

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA**

MARCO ANTONIO PEREIRA DE ÁVILA

**Influência do silício sobre a difusão do fósforo no solo e na eficiência
agronômica de fertilizantes fosfatados granulados**

Piracicaba

2016

MARCO ANTONIO PEREIRA DE ÁVILA

**Influência do silício sobre a difusão do fósforo no solo e na eficiência
agronômica de fertilizantes fosfatados granulados**

**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

2016

AUTORIZO A 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

Ávila, Marco Antonio Pereira de

Influência do silício sobre a difusão do fósforo no solo e na eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados granulados / Marco Antonio Pereira de Ávila; orientador Takashi Muraoka. - - Piracicaba, 2016.

101 p. : il.

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. Adsorção 2. Agricultura sustentável 3. Diluição isotópica 4. Fertilidade do solo 5. Fosfatos 6. Materiais recicláveis 7. Nutrição vegetal 8. Silicatos
Tecnologia de fertilizantes I. Título

CDU (631.85 : 66.099.2) 631.15

Aos meus Pais Antônio e Zélia, que com a graça de Deus me conceberam a vida, pessoas especiais, que superaram todas as dificuldades para me dar o melhor e mais perfeito exemplo de amor, honestidade e bondade. Estes, jamais mediram esforços para que um dos filhos alcançasse seu objetivo.

Aos meus irmãos, pelo carinho, companheirismo, apoio e momentos felizes proporcionados...

Aos meus sobrinhos Rian e Luisa...

A minha namorada Paula Castanho, pelo amor, carinho, compreensão e alegria...

A nação brasileira...

DEDICO

AGRADECIMENTOS

- A Deus, por me dar forças e estar sempre presente em minha vida.
- A Nossa Senhora Aparecida por interceder pelas graças que alcancei não deixando minha estrutura abalar nos momentos mais difíceis.
- Ao meu Orientador, professor Dr. Takashi Muraoka, pela confiança, ensinamentos, conselhos, amizade e paciência. Um verdadeiro exemplo de pessoa e profissional, que desde então tem minha admiração e respeito, se tornando minha inspiração.
- A Universidade de São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP, que por meio do programa de Pós Graduação me ofereceu a oportunidade da realização do curso de Mestrado.
- Aos profissionais da Seção de Pós-Graduação pela cordialidade, atenção e disponibilidade.
- Aos professores Dr. José Lavres Jr. e Dr. Rafael Otto pelos ensinamentos nas áreas de nutrição mineral de plantas e fertilidade do solo e adubação. Jovens profissionais de conhecimento e competência inquestionáveis, sendo sem dúvida uma inspiração para a vida profissional de todos nós.
- A equipe do Núcleo de Pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera, da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (NUPEGEL-ESALQ/USP) na figura da professora Dr^a Célia Regina Montes, colaborando gentilmente com a realização das análises de difração de raios X.
- A comissão de Pós Graduação do CENA/USP, pelo brilhante trabalho que desempenham sempre com profissionalismo e seriedade. Não medindo esforços para o avanço da ciência de nossa Instituição.
- A ESALQ-USP, pelas disciplinas às quais pude cursar, onde tive o privilégio de aprender com professores do mais alto nível.
- A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa de estudos.
- A minha Família, pelo amor e conforto nas horas difíceis de minha jornada.
- A minha irmã gêmea Mara, pelo carinho, ajuda incondicional e valiosos ensinamentos transmitidos. Acima de tudo pelo apoio e amor ofertado nos momentos mais difíceis de minha caminhada. Sem sua ajuda, não teria chego onde estou.

- A minha namorada Paula, pelo amor, ensinamentos, paciência, compreensão e acima de tudo, pelo exemplo de força e alegria, sempre me motivando a evoluir e ser uma pessoa melhor.
- Ao amigo e professor Dr. José Sérgio de Araújo, pelo apoio e amizade, sempre me ajudando a alcançar meus objetivos.
- Ao meu orientador de iniciação científica, Prof. Dr. Felipe Campos Figueiredo, pela amizade, ensinamentos e incentivos.
- Aos Meus amigos, Eduardo Gonçalves, Tiago, Jair Trapé, dentre todos outros tão importantes quanto, mesmo que a quilômetros de distância nunca me abandonaram.
- Ao meu grande amigo Marcelo Borges, pelos incentivos, ensinamentos, exemplo de vida, puxões de orelha. Por anos atrás, ter me levado para conhecer a ESALQ e o CENA-USP, sendo crucial no despertar um sonho, para que com isso, eu pudesse planejar e traçar o caminho que hoje culmina na realidade.
- Ao meu cunhado Sérgio, pela amizade, companheirismo e momentos de descontração.
- As técnicas do Laboratório de Fertilidade do Solo CENA-USP, Mara e Sandra, pela disciplina, amizade, respeito e auxílio na execução de análises laboratoriais.
- Ao meu valioso amigo Thiago Cardoso, pela amizade, ajuda e ensinamentos transmitidos, que muito contribuiu para finalização deste trabalho.
- Aos colegas de jornada e amigos da salinha de estudos: Aline, Guilherme, Josimar, Neri e Thaís. E em especial aos amigos Thiago, Fábio, Aijânio, Cristiano, Renato e Lucas Sartor, pelas ajudas e ensinamentos que muito contribuíram para finalização deste trabalho.
- Aos colegas e moradores da Vila da Pós Graduação da ESALQ-USP, em especial ao amigo Christopher, pelos momentos de descontração, conversas e ensinamentos.
- Aos amigos Antônio (K-nudos), André (Asa Δ) e José Ari (Kupin) pela ajuda e momentos de descontração.
- A equipe da Biblioteca do CENA/USP, na figura da Sra. Marília, pela atenção, carisma e disponibilidade que me recebeu e auxiliou na finalização deste trabalho.
- A VILLARES METTALS de Sumaré - SP, na figura do senhor José Roberto Murari, pelo incentivo, apoio e exemplo de responsabilidade social e ambiental a qual desempenham.
- A todos que da mais simples forma, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, meu muito obrigado!

“Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo está vendo e pensar uma coisa diferente”.

Roger Von Oech.

RESUMO

ÁVILA, M. A. P. **Influência do silício sobre a difusão do fósforo no solo e na eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados granulados**. 2016. 101 p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

O fósforo (P) é um elemento altamente demandado pela agricultura mundial para produção de alimentos. Os solos de regiões tropicais apresentam baixo teor de P disponível às plantas, devido à escassez natural herdada do material de origem e predominância de processos de fixação, sendo necessário o suprimento deste nutriente via adubação. Os fertilizantes fosfatados solúveis utilizados apresentam baixo aproveitamento devido a reações que se iniciam desde a interface solo-grânulo até o trajeto difusivo do P no solo. Pesquisas têm abordado sobre o potencial do silício (Si) em competir por sítios de adsorção de P no solo, tornando este nutriente mais disponível às plantas e aumentando o aproveitamento dos adubos fosfatados. Visando desenvolver estratégias para melhorar a eficiência agrônômica do fosfato monoamônio (MAP) os objetivos deste trabalho foram: a) construir um dispositivo para granular fertilizante em pequenas quantidades, b) avaliar a difusão e disponibilidade do P a partir dos fertilizantes produzidos, em dois solos de característica textural e capacidade máxima de adsorção de P contrastantes e c) avaliar a eficiência agrônômica e o aproveitamento do P dos fertilizantes propostos neste estudo em conjunto com o superfosfato orgânico-complexado (SOC) e o MAP, por meio da técnica isotópica com ^{32}P . Foram conduzidos quatro experimentos no Laboratório de Fertilidade do Solo do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP), Piracicaba - SP. Os solos utilizados nos ensaios foram classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd). Conduzidos simultaneamente, o primeiro e segundo experimentos constituíram de estudo da difusão do P por meio da incubação dos fertilizantes em placa de petri preenchidas com cada um dos solos, montados em delineamento inteiramente casualizado, compostos por 11 tratamentos (9 fertilizantes com diferentes proporções P-Si (1-9 a 9-1) no grânulo mais o MAP e o tratamento controle) e cinco repetições. O terceiro e quarto experimentos foram instalados em casa de vegetação com a cultura do milho cultivada nos dois tipos de solo, num delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5x4, sendo cinco fertilizantes fosfatados dentre os quais três foram selecionados no estudo de incubação (proporções P-Si no grânulo: 2-8, 6-4 e 8-2) o SOC e o MAP, aplicados em quatro doses de P (0, 30, 60, 90 mg kg⁻¹). Foi possível construir o granulador projetado, e com uso deste produzir os fertilizantes propostos. No estudo de incubação, observou-se que a presença de Si no grânulo do fertilizante fosfatado alterou o pH do solo ao redor dos grânulo e a difusão e disponibilidade do P em ambos os solos estudados. O P difundiu-se poucos centímetros no solo, ficando restrito às primeiras seções em torno do ponto de aplicação do fertilizante. No experimento em casa de vegetação, observou-se que o fertilizante contendo a maior quantidade de Si no grânulo proporcionou maiores valores de P acumulado, P na planta proveniente do fertilizante e aproveitamento do P do fertilizante, bem como melhores índices de eficiência agrônômica relativa em relação ao MAP. O SOC proporcionou os menores resultados em todos os parâmetros avaliados.

Palavras chaves: Fosfato. Silicato. Adsorção. Diluição isotópica. ^{32}P . Milho.

ABSTRACT

ÁVILA, M. A. P. **Silicon influence on phosphorus diffusion in soil and on agronomic efficiency of granular phosphate fertilizer.** 2016. 101 p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

Phosphorus (P) is a highly demanded element for world agriculture for food production. Tropical soils present low level of this nutrient in phyto-available form due to natural inherited shortage of source material and predominance of fixation processes, requiring the supply of this nutrient via fertilization. The soluble phosphate fertilizers used have low utilization by plants due to reactions that start from the soil-granule interface to the P diffusive path in the soil. Research has addressed on the silicon (Si) potential to compete for P adsorption sites in the soil, making this nutrient more available to plants and increasing the use of fertilizer P. In order to develop strategies to increase the agronomic efficiency of monoammonium phosphate (MAP) the objectives of this study were: a) to build a device for the production of granulated fertilizer in small quantities b) assess the diffusion and availability of P from the fertilizer produced in two contrasting textural characteristics and maximum P adsorption capacity and c) evaluate the agronomic efficiency and utilization of P from fertilizers proposed in this study compared with the organic-complexed superphosphate (OCS) and MAP by ^{32}P isotope technique. Four experiments were conducted at the Soil Fertility Laboratory of Center for Nuclear Energy in Agriculture (CENA-USP), Piracicaba SP, Brazil. The soils used in the experiments were classified as Oxisol and Haplortox collected from the surface layers. The first and second experiments, conducted simultaneously, constituted the fertilizer incubation study in petri dishes in a completely randomized design with 11 treatments (9 fertilizer with different P- Si proportions (1-9 to 9-1) in the granule, plus the MAP and the control) and five replicates. The third and fourth experiments were conducted in a greenhouse with corn grown in the two types of soil in a completely randomized 5x4 factorial design, with five phosphate fertilizer among which three were selected in the study of incubation (proportions P-Si in the granule: 2-8, 6-4 and 8-2), OCS and MAP applied in four rates of P (0, 30, 60, 90 mg kg⁻¹). It was possible to build the projected granulator, and use this to produce the proposed fertilizer. In the study of incubation, it was observed that the presence of Si in phosphate fertilizer granule changed the pH of the soil around the granules and the diffusion of P in both soils. The P diffused few centimeters in both soils, being restricted to the first sections around the applied granule. It was observed that, in the greenhouse experiment, in both soils, the fertilizer containing the highest amount of Si in the granule provided the highest plant accumulated P values, P in the plant derived from fertilizer and of fertilizer P utilization and best relative agronomic efficiency rate in relation to MAP and the OCS. The OCS gave the lowest results in all parameters.

Key words: Phosphate. Silicate. Adsorption. Isotope Dilution. ^{32}P . Corn.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1. Panorama e perspectivas futuras das reservas de rochas fosfáticas no Brasil e no Mundo	17
2.2. Fósforo na planta	19
2.3. Fósforo no solo	21
2.4. Novas tecnologias para fertilizantes fosfatados	23
2.5. Interação P x Si	25
2.6. Uso de isótopos radioativos do P como traçadores em estudos de fertilidade do solo e nutrição de plantas	26
3. HIPÓTESE	28
4. OBJETIVOS	29
5. MATERIAL E MÉTODOS	30
5.1. Informações Gerais	30
5.1.1 Desenvolvimento e construção do granulador de bancada tipo prato-rotativo	30
5.1.2. Produção dos fertilizantes	33
5.1.3. Caracterização dos solos utilizados	35
5.2. Experimento 1 - Estudo da difusão e disponibilidade do P por intermédio da incubação dos fertilizantes em placa de petri em Latossolos com textura e capacidade de adsorção de P contrastantes	37
5.2.1. Correção do solo	37
5.2.2. Montagem das placas de petri	38
5.2.3. Avaliações	40
5.2.4. Análise estatística	41
5.3. Experimento 2 - Avaliação da eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados na cultura do milho cultivado em Latossolos com textura e capacidade de adsorção de P contrastantes	41
5.3.1. Correção do solo, montagem e condução dos experimentos	41
5.3.2 Análise estatística	46
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
6.1. Viabilidade econômica do granulador de prato-rotativo desenvolvido	47

6.2. Experimento 1 - Estudo da difusão e disponibilidade do P por intermédio da incubação dos fertilizantes em placa de petri em Latossolos com textura e capacidade de adsorção de P contrastantes.....	47
6.2.1. Atributos químicos do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e do Latossolo Vermelho distrófico (LVd)	47
6.2.2. pH dos solos nas diferentes secções a partir do ponto de aplicação dos fertilizantes	48
6.2.3. P-total nos solos nas diferentes secções a partir do ponto de aplicação dos fertilizantes	52
6.2.4. P-disponível (P-resina) nos solos nas diferentes secções a partir do ponto de aplicação dos fertilizantes	59
6.2.5. Total de P-disponível (P-resina) na placa de petri	65
6.3. Experimento 2 - Avaliação da eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados na cultura do milho cultivado em Latossolos com textura e capacidade de adsorção de P contrastantes	69
6.3.1 Comportamento das plantas de milho cultivadas sob o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)	69
6.3.2. MSPA das plantas de milho	70
6.3.3. Interação dos fatores fertilizante e doses de P para o P acumulado	71
6.3.4. Fósforo proveniente do fertilizante	75
6.3.5. Aproveitamento do P proveniente do fertilizante em cada tratamento e dose	76
6.4. Comportamento das plantas de milho cultivadas sob o Latossolo Vermelho distrófico (LVd).....	77
6.4.1. Comportamento dos fatores fertilizantes e doses para MSPA das plantas de milho	78
6.4.2. Interação dos fatores fertilizantes e doses de P para o P acumulado	80
6.4.3. Fósforo proveniente do fertilizante	83
6.4.4. Aproveitamento do P proveniente do fertilizante	84
7. CONCLUSÕES	85
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
REFERÊNCIAS.....	88

1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um elemento imprescindível para a agricultura mundial, sendo crucial na produção de alimentos e um dos nutrientes mais limitantes para o cultivo agrícola. Por ser extraído de recursos naturais não renováveis existe a preocupação sobre a sua iminente escassez, fato que coloca em risco a segurança alimentar das próximas gerações.

Esta preocupação se potencializa com o ritmo acelerado de crescimento da população mundial, o que requer uma crescente demanda de insumos, ocasionando, principalmente, uma maior intensidade de exploração dos recursos naturais. De acordo com dados publicados na revisão *World Population Prospects*, em 2015, a população mundial alcançou a marca dos 7,3 bilhões de pessoas. Tais estimativas apontam que se o ritmo constante de crescimento populacional perdurar, em 2050, o planeta Terra abrigará cerca de 9,7 bilhões de habitantes. Segundo dados da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), para suprir a demanda crescente e sustentar o alcance desta meta, a produção de alimentos terá de aumentar cerca de 60 % até o ano de 2050.

Comparando com outros nutrientes, o P é o menos móvel e o menos disponível para as plantas na maioria das condições de solo. Estima-se que mais de 5,7 bilhões de hectares no mundo apresente baixo teor de P disponível para sustentar adequadamente a produção das culturas (HINSINGER, 2001).

O baixo teor de P biodisponível em solos tropicais altamente intemperizados, como os do Brasil, é decorrente da escassez natural herdada do material de origem e predominância dos processos de fixação¹ deste elemento no solo. A restrita absorção pelas plantas do P aplicado via fertilizante é decorrente de eventos de alta complexidade que iniciam na interface solo/grânulo e se propagam ao longo do trajeto difusivo do P no solo. Conhecer a fundo estas reações é de suma importância para o estudo e desenvolvimento de tecnologias que se mostrem eficientes em minimizar a interação do P aplicado com o solo, a fim de melhorar o aproveitamento deste pelas culturas.

Neste contexto, visando sanar tais problemas e melhorar a eficiência das adubações fosfatadas, diversas práticas têm sido adotadas, tais como a correção da acidez do solo com calcário ou silicatos, aplicação localizada do fertilizante, plantio direto, adubação verde, uso de micorrizas, aplicação de composto orgânico ou uso de adubos organominerais, entre

¹ Fixação: No texto, este termo refere-se aos processos que diminuem a disponibilidade do P no solo como a adsorção específica e/ou sua precipitação em compostos de baixa solubilidade.

outras. Além disso, a indústria de fertilizantes tem buscado constantemente desenvolver novas tecnologias com intuito de melhorar a eficiência agrônômica das fontes fosfatadas tradicionalmente utilizadas. Nesta linha de desenvolvimento, surgiram os chamados fertilizantes tecnológicos, cuja principal característica é a liberação lenta e/ou controlada dos componentes dos grânulos, por intermédio de revestimento protetor insolúvel em água (TRENKEL, 2010). Existe também fertilizantes onde o P encontra-se complexado com substâncias orgânicas através de pontes metálicas, os chamados fertilizantes de rizosfera controlada (ERRO et al, 2011).

Unindo-se a estas tecnologias, diversos estudos apontam o potencial do silício (Si) em promover melhorias no aproveitamento do P aplicado, não somente pelo potencial de correção do pH do solo, mas também pelo fornecimento de ânions na forma de silicato, que são capazes de competir/saturar os sítios de adsorção de fosfato no solo e conseqüentemente aumentar sua disponibilidade às plantas.

Embora existam vários estudos de aplicação de fontes de Si ao solo, o fornecimento do P e Si juntos no mesmo fertilizante tem sido raramente estudado, existindo poucos produtos no mercado, a exemplo dos termofosfatos. Devido a carência de estudos na área, até o momento não foram encontrados trabalhos avaliando o comportamento de fertilizantes contendo fosfatos solúveis em combinação com Si (filossilicato²), constituindo assim um grânulo fonte de P e Si. Com essa composição, o P solúvel encontrar-se-ia interposto na matriz silicatada de menor solubilidade, onde tal configuração pode modificar a marcha de dissolução do grânulo do fertilizante no solo, bem como, minimizar a exposição do P com as superfícies adsorventes e ainda fornecer o íon silicato para competir com os sítios de adsorção de P no solo.

Diante destas premissas, torna-se importante avaliar se esta proposta de fertilizante melhora a difusão e disponibilidade de P, em diferentes condições de solo, avaliando a absorção deste nutriente pelas plantas por meio da técnica isotópica com ³²P.

²Filossilicato: Fonte de Si na forma do produto comercial MICROTON®.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Panorama e perspectivas futuras das reservas de rochas fosfáticas no Brasil e no Mundo

A dependência da agricultura na aplicação regular de fertilizantes minerais aumenta a cada ano, sendo este crescimento decorrente da necessidade de suprir os nutrientes extraídos pelas culturas, reestruturando assim, a fertilidade dos solos explorados.

A adoção destas práticas gera uma crescente apreensão na sociedade atual, resultado do risco de escassez dos nutrientes provenientes de recursos naturais não renováveis. A magnitude deste problema chega a assumir abrangência geopolítica, comparada por muitos estudiosos a emblemáticas preocupações como o aquecimento global e as reservas de petróleo.

Como o Petróleo, o P é finito, extraído de recursos naturais não renováveis (ROSEMARIN; EKANE, 2016). Unindo-se a este problema, outro agravante é que na cadeia de produção, em torno de 70 a 80 % do P é perdido (disperso) para o sistema, fato que ocorre desde sua extração nas jazidas até o alimento posto na mesa do consumidor (SCHRODER et al., 2010).

Ao se tratar de projeções futuras sobre a longevidade das jazidas de rocha fosfática no mundo, as previsões são controversas. Cordell et al. (2009) e Cordell e White (2015), baseados em estimativas de aumento da produção de alimentos e extração de rochas fosfáticas, sugeriram que o pico de extração e consumo de P no mundo poderá ocorrer por volta de 2030, com posterior declínio e subsequente escassez das reservas.

Acrescentando as estimativas anteriores, Herring e Fantel (1993), estimaram o esgotamento das reservas de rochas fosfáticas, então conhecidas e economicamente viáveis, em até 100 anos, considerando a data de publicação. Além destas estimativas, existem diversas outras inferências para a extinção das reservas de P no mundo, com perspectivas que variam de 50 a 100 anos (STEEN, 1998; SMIL, 2000), ou ainda 125 anos conforme Smit et al. (2009). Todas estas previsões além de incertas apresentam certo grau de pessimismo quanto à vida útil das reservas mundiais de rocha fosfática.

Um levantamento foi realizado pelo *International Fertilizer Development Center* (IFDC) sobre o status das reservas de rocha fosfática no mundo, baseando principalmente no emprego das novas tecnologias que possam expandir as fronteiras de jazidas economicamente exploráveis. Neste relatório, as projeções apresentadas não evidenciam que as reservas poderão se esgotar em tão pouco tempo, podendo assim, perdurarem pelos próximos 300 a

400 anos (van KAUWENBERCH, 2010). Embora as novas projeções sejam mais otimistas, Cooper et al. (2011) apontam que a distribuição geográfica e magnitude das jazidas de rocha fosfática são irregulares e que muitos países poderão ter suas reservas esgotadas mais precocemente.

Mas quando, exatamente, a demanda de fosfato irá superar a oferta? Isto é algo ainda muito incerto, sujeito a debates e conflitos de opiniões. Talvez seja cedo para dizer precisamente, mas uma coisa é certa, a quantidade de fosfato de rocha de alta qualidade e baixo custo de extração e processamento está diminuindo (SCHRODER et al., 2010).

Recentemente, o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) publicou que as bases de reservas mundiais de rocha fosfática estavam no ano de 2015, na ordem de 67 bilhões de toneladas em P_2O_5 distribuídas em mais de 23 países (USGS, 2015). Considerando os valores publicados para cada país e transformando-os em porcentagem, fica evidente que a distribuição geográfica destas reservas no mundo é muito irregular, estando grande parte restrita a apenas um grupo de países. Neste contexto, concluiu-se que em torno de 75 % das reservas estão situadas em Marrocos, na região do Saara Ocidental, 20 % estão distribuídas em apenas oito países como a China, Argélia, Síria, África do Sul, Rússia, Jordânia, Estados Unidos, Austrália e os 5 % restante, nos demais países.

Quanto ao consumo mundial, históricos apontam que a demanda por fertilizantes fosfatados vem crescendo a uma taxa de 2,2 % ao ano. Este crescimento tem sido mais expressivo na Ásia Oriental, Sul da Ásia e América Latina, e certamente, em breve atingirá a marca de consumo das 46,6 milhões e toneladas de P_2O_5 ao ano. De modo à atender esta demanda, em 2018 a capacidade de abastecimento anual está sendo projetada para atingir a marca das 61,5 milhões de toneladas de P_2O_5 , e este aumento na oferta deverá ser provido principalmente por Marrocos, China e Arábia Saudita (FAO, 2015).

Em se tratando do maior produtor mundial, a China lidera o ranking, seguida pelos Estados Unidos. No entanto, este cenário deve mudar devido aos grandes investimentos no setor de mineração no Marrocos, fato que em breve fará deste o maior produtor mundial de rocha fosfática (ROSEMARIN; EKANE, 2016).

Até o ano de 2019, trinta novas unidades para processamento de fosfato estão previstas para serem inauguradas, sendo que a China e o Marrocos serão responsáveis por receber metade destas unidades, e as demais plantas deverão ser abertas na Arábia Saudita, Brasil e Índia (HEFFER; PRUD'HOMME, 2015).

Quanto à situação das reservas brasileiras, avalia-se em aproximadamente 270 milhões de toneladas em reservas de P_2O_5 (USGS, 2015), estando as principais jazidas

concentradas no estado de Minas Gerais com 68 %, Goiás com 14 %, São Paulo com 6 % e demais estados com 12 % (IBRAM, 2012). Em termos de produção, no ano de 2013, o estado de Minas Gerais foi responsável por fornecer 49 % do fosfato nacional, seguido por Goiás (36 %), São Paulo (10 %), Bahia (4 %), e Tocantins (1 %) (DNPM, 2014). Sabe-se, no entanto que as reservas brasileiras correspondem a uma pequena fração do total das reservas quando comparado aos países na liderança do ranking mundial.

