. H.; BARBER, S. A. Phosphorus uptake rate of soybean roots as influenced by plant age, root trimming, and solution P concentration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, p. 973-975, 1976.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. The media of plant nutrition. In: _____. **Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives**. Sunderland: Sinauer Associates, 2005. chap. 2, p. 17-40.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. Mineral metabolism. In: _____. **Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives**. Sunderland: Sinauer Associates, 2005. chap. 8, p. 201-242

FAGERIA, N. K. Resposta de cultivares de arroz a fertilizantes fosfatados em latossolo vermelho escuro do Brasil central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, n. 1, p. 63-67, 1991.

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P.; STONE, L. F. Nutrição de fósforo na produção de feijoeiro. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. cap. 17. p.435-453.

FAHL, J. I.; CAMARGO, M. B. P. de; PIZZINATTO, M. A.; BETTI, J. A.; MELLO, A. M. T. de; DeMARIA, I. C.; FURLANI, A. M. C. **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. 6.ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1998. 396p. (Boletim, 200).

FARDEAU, J. C. Le phosphore assimilable des sols: as representation par um modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. **Agronomie**, v.13, p. 317-331. 1993.

FARDEAU, J. C. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. **Fertilizer Research**, Dordrecht ,v.45, p.91-100, 1996.

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 Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 781-787, 2002.

FIGLIARO, M. F.; SILVA, P. M.; FERREIRA, R. M.; VICTORIA, R. L.; TSAI, S. M. Mineralização de azola marcada com ^{15}N em solo cultivado e não cultivado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, n. 3, p. 305-312, 1990.

FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. II. Significance of root radius, root hairs and cation-anion balance for phosphorus influx in seven plant species. **Plant and Soil**, The Hague, v. 132, p. 261-272, 1991.

FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants: External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. **Plant and Soil**, The Hague, v. 110, p. 101-109, 1998.

FRIED, M.; DEAN, L. A. A concept concerning the measurement of available soil nutrients. **Soil Science**, Baltimore, v. 73, p. 263-271, 1952.

GARGANTINI, H.; SOARES, E. Efeito do tamanho do vaso e da época de corte de plantas de trigo no estudo da ação dos nutrientes N, P e K. **Bragantia**, Campinas, v. 32, n. 12, p. 237-244, 1973.

GAUCH, H.G. **Inorganic plant nutrition**. Dowden: Hutchinson & Ross, 1973. 488p.

GLASS, A.D.M. Nutrient absorption by plant roots: regulation of uptake to match plant demand. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Ed.). **Plants Roots: The Hidden Half**. New York: Marcel Dekker, 2002. chap. 34, p. 571-585.

GRANT, C. A.; FLATEN, D. N.; TOMASIEWICZ, D. J.; SHEPPARD, S. C. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **POTAFOS: Informações Agronômicas**, Piracicaba, n.95, p.1-5. 2001.

GUNNARSON, O.; FREDERIKSON, L. A method for determining plant available phosphorus in soil by means of ^{32}P . In: ISOTOPE TECHNIQUES CONFERENCE, 1953, Oxford. **Proceedings...** Oxford, 1953. v. 1, p. 427-431.

HAMEED, M. A.; REID, J. B.; ROWE, R. N. Root confinement and its effects on the water relations, growth and assimilate partitioning of tomato (*Lyconpersicon esculentum* Mill). **Annals of Botany**, London, v. 59, p. 685-692. 1987.

HANSON, P.J.; DIXON, R.K.; DICKSON, R.E. Effect of container size and shape on the growth of northern red oak seedlings. **HortiScience**, Alexandria, v. 22, p. 1293-1295. 1987.

HENS, M.; HOCKING, P. An evaluation of the phosphorus benefits from grain legumes in rotational cropping using ³³P isotopic dilution. In: INTERNATIONAL CROP SCIENCE CONGRESS, 4., 2004, Brisbane. Disponivelem: www.cropscience.org.au.