Diante das informações apresentadas, torna-se possível concluir que a escassez de P certamente será um grande desafio para a humanidade nas próximas décadas, sendo necessário o desenvolvimento de novas estratégias tecnológicas voltadas à produção de alimentos, que proporcionem o uso eficiente do P na agricultura, possibilitando uma maior longevidade das reservas globais, garantindo assim a segurança alimentar das gerações futuras bem como a estabilidade política e econômica das nações (CORDELL et al., 2009; COOPER et al., 2011; CORDELL; WHITE, 2015).

2.2. Fósforo na planta

Embora seja o segundo macronutriente menos exigido pelas plantas (EPSTEIN; BLOOM, 2006), o P exerce importante papel no metabolismo vegetal. Deste modo, nos mais diversos sistemas de cultivo, faz-se necessária a aplicação constante deste nutriente no solo, a fim de viabilizar a produção agrícola.

O P é encontrado em concentrações que variam de 0,1 a 1 % na matéria seca de tecidos vegetais (MARSCHNER, 2012), sendo estas quantidades, relativamente muito menores do que as quantidades de nitrogênio (N) e potássio (K) (RAIJ, 1991).

Sua presença na célula vegetal é necessária para muitos aspectos metabólicos, tais como, formação de fosfolípidos da membrana, formação e uso do ATP como fonte de energia, regulação dos processos celulares de fosforilação de metabolitos, estrutura de ácidos nucleicos, dentre outros (EPSTEIN; BLOOM, 2006; MARSCHNER, 2012; TAIZ; ZEIGER, 2013; HERNÁNDEZ; MUNNÉ-BOSCH, 2015). Além destes, as plantas também apresentam alguns processos metabólicos específicos (como a fotossíntese e a fotorrespiração), e as complexas relações entre fontes e drenos de fotoassimilados, que também dependem do P, o que torna ainda mais importante os estudos acerca dos efeitos da disponibilidade de P para a fisiologia vegetal (HERNÁNDEZ; MUNNÉ-BOSCH, 2015). O P também auxilia na formação e desenvolvimento das raízes, melhora a qualidade de diversos frutos e verduras e ainda, apresenta papel vital na formação das sementes, onde é encontrado principalmente na forma de fitatos, importante composto de reserva deste órgão (TAIZ; ZEIGER, 2013).

O P é absorvido pelas plantas na forma dos íons ortofosfato H_2PO_4^- e/ou HPO_4^{2-} . Sendo o pH do solo, o fator determinante para a predominância de uma das formas do íon na solução do solo (TISDALE et al., 1993; BARBER, 1995).

Dos mecanismos de contato íon- raiz envolvidos na movimentação do nutriente até a zona radicular destaca-se a difusão, que contribui em torno de 94 % de íons ortofosfato que é absorvido pela planta, seguido então pela interceptação radicular com 3,5 % e o fluxo de massa em 2,6 % (BARBER, 1962).

Uma vez presente na solução do solo, o ortofosfato é então rapidamente absorvido pelas raízes das plantas, mediante a um transportador do tipo simporte, e incorporado a uma diversidade de compostos orgânicos. Durante este processo, um dos principais pontos de entrada do fósforo nas rotas de assimilação ocorre durante a formação da adenosina trifosfato (ATP), molécula energética da célula (TAIZ, ZEIGER, 2013).

Altamente móvel quanto à redistribuição nos tecidos da planta, o P é rapidamente mobilizado dos tecidos velhos para os mais jovens ou em processo de formação. Sabe-se que até 60 % do P pode ser conduzido via floema a partir de aplicações foliares ou de folhas envelhecidas para os pontos de crescimento. Com isso, os sintomas característicos da deficiência de P apresentam-se primeiro nas partes basais das plantas onde se tem a predominância de tecidos maduros, desenvolvidos anteriormente ao quadro de deficiência (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Hernández e Munné-Bosch (2015) relatam que, quadros de deficiência acentuada de P podem levar a alterações no aparato fotossintético, redução da taxa de assimilação do CO_2 , modificações na regulação de genes relacionados à fotossíntese e fotoinibição do fotossistema II. Estas mudanças podem acarretar um estresse foto-oxidativo, que é caracterizado pelo aumento de espécies reativas de oxigênio nos cloroplastos e que em elevadas concentrações podem causar danos e lesões irreversíveis às células.

No entanto, diante destas situações, as plantas desenvolveram diversos mecanismos para amenizar os efeitos causados pela deficiência de P, dentre estes podemos citar: ativação de mecanismos antioxidantes nos cloroplastos, ativação da fotorrespiração, acúmulo de pigmentos como a antocianina em tecidos e alterações nas relações fonte/dreno. Associados, estes mecanismos ativam respostas simultâneas em vários níveis metabólicos para evitar os danos decorrentes do estresse oxidativo (HERNÁNDEZ; MUNNÉ-BOSCH, 2015).

Corroborando estas informações, Fan et al. (2016) afirmam que as plantas podem responder defensivamente a baixos níveis de P, modificando sua morfologia e vias

metabólicas através da expressão diferencial de genes responsivos à deficiência de fosfato, com o propósito de amenizar os danos no desenvolvimento e atividades celulares.

Contudo, os sintomas da deficiência de P na planta são caracterizados pela presença de caules delgados (mas não lenhosos), crescimento reduzido, má formação de tecidos, maturação retardada, as folhas apresentam-se com coloração verde escuro e a nervura central arroxeadada devido à produção de antocianina, podendo conter lesões necróticas que evoluem para morte das folhas mais velhas. Decorrente de diversas anomalias fisiológicas, a deficiência de P pode também promover a má formação do sistema radicular, prejudicando o desenvolvimento e produção da planta (BINGHAM, 1966; EPSTEIN; BLOOM, 2006; TAIZ; ZEIGER, 2013).

2.3. Fósforo no solo

A concentração média de P na crosta terrestre é de aproximadamente 0,12 % (FASSBENDER, 1978), podendo apresentar uma variação de 0,005 % a 0,15 % em sua quantidade total nas camadas superficiais do solo (TISDALE et al., 1993; HAVILIN et al., 2005).

No entanto, nos mais diversos tipos de solos, os teores totais de P podem variar de acordo com as características herdadas do material de origem, sendo possível observar baixas quantidades (pouco acima de zero) em solos com alto teor de areia, até valores na casa das 3000 mg kg⁻¹ em solos muito argilosos (FARDEAU, 1996; RAIJ, 2011).

Embora exista ampla magnitude de valores observados para P total nos solos, o P disponível é encontrado em quantidades restritas na solução, representando em muitos casos menos de 0,1 % do P total (RAIJ, 2011). Fardeau (1996) observou que especificamente em solos agrícolas a concentração de íons fosfato na solução podem variar de 0,002 a 2 mg L⁻¹.

Na solução do solo, o P encontra-se principalmente como íons ortofosfato primários H₂PO₄⁻ e secundários HPO₄²⁻, sendo o pH do meio o fator determinante para predominância de uma destas formas (TISDALE et al., 1993; BARBER, 1995; RAIJ, 2011). De modo geral, em solos relativamente ácidos (pH variando de 4,0 a 6,0) como a maioria dos encontrados no Brasil, tem-se o predomínio da forma iônica H₂PO₄⁻ (RAIJ, 2011).

Apresentando baixíssima mobilidade no solo, o P é capaz de deslocar-se por apenas poucos centímetros na solução, por meio do processo de difusão, principal forma de contato entre o íon-raiz deste nutriente. Barber (1995) e Malavolta (2006) relataram que a difusão é caracterizada pela movimentação de um elemento a curta distância dentro de uma fase aquosa (solução do solo) estacionária, a favor do gradiente de concentração, ou seja, de uma região

de maior concentração para outra de menor concentração, que no caso é a superfície da raiz, onde a absorção pela planta faz com que a concentração diminua.

O baixo teor de P na solução e a sua conseqüente baixa mobilidade no solo é resultado da interação do P com os componentes do solo. Na fração sólida do solo o P pode ser encontrado em ligações químicas com os metais cálcio (Ca), ferro (Fe) e alumínio (Al), sendo também identificado nas argilas silicatadas de baixa atividade e ainda adsorvido aos oxihidróxidos de ferro e alumínio. Além disto, o P também pode ser adsorvido na matéria orgânica por intermédio de pontes de cátions (PARFFIT, 1978; RAIJ, 2011).

Neste contexto, voltando-se à fertilidade do solo, três “compartimentos” são adotados para representar o P no solo, sendo eles: P na solução prontamente disponível às plantas, P lábil e P não lábil (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Como já relatado, o P na solução se apresenta em baixas concentrações, particularmente em solos intemperizados, devido à formação de compostos de baixa solubilidade, bem como, pela ocorrência de processos de adsorção específica do elemento nas partículas coloidais do solo. O P lábil encontra-se em equilíbrio com P da solução, estando representado por formas metaestáveis de compostos de P ainda mal formados. O P não lábil representa a maior parte do P inorgânico no solo, estando representado por compostos insolúveis (LARSEN, 1967; NOVAIS; SMYTH, 1999; RAIJ, 2011).

Os solos das regiões tropicais geralmente apresentam baixo teor de P em decorrência da escassez natural deste nutriente e da predominância dos processos de fixação do P no solo, tornando-o indisponível às culturas. Estes processos se intensificam em condições de intemperismo avançado, fato que provoca mudanças nas características dos solos tornando-os mais eletropositivos e com maior capacidade adsorver ânions como o fosfato (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Como abordado neste texto, a fixação do P no solo engloba os processos de adsorção específica e precipitação. No processo de adsorção específica do P no solo ocorre inicialmente uma rápida atração eletrostática (BARROW, 1985), seguida por reações mais lentas com troca de ligantes de grupamentos OH e OH_2^+ superficiais dos oxihidróxidos por fosfato da solução, caracterizando um complexo de superfície com ligações químicas de alta covalência (PARFFIT, 1978). Tais ligações de alta covalência são denominadas de complexo de esfera interna, onde o íon ou molécula liga-se diretamente nos grupamentos OH e OH_2^+ das superfícies adsorventes, sem a interposição de moléculas de água (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989). Desta forma, o fosfato pode ligar-se em formas monodentadas, estando apenas um oxigênio do fosfato ligado ao metal, bidentadas onde dois

oxigênios do fosfato encontram-se ligados ao metal e por fim binucleadas, que é caracterizada pela ligação de dois oxigênios do fosfato a dois átomos do metal (PRASAD; POWER, 1997).

Estas reações do fosfato com os oxihidróxidos vão evoluindo lentamente, tendendo à especificidade e formação dos compostos binucleados ou ainda culminando com a penetração do fosfato nas imperfeições do cristal (BARROW, 1985; NOVAIS; SMYTH, 1999; BARROW, 2015).

Já o processo de precipitação é caracterizado quando o P reage com formas iônicas de Fe, Al e Ca. Em condições de solos ácidos, observam-se reações do P com formas iônicas de Al e Fe, enquanto em solos neutros ou calcários, tem-se a ocorrência da formação dos precipitados com Ca. Em ambos os casos, os resultados destas reações são compostos de composição definida e de baixa solubilidade (PARFITT, 1978; SAMPLE et al., 1980).

Diante da dinamicidade das reações citadas, em muitos casos, o solo pode se tornar um forte dreno de P, exigindo a aplicação de altas doses de fertilizantes fosfatados para obtenção de produtividades satisfatórias (NOVAIS; SMYTH, 1999). No entanto, quando fosfatos solúveis são aplicados ao solo, sua rápida dissolução torna o P propenso aos processos de adsorção específica e precipitação, sendo desta forma, amplamente conhecida à necessidade de frequentes aplicações de P via fertilizantes nos ciclos de cultivo. Isso se deve ao fato de que na maioria dos casos o P remanescente no solo, oriundo de aplicações anteriores, encontra-se em formas adsorvidas, podendo não estar prontamente disponíveis às plantas. Analisando o comportamento do P no solo, é possível compreender a decorrente causa do baixo aproveitamento do P observados nas adubações.

Ressaltando a magnitude de efeitos causados na eficiência das adubações fosfatadas, Nahas (1991) relatou que cerca de 70 a 95 % do P solúvel aplicado nos solos, são adsorvidos e apenas 5 a 30 % ficam disponíveis às plantas. Neptune et al. (1979), por intermédio da técnica isotópica com ^{32}P , verificaram que o aproveitamento do P aplicado via superfosfato triplo pela cultura do feijoeiro não atingiu 10 %, evidenciando assim que grande parte do P foi adsorvido ou transformado em compostos de baixa solubilidade no solo.

2.4. Novas tecnologias para fertilizantes fosfatados

A indústria de fertilizantes investe constantemente em pesquisas que visam o desenvolvimento de novas tecnologias, com o intuito de melhorar a eficiência agrônômica atualmente alcançada com as fontes tradicionais. Neste contexto, McLaughlin et al. (2011) relatam que existem diversas patentes depositadas e muito na literatura científica sobre

produtos e tecnologias recentemente desenvolvidas com o propósito de aumentar a eficiência dos fertilizantes fosfatados e/ou disponibilizar parte do P já eventualmente fixado no solo.

Dentre tais inovações, têm-se à disposição os chamados fertilizantes tecnológicos, os quais são caracterizados principalmente pela liberação lenta e/ou controlada. Esta tecnologia possibilita retardar ou liberar de maneira controlada o nutriente a partir do grânulo de fertilizante através da adição de revestimento protetor insolúvel em água, semipermeável (poroso), ou permeável que são designados como polímeros, agindo no controle da penetração de água no grânulo e alterando a taxa de dissolução do nutriente para o solo (TRENKEL, 2010).

Pauly et al. (2002), estudando a aplicação do fosfato monoamônio (MAP) e fosfato diamônio (DAP) revestidos com polímeros sintéticos que retardam a taxa de liberação de P a partir dos grânulos de fertilizantes, observaram que na cevada, o polímero de liberação lenta aumentou significativamente a absorção de P fornecido pelo MAP sobre os três solos utilizados para o cultivo (siltoso, arenoso e argiloso), no entanto, o polímero utilizado não aumentou a eficiência do DAP em fornecer o P para a cultura. Da mesma forma, Chagas et al. (2015), avaliando a aplicação do MAP com e sem adição de polímero em cinco diferentes doses de P na cultura da alface sob um Latossolo Vermelho argiloso, observaram que o revestimento do MAP com polímeros aumentou a eficiência da adubação fosfatada, melhorando ainda o uso do fósforo residual no solo.

Dentro desta filosofia inovadora, existem também os fertilizantes cujo P apresenta-se complexado com substâncias orgânicas através de pontes metálicas os chamados fertilizantes orgânico-complexados que apresentam solubilidade reduzida, mas que, quando aplicados ao solo, o P é liberado pela ação de ácidos orgânicos exsudados pelo sistema radicular das plantas (GARCIA-MINA, 2006; ERRO et al., 2011; 2012). Estas tecnologias visam, sobretudo, controlar as reações na interface solo/grânulo do fertilizante de modo a promover melhor aproveitamento das fontes solúveis aplicadas ao solo.

Neste contexto, McLaughlin et al. (2011) citam algumas das tecnologias patenteadas, que incluem a utilização de polímeros para complexar cátions que poderiam precipitar o P após sua aplicação no solo bem como o uso de compostos de silício para reduzir a fixação de P aplicado.

Segundo estes propósitos, diversos estudos apontam o potencial do silício (Si) em promover melhorias no aproveitamento do P aplicado, não somente pelo potencial de correção do pH do solo que a maioria das fontes silicatadas possui, mas também, pelo fornecimento de ânions na forma de silicato que possuem potencial para competir/saturar os sítios de adsorção

de fosfato no solo (FASSBENDER, 1978; LOPES; GUILHERME, 2000; OWINO-GERROH; GASCHO, 2004; VALLE et al., 2016).

2.5. Interação P x Si

Vários estudos têm apontado que a adubação silicatada promove melhorias na disponibilidade do P no solo. Dentre outras variáveis, este fato tem sido atribuído à competição por sítios de adsorção no solo entre os ânions fosfato e silicato (OBIHARA; RUSSEL, 1972; FASSBENDER, 1978; LOPES; GUILHERME, 2000; POZZA et al., 2007; TAVAKKOLI et al., 2011; VALLE et al., 2016).

Uma das evidências que suportam tais resultados é que o Si na forma de H_4SiO_4 poder ser retido no solo de modo semelhante a outros íons como o fosfato, por exemplo, (HINGSTON et al., 1972). A similaridade química entre as moléculas de P e Si ($H_2PO_4^-$ e $H_3SiO_4^-$) pode ser a principal forma de explicar a ocorrência desta interação no solo (HINGSTON et al., 1972).

Corroborando o exposto, Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) afirmaram que o aumento da disponibilidade do P no solo ocorre porque, o íon silicato desloca-o dos sítios de adsorção (ou os ocupa preferencialmente) ou porque diminuí a atividade de íons Al^{3+} na solução do solo, evitando que estes precipitem com $H_2PO_4^-$.

Carvalho et al. (2000) estudaram as interações (P x Si) nas camadas superficiais de dois solos do cerrado, sendo um Latossolo Vermelho-Escuro e um Cambissolo, utilizando diferentes doses de Si em mudas de *Eucalyptus grandis*, os autores verificaram que foi possível dessorver o P do solo pela ação do silício aplicado na forma de silicato, sendo este efeito mais expressivo no Cambissolo (menos intemperizado) do que no Latossolo.

Prado e Fernandes (2001) avaliando o efeito da escória de siderurgia e do calcário na concentração do P disponível em um Latossolo Vermelho-Amarelo, cultivado com cana-de-açúcar, observaram um efeito linear da escória de siderurgia no P disponível no solo, não observando tal relação quando se aplicou apenas calcário. Estes resultados sugerem que o efeito positivo da escória de siderurgia se deve ao silicato, que foi capaz de agir na saturação de sítios de adsorção de P no solo.

Pozza et al. (2007) avaliando a adsorção de P e Si em gibbsita, aplicaram quantidades iguais de cada elemento e observaram que pode ocorrer competição pelos sítios de adsorção no mineral, ocasionando a dessorção de silicato por fosfato e vice e versa.

Tavakkoli et al. (2011) em estudo isolando o fator pH do solo, notaram maior acúmulo de P pelas culturas do arroz previamente fertilizadas com silicatos, os autores

atribuíram este resultado à interação entre o Si e o P no solo, mesmo em condições onde o efeito corretivo de acidez do silicato foi controlado.

Utilizando a técnica isotópica com ^{32}P , Fher (2014) avaliou a influência do Si na utilização do P por plantas de arroz mediante aplicação da wollastonita e do filossilicato. O autor concluiu que o filossilicato promoveu maiores ganhos na massa seca e acúmulo de P na parte aérea das plantas, sendo este fato atribuído à interação do Si fornecido pelo filossilicato com o P do solo, tornando-o mais disponível para absorção das plantas.

Sandim et al. (2014) avaliando a influência da silicatagem em relação a calagem na dessorção de P no solo, por meio de dois extratores (Mehlich-1 e Resina), observaram resultados que apontam efeitos positivos da interação P x Si nos teores de P no solo e nos parâmetros avaliados nas plantas.

Em decorrência desta interação P x Si no solo, diversas pesquisas vêm buscando compreender os mecanismos envolvidos neste processo, de modo a criar estratégias que promovam a melhoria da eficiência das adubações fosfatadas.

2.6. Uso de isótopos radioativos do P como traçadores em estudos de fertilidade do solo e nutrição de plantas

Isótopos são átomos associados ao mesmo elemento da tabela periódica, cujo núcleo contém o mesmo número de prótons, porém, com diferente número de nêutrons, e consequentemente, diferente massa atômica. Obrigatoriamente as propriedades químicas dos isótopos são as mesmas, pois representam átomos de um mesmo elemento. Entretanto, estes elementos podem ser classificados como estáveis, por apresentarem configurações nucleares estáveis, isto é, não alteram a massa ao longo da sua existência, e radioativos, que decaem (mudam suas massas) por emissão de energia ou partículas subatômicas (MARTINELLI et al., 2009).

Seu uso tem sido aplicado amplamente em estudos que envolvam a agricultura, destacando-se com grande importância para a compreensão dos mecanismos e trajetória de alguns nutrientes no sistema solo-planta, dando suporte ao estudo da eficiência de fertilizantes, na avaliação de fontes alternativas de nutrientes e demais estudos relacionados à fertilidade dos solos e nutrição de plantas (HARDARSON, 1990; ZAPATA; HERA, 1997; SINGH et al., 2013) bem como em questões ambientais (MARTINELLI et al., 2009).

Neste contexto, o uso da técnica de diluição isotópica com radionuclídeos do P tem sido fundamental para a compreensão do comportamento deste nutriente no sistema solo-planta. A técnica é muito vantajosa, pois apresenta alta sensibilidade na detecção de teores do

nutriente, na casa de 10^{-15} gramas, possibilitando quantificar o P fornecido exclusivamente pelo fertilizante adicionado, separando-o na planta do P fornecido pelo solo (MURAOKA, 1991). O resultado desta quantificação pode ser alcançado por meio da utilização de cálculos matemáticos o que possibilita a obtenção do percentual de P proveniente do fertilizante e do P proveniente do solo (FARDEAU; GUIRAUD; MATROL, 1996).

Na natureza praticamente todo P é encontrado na forma de ^{31}P , portanto seus isótopos são sintetizados para fins de pesquisas e uso na medicina nuclear. O principal fator que viabiliza o uso destes é o curto tempo de meia vida (25,3 dias para o ^{33}P e 14,3 dias para o ^{32}P). Além da meia-vida, ambos radionuclídeos diferem-se na energia liberada durante o decaimento. Tanto o ^{33}P quanto o ^{32}P são emissores de partículas β^- , no entanto o ^{33}P é de baixa energia (0,249 Mev), o que torna necessário o uso de solução cintiladora para a detecção no cintilador líquido. Já o ^{32}P é de alta energia (1,72 Mev) e, portanto, a detecção ocorre por efeito Cerenkov, dispensando a presença de solução cintiladora (VOSE, 1980).

Em experimentos com maior tempo de duração, o uso do ^{33}P pode ser interessante, no entanto, observam-se entraves como o alto custo e burocracias para importação, bem como, a geração de resíduos altamente contaminantes decorrentes do uso da solução cintiladora. Por este fato, no Brasil, quase todos os estudos do P no solo e planta são conduzidos com uso do ^{32}P , reduzindo significativamente os custos da pesquisa.

Há décadas, diversos pesquisadores no Brasil e no mundo, veem utilizando a técnica de diluição isotópica como ferramenta diferencial e eficaz no estudo da fertilidade do solo e nutrição de plantas, por meio do uso do ^{32}P (NEPTUNE; MURAOKA; SFTEWART, 1979; FARDEAU; MOREL; JAHIEL, 1988; MOREL; FARDEAU, 1990; MURAOKA, 1991; CHIEN et al., 1996; FERNANDES; MURAOKA, 2002; ALVAREZ V et al., 2002; LUCA et al., 2002; FRANZINI; MURAOKA; MENDES, 2009; FRANZINI et al., 2009; CIMPEANU; BARNA; ILIESCU, 2014) e do ^{33}P (NANZER et al., 2014). Além destes, estudos sofisticados realizados por meio de incubação em placa de petri, também possibilitaram a avaliação da difusão e labilidade do P no solo através do uso da técnica isotópica (LOMBI et al., 2004a; 2004b; 2006).

Logo, o uso dos radionuclídeos do P é uma técnica de eficácia comprovada, capaz de auxiliar diretamente na compreensão da dinâmica interação do P no sistema solo-planta e auxiliar na determinação da eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados.

3. HIPÓTESE

As hipóteses testadas foram:

(i) A presença de Si no grânulo de fertilizante fosfatado altera o pH nas vizinhanças do grânulo bem como melhora a difusão e disponibilidade do P no solo;

(ii) Os fertilizantes ora propostos, contendo Si no grânulo e o fertilizante tecnológico superfosfato orgânico-complexado (SOC) melhoram a disponibilidade e o aproveitamento P pelas plantas de milho.

4. OBJETIVOS

Objetivou-se com este estudo:

- (i) Construir um dispositivo para granulação dos fertilizantes contendo P e Si em diferentes proporções;
- (ii) Avaliar a difusão e disponibilidade do P a partir dos fertilizantes produzidos em dois solos, com diferentes características texturais e capacidade de adsorção de P;
- (iii) Avaliar a eficiência agrônômica e o aproveitamento do P dos fertilizantes propostos em relação ao fertilizante tecnológico disponível no mercado SOC e o fosfato monoamônio (MAP), por meio da técnica isotópica com ^{32}P .

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Informações Gerais

Foram conduzidos quatro experimentos no Laboratório de Fertilidade do Solo do Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, situado no campus Luiz de Queiroz na cidade de Piracicaba, Estado de São Paulo.

5.1.1 Desenvolvimento e construção do granulador de bancada tipo prato-rotativo

A primeira etapa do projeto consistiu no desenvolvimento e construção de um granulador tipo prato-rotativo para produção dos protótipos de fertilizantes avaliados. Essa etapa foi realizada com o intuito de, reduzir custos da pesquisa e simular em escala laboratorial o processo de granulação dos fertilizantes produzidos na indústria.

O dispositivo foi construído com 85 % de materiais reutilizados, originados de sucata de automóveis, eletroeletrônicos, retalhos de ferragens e demais materiais que muitas das vezes são descartados de maneira inadequada no meio ambiente.

Dotado de um prato-rotativo para granulação, o dispositivo conta com um sistema eletromecânico de resposta rápida, que permite maior amplitude e agilidade na escolha do ângulo de serviço do prato-rotativo durante as etapas da granulação. Abaixo as Figuras 1, 2 e 3 apresentam os desenhos industriais, projetados para a construção do granulador.

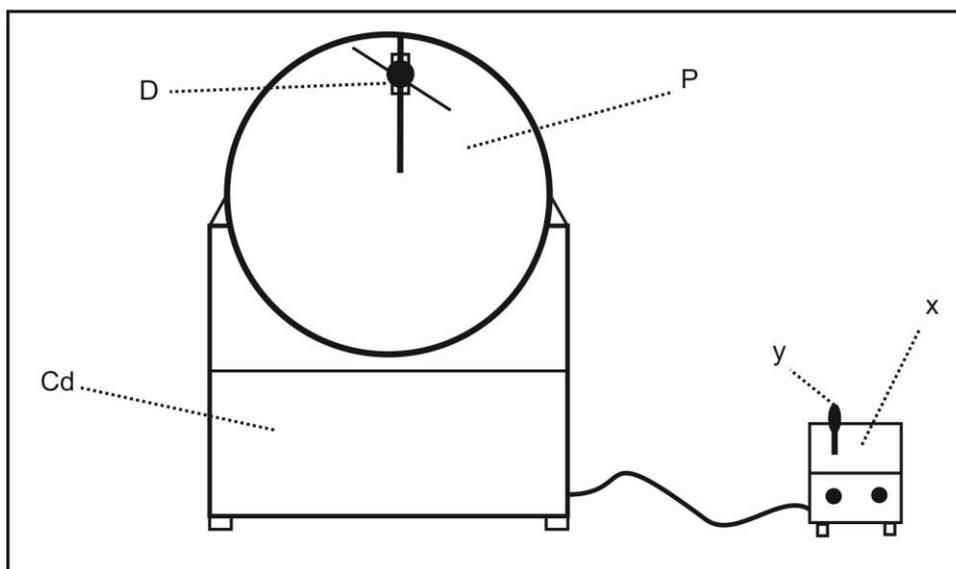


Figura 1 - Desenho industrial contemplando a vista frontal do dispositivo onde: (P) prato-rotativo de granulação; (D) defletor multidirecional; (x) painel de controle; (y) controle de angulação; (Cd) carenagem frontal.

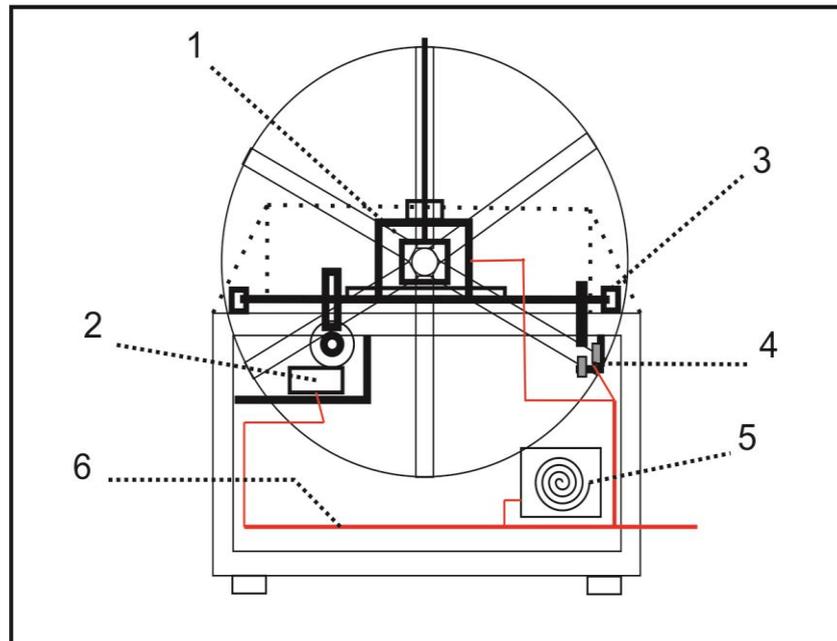


Figura 2 - Vista em perspectiva interna do dispositivo apresentando as designações dos componentes principais: (1) conjunto moto-redutor principal; (2) conjunto moto redutor de angulação; (3) mancal embuchado com teflon; (4) limitadores de inclinação; (5) cooler de refrigeração; (6) sistema de condutores elétricos.

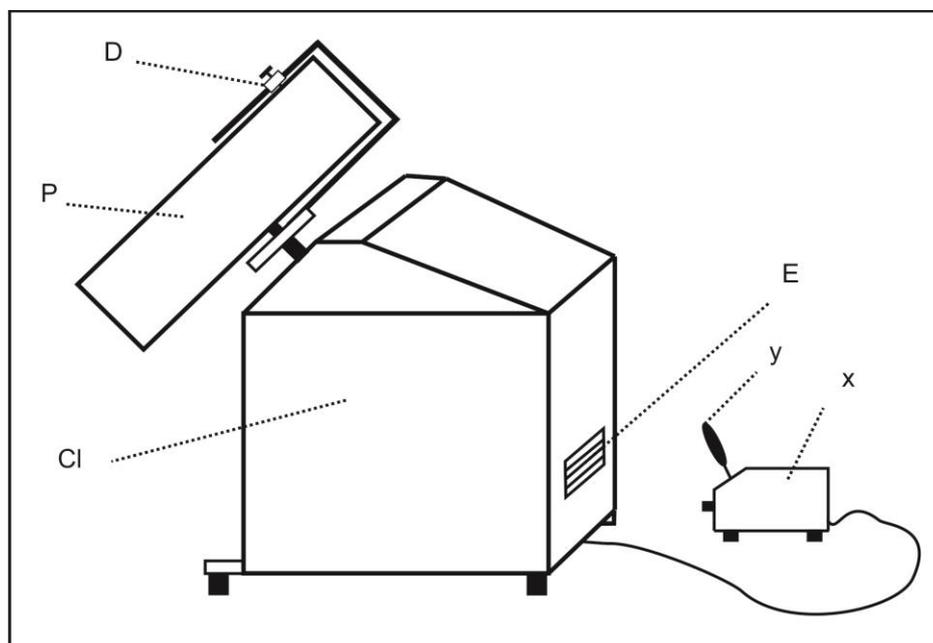


Figura 3 - Vista lateral do dispositivo onde: (P) borda lateral do prato-rotativo; (D) regulagem do defletor, (E) entrada de ar para o sistema de refrigeração interna; (Cl) carenagem lateral; (y) alavanca do comando eletromecânico da angulação; (X) central de comando e transformador de tensão 110-12 volts.

Após a construção, o dispositivo (Figura 4) foi testado e instalado no Laboratório de Fertilidade do Solo do CENA-USP, desde então, vem sendo utilizado para granulação de fertilizantes, dando suporte a vários projetos de pesquisa da instituição.



Figura 4 - Granulador de prato-rotativo.

A Tabela 1 apresenta os dados técnicos do granulador tipo prato-rotativo construído e utilizado na produção dos fertilizantes avaliados neste estudo.

Tabela 1 - Dados técnicos do granulador tipo prato-rotativo

Especificações técnicas gerais	
Tipo/modelo	Granulador/pelotizador de prato-rotativo
Classe	Bancada
Aplicação	Homogeneização/granulação/recobrimento
Tensão (V)	127
Potência (Cv)	0,25
Rotação nominal do prato (RPM)	45
Dimensões do prato ¹ (cm)	40 Ø x 10 altura
Amplitude de angulação (graus °)	7 a 90
Sistema de angulação	Eletromecânico de alta sensibilidade/resposta
Rendimento médio ² (g h ⁻¹)	450
Eficiência média de granulação ² (%)	60 a 90

¹ Aceita expansão do prato rotativo até 60 Ø x 15 altura.

² Resultado médio obtido em testes constituídos de cinco repetições, utilizando-se para granulação fontes como Superfosfato simples, Superfosfato triplo ou Fosfato monoamônio. Portanto, estes valores podem variar de acordo com as características do material a ser granulado, agente aglutinante utilizado, bem como, o treinamento do operador.

É importante ressaltar que o dispositivo ora desenvolvido, possui como principal diferencial o sistema eletromecânico de angulação que visa facilitar o manuseio, além de conferir maior segurança e eficiência ao processo de granulação e/ou recobrimento de fertilizantes.

5.1.2. Produção dos fertilizantes

Para a produção dos fertilizantes foi utilizado como fonte de P o MAP comercial granulado, devido ao fato deste conter elevado teor de P, o que permitiu alcançar alta concentração deste nutriente nos fertilizantes produzidos. Como fonte de Si utilizou-se o filossilicato, um fertilizante comercial de nome MICROTON[®], caracterizado por não alterar o pH do solo (GODOY et al., 2009) e conter 26 % de Si (KORNDÖRFER; PEREIRA; NOLLA, 2004), 1,9 % CaO, 2 % MgO, 2,2 % Fe₂O₃, 2,1 % Na₂O e 1,4 % de K₂O segundo análise fornecida pelo fabricante.

Para dar início ao processo de produção dos fertilizantes, a fonte de P foi moída e peneirada em malha de 250 mesh, obtendo-se partículas finas para o processo de granulação. A fonte de Si encontrava-se em pó e foi apenas peneirada em malha 250 mesh, visando a padronização das partículas de ambas às fontes utilizadas. Para obtenção dos grânulos com proporção desejada, foi considerado o teor total destes elementos em cada uma das fontes (MAP e Filossilicato) de modo a estabelecer relações P-Si de 1-9, 2-8, 3-7, 4-6, 5-5, 6-4, 7-3, 8-2, 9-1 somando num total de nove diferentes fertilizantes.

No início do processo de granulação, a quantidade exata de cada uma das fontes foi pesada, previamente misturada e cerca de 1/3 desta mistura colocada no granulador. Após esta etapa, iniciou-se a aplicação do líquido ligante, a base de dextrina (ALCARDE, 2009) a 5 % na água deionizada sobre a mistura no dispositivo, iniciando assim o processo de aglomeração de partículas e formação dos grânulos. À medida que ocorreu a formação de pequenos grânulos, adicionou-se gradualmente o restante da mistura reservada concomitante a aplicação do líquido ligante, até que os grânulos atingissem o diâmetro estabelecido. No decorrer da fase de granulação, foi necessária a mudança constante da angulação do prato-rotativo de modo a promover a agregação e consolidação das partículas no grânulo, conferindo assim maior dureza e esfericidade ao produto final (Figura 5). Após o término do processo, os grânulos foram secos em estufa com circulação de ar a 45 °C até peso constante e posteriormente peneirados para seleção de grânulos de 1 a 4 mm.

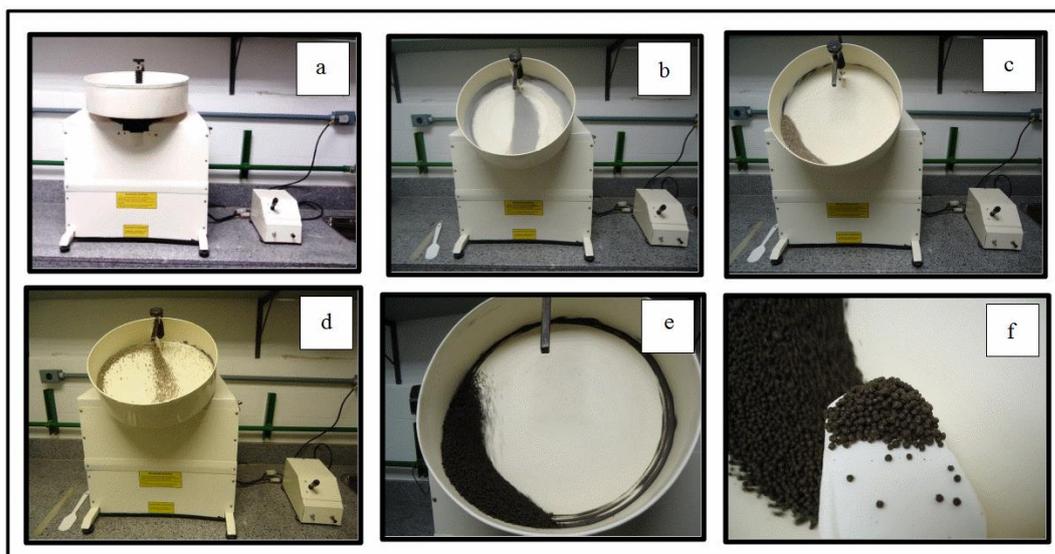


Figura 5 - Etapas do processo de granulação dos fertilizantes. Onde: [a] posicionamento do prato de granulação para adição da mistura em pó a ser granulada; [b] angulação para homogeneização da mistura e posterior aplicação do líquido ligante; [c] início do processo de aglomeração de partículas e formação dos grânulos. [d] aumento do diâmetro dos grânulos, [e] fase final de acabamento dos grânulos já no diâmetro desejado; [f] final do processo, produto pronto para ser submetido à secagem em estufa de circulação de ar.

A caracterização dos fertilizantes produzidos foi realizada segundo a metodologia oficial de análises de fertilizantes, corretivos, inoculantes, substratos e contaminantes do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2007) e os dados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização dos fertilizantes

Fertilizante ¹	% P ₂ O ₅		Si	N	Ca	Mg
	Total	CNA+H ₂ O				
Proporção P - Si	%					
1-9	5,4	4,8	22,0	1,1	1,20	1,07
2-8	11,3	10,7	19,8	2,4	1,05	0,94
3-7	16,1	15,7	17,0	3,4	0,91	0,81
4-6	21,1	20,7	13,9	4,4	0,77	0,68
5-5	25,5	25,1	11,0	5,4	0,63	0,56
6-4	30,4	30,2	8,9	6,4	0,5	0,44
7-3	35,1	34,5	6,3	7,4	0,37	0,33
8-2	39,7	38,7	4,4	8,4	0,24	0,22
9-1	43,8	43,3	2,0	9,2	0,12	0,10
(MAP)	52,3	51,2	0	11,0	0	0

¹ Com exceção do MAP (produto comercial), todos os demais fertilizantes foram produzidos exclusivamente para este estudo, portanto não se tratam de produtos comerciais ou que se enquadrem à legislação vigente.

5.1.3. Caracterização dos solos utilizados

Os solos foram coletados da camada superficial de 0 a 20 cm no município de Piracicaba, Estado de São Paulo, sendo classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd) (EMBRAPA, 2013). Retirou-se amostras de terra que foram secas ao ar, peneiradas em malha de 2 mm e determinadas as propriedades químicas (Tabela 3) de acordo com a metodologia proposta por Raij et al. (2001). A análise granulométrica foi realizada segundo Camargo et al. (1986), apresentando respectivamente valores de 760, 21, 219 g kg⁻¹ para o LVAd e 290, 163, 547 g kg⁻¹ para LVd referente aos teores de areia, silte e argila, sendo classificados como de textura média e textura argilosa, respectivamente.

Tabela 3 - Resultado da análise química dos solos antes de efetuada a calagem

Solo	pH	MO	P	S	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	T	V	m
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³					mmol _c dm ⁻³					%
LVA	4,2	37	6	4	0,5	11	4	3	47	16	63	25	16
LV	4,0	23	3	28	0,5	8	2	9	64	11	75	14	46
Micronutrientes													
Solo	B	Cu	Fe	Mn	Zn								
	mg dm ⁻³												
LVA	0,49	0,8	109	6	2,2								
LV	0,26	0,7	29	5,2	1,2								

Para melhor caracterização, os solos foram submetidos a uma ampla curva de adsorção de P, seguindo procedimentos descritos por Graetz e Nair (2000), de modo a identificar a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) através da isoterma de Langmuir (Figura 6) apresentando valores para o LVAd e LVd de 660 mg kg⁻¹ e 1495 mg kg⁻¹, respectivamente.

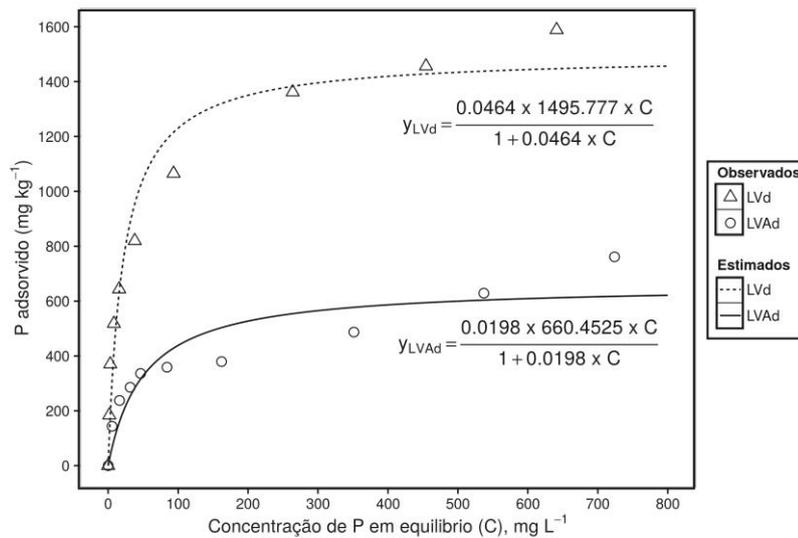


Figura 6 - Representação gráfica da CMAP do LVAd e do LVd, por meio do ajuste da curva de adsorção à equação da Isoterma de Langmuir.

A fração de argila dos solos foi caracterizada por difração de raio-x (Figura 7) realizada no laboratório do Núcleo de Pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera, da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (NUPEGEL-ESALQ/USP). Para geração dos difratogramas foi utilizado um aparelho Philips, modelo PW-1877, com radiação $CuK\alpha$ (0,154 nm) e intervalo de análise de 3 a 45° (2 θ), o qual encobre toda a família de planos desejada dos minerais de argila. O tempo foi de 1 segundo por passo e passo de 0,02° (2 θ).

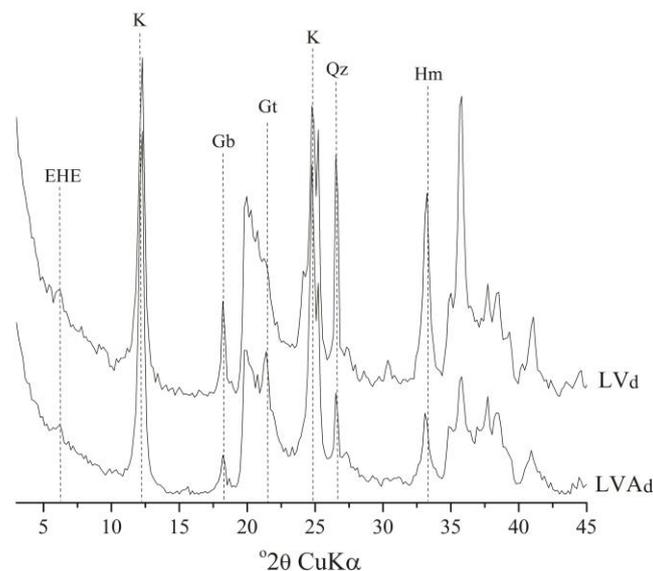


Figura 7 - Difratograma da fração argila pulverizada, para o LVAd e LVd. Onde: Caulinita (K); Gibbsita (Gb); Goethita (Gt); Hematita (Hm); Quartzo (Qz); Esmeclita com hidróxido entre camadas (EHE).

5.2. Experimento 1 - Estudo da difusão e disponibilidade do P por intermédio da incubação dos fertilizantes em placa de petri em Latossolos com textura e capacidade de adsorção de P contrastantes

Foram conduzidos dois experimentos em delineamento inteiramente casualizado, compostos por 11 tratamentos com cinco repetições cada (Tabela 4).

Tabela 4 - Descrição dos tratamentos

Tratamento	Descrição ¹	Sigla
1	Relação P-Si no grânulo = 1-9	1-9
2	Relação P-Si no grânulo = 2-8	2-8
3	Relação P-Si no grânulo = 3-7	3-7
4	Relação P-Si no grânulo = 4-6	4-6
5	Relação P-Si no grânulo = 5-5	5-5
6	Relação P-Si no grânulo = 6-4	6-4
7	Relação P-Si no grânulo = 7-3	7-3
8	Relação P-Si no grânulo = 8-2	8-2
9	Relação P-Si no grânulo = 9-1	9-1
10	Fertilizante fosfatado (comercial)	MAP
11	Sem adição de P	C

¹ Os fertilizantes contendo as proporções de P e Si no grânulo foram produzidos exclusivamente para este estudo, não se tratando, portanto de um produto comercial ou que se enquadre na legislação vigente.

5.2.1. Correção do solo

Após a interpretação dos resultados das análises químicas, o pH dos solos foram corrigidos pelo método da saturação por bases, visando elevá-la à 70 %. Para tal, foi aplicado carbonato de cálcio (p.a) e os solos foram incubados por um período de 30 dias na umidade de 70 % da capacidade máxima de retenção de água (CMRA). Transcorrido este período, foram retiradas amostras de solo para verificar a evolução do pH, que apresentou valor de 5,5 (CaCl_2 0,01 mol L⁻¹) (RAIJ et al., 2001) para ambos solos.

Para quantificar a CMRA, foram pesados 50 g da amostra de solo e posteriormente depositadas em um funil de plástico previamente revestido com papel de filtro (Whatman[®] N°42) acoplado sobre frascos de vidro com capacidade de 100 ml. Em seguida, foram adicionados 50 ml de água deionizada e os funis foram recobertos com filme de PVC com objetivo de evitar perda de água por evaporação, permanecendo nesta condição por vinte e quatro horas. Repetiu-se o procedimento sem a amostra de solo, a fim de descontar o volume de água retido apenas no filtro de papel. Ao término desse período, a água percolada de cada

conjunto foi pesada de modo a obter seu volume, possibilitando assim, o cálculo da CMRA do solo. Durante o período de incubação nas placas de petri, adotou-se a umidade do solo em 70 % da sua CMRA.

5.2.2. Montagem das placas de petri

Para avaliar a difusão do P a partir dos grânulos de fertilizantes foi realizado um experimento de incubação em placas de petri com dimensões de 86 mm de diâmetro por 10 mm de altura, baseando-se na metodologia descrita por Lombi et al. (2004a; 2004b) e Silva (2013).

Visando aproximar a densidade de ambos os solos e promover uma melhor acomodação destes no interior da placa de petri foi aplicado água deionizada até o umedecimento parcial e alcance da densidade de $1,25 \text{ g cm}^{-3}$. Em sequência, 85 g de solo úmido foram adicionados em cada placa de petri, que depois de acomodado recebeu a quantidade de água necessária para elevar a umidade a 70 % da CMRA, com auxílio de uma seringa. Posteriormente, as placas foram fechadas, envoltas em filme de PVC, recobertas com papel alumínio e incubadas em BOD por 24 horas em temperatura a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Este procedimento assegurou que a umidade permanecesse distribuída por igual em todo o solo da placa, favorecendo a movimentação do P exclusivamente pelo processo de difusão.

Após o período de pré-incubação, foram adicionados os grânulos dos diferentes fertilizantes, no centro de cada uma das placas, em posicionamento equidistante entre a base e a superfície da tampa. Todas as placas de petri, exceto o tratamento controle, receberam 10 mg P, porém, devido o fato dos fertilizantes conterem diferentes concentrações deste nutriente, foi necessário selecionar grânulos cuja massa era suficiente para atingir a quantidade de P necessária (Figura 8). Não foi necessário balancear o nitrogênio (N), pois este já se encontrava equilibrado junto as 10 mg P adicionados, isto se deve ao fato de que todos os fertilizantes foram produzidos a partir do MAP ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) mantendo a mesma relação P-N aplicado em todos os tratamentos, exceto no controle.

Ao final desta etapa, as placas de petri foram envoltas separadamente em filme de PVC, empilhadas em conjuntos de dez placas e estes foram envoltos em papel alumínio, visando evitar a perda de água e interferências do meio externo, e foram levadas para incubação na BOD sob temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ por cinco semanas (Figura 8). Justifica-se a escolha deste intervalo de incubação com base em Williams (1948), que afirmou que este

período coincidiu com o estágio de maior demanda fisiológica por P pela maioria das gramíneas, para que as mesmas possam expressar seu máximo potencial produtivo.