HOCKING, P. J. Redistribution of nutrient elements from cotyledons of two species of annual legumes during germination and seedling growth. **Annals of Botany**, London, v. 45, p. 383-396, 1980.

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: INTERNATIONAL PLANT NUTRITION COLLOQUIUM, 13., 1997, Tokyo. **Plant nutrition** – for sustainable food production and environment. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997. p. 305-308.

HUMPHRIES, E. C. Effect of removal of a part of the root system on the subsequent growth of the root and shoot. **Annals of Botany**, London, v. 22, p. 151-157. 1958.

JACKSON, M. B. Are plant hormones involved in root to shoot communication? **Advances in Botanical Research**, London, v. 19, p. 104-187. 1993.

JOSE, A. L.; KRISHINAMOORTHY, K. K Isotopic exchange of phosphates in soil: "E" value. **Soil Fertilizer**, lv. 5, p. 620-627, 1972.

JUNGK, A.; BARBER, S. A. Plant age and the phosphorus uptake characteristics of trimmed and untrimmed corn root systems. **Plant and Soil**, The Hague, v. 42, p. 227-239, 1975.

JUNK, A. O. Dynamics of Nutrient Movement at the Soil-Root Interface. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A; KAFKAFI, U. (Ed.). **Plants Roots: The hidden half**. New York: Marcel Dekker, 2002. chap. 35, p. 586-611.

KAPLAN, I. **Física nuclear**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.

KONDORFER, G. H.; EIMORI, I. E.; TELLECHEA, M. C. R. Efeito de técnicas de adição do zinco a fertilizantes granulados na produção de matéria seca do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 11, n. 3, p. 329-332, 1987.

KRIZEK, D. L.; CARMI, A.; MIRECKI, R. M.; SNYDER, F. W.; BUNCE, J. A. Comparative effects of soil moisture stress and restricted root zone volume on morphogenetic and physiological responses of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 36, p 25-38. 1985.

L'ANNUNZIATA, M. F. Cerenkov counting. In: _____. **Radionuclide traces, their detection and measurement**. London: Academic Press, 1987. chap. 6, p. 241-264.

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

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

LARSEN, S.; COOKE, I. J. The influence of radioactive phosphate level on the absorption of phosphate by plants and on the determination of labile soil phosphate. **Plant and Soil**, The Hague, v. 14, n. 1, p. 43-48, 1961.

LARSEN, S.; GUNARY, D. The determination of labile soil phosphate as influenced by the time of application of labeled phosphate. **Plant and Soil**, The Hague, v. 20, p. 135-142, 1964.

LARSEN, S.; SUTTON, C. D. The influence of soil volume on the absorption of soil phosphorus by plants and on the determination of labile soil phosphorus. **Plant and Soil**, The Hague, v. 18, n. 1, p. 77-84, 1963.

LOMBARDI, M. L. C. O.; LOPES, E. S.; FREITAS, S. S.; NOVO, M. C. S. S. Avaliação de estirpes de *Bradyrhizobium* sp. para amendoim em solo pré-cultivado com trigo e aveia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 12, n. 1, p. 33-37, 1988.

MACHADO, C.T.T. **Caracterização de genótipos de milho quanto a parâmetros morfológicos, fisiológicos e microbiológicos associados à eficiência de absorção e uso de fósforo**. 2000. 366f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal

Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2000.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola** – Adubos e adubação. 2.ed. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1967. 606p.

MALAVOLTA, E. O Fósforo na planta e interações com outros elementos. In: YAMADA, T.; ADBALLA, S. R. S. (Ed.) **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. cap. 3, p. 35-98.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G .C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Princípios e aplicações. Piracicaba:POTAFOS, 1989. 201p.

MAMO, T.; RICHTER, C.; HOPPENSTEDT, A. Phosphorus response studies on some varieties of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) and tef (*Eragrostis tef* [Zucc.] Trotter) grown in sand culture. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Madison, v. 176, p. 189-197. 1996.