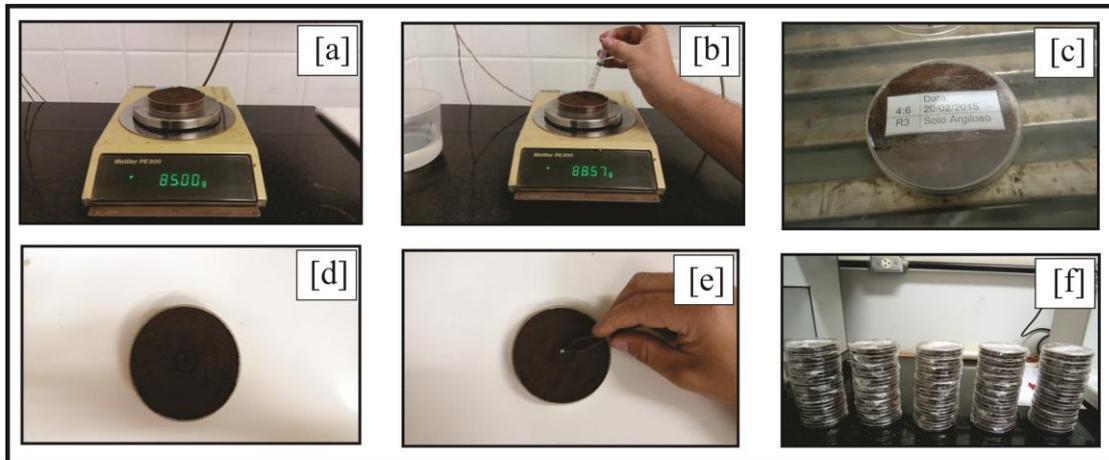


Figura 8 - Detalhes do processo de montagem do experimento em placas de petri, onde: [a] pesagem do solo na placa de petri; [b] adição de água; [c] identificação e vedação das placas de petri com filme de PVC para serem pré-incubadas por um período de 24 h; [d] demarcação do ponto de aplicação dos grânulos de fertilizante; [e] adição do fertilizante; [f] placas de petri fechadas e vedadas com filme de PVC para então serem envoltas com papel alumínio e levadas para incubação na BOD por cinco semanas.

Ao término do período de incubação, as placas foram abertas e amostras de solo retiradas no formato de anéis concêntricos a partir do centro (Figura 9). Foram confeccionados os anéis para facilitar a retirada das amostras, ajustados ao diâmetro de 15,5 mm, 27 mm, 51 mm e 86 mm para a 1^a, 2^a, 3^a e 4^a seções, respectivamente (Figura 10). As amostras retiradas foram secas em estufa à 40 °C por cinco dias, pesadas, homogêneas e o solo submetido às análises químicas.

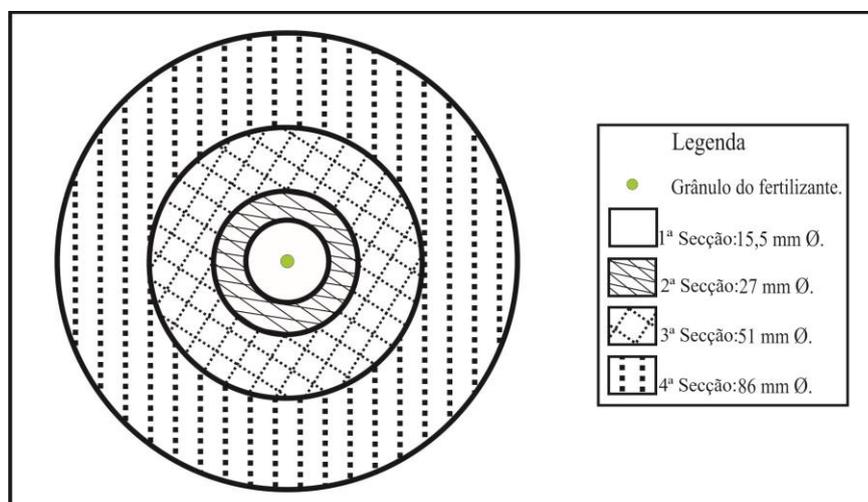


Figura 9 - Representação gráfica do posicionamento e diâmetro das seções na placa de petri.

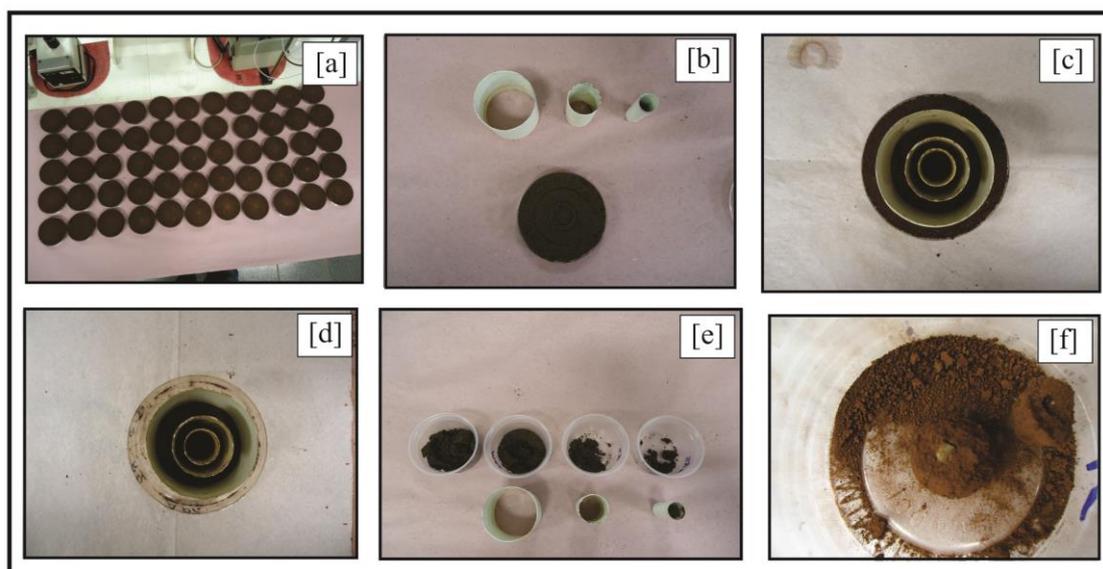


Figura 10 - Detalhes do processo de desmontagem do experimento em placas de petri, onde: [a] placas de petri abertas sobre a bancada; [b] demarcação e detalhes dos anéis amostradores; [c] posicionamento dos anéis sobre as placas; [d] retirada das seções, iniciando-se de fora para dentro de modo a evitar contaminações; [e] amostras armazenadas em recipiente de plástico e prontas para secagem à 40 °C; [f] detalhe do grânulo de fertilizante na primeira secção.

5.2.3. Avaliações

As amostras de solo retiradas em cada uma das seções circulares foram submetidas às seguintes análises químicas: pH em água (relação 1:10), P-disponível por resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001) e P-total pelo método de extração com água régia (McGRATH; CUNLIFFE, 1985).

Devido à pequena quantidade de solo nas seções centrais da placa de petri, para a determinação do P-disponível (Resina) foi necessário realizar uma adaptação ao método proposto por Raji et al. (2001), onde foi utilizado apenas 1 g de solo, no entanto sendo mantida a mesma relação solo-resina estipulada na metodologia original.

Para a análise do P-total, 0,5 g de solo (< 2 mm) foi colocado em tubo de digestão e adicionado 5 ml de água régia (ácidos concentrados na relação de 1:3 de HNO₃:HCl) permanecendo por *overnight* no interior da capela de fluxo contínuo. Passadas 12 horas finalizou-se a digestão com a elevação gradual da temperatura até 240 °C e a solução restante no tubo (< 1 ml) foi diluída com água deionizada, em balões de 50 ml, efetuando-se a homogeneização da amostra. O extrato foi filtrado em papel Whatman[®] N° 42 e o P determinado por espectrometria de absorção molecular (colorimetria), no comprimento de onda de 420 nm.

5.2.4. Análise estatística

Para cada um dos solos, adotou-se o delineamento inteiramente casualizado em parcelas subdivididas compostas por 11 tratamentos com cinco repetições. Os dados obtidos foram analisados utilizando o programa estatístico SISVAR[®] versão 4.0 (FERREIRA, 2000) para o estudo da variância e teste de médias, e os gráficos foram plotados no SigmaPlot[®] versão 11 (SYSTAT SOFTWARE Inc., 2006). Quando o valor de “F” foi significativo, aplicou-se o teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade para comparação das médias.

5.3. Experimento 2 - Avaliação da eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados na cultura do milho cultivado em Latossolos com textura e capacidade de adsorção de P contrastantes

Foram conduzidos simultaneamente dois experimentos em casa de vegetação no Centro de Energia Nuclear na Agricultura CENA-USP, localizado na cidade de Piracicaba, Estado de São Paulo, utilizando-se como cultura teste o milho (*Zea mays* L.), cultivado no LVAd e no LVd.

Os experimentos foram instalados em delineamento experimental inteiramente casualizado com quatro repetições, em esquema fatorial 5 x 4, sendo os tratamentos compostos por 5 fontes de P: MAP, SOC e os fertilizantes com as relações P-Si 2-8, 6-4, 8-2 pré-selecionados de acordo com os resultados do primeiro experimento, aplicados em quatro doses de P (0, 30, 60, 90 mg de P kg⁻¹), totalizando em 20 tratamentos.

5.3.1. Correção do solo, montagem e condução dos experimentos

Após interpretação dos resultados das análises químicas do solo, o pH dos dois solos foi corrigido pelo método da saturação por bases visando elevá-la a 70 % (RAIJ et al., 1997), onde 3 kg de solo foram colocados em sacos plásticos resistentes, e posteriormente aplicado calcário de PRNT 90 % (36 % CaO e 15,8 % MgO). Em seguida os sacos contendo solo foram acomodados em vasos plásticos com capacidade de 3 L e os solos umedecidos até 70 % da CMRA, permanecendo incubados por 90 dias. Ao término do período de incubação foi novamente analisado o pH dos solos (CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹) (RAIJ et al., 2001) apresentando valores de 5,3 e 5,5 para o LVAd e LVd, respectivamente.

Ao longo do período de cultivo foi monitorada a temperatura e umidade no interior da casa de vegetação, estando os valores médios apresentados na Figura 11.

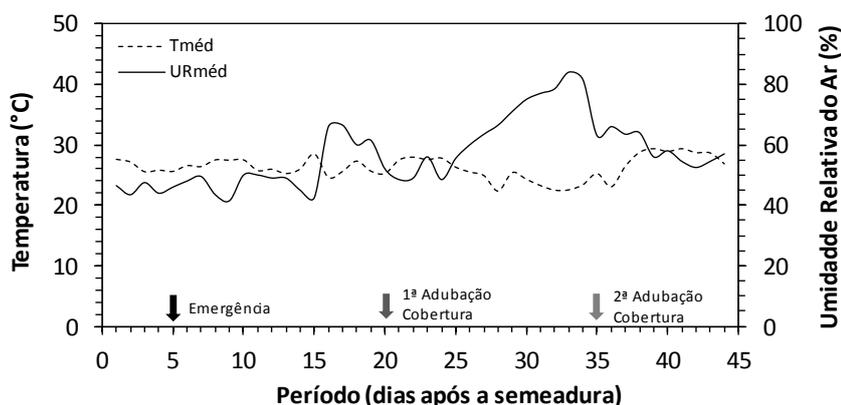


Figura 11 - Média da temperatura e umidade no interior da casa de vegetação do plantio até a colheita.

A caracterização química dos fertilizantes testados foi realizada conforme metodologia oficial de análises de fertilizantes, corretivos, inoculantes, substratos e contaminantes do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2007) e os resultados encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização dos fertilizantes

Fertilizante ¹	----- % P ₂ O ₅ -----		Si	N	Ca	Mg	S
	Total	CNA+H ₂ O					
Proporção P - Si	----- % -----						
2-8	11,3	10,7	19,8	2,4	1,05	0,94	0,0
6-4	30,4	30,2	8,9	6,4	0,5	0,44	0,0
8-2	39,7	38,7	4,4	8,4	0,24	0,22	0,0
10-0 (SOC)	27,4	26,9	0	3,0	10,0	0,0	6,0
10-0 (MAP)	52,3	51,2	0	11,0	0,0	0,0	0,0

¹ Com exceção do MAP e SOC (produtos comerciais), todos os demais fertilizantes foram produzidos exclusivamente para este estudo, portanto não se tratam de produtos comerciais ou que se enquadrem à legislação vigente.

A técnica isotópica com o ³²P foi utilizada para a quantificação mais eficaz do P proveniente dos fertilizantes absorvidos pelo milho. Foi utilizado o método de marcação indireta, onde após o término do período de incubação com calcário o solo recebeu o ³²P, tornando-se marcado. Para isso, utilizou-se 25 g de areia fina lavada, que receberam 8,65 MBq de ³²P livre de carregador. Após 24 horas, a areia foi homogeneizada e aplicada no solo, e este foi agitado para homogeneização da marcação por meio do elemento radiativo. Ao término deste procedimento, os sacos foram novamente acomodados nos vasos plásticos e

distribuídos de maneira equidistante sobre as bancadas e na sequência o solo foi umedecido com água deionizada até atingir 70 % CMRA, permanecendo incubado por mais 10 dias, para que ocorresse o equilíbrio isotópico entre o ^{32}P e ^{31}P .

Verificou-se também que, nos dois solos, apenas o potássio (K) dos macronutrientes³ estava em baixo teor e dentre os micronutrientes o boro (B) se encontrava próximo ao limite inferior tolerável. Por medida de cautela foi adicionado na adubação básica 2 mg kg⁻¹ de B sob a forma de ácido bórico, junto às 150 mg kg⁻¹ de K. Também foi aplicado 150 mg kg⁻¹ de N parcelado em três etapas, sendo 50 mg kg⁻¹ junto à adubação básica, e o restante aplicado em cobertura aos 15 e 30 dias após a emergência (DAE).

No dia antecedente ao plantio, com os dois solos ligeiramente secos, foram aplicados os tratamentos com os fertilizantes fosfatados. Com o auxílio de um medidor, cerca de 1/3 do solo do vaso (1 kg) foi cuidadosamente retirado e os fertilizantes fosfatados foram adicionados de modo que houvesse a distribuição equidistante dos grânulos na subsuperfície, e em seguida, retornou-se ao vaso o solo retirado, sendo este devidamente acomodado. Este processo foi importante para assegurar que em todos os tratamentos o fertilizante fosfatado ficasse na mesma profundidade, minimizando assim possíveis interferências.

Seis sementes de milho (híbrido Pioneer P4285H) foram semeadas a aproximadamente 1,5 cm de profundidade e aos cinco DAE foram desbastadas para duas plântulas por vaso. Durante todo o período de condução do experimento a umidade foi mantida a 70 % da CMRA determinada para cada um dos solos. A Figura 12 apresenta a uma visão geral dos experimentos instalados na casa de vegetação.



Figura 12 - Vista geral dos experimentos (plantas com 20 dias após a emergência). [a] Plantas cultivadas no LVAd; [b] Plantas cultivadas no LVd.

³ Como fonte de potássio utilizou-se o Cloreto de potássio (KCl) e o sulfato de potássio (K₂SO₄), o nitrogênio foi fornecido na forma de ureia e sulfato de amônio. A aplicação mista de fontes sulfatadas foi necessária para balancear o enxofre (S) fornecido na maior dose de P adicionada pelo SOC.

Aos 45 DAE, as plantas de milho foram cortadas, lavadas em água deionizada e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por cinco dias. A massa seca da parte aérea (MSPA) foi determinada em balança analítica com precisão de 0,01 g e após, moídas em moinho tipo Willey. As amostras foram submetidas à digestão nitroperclórica e no extrato foi determinada a atividade do ^{32}P por meio do cintilador líquido através do efeito Cerenkov, dispensando-se o uso de solução cintiladora. O P total no tecido vegetal foi determinado pelo método colorimétrico do metavanadato e molibdato (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

O P acumulado nas plantas de milho foi calculado considerando-se a concentração de P no tecido vegetal e MSPA, através da equação 1.

$$P = [P] \times \text{MSPA} \quad (\text{eq. 1})$$

Onde:

P = Fósforo acumulado (mg vaso^{-1});

[P] = Concentração de P (g kg^{-1});

MSPA = Massa seca da parte aérea (g).

A eficiência agrônômica relativa EAR foi calculada segundo a equação 2.

$$\text{EAR (\%)} = \frac{Y_1 - Y_0}{Y_2 - Y_0} \times 100 \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:

Y0: É a produção de MSPA ou P acumulado no tratamento testemunha.

Y1: É a produção de MSPA ou P acumulado nos tratamentos com os fertilizantes: 2-8, 6-4, 8-2 ou SOC.

Y2: É a produção de MSPA ou P acumulado no tratamento padrão (MAP).

A quantidade de P na planta proveniente dos fertilizantes testados bem como o aproveitamento do P aplicado através de cada um deles foi obtida através do método de diluição isotópica, conforme descrito por Chien et al., (1996), aplicando-se as equações 3, 4, 5, 6 e 7.

$$\text{AE} = \frac{{}^{32}\text{P}}{{}^{31}\text{P}} \quad (\text{eq. 3})$$

Onde:

AE = É a atividade específica (DPM $\mu\text{g P}^{-1}$);

^{32}P = É a atividade do radionúclídeo ^{32}P na planta (DPM);

^{31}P = É o conteúdo de ^{31}P na planta (μg de P planta $^{-1}$).

$$F_{\text{fert.}} = 1 - \left[\frac{AE_{\text{P(fert.+ solo)}}}{AE_{\text{P(solo)}}} \right] \quad (\text{eq. 4})$$

Onde:

$F_{\text{fert.}}$ = fração do P absorvido do fertilizante;

$AE_{\text{P (ferti. + solo)}}$ = Atividade específica do P absorvido do fertilizante + do solo;

$AE_{\text{P (solo)}}$ = Atividade específica do P na planta absorvido do solo (Controle).

$$P_{\text{fert.}} = P_{(\text{fert.+ Solo})} \times F_{\text{fert.}} \quad (\text{eq. 5})$$

Onde:

$P_{\text{fert.}}$ = P absorvido do fertilizante;

$P_{(\text{fert.+ solo})}$ = P absorvido do fertilizante + solo;

$F_{\text{fert.}}$ = fração do P absorvido do fertilizante.

$$\%P_{\text{PP fert.}} = F_{\text{fert.}} \times 100 \quad (\text{eq. 6})$$

Onde:

$\%P_{\text{PP fert.}}$ = % de P na planta proveniente do fertilizante;

$F_{\text{fert.}}$ = fração do P absorvido do fertilizante.

O aproveitamento do P aplicado via fertilizante, correspondente à eficiência da adubação fosfatada, foi calculado conforme a equação abaixo:

$$Ap(\%) = \frac{P_{\text{ppf}}}{P_{\text{aplicado}}} \times 100 \quad (\text{eq. 7})$$

Onde:

Ap (%) = Aproveitamento do P do fertilizante;

P_{ppf} = P na planta proveniente do fertilizante (mg);

P_{aplicado} = É a quantidade de P aplicado ao solo pelo fertilizante (mg).

5.3.2 Análise estatística

Os resultados de cada parâmetro obtido e/ou calculados foram submetidos à análise de variância, e quando o valor “F” foi significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade. As análises estatísticas dos dados foram realizadas utilizando o programa estatístico SISVAR[®] versão 4.0 (FERREIRA, 2000). Para a variável independente, doses de P, também foi efetuado o ajuste do modelo de regressão por meio do programa SigmaPlot[®] versão 10 (SYSTAT SOFTWARE Inc, 2006).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Viabilidade econômica do granulador de prato-rotativo desenvolvido

Como já relatado, o dispositivo destinado à produção dos fertilizantes foi projetado e desenvolvido com uso de material reaproveitado, fato que contribuiu para reduções de gastos.

Foram contabilizados todos os investimentos financeiros direcionados à construção do dispositivo (granulador), somando-se em um total gasto de R\$ 3.430,00. Visando avaliar a viabilidade econômica do equipamento elaborado, foi realizado no mês de fevereiro de 2016, uma cotação do preço de um dispositivo com a mesma finalidade, disponível atualmente no mercado. Segundo orçamento disponibilizado por uma empresa de equipamentos para laboratório, situada na cidade de Piracicaba (SP), um equipamento de bancada para granulação/pelotização com mesmas dimensões e capacidade operacional, sairia pelo custo de R\$ 37.750,00.

Comparando o valor gasto para o desenvolvimento e construção do granulador e seu respectivo valor de mercado, foi obtida uma economia de 90,9% de recursos financeiros.

6.2. Experimento 1 - Estudo da difusão e disponibilidade do P por intermédio da incubação dos fertilizantes em placa de petri em Latossolos com textura e capacidade de adsorção de P contrastantes

6.2.1. Atributos químicos do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e do Latossolo Vermelho distrófico (LVd)

Os quadros abaixo apresentam as análises de variância de ambos os experimentos (Tabelas 6 e 7). A análise estatística dos parâmetros P-total, P-resina e pH nas secções nos tratamentos foram realizadas em parcelas subdivididas, sendo o tratamento (representado pela placa toda) considerado como parcela e as secções sub-parcelas do tratamento.

Observa-se que em ambos os solos, houve interação significativa entre tratamentos x secções para cada uma dos parâmetros (Tabelas 6 e 7). Assim, abaixo serão discutidos os desdobramentos de tratamento dentro de secções, pois esta é a avaliação de principal interesse.

Tabela 6 - Resumo do quadro de análise de variância dos atributos químicos fósforo total (P-Total), fósforo disponível por resina (P-resina) e potencial hidrogeniônico (pH), avaliados nas secções de solo da placa de petri nos diferentes tratamentos para o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)

Fator de Variação	GL	P-Total	P-resina	pH
F	10	***	***	**
Resíduo 1	44	-	-	-
S	3	***	***	***
F x S	30	***	***	***
Resíduo 2	132	-	-	-
Total	219	-	-	-
CV 1 (%)	-	3,05	3,98	1,49
CV 2 (%)	-	4,7	5,73	0,69

Nota: ***, **: Significância < 0,001, < 0,01 respectivamente, pelo teste de "F". Sendo: fertilizantes (F); Secções de solo na placa de petri (S).

Tabela 7 - Resumo do quadro de análise de variância dos atributos químicos fósforo total (P-Total), fósforo disponível por resina (P-resina) e potencial hidrogeniônico (pH), avaliados nas secções de solo da placa de petri nos diferentes tratamentos para o Latossolo Vermelho distrófico (LVd)

Fator de Variação	GL	P-Total	P-resina	pH
F	10	***	***	**
Resíduo 1	44	-	-	-
S	3	***	***	***
F x S	30	***	***	***
Resíduo 2	132	-	-	-
Total	219	-	-	-
CV 1 (%)	-	4,99	7,82	3,23
CV 2 (%)	-	4,75	8,03	1,75

Nota: ***, **: Significância < 0,001, < 0,01 respectivamente, pelo teste de "F". Sendo: fertilizantes (F); Secções de solo na placa de petri (S).

De modo a facilitar a compreensão e tornar a leitura mais dinâmica, dentro cada parâmetro avaliado, os resultados para cada um dos solos serão apresentados e discutidos na seguinte ordem: Primeiro o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e na sequência o Latossolo Vermelho distrófico (LVd).

6.2.2. pH dos solos nas diferentes secções a partir do ponto de aplicação dos fertilizantes

Todos os fertilizantes avaliados foram produzidos a partir do MAP, entretanto, a presença do Si no grânulo, em diferentes proporções, causou mudanças no pH do solo na região próxima ao ponto de aplicação dos fertilizantes.

Quando o grânulo de fertilizante entra em contato com o solo, ocorrem diversas reações durante a liberação dos nutrientes nele contido (SAMPLE et al., 1980; BOLAN; HEDLEY, 1990). No entanto, para que estas se iniciem é necessário que a água caminhe no solo em direção ao grânulo iniciando sua dissolução (LAWTON; VOMOCIL, 1954). Com isso, os produtos da solubilidade formados promovem a mudança do pH próximo ao grânulo de fertilizante aplicado ao solo (LINDSAY; FRANZIER; STEPHENSON, 1962). Essas alterações no pH do solo nas vizinhanças de grânulos dos fertilizantes têm sido reportadas por diversos autores (MOODY et al., 1995; LOMBI et al., 2004a; 2004b; MONTALVO et al., 2014).

Analisando os valores de pH do solo nas secções do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), apresentados na Tabela 8, observa-se que na primeira secção, o tratamento 1-9 foi o que apresentou maior pH, seguido pelos tratamentos 2-8 e 3-7, que não diferiram entre si. O maior pH observado nos tratamentos com altas proporções de Si em relação ao P pode ser atribuído à presença do flossilicato, pois mesmo com baixíssimo poder de neutralização (PN= 6 %), pois, possui baixos teores de CaO e MgO em sua constituição, este produto quando presente em altas concentrações, como na microrregião do solo em contato com o grânulo, proporcionou um maior pH do solo em relação ao MAP e o controle. Ainda na primeira secção, o MAP não alterou o pH do solo em relação ao controle, apresentando valores estatisticamente iguais aos tratamentos 9-1, 8-2, 7-3, 6-4 (Tabela 8).

Rancz e Soper (1967), reportaram um aumento inicial no pH do solo nas vizinhanças de grânulos de MAP. No entanto, com o passar do tempo de incubação, este pH tende a decrescer decorrente de processos de nitrificação (ISENSEE; WALSH, 1971; ISENSEE; WALSH, 1972; LOMBI et al., 2004b).

Na literatura, na grande maioria dos casos, têm sido observadas mudanças substanciais do pH do solo nas zonas de maior influência do grânulo de MAP aplicado. Montalvo et al. (2014) avaliaram o comportamento de diversos fertilizantes, e observaram que o MAP promoveu uma queda do pH na primeira e segunda secção circular a partir do ponto de aplicação em quatro dos seis solos avaliados. Silva (2013) avaliando o comportamento de sete diferentes fertilizantes fosfatados aplicados em um Neossolo Quartzarênico álico, observou que exceto o fosfato diamônio (DAP), todos os demais tratamentos, incluindo o MAP, promoveram acidificação do solo nas três primeiras secções a partir do ponto de aplicação dos fertilizantes.

Outros resultados diferentes dos obtidos no presente estudo foram verificados por Lombi et al. (2004a), que observaram diminuição significativa do pH do solo, principalmente

na primeira secção (0-7,75 mm) a partir do ponto de aplicação do MAP nas formas granulada, pó e líquida.

Na segunda secção (7,76 - 13,5 mm) foi observado uma queda substancial no pH do solo para todos os fertilizantes aplicados, sendo inferior ao do tratamento controle. Este fato pode ser explicado pela ocorrência de processos de nitrificação sofridos pelo íon acompanhante NH_4^+ presente no MAP (ISENSEE; WALSH, 1971; ISENSEE; WALSH, 1972; LOMBI et al., 2004b) causando a acidificação do solo. Assim, Silva (2013) observou que após 35 dias de incubação todo o N do MAP havia deixado o grânulo de fertilizante difundindo-se no solo.

Portanto, entre os tratamentos que receberam P, os menores valores de pH foram proporcionados pelos fertilizantes 1-9, 6-4, 8-2, 2-8, 3-7, 4-6, 5-5 e os fertilizantes MAP e 9-1 apresentaram os maiores valores de pH (Tabela 8).

Na terceira e quarta secção, não foram identificadas diferenças no pH do solo entre os tratamentos que receberam fertilizante fosfatado, sendo que estes diferiram apenas em relação ao tratamento controle, que apresentou maior valor (Tabela 8). Este resultado pode estar relacionado aos processos de nitrificação do NH_4^+ já anteriormente relatados.

Tabela 8 - Valores de pH no solo das secções circulares a partir do ponto de aplicação dos fertilizantes para o Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd)

Tratamento ¹	Secções			
	0 - 7,75 mm	7,76 - 13,5 mm	13,6 - 25,5 mm	25,6 - 43 mm
1-9	6,192 a	5,280 d	5,170 b	5,382 b
2-8	6,034 b	5,330 cd	5,136 b	5,398 b
3-7	5,990 b	5,332 cd	5,164 b	5,346 b
4-6	5,820 c	5,334 cd	5,164 b	5,368 b
5-5	5,766 cd	5,342 cd	5,162 b	5,332 b
6-4	5,716 de	5,326 d	5,144 b	5,322 b
7-3	5,738 cde	5,410 bc	5,178 b	5,326 b
8-2	5,696 de	5,326 d	5,174 b	5,326 b
9-1	5,684 de	5,428 b	5,184 b	5,326 b
MAP	5,672 e	5,450 b	5,198 b	5,370 b
C	5,664 e	5,640 a	5,650 a	5,578 a

¹ Os tratamentos constituídos pelas proporções P-Si no grânulo de fertilizante são representados pelas siglas de (1-9 a 9-1); (MAP) Fosfato monoamônio, (C) controle.

Letras minúsculas iguais na coluna referentes à mesma secção, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Analisando os valores de pH do solo nas secções do Latossolo Vermelho distrófico (LVd) (Tabela 9), observou-se que na primeira secção circular os tratamentos 1-9, 3-7 e 9-1

não diferiram entre si. O menor valor de pH entre os tratamentos que receberam P foram verificados para o MAP, no entanto, este não se diferiu estatisticamente dos demais fertilizantes com exceção do tratamento 1-9, já anteriormente mencionado. Assim, observa-se que nesta secção todos os tratamentos diferiram do controle, que apresentou o menor valor de pH, indicando que a presença do fertilizante elevou o pH na região de aplicação do grânulo (Tabela 9). Estes resultados reforçam as evidências encontradas no LVAd, conforme discutido, onde a presença dos fertilizantes fosfatados proporcionaram pH igual ou superior ao controle.

Contradizendo os resultados obtidos no presente estudo, Isensee e Walsh (1971) verificaram a diminuição do pH nas proximidades do ponto de aplicação do MAP de 6,2 para 5,8.

Ao contrário do comportamento observado no LVAd, na segunda secção (7,76-13,5 mm), observou-se no LVd que todos os fertilizantes, exceto o 1-9 e 6-4 apresentaram valor de pH superior ao identificado no tratamento controle. Neste grupo, destacam-se com diferenças estatísticas os tratamentos 9-1, 8-2, 7-3, MAP e 4-6, que apresentaram maiores valores de pH (Tabela 9). O pH mais alto nesta secção pode ser atribuído ao fato de que em solos ricos em minerais com carga variável, como os Latossolos mais intemperizados, a adsorção específica do P nos oxidróxidos de Fe e Al, pode liberar hidroxilas no solo e promover um aumento do pH (STOOP, 1983).

Diferindo dos resultados obtidos no presente estudo, Montalvo et al. (2014) avaliando a difusão do P fornecido por diferentes fertilizantes fosfatados, granulados e líquidos, observaram que em um Latossolo Vermelho eutroférico com alto teor de argila (61 % de argila) o MAP promoveu a queda no pH do solo na primeira e segunda secção em relação ao tratamento controle.

Na terceira secção circular (13,6-25,5 mm) os fertilizantes 8-2, MAP, 3-7, 9-1, 4,6 e 7-3 apresentaram os maiores valores de pH. Os demais tratamentos apresentaram os menores valores, não diferindo estatisticamente do tratamento controle. Neste solo (LVd), nenhum dos fertilizantes aplicados proporcionaram mudanças significativas no pH do solo da última secção circular (25,6-43,0 mm) (Tabela 9).

A restrita e/ou não observância de mudança no pH na terceira e quarta secção (Tabela 9) é atribuída à baixíssima quantidade ou ausência de P difundido, conforme resultados discutidos mais abaixo.

Tabela 9 - Valores de pH no solo das secções circulares a partir do ponto de aplicação dos fertilizantes para o Latossolo Vermelho distrófico (LVd)

Tratamento ¹	Secções			
	0 - 7,75 mm	7,76 - 13,5 mm	13,6 - 25,5 mm	25,6 - 43 mm
1-9	6,354 a	5,418 de	5,282 c	5,346 a
2-8	6,268 bc	5,488 cd	5,544 c	5,432 a
3-7	6,164 abc	5,504 bcd	5,692 ab	5,426 a
4-6	6,122 bcd	5,656 abc	5,662 ab	5,508 a
5-5	5,930 de	5,492 cd	5,322 c	5,436 a
6-4	5,852 e	5,380 de	5,306 c	5,436 a
7-3	6,054 cd	5,698 ab	5,568 ab	4,458 a
8-2	6,136 bc	5,748 a	5,754 a	5,496 a
9-1	6,166 abc	5,814 a	5,682 ab	5,462 a
MAP	6,014 cde	5,786 a	5,720 ab	5,416 a
C	5,260 f	5,266 e	5,286 c	5,340 a

¹ Os tratamentos constituídos pelas proporções P-Si no grânulo de fertilizante são representados pelas siglas de (1-9 a 9-1); (MAP) Fosfato monoamônio, (C) controle.

Letras minúsculas iguais nas colunas referentes à mesma secção, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

6.2.3. P-total nos solos nas diferentes secções a partir do ponto de aplicação dos fertilizantes

Nos dois experimentos a quantidade de P adicionada em cada placa de petri foi de 10 mg. Para ambos os solos, depois de realizado o balanço de P-total com os resultados da análise química, não foram verificadas diferenças significativas na quantidade de P adicionada entre os tratamentos. Este fato exclui erros experimentais em função da adição inicial do P durante a montagem do ensaio.

A não observância de diferenças na quantidade total de P fornecida inicialmente pelos fertilizantes nos diferentes tratamentos é forte indício da homogeneidade dos grânulos, que pode ser relacionado à eficácia do granulador, e do processo de granulação.

A Figura 13-A, mostra a concentração de P-total nas secções de solo do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), representando a movimentação do P ao final das cinco semanas de incubação. Pode-se observar que o tratamento contendo P-Si no grânulo, na proporção 1-9, apresentou o maior valor de P-total na primeira secção (0-7,75 mm) seguido pelo 2-8 e 3-7. Os fertilizantes MAP, 9-1 e 8-2 apresentaram os menores teores de P-total na secção, indicando a maior difusão do P nestes tratamentos. Em situação intermediária, apresentam-se os demais tratamentos. Neste solo, o percentual de P-total difundido a partir do ponto de aplicação pode ser visualizado na Figura 13-B.

Observa-se que no tratamento 1-9 45,76 % do P-total foi encontrado na primeira secção (0-7,75 mm), demonstrando a menor difusão do P aplicado neste tratamento. O menor percentual de P-total, encontrado nesta mesma secção, foi verificado para o MAP, correspondendo a 27,02 %, novamente indicando que o P fornecido por esta fonte se difundiu e foi distribuído mais efetivamente ao longo das secções.

Silva (2013) avaliando a difusão do P fornecido por sete diferentes fertilizantes fosfatados solúveis em um Neossolo Quartzarênico álico, concluiu que a maior difusão do P foi proporcionada pelo fertilizante MAP e DAP, sendo estes resultados de acordo com os observados no presente estudo.

Com metodologia semelhante, porém em condições diferentes das apresentadas neste estudo, Lombi et al. (2004 b) avaliando diferentes fontes de P aplicadas sob a forma granular e fluída, em solos calcários e não calcários, observaram que quando aplicado na forma granular, mais de 50 % do P-total permaneceu na primeira secção (0-7,75 mm).

Os altos teores de P-total encontrados em alguns tratamentos na primeira secção de solo podem ser atribuídos inclusive ao P que permaneceu no próprio grânulo do fertilizante. Gilkes e Mangano (1983) relataram que até 20 % do P em fosfatos de cálcio e 10 % do P nos fosfatos de amônio estão associadas com impurezas catiônicas (Ca, Mg, Al e Fe) derivados do fosfato de rocha, formando assim compostos insolúveis. Com isso, em muitos dos casos, a difusão restrita de P observado nos fertilizantes fosfatados pode estar associada à formação de compostos menos solúveis de P (por exemplo, fosfato dicálcico di-hidratado e fosfato bicálcico anidro) que se formam, por exemplo, após a dissolução do fosfato monocálcico e que podem representar até 33 % do P inicial (HEDLEY; McLAUGHLIN, 2005).

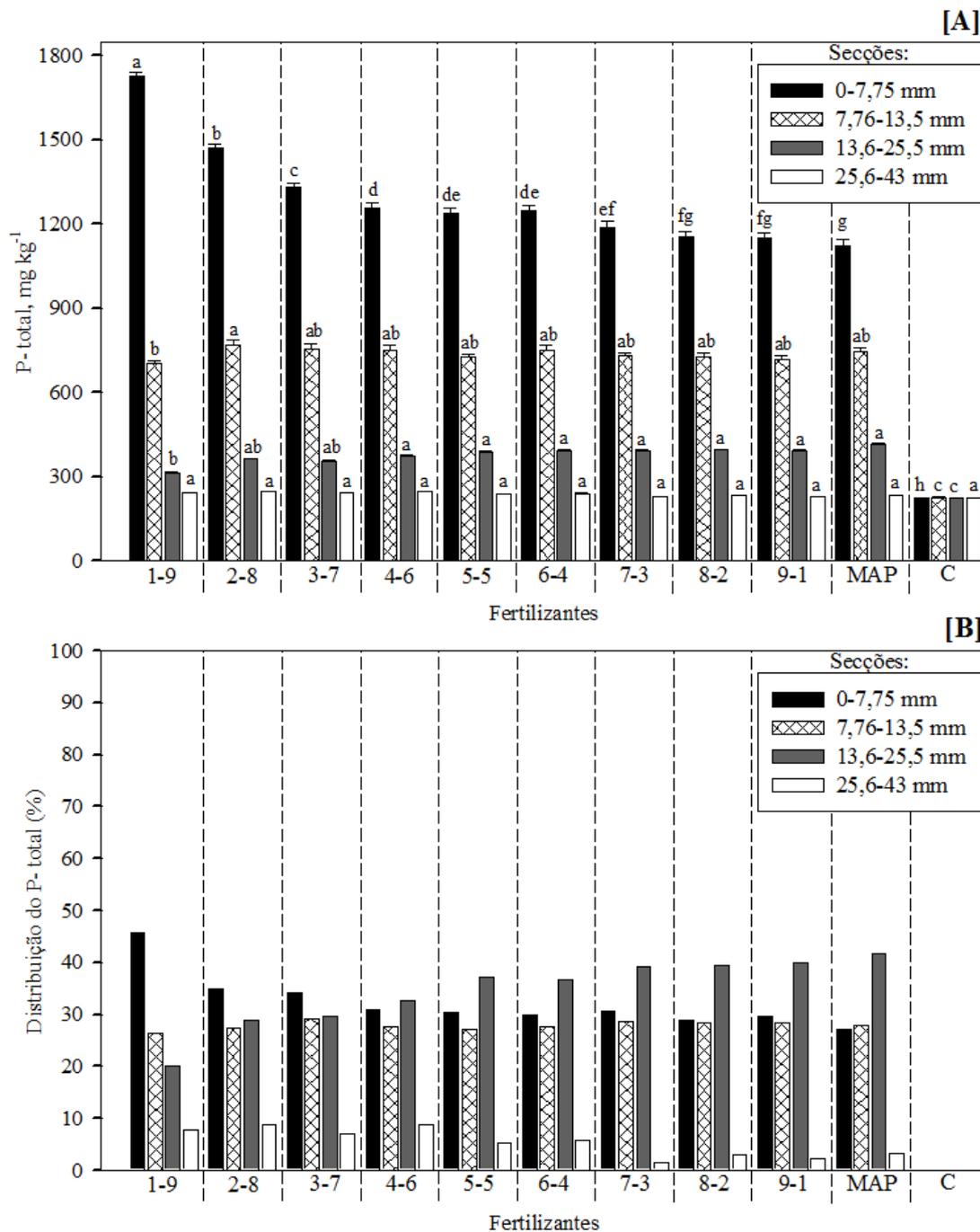


Figura 13 - [A] Teor de P-total (mg kg^{-1}) do solo (LVAd) nas secções da placa de petri após a aplicação dos fertilizantes fosfatados e [B] distribuição percentual do P- total em cada secção ($\%P_fS_{1-4}$) calculado conforme a equação: $\%P_fS_i = [(P_f)S_i * W_i] / \sum_{i=1-4} [(P_f)S_i * W_i]$. Onde: i a secção da placa de petri (1 a 4); $(P_f)S_i$ o teor de P- total devido à adição do fertilizante; W_i a massa de solo em uma determinada secção. $(P_f)S_i$ é calculado subtraindo-se $225,43 \text{ mg kg}^{-1}$ de P-total (controle) dos demais tratamentos. Colunas referentes às mesmas secções e seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de significância. Os tratamentos constituídos pelas proporções P-Si no grânulo de fertilizante são representados pelas siglas de 1-9 a 9-1; (MAP) Fosfato monoamônio, (C) controle. As barras de erro (gráfico A) representam o erro padrão da média das 5 repetições.

Vale ressaltar que juntamente com o Si incorporado nos grânulos foram adicionadas certas quantidades de Ca, Mg e Fe oriundas do flossilicato. Com isso, nas maiores proporções de Si, os teores destes cátions podem ter propiciado a formação de compostos de baixa solubilidade ainda no grânulo do fertilizante e conseqüentemente os valores de P-total mais elevados na primeira secção. Pierzynski et al. (2005) afirmam que o P possui grande afinidade com diversos metais. Segundo Silva (2013) a permanência de grande parte do P no grânulo se dá pela formação de compostos poucos solúveis, principalmente como formas de P-Al e P-Fe.

Reforçando estes resultados, Khatiwada et al. (2012) e Degryse e McLaughlin (2014) verificaram que imediatamente ao redor do grânulo de fertilizante, o principal mecanismo que leva a redução da disponibilidade do P é a precipitação.

Corroborando com estas hipóteses, Lombi et al. (2004b) observaram que a quantidade de P que permaneceu no grânulo do MAP, após cinco semanas de incubação, foi de 13 %. Montalvo et al. (2014) avaliando a difusão do MAP granular em sete diferentes solos da Austrália, observaram que 9,6 a 10,6 % do P inicialmente aplicado permaneceu no grânulo do fertilizante.

Na segunda secção (7,76-13,5 mm) o fertilizante 2-8 apresentou o maior teor de P-total e o fertilizante 1-9 apresentou o menor valor. Os demais fertilizantes apresentaram teores intermediários não sendo observada diferença estatística entre eles (Figura 13-A). É importante frisar que todos os tratamentos com fertilizantes apresentaram teores de P-total superior ao controle. Na Figura 13-B é possível observar que 26,4 % do P do fertilizante 1-9 foram encontrados na segunda secção (7,76-13,5 mm), enquanto para o MAP foram verificados 28 % do P-total.

Observando os resultados na terceira secção (13,6-25,5 mm), os maiores teores de P-total foram encontrados para os fertilizantes MAP, 9-1, 8-2, 7-3, 6-4, 5-5, 4-6 e o menor valor observado para o tratamento 1-9, sendo que os tratamentos 2-8 e 3-7 não diferiram entre estes dois grupos (Figura 13-A). Neste contexto, na Figura 13-B, foi possível observar que na terceira secção, o maior percentual de P-total foi encontrado com o fertilizante MAP (41,82 %) e o menor no fertilizante 1-9 (20,10 %). Com os resultados obtidos na segunda e terceira secção, verifica-se que o P do fertilizante 1-9 se difundiu menos no solo.

Segundo Degryse e McLaughlin (2014) o P é fortemente adsorvido, fato que ocasiona a diminuição da velocidade difusiva deste elemento no solo, gerando assim um gradiente de concentração nas vizinhanças dos grânulos, que pode persistir por anos em solos de alta capacidade de adsorção de P.

Não foram identificadas diferenças estatísticas na secção 25,6-43,0 mm, no teor de P-total entre os tratamentos, evidenciando a baixa difusão do P no solo (Figura 13-A). Blanchard e Caldwell (1966) relataram difusão do P de 20 a 30 mm a partir de grânulos de MAP, após duas semanas de incubação em um solo franco argiloso. Em um solo calcário, Lombi et al. (2004a) observaram difusão do P fornecido pelo MAP até a secção de 13,5 a 25,5 mm.

Os resultados obtidos neste estudo também estão de acordo com os verificados por Castro et al. (2013), que avaliando a difusão do P em um Latossolo Vermelho com pH 7,0, observaram a presença de P difundido a partir do grânulo de MAP até a distância de 25,5 mm.

Na Figura 14-A, pode ser verificada a concentração de P-total nas secções de solo do Latossolo Vermelho distrófico (LVd). O fertilizante 1-9 apresentou o maior valor de P-total na primeira secção (0-7,75 mm), no entanto foi estatisticamente igual ao tratamento 2-8 que por sua vez não diferiu estatisticamente dos tratamentos 3-7 e 9-1. Os demais fertilizantes não diferiram entre si e apresentaram os menores teores de P-total na secção 0-7,75 mm, indicando maior difusão do P. Na Figura 14-B, pode ser observado o percentual de P-total difundido a partir do ponto de aplicação do fertilizante. No tratamento 1-9, 66,98 % do P-total permaneceu na primeira secção (0-7,75 mm), evidenciando baixa difusão do P aplicado. O menor percentual de P-total encontrado nesta mesma secção foi para o MAP, correspondendo a 52,03 %, novamente indicando que o P fornecido por esta fonte se difundiu mais ao longo das secções. Este comportamento mostra-se coerente com os resultados observados na primeira secção do LVAd.

Após o contato do fertilizante com o solo, observa-se um deslocamento da água em direção ao grânulo, no sentido contrário, o P solubilizado do grânulo move-se em direção ao solo (HETTIARACHI et al., 2006), este fato pode também dificultar a difusão do P para mais distante do ponto de aplicação do fertilizante, aumentando sua concentração imediatamente ao redor do grânulo e com isso favorecendo a ocorrência de processos de precipitação do P (LOMBI et al., 2006). Lombi et al. (2004a), verificaram por meio de técnicas isotópicas e microscopia eletrônica a presenças de compostos P-Ca, P-Mg, P-Al e P-Fe no grânulo do MAP após ser incubado em solo da Austrália.

O maior teor de P-total na primeira secção do LVd principalmente para os fertilizantes com maiores teores de Si no grânulo, podem ser atribuídos aos processos de precipitação do P com metais ainda dentro do próprio grânulo e na interface solo-grânulo, conforme observado por Silva (2013).

Nos tratamento com alta proporção de Si no grânulo, outro fator que provavelmente favoreceu para que o P permanecesse na primeira secção do solo, pode estar relacionado a processos físicos, onde a presença do flossilicato no grânulo pode ter promovido uma menor taxa de liberação do P durante o período de cinco semanas. Trenkel (2010) cita diversas tecnologias que visam modificar a dinâmica de liberação do nutriente a partir de grânulos de fertilizante. O autor menciona sobre a alteração da superfície exposta do elemento versus o volume do grânulo. Aliando-se a este fato, os resultados observados podem estar associados à mudança da penetração de água e saída do elemento da estrutura granular, o que pode ter contribuído para permanência do P no grânulo e conseqüentemente os altos teores de P-total na secção de 0-7,75 mm.

Analisando os resultados na segunda secção (7,76-13,5 mm), verificou-se que os fertilizantes MAP, 9-1, 7-3, 6-4, 5-5, 8-2 e 4-6 apresentaram os maiores teores de P-total. Nesta mesma secção, o tratamento 1-9 foi o que apresentou menor teor, não diferindo estatisticamente dos tratamentos 2-8 e 3-7. Este resultado é justificado pelo alto teor de P-total encontrado na primeira secção para estes fertilizantes (Figura 14-A). Observou-se também, uma maior homogeneidade no percentual de P-total difundido entre os diferentes tratamentos na segunda secção, onde foram encontrados 29,13 % e 36,89 % do P-total para os fertilizantes 1-9 e MAP, respectivamente (Figura 14-B). Estes resultados apresentam coerência com os observados no solo LVAd. Provavelmente, nesta secção, a ação de processos de adsorção do P foi o principal fator a restringir seu deslocamento, tendo em vista a alta capacidade de fixação de P deste solo, evidenciado pela isoterma de Langmuir (Figura 6). Hedley e McLaughlin (2005) relatam que processos de adsorção específica predominam em zonas onde a concentração de P é menor do que a CMAP do solo.

Em função da alta adsorção na secção anterior (7,76-13,5 mm), a quantidade de P difundida até a terceira seção (13,6-25,5 mm) da placa de petri não foi suficiente para promover alterações significativas no teor de P-total entre os tratamentos (Figura 14-A).

Também não foram observadas diferenças estatísticas nos teores de P-total na quarta seção (25,6-43,0 mm) (Figura 14-A). Com a avaliação do percentual de P-total observou-se que, pouco ou nenhum P do fertilizante encontrado foi decorrente da aplicação dos tratamentos (Figura 14-B).