MARAI, P. G.; DEIST, J.; HEYNS, C. F. G. Correction for seed-borne phosphate in the determination of labile soil phosphate. **Agrochimica**, Pretoria, v. 1, p. 99-104, 1969.

MARSCHNER, H. Functions of mineral nutrients: Macronutrients. In: _____. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. chap. 8, p. 229-312.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 2 ed. London: Academic Press, 1995. 889p.

MARSCHNER, H.; KIRKBY, E. A.; CAKMAK, I. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 47, p. 1255-1263, 1996.

MARSOLA, T. **Marcação de plantas com ³²P para estudos da mineralização do fósforo orgânico**. 2003. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 2003.

MATIN-PRÉVEL, P.; GAGNARD, J.; GAUTIER, P. The purpose of plant analysis's. In: _____. **Plant Analyses as a Guide to the nutrient requirements of temperate and tropical crop**. Lavoisier Publishing, p.116-113,1984.

MARTINS, C. E.; AMARAL, F. A. L.; CÓSER, A. C. Comportamento de espécies e ecotipos de estilosantes submetidos a diferentes níveis de saturação de alumínio. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 194-204, 1993.

McCLUNG, A. C.; FREITAS, L. M. M.; LOTT, W. L. **Estudos sobre enxofre em solos de São Paulo**. São Paulo: IBEC Research Institute, 1958. 31p. (Bulletin, 17).

McLAUGHLIN, M. J.; ALSTON, A. M. The relative contribution of plant residues and fertiliser to the phosphorus nutrition of wheat in a pasture/cereal rotation. **Australian Journal Soil Research**, Melbourne, v. 24, p. 517-526, 1986.

McLAUGHLIN, M. J.; ALSTON, A. M.; MARTIN, J. K. Phosphorus cycling in wheat-pasture rotations. I. The source of phosphorus taken up by wheat. **Australian Journal Soil Research**, Melbourne, v. 26, p. 323-321, 1988.

MENDES, F. L. **Efeito do tamanho do vaso na avaliação do fósforo isotopicamente trocável**. 2003. 24 p. Monografia (TCC Engenharia Agrônômica) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2003.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. Bern: International Potash Institute. 2001. 849 p.

MILLER, E. C. **Plant physiology**: with reference to the green plant. New York: McGraw-Hill, 1938.1201p.

MOREL, C.; PLENCHETTE, C. Is the isotopically exchangeable phosphate of a loamy soil the plant available P? **Plant and Soil**, The Hague, v. 158, p. 287-297. 1994.

MURAOKA, T. Uso de técnicas isotópicas em fertilidade do solo. In: OLIVEIRA, A. J.; GARRIDO, W. E.; ARAUJO, J. D. de; LOURENÇO, S. (Coord.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: EMBRAPA, SEA, 1991. p. 255-273.

MURAOKA, T.; BOARETTO, A. E. Uso de isótopos em estudos de adubação foliar. In: BOARETTO, A. E.; ROSOLEM, C. A. **Adubação foliar**. Campinas: Fundação Cargill, 1989. p.321-334.

MURAOKA, T.; NEPTUNE, A. M. L.; NASCIMENTO FILHO, V. F. Efeitos do zinco e

do manganês da semente nos teores desses elementos nas respectivas plantas. In: SEMINÁRIO REGIONAL SOBRE O USO DE TÉCNICAS NUCLEARES EM ESTUDO DA RELAÇÃO SOLO – PLANTA ATMOSFERA. Piracicaba, CIEN/CENA, 1981.

MUTSAERS, H. J. W. Leaf growth in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) 2. The influence of temperature, light, water stress and root restriction on the growth and initiation of leaves. **Annals of Botany**, London, v. 51, p. 521-529. 1983.

NASCIMENTO FILHO, V. F. Fitting a Co-60 external source to a liquid scintillation system for the estimation of P-32 Cerenkov effect detection efficiency. **International Journal of Applied Radiation and Isotopes**, New York, vol. 28, p. 789-790. 1979.

NATALE, W.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T. Absorption et redistribution de ^{32}P appliqué sur ferrille de goyavier. **Fruits**, Paris, v. 54, p. 23-29, 1999.

NEPTUNE, A. M. L.; MURAOKA, T. Uso de técnicas em química e fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 2, p. 151-163, 1978.

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**, Turrialba, v.29, n.1, p.29-34, 1979.

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

OLIVEIRA, M.; TRIVELIN, P. C. O.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; MORTATTI, J. Leaching of nitrogen, potassium, calcium and magnesium in a sandy soil cultivated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 861-868, 2002.

PEARSON, J. N.; RENGEL, Z. Mechanisms of plant resistance to nutrient deficiency stresses. In: BASRA, A. S; BASRA, R. K. (Ed.). **Mechanisms of Environmental Stress Resistance in Plants**. Amsterdam, Netherlands: Harwood Academic Publishers, 1997. p. 213-240.

PEREIRA, A. V. **Efeitos de tipos e tamanhos de sacos plásticos sobre o desenvolvimento de porta-enxertos de seringueira**. 1983. 44 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1983.

PETERSON, T. A.; KRIZEK, D. T. A flow-through hydroponic system for the study of root restriction. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 15, p. 83-911. 1992.

PETERSON, T. A.; REINSEL, M. D.; KRIZEK, D. T. Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill., cv. "Better Bush") plant response to root restriction. 1. Alteration of plant morphology. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 42, p. 1233-1240. 1991a.

PETERSON, T. A.; REINSEL, M. D.; KRIZEK, D. T. Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill., cv. "Better Bush") plant response to root restriction. 2. Root respiration and ethylene generation. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.42, p. 1233-1240. 1991b.

RAIJ, B. van. Fósforo no Solo e interação com outros elementos. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. cap. 4, p. 107-114.

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

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987.

RANDALL, P. J. Genotypic differences in phosphate uptake. In: JOHANSEN, C.; SHARMA, K. K.; SUBBARAO, G. V.; KUENEMAN, E. A. (Ed.). **Genetic manipulation of crop plants to enhance integrated nutrient management in cropping systems**. 1. Phosphorus. Patancheru, Andhra Pradesh, India: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 1994. p. 31-47.

RAPOSO, R. W. C. **Eficiência de cultivares de soja na absorção e utilização de fósforo**. 2003. 75f. Tese (Doutorado) – 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: _____. **Mineral nutrition of crops: Fundamental mechanisms and implications**. Binghamton: Food Products Press, 1999. chap. 9, p. 227-265.

RIBEIRO, S. A. **Comparação entre cultivo de plantas em vasos e no campo**.

1994. 107f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

RICHARDS, D.; ROWE, R. N. Effects of root restriction, root pruning and 6-benzylaminopurine on the growth of peach seedlings. **Annals of Botany**, London, v. 41, p. 729-740. 1977.

ROBBINS, N. S.; PHARR, D. M. Effect of restricted root growth on carbohydrate metabolism and whole plant growth of *Cucumis sativus* L. **Plant Physiology**, Rockville, v. 87, p. 409-413. 1988.

ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R.; MAIA, I. G.; NAKAGAWA, J. Respostas da soja ao magnésio do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, n. 1, p.47-54, 1992.

RUFF, M. S.; KRIZEK, D. L. MIRECKI, R. M.; INOUE, D. W. Restricted root zone volume: Influence on growth and development of tomato. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 112, p. 763-769. 1987.

RUSSELL, R. S.; RUSSELL, E. W.; MARAIS, P. G. Factors affecting the ability of plants to absorb phosphate from soils. I The relationship between labile phosphate and absorption. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 8, p. 248-267, 1957.

RUSSELL, R. S.; RUSSELL, E. W.; MARAIS, P. G. Factors affecting the ability of plants to absorb phosphate from soils. II A comparison of the ability of different species to absorb labile soil phosphate. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 9, n. 1, p. 101-108, 1958.

SALCEDO, I.H.; BERTINO, F.; SAMPAIO, E.V.S.B. Reactivity of phosphorus in Northeastern Brazilian soils assessed by isotopic dilution. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 140-145, 1990.