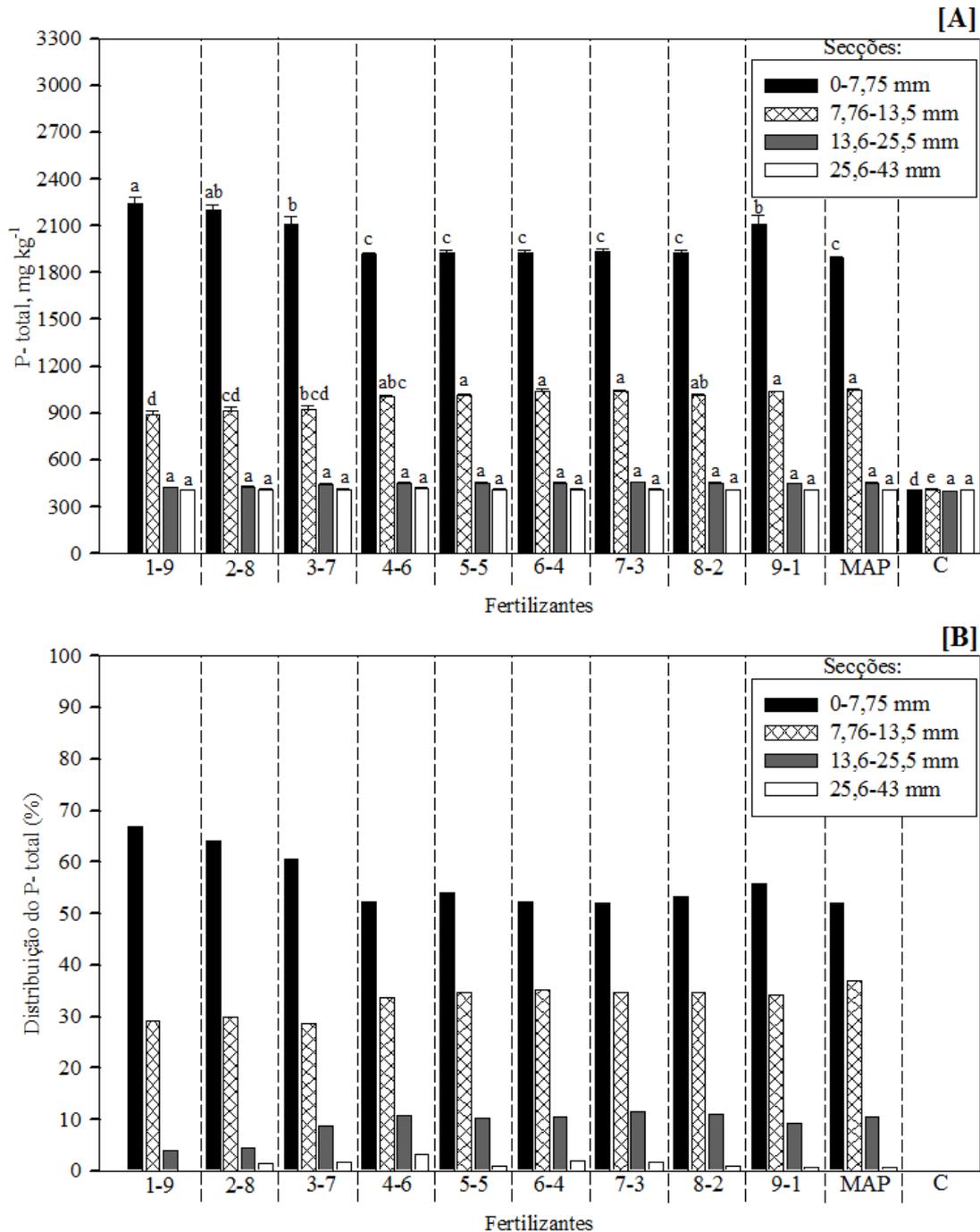


Figura 14 - [A] Teor de P-total (mg kg^{-1}) do solo (LVd) nas secções da placa de petri após a aplicação dos fertilizantes fosfatados e [B] distribuição percentual do P- total em cada secção ($\%P_fS_{1-4}$) calculado conforme a equação: $\%P_fS_i = [((P_f)S_i * W_i) / \sum_{i=1-4}((P_f)S_i * W_i)]$. Onde: i a secção da placa de petri (1 a 4); $(P_f)S_i$ o teor de P- total devido à adição do fertilizante; W_i a massa de solo em uma determinada secção. $(P_f)S_i$ é calculado subtraindo-se $406,9 \text{ mg kg}^{-1}$ de P-Total (controle) dos demais tratamentos. Colunas referentes às mesmas secções e seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de significância. Os tratamentos constituídos pelas proporções P-Si no grânulo de fertilizante são representados pelas siglas de (1-9 a 9-1); (MAP) Fosfato monoamônio, (C) controle. As barras de erro (gráfico A) representam o erro padrão da média das cinco repetições.

Observou-se, portanto que neste solo (LVd) o P fornecido por todos os tratamentos ficou restrito às duas primeiras secções (0-7,75 e 7,76-13,5 mm). Barber (1980) relatou que o P quando fixado, não é capaz de se difundir facilmente no solo, sendo esta uma das principais explicações para os resultados obtidos no presente experimento.

Corroborando com estes resultados, Degryse e McLaughlin (2014) em estudo da difusão do P fornecido pelo MAP e DAP em diversos solos por meio da técnica da captura do P difundido com uso de papel filtro impregnado com óxido de Fe, os autores observaram que para um solo ácido intemperizado e o um solo calcário, não foi possível detectar P à distância maior que 13,5 mm a partir do ponto de aplicação do grânulo do fertilizante fosfatado.

Como já apresentado, as variáveis foram analisadas separadamente em cada solo, no entanto fica evidente que para o LVAd foi possível encontrar valores significativos de P difundido até a terceira secção (13,6-25,5 mm) (Figura 13-A), enquanto no LVd o P fornecido pelos tratamento ficou restrito até a segunda secção (7,76-13,5 mm) (Figura 14-A).

Lawton e Vomocil (1954) avaliando o efeito da variação de umidade, e nível de compactação do solo sobre a dissolução e a migração de P a partir de grânulos de superfosfato, concluíram que a textura também apresentou significativa influência sobre a difusão de P, com taxas maiores em solos de textura arenosa.

Estudando a difusão do P fornecido por diferentes fertilizantes em três solos, sendo dois deles calcários, Lombi et al (2004b) observaram diferenças entre a difusão do P, atribuindo o resultado ao contraste físico-químico dos solos principalmente em termos de capacidade adsorção e textura dos solos. No mesmo raciocínio, Cessa et al. (2010) também afirmaram que a capacidade de adsorção de P pode ser influenciada principalmente pelo teor de argila e mineralogia do solo.

Degryse e McLaughlin (2014) observaram que em solos com pH inferior a 7,0, a difusão do P diminui de acordo com o aumento da concentração de Fe e Al extraídos por oxalato. Assim como estes achados, Sakadevan e Bavor (1998) observaram que formas amorfas de óxidos de Fe e Al são os principais adsorventes de P no solo.

6.2.4. P-disponível (P-resina) nos solos nas diferentes secções a partir do ponto de aplicação dos fertilizantes

O P extraído por resina trocadora de íons (P-resina) representa a fração de P disponível às plantas, sendo este método capaz de acessar os compartimentos do P na solução mais o P-lábil do solo.

Na Figura 15-A são apresentados os resultados da concentração do P disponível (P-resina) nas secções de solo do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), ao final das cinco semanas de incubação.

Na primeira secção (0-7,75 mm) o maior teor de P-disponível é observado no tratamento 1-9, seguido pelos tratamentos 2-8 e 3-7, respectivamente (Figura 15-A). O menor valor de P disponível na primeira secção (0-7,75 mm) foi verificado para o MAP. Estes resultados estão coerentes com a os resultados do P-total. A Figura 15-B mostra com maiores detalhes o comportamento e a quantidade do P-disponível encontrada em cada secção nos diferentes tratamentos. Na primeira secção, os maiores valores percentuais foram observados nos tratamentos 1-9 e 2-8, que apresentaram 58,06 % e 46,05 % do P-disponível, respectivamente. É possível identificar uma queda gradativa a partir destes tratamentos até o MAP, que demonstrou 31,82 % do P-disponível nesta secção. Silva (2013) estudando a difusão e disponibilidade de P a partir de diversas fontes de fertilizantes fosfatados aplicados em um Neossolo Quartzarênico da região do cerrado observou apenas 27 % do P-disponível do MAP na primeira secção de solo.

Lombi et al. (2004a) avaliando a difusão do MAP em diferentes formas físicas, em um solo calcário, observaram 15 % do P-disponível na primeira secção (0-7,75 mm) para o fertilizante MAP granulado.

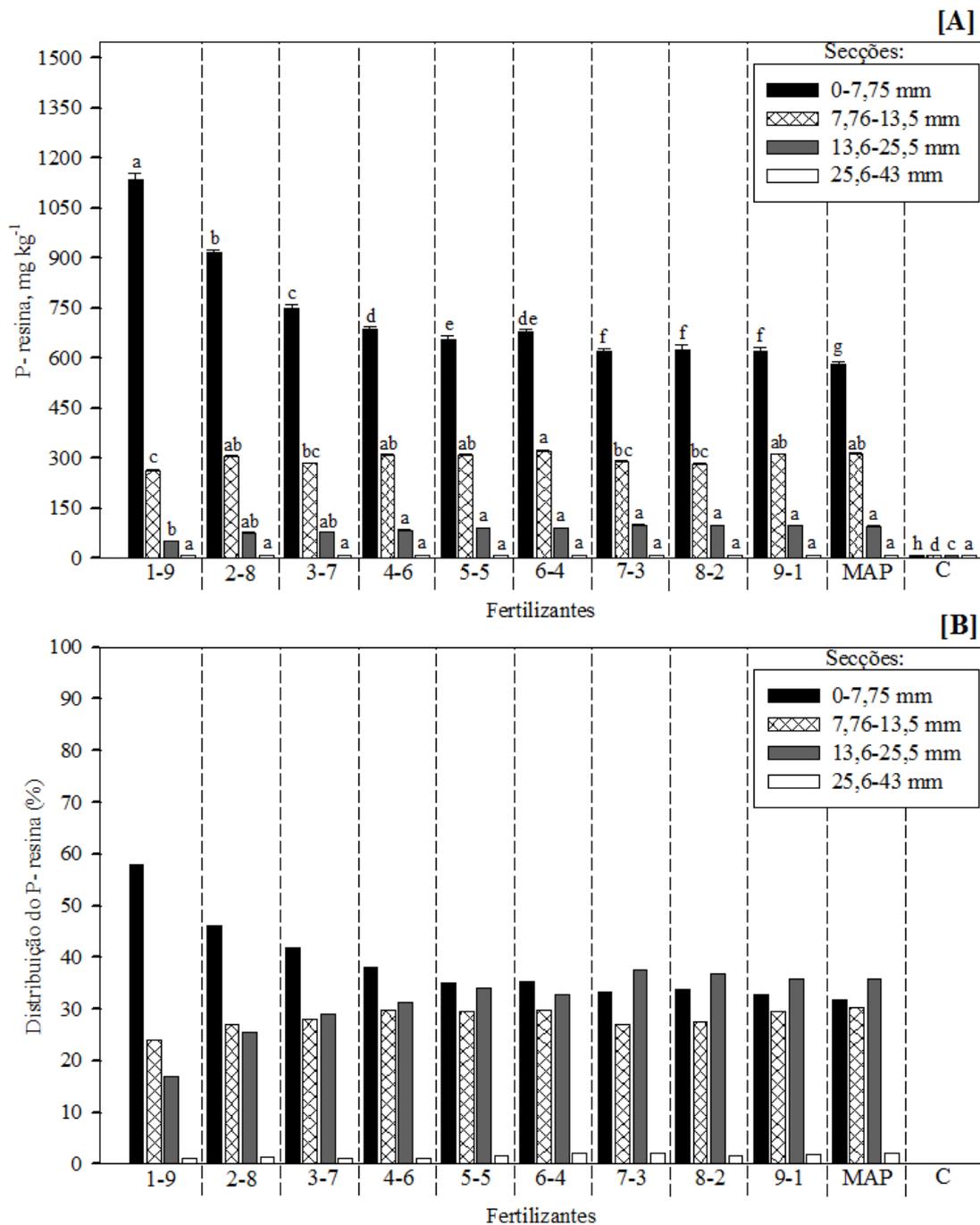


Figura 15 - [A] Teor de P-resina (mg kg^{-1}) do solo (LVAd) nas secções da placa de petri após a aplicação dos fertilizantes fosfatados e [B] distribuição percentual do P-resina em cada secção ($\%P_fS_{1-4}$) calculado conforme a equação: $\%P_fS_i = [((P_f)S_i * W_i) / \sum_{i=1-4} ((P_f)S_i * W_i)]$. Onde: i a secção da placa de petri (1 a 4); $(P_f)S_i$ o teor de P-resina devido à adição do fertilizante; W_i a massa de solo em uma determinada secção. $(P_f)S_i$ é calculado subtraindo-se $7,03 \text{ mg kg}^{-1}$ de P-resina (controle) dos demais tratamentos. Colunas referentes às mesmas secções e seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de significância. Os tratamentos constituídos pelas proporções P-Si no grânulo de fertilizante são representados pelas siglas de (1-9 a 9-1); (MAP) Fosfato monoamônio, (C) controle. As barras de erro (gráfico A) representam o erro padrão da média das cinco repetições.

Analisando os resultados nas secções de solo mais externas da placa de petri, é possível observar de maneira geral, diminuição dos teores de P-disponível, sendo que na segunda secção (7,76-13,5 mm) os menores valores observados foram para os fertilizantes 1-9, 3-7, 7-3 e 8-2. Nesta mesma secção, o fertilizante 6-4 apresentou o maior teor de P-disponível, não sendo observadas diferenças relevantes entre os tratamentos 2-8, 4-6, 5-5, 9-1 e MAP (Figura 15-A). Este resultado mostra-se interessante, principalmente para o fertilizante 2-8 que demonstrou o segundo maior valor de P-resina na primeira secção de solo e foi um dos tratamentos de maior valor na segunda secção. Analisando o percentual de P-resina, observa-se de forma geral, que o fertilizante 1-9 apresentou o menor valor (23,9 %) e o MAP o maior (30,28 %) (Figura 15-B). Lombi et al. (2004a) encontraram após cinco semanas da aplicação do MAP granulado, 23 % do P-disponível na segunda secção de um solo calcário.

Na terceira secção (13,6-25,5 mm) é possível observar que os tratamentos 2-8, 3-7, 4-6, 5-5, 6-4, 7-3, 8-2, 9-1 e MAP conferiram maiores teores de P-disponível. O tratamento 1-9 apresentou o menor valor, no entanto, não se diferiu dos tratamentos 2-8 e 3-7 (Figura 15-A). Seguindo esta tendência, o maior percentual de P-disponível foi verificado para o MAP (35,91 %) e o menor para o fertilizante 1-9, onde foi encontrado 16,91 % de P-disponível respectivamente (Figura 15-B).

Não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, na quarta secção circular (25,6-43,0 mm), inclusive em relação ao controle. Este resultado reforça evidências sobre a baixa mobilidade e disponibilidade do P à medida que se afasta do ponto de aplicação (Figura 15-A). Silva (2013) também não observou mudanças significativas nos teores P-disponível na última secção de um Neossolo Quartizarênico.

A Figura 16-A, apresenta os teores de P-disponível (P-resina) nas secções de solo do Latossolo Vermelho distrófico (LVd) ao final das cinco semanas de incubação.

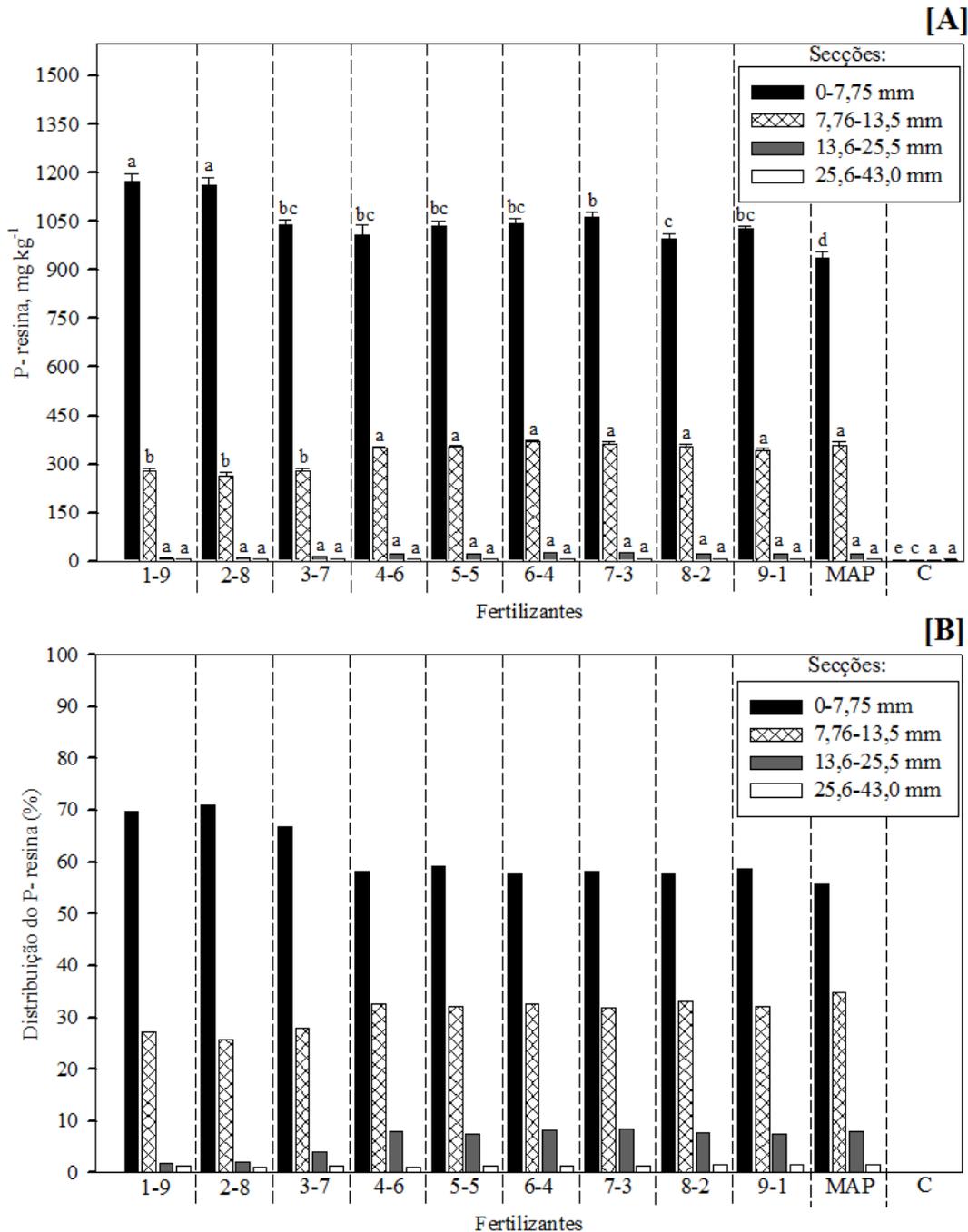
Na primeira secção (0-7,75 mm) o maior teor de P-disponível foi observado no tratamento 1-9 e 2-8, sendo que o menor foi proporcionado pelo MAP (Figura 16-A). De encontro com estes resultados, a Figura 16-B mostra o comportamento e a quantidade do P-disponível em cada tratamento nas diferentes secções. Em termos percentuais, foram observados na primeira secção circular dos tratamentos 2-8 e 1-9 os valores de 69,68 % e 70,86 % do P-disponível, respectivamente. Torna-se possível identificar uma redução a partir destes tratamentos até o MAP, que demonstrou 55,73 % do P-disponível nesta secção.

Nas secções mais externas da placa de petri é possível observar, de maneira geral, diminuição dos valores de P-disponível, sendo que na segunda secção (7,76-13,5 mm) os menores valores foram observados para os tratamentos 1-9, 2-8 e 3-7. Os demais tratamentos exceto o controle, não diferiram estatisticamente entre si (Figura 16-A). Neste contexto, observou-se que os fertilizantes 2-8, 1-9 e MAP, apresentaram os valores de 25,75, 27,24 e 34,78 %, respectivamente (Figura 16-B).

Bendi e Gilkes (1987) avaliaram a movimentação do P fornecido pelo superfosfato triplo em um solo de alta e outro de baixa CMAP. Os autores observaram que no solo de alta CMAP, 27 e 45 % do P fornecido pelo fertilizante havia se dissolvido e movimentado acima de cinco milímetros a partir do ponto de aplicação, após duas e quatro semanas, respectivamente. Para o solo de baixa CMAP os valores de P encontrado acima de cinco milímetros do ponto de aplicação para os respectivos períodos, foram de 59 e 72 %.

De forma geral, observou-se que quando os fertilizantes apresentaram maiores teores de P-resina na primeira secção circular de solo, estes tiveram seus teores gradativamente reduzidos na segunda secção, fato que indica uma menor movimentação e disponibilidade do P à medida que se afasta do ponto de aplicação. De modo contrário, os fertilizantes que apresentaram menores valores de P-resina na secção próxima ao grânulo, conferiram maiores teores nas secções subsequentes, fato que indica uma maior movimentação do P nestes tratamentos até as regiões mais distantes do ponto de aplicação.

Na terceira e quarta secção (13,6-25,5 e 25,6-43,0 mm), não foram encontrados teores de P-resina suficientes para promover diferenças significativas entre os fertilizantes e o controle (Figura 16-A). Deste mesmo modo, na terceira secção, observou-se concentrações de P disponível (P-resina) menores que 9 % e na última secção valores menores que 2 % (Figura 16-B). Este fato reforça evidências sobre a baixa mobilidade e disponibilidade do P em Latossolos com alto teor de argila e alta capacidade de adsorção (NOVAIS; SMYTH, 1999).



Com relação ao trajeto difusivo do P no solo, observou-se que em algumas regiões (regiões da placa) podem ocorrer diferentes processos e reações entre o P, constituintes do próprio fertilizante e do solo. Assim, Benbi e Gilkes (1987) descreveram três regiões por onde o P passa durante seu trajeto difusivo. Na primeira região o grânulo residual e uma pequena porção de solo ao seu redor, abrangendo os compostos insolúveis formados no próprio grânulo e precipitados na solução do solo (BENBI; GILKES, 1987). Este processo pode explicar a alta quantidade de P presente na primeira secção, considerando que uma boa parte dele seja representada por esta primeira região.

A segunda região é imediatamente próxima ao fertilizante sendo, portanto, saturada de P (altamente concentrada em P), onde se excede a capacidade de adsorção e tem-se a formação de precipitados pela reação dos íons liberados com metais e materiais orgânicos (BENBI; GILKES, 1987). É importante frisar que a extensão desta região depende diretamente da CMAP do solo (BARROW, 1989). Silva (2013) relata que seria possível o P se movimentar mais livremente nesta região, no entanto os processos de precipitação são intensos e governam sua difusão.

Já a terceira região, é onde a CMAP do solo não é excedida. Deste ponto em diante, o P fica mais sujeito a processos de adsorção específica do que aos processos de precipitação (BENBI; GILKES, 1987).

6.2.5. Total de P-disponível (P-resina) na placa de petri

A Figura 17 apresenta o total de P-disponível em $\mu\text{g placa}^{-1}$ para o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd). Os maiores valores de P-disponível foram observados nos tratamentos 1-9 e 2-8. Estes resultados fornecem evidências da influência do Si na disponibilidade de P nas condições consideradas. Os demais tratamentos não diferiram entre si. O controle apresentou o menor resultado, com isso o valor ora apresentado é oriundo do fósforo já contido no solo.

Conforme observado nas análises de P-total e P-disponível nas diferentes secções anteriormente apresentadas, observou-se que nos tratamentos 1-9 e 2-8 a primeira secção avaliada contribuiu com a maior parte do P-disponível em toda placa de petri. Com a permanência da maior parte do P no centro da placa de petri, presumiu-se que houve por uma menor exposição do P às superfícies adsorventes do solo, fato que pode ter sido fundamental para os maiores teores de P disponíveis encontrados nestes tratamentos.

A alteração de pH nas vizinhanças do grânulo nos diferentes tratamentos conforme discutido acima, pode também ter contribuído para os melhores resultados encontrados nos tratamentos apresentados na Figura 17, porém, no presente estudo não foi possível separar tais processos, bem como a magnitude e de influência de cada um deles.

Sandim et al. (2014) avaliando a influência da silicatagem em relação a calagem na dessorção de P no solo, usando dois extratores (Mehlich-1 e Resina) para avaliar o P disponível, observaram incrementos dos teores de P no solo, apontando assim efeitos positivos da interação P x Si.

Owino-Gerroh e Gascho (2005) estudando a influência da aplicação de Si na fixação de P no solo e a disponibilidade de P às plantas de milho, em um Latossolo Vermelho distrófico, observaram que o Si promoveu redução na capacidade de adsorção de P do solo, sendo este resultado atribuído ao incremento no pH gerado pela aplicação do silicato de sódio ao solo. Os autores explicaram que quando o íon silicato é convertido em ácido silícico no solo, este expressa carga superficial menos negativa do que o íon fosfato, com isso o Si não deve substituir o P nos sítios de sorção ou ser preferencialmente adsorvido quando ambos se encontram livres na solução do solo.