SANYAL, S. K.; DATTA, S. K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. In: STEWART, B. A. (Ed.). **Advances in soil science**. New York: Springer-Verlag, v.16, p.1-119, 1991.

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

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.

SCIVITTARO, W. B.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T. Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados fluidos e sólidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 505-511, 1997.

SILVA, J. B. C. da; NOVAIS, R. F.; SEDIYAMA, C. S. Identificação de genótipos de sorgo tolerantes à toxicidade de alumínio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, n.1, p. 77-83, 1984.

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.

SIQUEIRA, J.O.; ANDRADE, A.T.; FAQUIN, V. O papel dos microrganismos na disponibilização e aquisição de fósforo pelas plantas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. cap. 5, p. 117-149.

SPINKS, J. W. T.; BARBER, S. A. Studies of fertilizer uptake using radioactive phosphorus. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 27, p. 145-156, 1947.

STAUFFER, M. D.; SULEWSKI, G. Fósforo – essencial para a vida. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. cap. 1, p. 1-11.

STURION, J. A. Influência do recipiente e do método de semeadura na formação de mudas de *Mimosa scabrella* Benth. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, v.2, p. 69-78, 1981.

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

TINKER, P. B.; NYE, P. H. **Solute movement in the rhizosphere**. New York: Oxford University Press, 2000, 464 p.

TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W. de; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; BENDASSOLI, J. A. Perdas de nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 193-201, 2002a.

TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, M. W. de; GAVA, G. J. C.; SARRIÉS, G. A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana de açúcar (cana planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 637-646, 2002b.

TROLOVE, S. N.; HEDLEY, M. J.; CARADUS, J. R.; MACKAY, A. D. Uptake of phosphorus from different sources by *Lotus pedunculatus* and three genotypes of *Trifolium repens*. 1. Plant yield and phosphate efficiency. **Australian Journal Soil Research**, Melbourne, v. 34, p. 1015-1026. 1996a.

TROLOVE, S. N.; HEDLEY, M. J.; CARADUS, J. R.; MACKAY, A. D. Uptake of phosphorus from different sources by *Lotus pedunculatus* and three genotypes of *Trifolium repens*. 2. Forms of phosphate utilized and acidification of the rhizosphere. **Australian Journal Soil Research**, Melbourne, v. 34, p. 1027-1040. 1996b.

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

WHITE, R. E. Concepts and methods in the measurement of isotopically exchangeable phosphate in soil. **Phosphorus in Agriculture**, v. 67, p. 9-16, 1976.

WOLF, A. M.; DAKER, D. E.; PIONKE, H. B. The measurement of labile phosphorus by the isotopic dilution and anion resin methods. **Soil Science**, Baltimore, v. 141, n. 1, p.60-70, 1986.

XU, D.; DELL, B.; MALAJCZUK, N.; GONG, M. Effects of P fertilization on productivity and nutrient accumulation in a *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* plantation in southern China. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.161, p.89-100, 2002.

APÊNDICE



FOTO 1– Plantas de feijão cultivadas em solo sem adubação fosfatada nos volumes de terra de 2,0 L; 4,0 L; 8,0 L; 12,0 L e 18,0 L (período de desenvolvimento: 50 dias).



FOTO 2– Plantas de feijão cultivadas em solo com adubação fosfatada nos volumes de terra de 2,0 L; 4,0 L; 8,0 L; 12,0 L e 18,0 L (período de desenvolvimento: 50 dias).



FOTO 3– Plantas de milho cultivadas em solo sem adubação fosfatada nos volumes de terra de 2,0 L; 4,0 L; 8,0 L; 12,0 L e 18,0 L (período de desenvolvimento: 50 dias).



FOTO 4– Plantas de milho cultivadas em solo com adubação fosfatada nos volumes de terra de 2,0 L; 4,0 L; 8,0 L; 12,0 L e 18,0 L (período de desenvolvimento: 50 dias).