Prado e Fernandes (2001) avaliando o efeito da escória de siderurgia e do calcário na concentração do P disponível em um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar observaram um efeito linear da escória de siderurgia no P disponível no solo, não observando, porém, esta relação quando se aplicou apenas calcário. Estes resultados sugeriram que o efeito positivo da escória de siderurgia se deve ao silicato, que foi capaz de agir na saturação de sítios de adsorção de P no solo.

Com isso, observou-se divergência entre os resultados encontrados na literatura, tornando ainda mais evidente a dificuldade de separação dos fatores que possam substancialmente interferir na disponibilidade do P quando se tratando do estudo da interação P x Si no solo, ao passo que a composição e conseqüentes reações do fertilizante modificam a microrregião de solo ao seu redor.

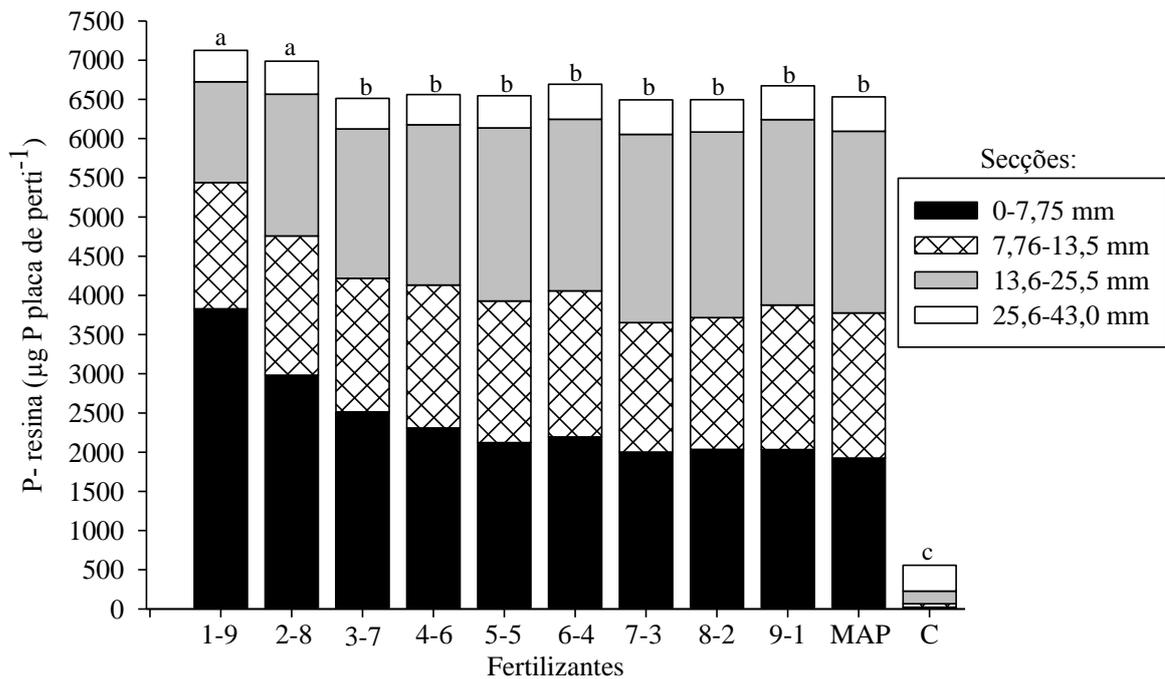


Figura 17 - Quantidade de P-disponível (P-resina) em μg placa de petri⁻¹ no Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd). Para o cálculo, foi considerado o teor de P em $\mu\text{g kg}^{-1}$ em cada uma das seções e a sua respectiva massa de solo. Colunas seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância.

Na Figura 18 é possível observar o total de P-disponível em μg placa⁻¹ para o Latossolo Vermelho distrófico (LVd). Os maiores valores P-disponível foram observados nos tratamentos com proporções (P-Si) intermediárias (4-6, 5-5, 6-4, 7-3). No entanto, estes resultados foram estatisticamente iguais aos tratamentos 1-9, 2-8, 8-2, 9-1 e MAP, que por sua vez foram estatisticamente iguais ao tratamento 3-7. Não foi encontrada uma explicação plausível para este fato, que pode estar associado a erros analíticos, principalmente nas seções de maior massa de solo, onde uma pequena diferença no teor de P pode alterar substancialmente o resultado do P-disponível em toda placa. No entanto, foi possível notar maior contribuição do P-resina pela primeira seção de solo dos tratamentos 1-9 e 2-8, seguindo a mesma tendência observada anteriormente. Como esperado o controle apresentou o menor P-disponível na placa.

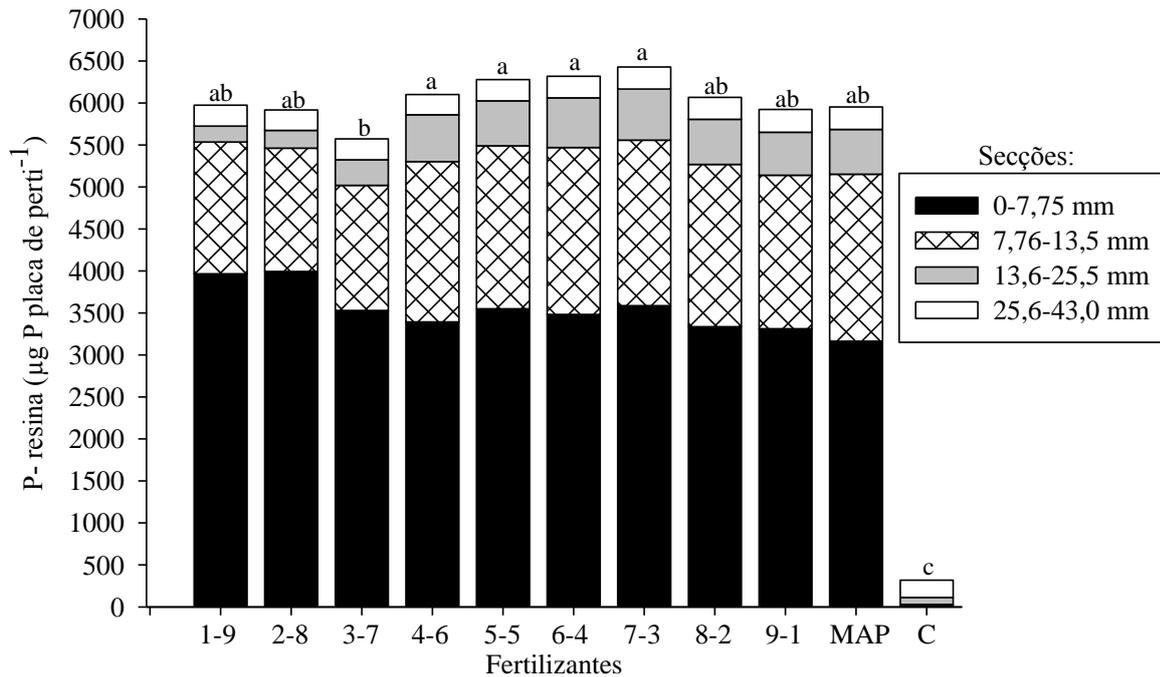


Figura 18 - Quantidade de P-disponível em $\mu\text{g placa}^{-1}$ (P-resina) no Latossolo Vermelho distrófico (LVd). Para o cálculo da quantidade foi considerado o teor de P em $\mu\text{g kg}^{-1}$ em cada das seções e sua respectiva massa de solo. Colunas seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância.

Avaliando a dessorção do P por Si em Latossolo Vermelho-Escuro e Cambissolo, cultivado com eucalipto, Carvalho et al. (2000) observaram que a ação do Si sobre a dessorção de P se mostrou mais evidente no Cambissolo, menos intemperizado com maior teor de caulinita e menor CMAP do que no Latossolo, mais intemperizados e com maior teor de gibbsita.

Cessa et al. (2011) concluíram que a pré-aplicação do Si no solo, com intuito de melhorar a disponibilidade de P, depende principalmente da mineralogia da fração argila do solo, bem como da quantidade de Si na solução do solo, podendo assim este deslocar ou ser deslocado por P nos sítios de carga.

Estes resultados estão de acordo com os observados no presente estudo, no qual foi verificado no solo com menor teor de argila e menor CMAP, influência positiva no teor de P-disponível nos tratamentos com maiores quantidades de Si no grânulo, conforme apresentado anteriormente na Figura 17.

6.3. Experimento 2 - Avaliação da eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados na cultura do milho cultivado em Latossolos com textura e capacidade de adsorção de P contrastantes

6.3.1 Comportamento das plantas de milho cultivadas sob o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)

Na Tabela 10 é apresentado o resumo da análise de variância referente aos parâmetros massa seca da parte aérea (MSPA) e P acumulado. Os parâmetros P na planta proveniente do fertilizante (Pppf) e aproveitamento do P proveniente do fertilizante (APpf) foram analisados separadamente, por não possuírem o tratamento controle (0 mg kg⁻¹ de P) do fator dose de P, assim, o resumo da análise de variância encontra-se na Tabela 11.

Tabela 10 - Resumo do quadro de análise de variância para os parâmetros massa seca da parte aérea (MSPA) e P acumulado na MSPA (P acumulado) das plantas de milho cultivadas no Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)

Fator de Variação	GL	MSPA	P acumulado
Fertilizante	04	ns	**
Dose	03	**	**
Fertilizante x dose	12	ns	**
Resíduo	60	-	-
Total	79	-	-
CV (%)		10,16	12,38

Nota: ns: não significativo; * e ** Significância < 0,05 e, < 0,01 respectivamente, pelo teste de F.

Tabela 11 - Resumo do quadro de análise de variância para os atributos: P na planta proveniente do fertilizante (Pppf) e aproveitamento do P proveniente do fertilizante (APpf) pelas plantas de milho cultivadas no Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)

Fator de Variação	GL	Pppf	APpf
Fertilizante	04	**	**
Dose	02	**	**
Fertilizante x dose	08	*	ns
Resíduo	45	-	-
Total	59	-	-
CV (%)		11,12	9,66

Nota: ns: não significativo; * e ** Significância < 0,05, e < 0,01 respectivamente, pelo teste de F.

6.3.2. MSPA das plantas de milho

Não foram observadas influências significativas entre os diferentes fertilizantes, bem como da interação fertilizante x dose para a MSPA das plantas de milho. Baseando-se na curva de resposta e equação de regressão, observou-se um comportamento quadrático, sendo possível visualizar incremento na MSPA das plantas de milho com o aumento da dose de P em até 73 mg kg^{-1} , valor este obtido através do cálculo do ponto de máxima da linha de tendência (Figura 19).

Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Bastos et al. (2010) e Harger et al. (2007) que também observaram ajustes quadráticos para MSPA de plantas de milho em relação às doses de P aplicadas.

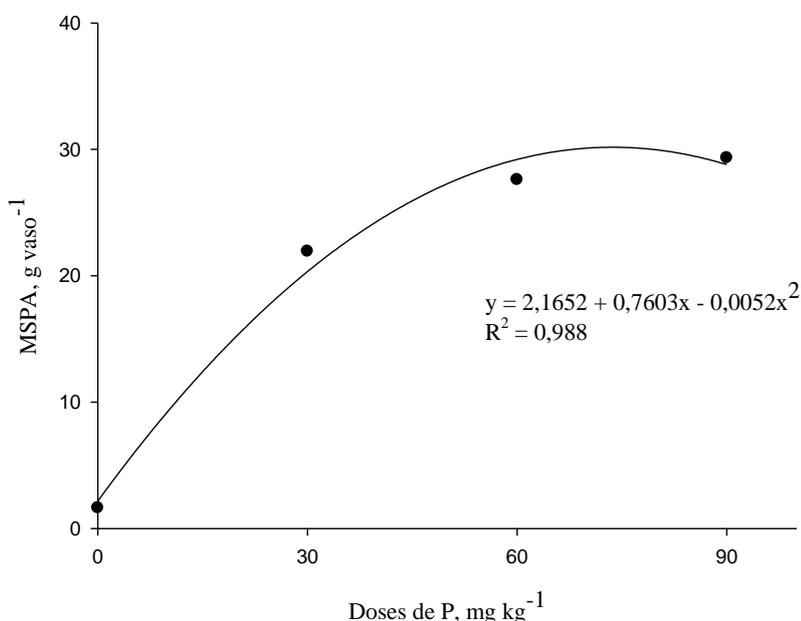


Figura 19 - Efeito das doses de P na massa seca da parte aérea (MSPA) das plantas de milho cultivado no solo (LVAd).

Devido ao baixo teor de P disponível no solo, a primeira dose de P aplicada (30 mg kg^{-1}) foi responsável por um alto incremento de MSPA em relação ao controle, sendo este comportamento esperado e semelhantes aos observados por Corrêa et al. (2008).

Explica-se tais resultados pela importância do P para os processos de produção e transferência energética, sendo intimamente relacionado ao crescimento e produção de massa vegetal (EPSTEIN; BLOOM, 2006; MARSCHENER, 2012; TAIZ; ZEIGER, 2013) proporcionando assim, melhor desenvolvimento, maior acúmulo de massa e reservas na planta. Prado et al. (2001) observaram também que a aplicação de doses crescentes de P aumentou significativamente a produtividade do milho.

Na Tabela 12 é apresentada a eficiência agrônômica relativa (EAR) dos fertilizantes nas diferentes doses em relação ao MAP comercial. Observou-se que na dose de 30 mg kg⁻¹ de P a EAR dos fertilizantes 2-8, 6-4 e 8-2 alcançaram os valores de 117, 115 e 110 % respectivamente, e que na dose de 60 mg kg⁻¹ o fertilizante 8-2 manteve-se em 110 %. Na dosagem de 90 mg kg⁻¹ os fertilizantes 6-4 e SOC se mostraram abaixo do padrão MAP.

A maior EAR observada no fertilizante contendo maior proporção de Si no grânulo e na menor dose de P aplicada pode estar relacionada ao benefício decorrente da interação P x Si na interface solo-grânulo bem como a modificação da estrutura granular, fato que alterou a dinâmica difusiva do P, conferindo altas concentrações de P disponível na secção imediatamente em torno do grânulo de fertilizante, conforme observado no experimento 1.

Tabela 12 - Eficiência agrônômica relativa (EAR %) para massa seca da parte aérea (MSPA) no solo (LVAd)

Fertilizante	Dose mg kg ⁻¹		
	30	60	90
	----- EAR (%) -----		
2-8	117	107	101
6-4	115	104	95
8-2	110	110	104
MAP ¹	100	100	100
SOC	102	105	89

¹ Fosfato monoamônio, adotado como padrão (100 % de eficiência agrônômica).

6.3.3. Interação dos fatores fertilizante e doses de P para o P acumulado

Na Tabela 13 e Figura 20 é apresentado o desdobramento da interação entre fertilizantes e doses de P sobre o P acumulado pelas plantas de milho. Foram observadas diferenças significativas no P acumulado entre as doses, sendo identificada uma resposta crescente com o aumento da dose de P aplicada.

Entre os fertilizantes foram detectadas diferenças apenas na dose de 90 mg kg⁻¹, com o maior acúmulo de P (75,48 mg vaso⁻¹) proporcionado pelo fertilizante 2-8 e o menor (51,14 mg vaso⁻¹) pelo SOC. Os fertilizantes 6-4, 8-2 e MAP apresentaram resultados intermediários, não diferindo estatisticamente entre si (Tabela 13).

O maior acúmulo de P pelo fertilizante 2-8 na dose de 90 mg kg⁻¹ está relacionado com a maior quantidade P disponível no solo. A maior disponibilidade de P, sobretudo na região em torno do grânulo de fertilizante aplicado, como já relatado, pode em grande parte

estar relacionada aos benefícios da interação P x Si no solo, onde segundo Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) o Si pode deslocar o P dos sítios de adsorção ou ser adsorvido preferencialmente, tornando o P mais disponível às plantas. Esta hipótese é reforçada pelo resultado obtido no primeiro experimento, onde os tratamentos 2-8 proporcionou maior teor total de P-disponível no solo da placa de petri em relação aos demais fertilizantes.

Pozza et al. (2007), avaliando a adsorção de P e Si em gibbsita, onde aplicaram quantidades iguais de cada elemento, observaram que pode ocorrer competição pelos sítios de adsorção no solo, ocasionando a dessorção de silicato por fosfato e vice e versa.

Estudando a influência da aplicação de silicato de cálcio sobre a dessorção de P em quatro solos havaianos, Roy et al. (1971) observaram que o Si foi capaz de aumentar o P dessorvido no solo não só diminuindo a CMAP, mas também mantendo as concentrações de P na solução do solo, podendo assim ser mais efetivamente absorvido pelas plantas.

Os resultados obtidos no presente estudo estão de acordo aos encontrados por Fher (2014), que ao avaliar o efeito do flossilicato (Microton[®]) e da wollastonita na disponibilidade de P no solo, observou que o flossilicato proporcionou o maior acúmulo de P na parte aérea de plantas de arroz. O autor concluiu que o Si fornecido pelo flossilicato interagiu com o P do solo tornando-o mais disponível às plantas.

Ao final dos 45 dias de cultivo, o menor acúmulo de P foi observado para o fertilizante SOC na dose de 90 mg kg⁻¹ de P. Este resultado é justificado, pois, segundo Urrutia et al. (2014) plantas adubadas com fertilizantes organo-complexados tendem a acumular menos P, porém, mostram-se mais eficientes em metabolizar o nutriente, o que não gera perdas na produção vegetal quando comparadas à fontes de P solúveis tradicionais.

No entanto, Borin et al. (2010) observaram que o maior acúmulo de P pela planta de milho doce foi crescente até os 63 DAE, sendo o período de maior absorção do P pela planta compreendido entre os 18 aos 27 dias. Com isto torna-se importante o fêecimento eficiente de P nos estágios iniciais da cultura, tendo em vista que há participação direta ou indireta do P em processos metabólicos principalmente os que envolvam gasto energético (EPSTEIN; BLOOM, 2006; MARSCHENER, 2012; TAIZ; ZEIGER, 2013), proporcionando assim melhor desenvolvimento e a conseqüente maior produtividade.

Tabela 13 - Interação de fertilizantes e doses de fósforo, sobre o fósforo acumulado (P acumulado) pelas plantas de milho cultivadas no LVAd

Fertilizante ⁽²⁾	Dose de P (mg kg ⁻¹)				Média
	0	30	60	90	
	P acumulado (mg vaso ⁻¹)				
2-8	1,98 Ad	27,49 Ac	45,78 Ab	75,48 Aa	37,68 A
6-4	1,98 Ad	23,81 Ac	43,88 Ab	59,94 Ba	32,40 B
8-2	1,98 Ad	25,58 Ac	41,01 Ab	58,59 BCa	31,79 BC
MAP	1,98 Ad	25,13 Ac	45,76 Ab	62,03 Ba	33,72 AB
SOC	1,98 Ad	21,90 Ac	38,16 Ab	51,14 Ca	28,29 C
Média	1,98 d	24,78 c	42,92 b	61,43 a	⁽³⁾

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

⁽²⁾ Proporções P-Si no grânulo: 2-8, 6-4, 8-2; MAP: fosfato monoamônio; SOC: Superfosfato organo-complexado.

⁽³⁾ Média geral.

Analisando as curvas de resposta e equações de regressão ajustadas para o P acumulado em função das doses (Figura 20), observou-se um comportamento linear do fertilizante 2-8 e quadrático para os demais, sendo que para todos os fertilizantes, o maior valor de P acumulado coincidiu com a maior dose de P aplicada.

Estes resultados assemelham-se aos obtidos por Alovisei et al. (2014) que estudando a interação de doses de P e Si na cultura do feijão cultivado sob um Latossolo Vermelho distroférico e um Neossolo Quartzarênico órtico, observaram maior quantidade de P acumulado na maior dose de P aplicada ao solo, em ambos os casos com comportamento linear.

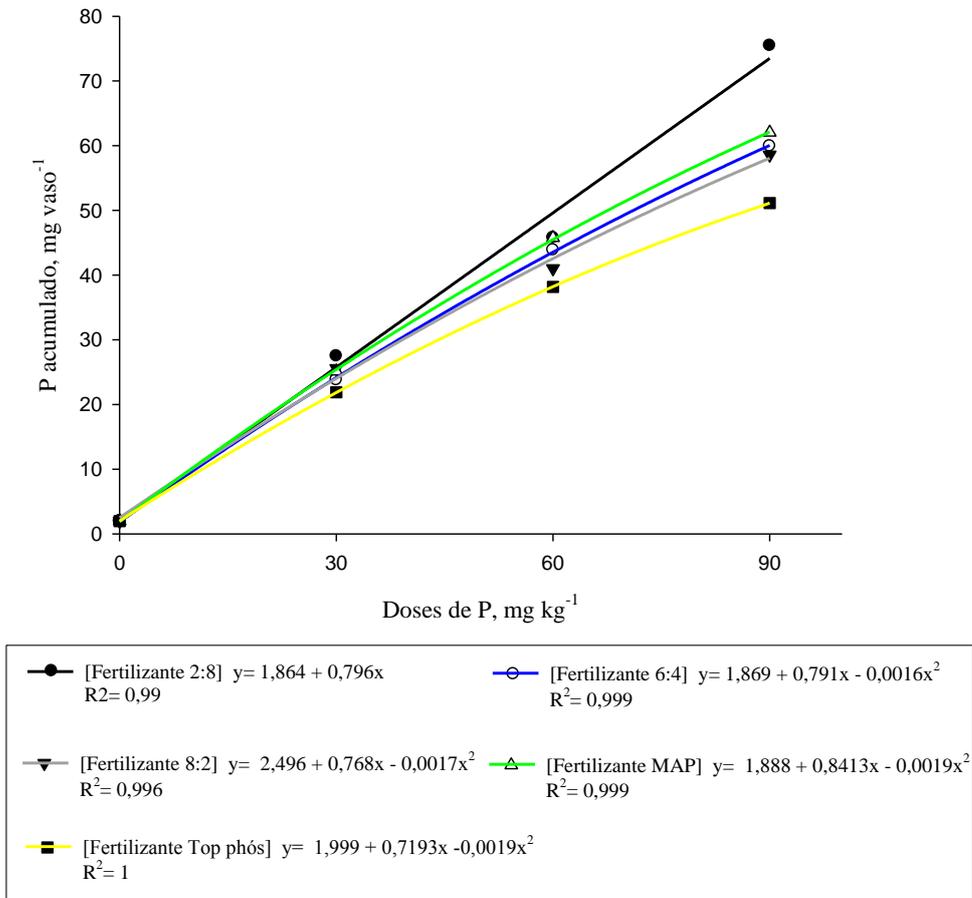


Figura 20 - Efeito de fontes e doses de fósforo para P acumulado na MSPA do milho cultivado no (LVAd).

Os resultados da EAR para P acumulado encontram-se apresentados na Tabela 14. Para a dose de 30 mg kg^{-1} o fertilizante 2-8 proporcionou a maior EAR (110 %) sendo a menor obtida com o fertilizante SOC (86 %). Para a dose de 60 mg kg^{-1} , os menores valores foram obtidos com os fertilizantes 6-4, 8-2 e SOC, apresentando, respectivamente, EAR de 96, 89 e 83 %. O fertilizante 2-8 apresentou a maior EAR na dosagem de 90 mg kg^{-1} de P, alcançando 122 %, sendo que o SOC obteve apenas 82 %, não atingindo a EAR do fertilizante padrão (MAP).

Nota-se que nas doses de 30 e 90 mg kg^{-1} de P aplicada, o fertilizante 2-8 apresentou maior EAR, fato que provavelmente relacionado com a interação Si e o P presentes no grânulo do fertilizante. Estes resultados também foram observados por Lopes et al. (2010) ao cultivarem estilosantes Mineirão, observaram na presença do silicato, um incremento de 23,7 % da eficiência de utilização do P aplicado à 50 % da dose, em relação à presença de calcário.

Para o fertilizante SOC, a menor EAR pode estar relacionada aos argumentos supramencionados, estando estes resultados coerentes às justificativas propostas por Urrutia et al. (2014).

Tabela 14 - Eficiência agrônômica relativa (EAR%) para P acumulado

Fertilizante	Dose mg kg ⁻¹		
	30	60	90
	EAR (%)		
2-8	110	101	122
6-4	94	96	97
8-2	102	89	94
MAP ¹	100	100	100
SOC	86	83	82

¹ Fosfato monoamônio, adotado como padrão (100 % de eficiência agrônômica).

6.3.4. Fósforo proveniente do fertilizante

Os resultados seguiram a mesma tendência aos observados para o P acumulado, pois ambos representam o P absorvido pela planta. No entanto, o Pppf exclui a participação do P natural do solo o qual foi absorvido junto ao P fornecido via fertilização. Isto foi possível através do uso da técnica isotópica com traçador ³²P, que possibilitou quantificar o P proveniente do fertilizante (Pppf) bem como o aproveitamento do P proveniente do fertilizante (APpf), absorvido pela planta (MURAOKA, 1991).

Analisando o desdobramento para o Pppf, observou-se em todos os tratamentos, um comportamento crescente em função do aumento da dose de P aplicada (Tabela 15). Dentre os fertilizantes, foram observadas diferenças significativas apenas na dose de 90 mg kg⁻¹, onde o maior teor do Pppf (71,98 mg vaso⁻¹) foi proporcionado pelo fertilizante 2-8 e o menor (48,45 mg vaso⁻¹) pelo SOC. Os demais fertilizantes apresentaram resultados intermediários não diferindo estatisticamente entre si (Tabela 15).

Tabela 15 - Desdobramento da interação entre fertilizantes e doses de fósforo, sobre o fósforo na planta proveniente do fertilizante (Pppf) pelas plantas de milho cultivadas no LVAd

Fertilizante ⁽²⁾	Dose de P (mg kg ⁻¹)				Média
	0	30	60	90	
	P ppf (mg vaso ⁻¹)				
2-8	-	25,02 Ac	43,29 Ab	71,98 Aa	46,76 A
6-4	-	21,84 Ac	41,31 Ab	56,78Ba	39,98 B
8-2	-	23,23 Ac	38,36 Ab	55,44 Ba	39,01 BC
MAP	-	22,53 Ac	42,99 Ab	58,69 Ba	41,40 B
SOC	-	19,66 Ac	35,69 Ab	48,45 Ca	34,6 C
Média	-	22,46 c	40,33 b	58,27 a	⁽³⁾

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

⁽²⁾ Proporções P-Si no grânulo: 2-8, 6-4, 8-2; MAP: fosfato monoamônio; SOC: Superfosfato organo-complexado.

⁽³⁾ Média geral.

6.3.5. Aproveitamento do P proveniente do fertilizante em cada tratamento e dose

Na Tabela 16 é possível observar o aproveitamento do P proveniente dos fertilizantes (APpf). Independentemente da dose aplicada, o maior APpf foi verificado para o fertilizante 2-8, alcançando 26,17 %. Em seguida apresentaram-se os fertilizantes 6-4, 8-2 e MAP que não diferiram estatisticamente entre si. O menor aproveitamento (19,87 %) foi observado para o fertilizante SOC.

De modo geral, o aproveitamento médio do P obtido neste estudo se mostrou acima dos valores comumente encontrados na literatura. Franzini et al. (2009a) em estudo com plantas de milho, utilizando superfosfato triplo marcado com ³²P, aproveitamento do P aplicado em torno de 10 %. Neptune et al. (1979) por intermédio de técnicas isotópicas ³²P, também verificaram que o aproveitamento do P aplicado via superfosfato triplo não atingiu 10 % pela cultura do feijoeiro.

O maior APpf (26,17 %) foi alcançado com 30 mg kg⁻¹ de P aplicado, decrescendo-se para 22,4 e 21,58 % nas doses de 60 e 90 mg kg⁻¹ respectivamente (Tabela 16). Tal comportamento já era esperado, devido ao fato do APpf ser dependente e correlacionado com a dosagem de fertilizante fosfatado aplicado.

Essa queda do aproveitamento à medida que se aumentou a dose de P também foi encontrada por Lopes et al. (2010), que verificaram redução do aproveitamento do P pelo estíloso Mineirão, variando de 13,2 % para 3,2 %, da menor para a maior dose de P aplicada, respectivamente.

Tabela 16 - Aproveitamento do P fornecido pelos diferentes fertilizantes e doses

Fertilizante	APpf (%)
2-8	26,17 A
6-4	22,75 B
8-2	22,55 B
MAP	23,55 B
SOC	19,87 C
Dose de P mg kg ⁻¹	APpf (%)
30	24,95 A
60	22,40 B
90	21,58 B

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

6.4. Comportamento das plantas de milho cultivadas sob o Latossolo Vermelho distrófico (LVd)

Apresentam-se nas Tabelas 17 e 18 os quadros da análise de variância para o experimento sob o Latossolo Vermelho distrófico (LVd). Da mesma forma que para o solo anterior, o Pppf e APpf foram analisados separados dos demais parâmetros, pelo fato de não possuírem o tratamento controle (0 mg kg⁻¹ de P) do fator dose de P, pois são dependentes dos fertilizantes aplicados.

Tabela 17 - Quadro de análise de variância para os atributos massa seca da parte aérea (MSPA) e fósforo acumulado (P acumulado) das plantas de milho cultivadas no Latossolo Vermelho distrófico (LVd)

Fator de Variação	GL	MSPA	P acumulado
Fertilizante	4	**	**
Dose	3	**	**
Fertilizante x dose	12	ns	**
Resíduo	60	-	-
Total	79	-	-
CV (%)		8,13	9,62

Nota: ns: não significativo; * e ** Significância < 0,05 e < 0,01 respectivamente, pelo teste de F.

Tabela 18 - Quadro de análise de variância para os atributos fósforo na planta proveniente do fertilizante (Pppf) e aproveitamento do fósforo proveniente do fertilizante (APpf) pelas plantas de milho cultivadas no Latossolo Vermelho distrófico (LVd)

Fator de Variação	GL	Pppf	APpf
Fertilizante	4	**	**
Dose	2	**	**
Fertilizante x dose	8	ns	ns
Resíduo	45	-	-
Total	59	-	-
CV (%)		8,63	7,65

Nota: ns: não significativo; * e ** Significância < 0,05 e < 0,01 respectivamente, pelo teste de F.

6.4.1. Comportamento dos fatores fertilizantes e doses para MSPA das plantas de milho

Os maiores valores de MSPA foram alcançados com os fertilizantes 2-8, 6-4, 8-2 e MAP, que não diferiram estatisticamente entre si. O SOC proporcionou o menor acúmulo de MSPA, entretanto se mostrando estatisticamente semelhante aos fertilizantes 6-4 e MAP (Tabela 19).

Zavaschi (2014) trabalhando com a cultura da cana-de-açúcar, observou menor acúmulo de massa seca nos colmos com a aplicação do SOC em relação ao superfosfato simples. O autor atribuiu este resultado à possível maior energia dispensada pela planta para absorver o nutriente, justificando em partes o menor ganho de massa vegetal. Pois segundo Urrutia et al. (2014) os processos para descomplexação do P do fertilizante envolvem gasto de energia, levando a planta, através de respostas metabólicas a maximizar o aproveitamento do P absorvido, o que pode ainda ocasionar um menor acúmulo de matéria seca das plantas.

No mesmo estudo, Zavaschi (2014) também avaliou a influência da aplicação do SOC na soqueira da cana-de-açúcar, sendo observado menor acúmulo de massa seca nos ponteiros em comparação às plantas que receberam superfosfato simples.

Tabela 19 - Influência dos fertilizantes na MSPA das plantas de milho em g vaso⁻¹

Fertilizante	MSPA (g vaso ⁻¹)
2-8	21,71 A
6-4	21,05 AB
8-2	21,50 A
MAP	20,96 AB
SOC	19,59 B

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A Figura 21 apresenta o comportamento da MSPA em função das doses de P aplicada. Constatou-se um comportamento crescente da curva de resposta com o aumento da dose, ajustando-se um modelo quadrático. Por meio da equação que descreve o comportamento da curva, foi possível calcular a dose de 74 mg kg⁻¹ de P aplicado para o máximo ganho de MSPA. Este resultado além de serem semelhantes aos observados no LVAd anteriormente apresentado, corroboram os observados por Silva et al. (2012).

Neste solo também foi observada uma elevada resposta na MSPA a partir da menor dose de P aplicado, este fato se deve ao baixo teor de P disponível inicialmente no solo. Pozza et al. (2007) afirmaram que na grande maioria dos solos tropicais, o suprimento natural de P é insuficiente ao adequado desenvolvimento das plantas. No presente estudo foi possível observar sintomas severos de deficiência de P no tratamento controle, resultando em baixo ganho em MSPA ao final dos 45 dias de cultivos.

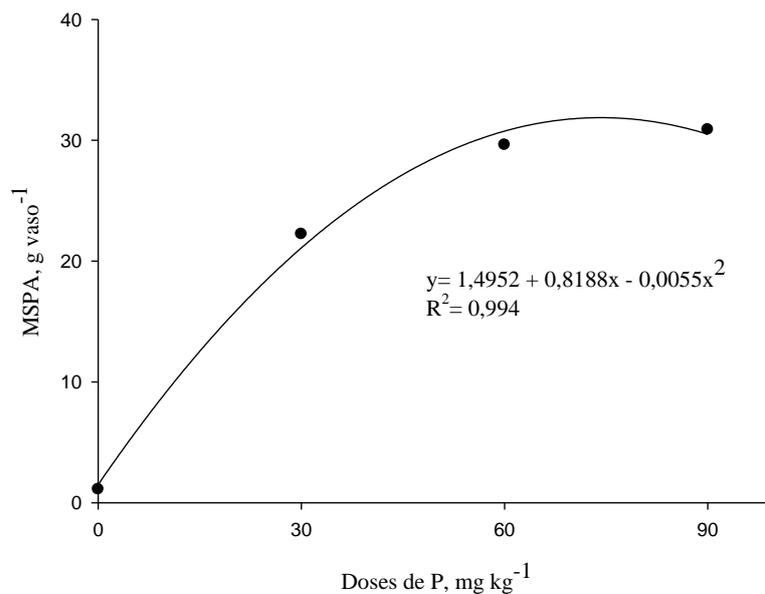


Figura 21 - Efeito das doses de P na massa seca da parte aérea (MSPA) das plantas de milho cultivadas no solo (LVd)

A Tabela 20 apresenta a EAR dos fertilizantes para MSPA. Observou-se que a maior EAR foi alcançada com o fertilizante 2-8 (112 %), e a menor para o SOC (86 %) ambos na dose de 30 mg kg⁻¹ de P aplicado. Para os demais fertilizantes, foram observadas menores diferenças em relação ao fertilizante padrão (MAP).

Tabela 20 - Eficiência agronômica relativa (EAR %) para massa seca da parte aérea (MSPA)

Fertilizante	Dose mg kg ⁻¹		
	30	60	90
	EAR (%)		
2-8	112	100	102
6-4	95	101	103
8-2	99	108	100
MAP ¹	100	100	100
SOC	86	97	95

¹ Fosfato monoamônio, adotado como padrão (100 % de eficiência agronômica).

6.4.2. Interação dos fatores fertilizantes e doses de P para o P acumulado

Observou-se que na dose de 30 mg kg⁻¹ o fertilizante 2-8 apresentou maior valor de P acumulado (25,06 mg vaso⁻¹), no entanto, este não se diferiu estatisticamente dos fertilizantes 6-4, 8-2 e MAP. O fertilizante SOC proporcionou menor quantidade de P acumulado, se diferenciando estatisticamente apenas do tratamento 2-8 (Tabela 21).

Na dose de 60 mg kg⁻¹ o fertilizante SOC apresentou a menor quantidade de P acumulado diferenciando estatisticamente dos demais fertilizantes que se mostraram superiores. Analisando o comportamento dos fertilizantes na maior dose de P aplicada (90 mg kg⁻¹), foi identificado que o tratamento 2-8 promoveu o maior acúmulo de P acumulado (56,12 mg vaso⁻¹). Os tratamentos 6-4, 8-2 e MAP apresentaram valores intermediários e não diferiram estatisticamente entre si. A menor quantidade de P acumulado foi observada no tratamento SOC, que diferiu estatisticamente dos demais (Tabela 21).

Novamente foi possível observar que o fertilizante com maior proporção de Si em relação ao P no grânulo proporcionou um maior acúmulo de P pelas plantas de milho, sugerindo uma maior disponibilidade do P aplicado ao solo por estes fertilizantes.

Valle et al. (2016) também observaram este comportamento, onde avaliando a aplicação do fertilizante AgroSiCa[®] em dois Latossolos e um Cambissolo, observaram aumento do teor de P na solução dos solos, atribuindo estes resultados, em partes, à competição entre o P e Si pelos mesmos sítios de adsorção no solo.

Avaliando a adsorção de diferentes ânions, dentre eles o fosfato e silicato, na superfície da gibbsita, Pozza et al. (2007) observaram que o fosfato tem capacidade de deslocar o Si adsorvido na superfície da gibbsita e vice versa. Os autores ainda concluíram que a aplicação prévia de Si seguida da aplicação de mesma quantidade molar de fosfato, reduziu em até 40,9 % a adsorção de fosfato à gibbsita.

Tais evidências podem explicar a maior eficiência de alguns dos fertilizantes testados, podendo também relacionar à dinâmica difusiva do P a partir dos grânulos de fertilizante aplicado ao solo, conforme observado no primeiro experimento. Com isso, o somatório de eventos de natureza físico-químicas verificados na interface solo-grânulo pode ter interferido na movimentação, quantidade e disponibilidade do P no solo durante a dissolução do grânulo de fertilizantes solúveis, conseqüentemente refletido na absorção e acúmulo de P pela planta.

Assim, os resultados desta pesquisa estão de acordo com autores como Degryse e McLaughlin (2014), onde comentam a respeito de reações que ocorrem em torno do grânulo aplicado ao solo e que podem afetar a eficiência agrônômica de fertilizantes bem como seu efeito residual para as culturas subsequentes.

Tabela 21 - Interação dos fatores fertilizantes e doses de P sobre o P acumulado pelas plantas de milho cultivadas no LVd

Fertilizante ⁽²⁾	Dose de P (mg kg ⁻¹)				Média
	0	30	60	90	
	Pacumulado (mg vaso ⁻¹)				
2:8	0,845 Ad	25,06 Ac	40,53 Ab	56,12 Aa	30,64 A
6:4	0,845 Ad	22,69 ABc	36,39 Ab	49,55 Ba	27,37 B
8:2	0,845 Ad	22,02 ABc	36,47 Ab	48,93 Ba	27,07 B
MAP	0,845 Ad	23,19 ABc	36,31 Ab	47,29 Ba	26,90 B
SOC	0,845 Ad	18,25 Bc	30,36 Bb	40,83 Ca	22,57 C
Média	0,845 d	22,24 c	36,01 b	48,55 a	⁽³⁾

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

⁽²⁾ Proporções P-Si no grânulo: 2-8, 6-4, 8-2; MAP: fosfato monoamônio; SOC: Superfosfato orgânico-complexado.

⁽³⁾ Média geral.

A Figura 22 apresenta as curvas de resposta para o P acumulado em função das doses de P. Para todos os fertilizantes Foi observado o incremento no P acumulado à medida que aumentou-se a dose aplicada, sendo realizado o ajuste de todas as curvas em modelos quadráticos. Pode ser verificado para todos os fertilizantes que o maior acúmulo de P pelas plantas de milho coincidiu com a maior dose de P aplicada. Os resultados se mostraram semelhantes aos observados para o LVAd.

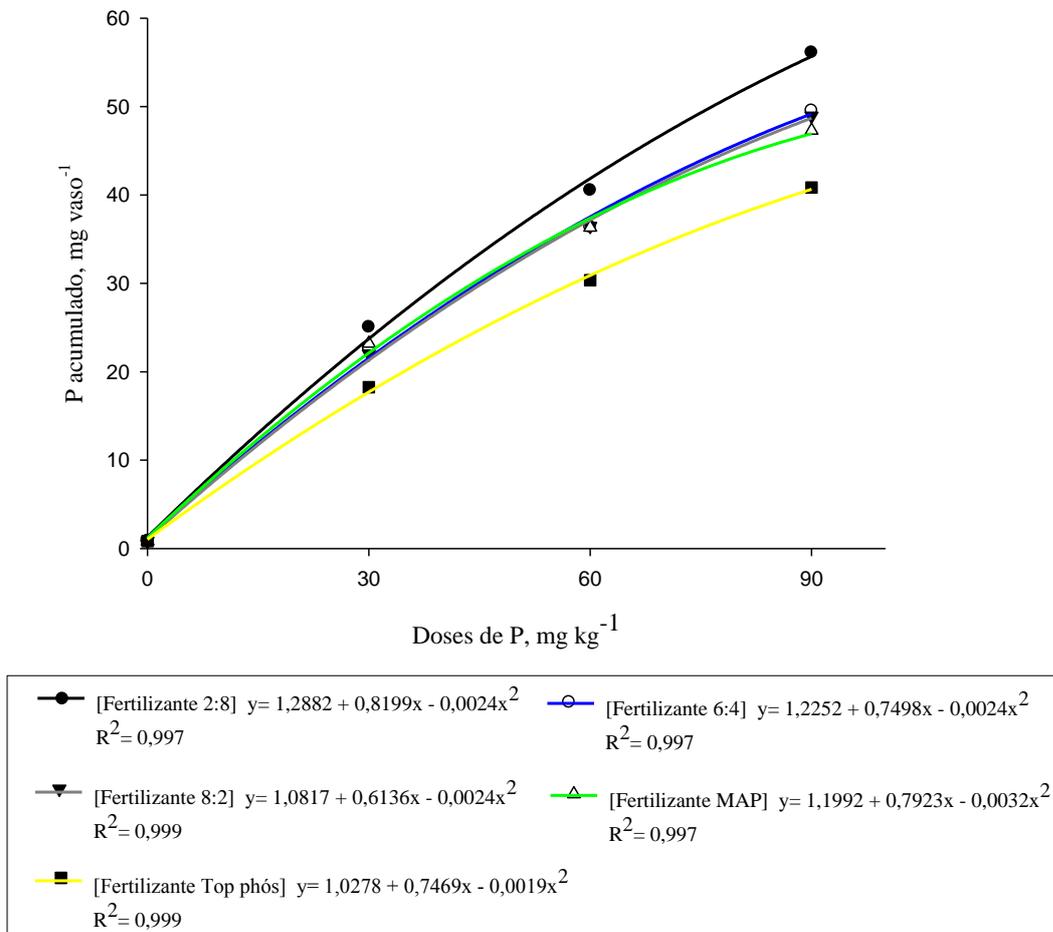


Figura 22 - Efeito de fontes e doses de fósforo para P acumulado na massa seca da parte aérea do milho cultivado no (LVd).

Na Tabela 22 é possível observar que o fertilizante 2-8 foi mais eficiente em disponibilizar P para as plantas em relação ao padrão fertilizante padrão (MAP) e aos demais tratamentos, apresentando EAR de 108, 112 e 119 %, respectivamente para as doses de 30, 60 e 90 mg kg⁻¹ de P. Independente da dose, os fertilizantes 6-4 e 8-2 pouco diferiram do padrão. O fertilizante SOC apresentou a menor EAR, com valores que variaram de 78 a 86 % para a menor e maior dose de P aplicado, respectivamente.

Tabela 22 - Eficiência agronômica relativa (EAR %) para P acumulado

Fertilizante	Dose mg kg ⁻¹		
	30	60	90
	EAR (%)		
2-8	108	112	119
6-4	98	100	105
8-2	95	100	104
MAP ¹	100	100	100
SOC	78	83	86

¹ Fosfato monoamônio, adotado como padrão (100 % de eficiência agronômica).

6.4.3. Fósforo proveniente do fertilizante

Os resultados verificados para o Pppf nos diferentes fertilizantes seguiram o mesmo comportamento observado para o P acumulado. O fertilizante 2-8 proporcionou o maior valor de Pppf (37,28 mg vaso⁻¹). Os fertilizantes 6-4, 8-2 e MAP apresentaram-se estatisticamente semelhantes. O fertilizante SOC foi o que apresentou o menor valor de Pppf (27,23 mg vaso⁻¹), diferindo estatisticamente dos demais (Tabela 23).

Mesma forma que para o P acumulado, para o Pppf em função das doses, observou-se comportamento crescente em decorrência do aumento da dose de P aplicada ao solo, sendo verificado os valores de 19,65, 33,22 e 45,39 mg vaso⁻¹ para as respectivas doses de 30, 60 e 90 mg kg⁻¹ de P.

Tabela 23 - Influência dos fatores fertilizantes e doses de fósforo, sobre o fósforo- na planta proveniente do fertilizante (Pppf) nas plantas de milho cultivadas no LVd

Fertilizante	Pppf (mg vaso ⁻¹)
2:8	37,28 A
6:4	33,39 B
8:2	33,04 B
MAP	32,84 B
SOC	27,23 C

Dose de P mg kg ⁻¹	Pppf (mg vaso ⁻¹)
30	19,65 C
60	33,22 B
90	45,39 A

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

6.4.4. Aproveitamento do P proveniente do fertilizante

O maior APpf foi alcançado com o fertilizante 2-8 (21,53 %). Os fertilizantes 6:4, 8:2 e MAP apresentaram os valores de 19,41, 19,16 e 19,33 %, respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si. O menor aproveitamento do P foi observado para o fertilizante SOC (15,75 %) (Tabela 24). Mesmo neste solo, com elevada CMAP, os fertilizantes aplicados proporcionaram aproveitamento superiores aos resultados comumente encontrados na literatura (NEPTUNE et al., 1979; FRANZINI et al., 2009b; LOPES et al., 2010).

É evidente a queda no aproveitamento do P mediante aumento da dose aplicada, sendo observados os respectivos valores de 21,84, 18,46 e 16,81 % para as doses de 30, 60 e 90 mg kg⁻¹ de P aplicado ao solo (Tabela 24). Estes resultados também seguiram a mesma tendência observada por autores como Lopes et al. (2010) e Franzini et al. (2009b).

Tabela 24 - Aproveitamento do P proveniente dos fertilizantes (APpf) e doses

Fertilizante	APpf (%)
2:8	21,53 A
6:4	19,41 B
8:2	19,16 B
MAP	19,33 B
SOC	15,75 C
Dose de P mg kg ⁻¹	APpf (%)
30	21,84 A
60	18,46 B
90	16,81 C

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

7. CONCLUSÕES

1. O granulador desenvolvido possibilitou a produção dos fertilizantes;
2. Todos o fertilizantes avaliados promoveram alterações no pH do solo em torno dos grânulos, sendo estes resultados observados principalmente na primeira e segunda secção a partir do ponto de aplicação do grânulo;
3. Os fertilizantes com maiores proporções de Si no grânulo foram os que mais modificaram a difusão do P, tanto no Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, quanto no Latossolo Vermelho distrófico;
4. Os fertilizantes com as maiores proporções de Si em relação ao P no grânulo conferiram nos maiores teores de P-total e P-disponível, na primeira secção de solo analisada, indicando a menor difusão do P nestes tratamentos;
5. No Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico o P aplicado difundiu-se até a terceira secção de solo, ao passo que no Latossolo Vermelho distrófico foram encontradas quantidades significativas de P apenas até a segunda secção de solo a partir do ponto de aplicação do grânulo;
6. Apenas os fertilizantes 1-9 e 2-8 aumentaram o total de P-disponível nas placas de petri preenchidas com o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, não sendo este resultado observado para o Latossolo Vermelho distrófico;
7. Observou-se um comportamento quadrático para MSPA das plantas de milho em função das doses de P aplicado;
8. Tanto no Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, quanto no Latossolo Vermelho distrófico os maiores valores de P acumulado pelas plantas de milho e P proveniente do fertilizante foram observados na maior dose de P aplicado;

9. O fertilizante 2-8 proporcionou maiores valores de Pppf, APpf, P acumulado pelas plantas de milho, bem como maior eficiência agrônômica nos parâmetros MSPA e P acumulado em comparação aos demais fertilizantes;

10. O SOC proporcionou os menores valores de P acumulado, Pppf e APpf pelas plantas de milho bem como menor eficiência agrônômica para os parâmetros MSPA e P acumulado.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados proporcionados pela adição do Si aos grânulos de MAP podem estar atribuídos à ocorrência de três fatores isolados ou em conjunto, sendo que as maiores proporções de Si (filossilicato) presente no fertilizante podem ter retardado entrada de água no grânulo e conseqüentemente a liberação do P. Mesmo que pequena, a alteração do pH na região em torno do grânulo de fertilizante aplicado pode ter interferido nos processos de adsorção e precipitação do P. Nos fertilizantes com maiores proporções de Si, pode ter ocorrido competição por sítios de adsorção do P no solo, e conseqüentemente tornando o P mais disponível às plantas.

Mais estudos devem ser realizados com a finalidade de compreender os mecanismos físicos e as reações químicas envolvidas na dissolução de fertilizantes contendo P e Si na composição, gerando assim mais informações e suporte ao desenvolvimento de novas tecnologias para fertilizantes fosfatados, visando aumento da eficiência de sua utilização e tornando mais sustentável a produção de cultivos.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J. C. **Manual de análise de fertilizantes**. Piracicaba: FEALQ, 2009. 219 p.
- ALOVISI, A. M. T.; FURTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; CURI, N.; ALOVISI, A. A. Silicon-phosphorus interactions in soils cultivated with bean plants. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 36, n. 1, p. 79-86, 2014.
- ALVAREZ, 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.
- BARBER, S. A. Diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. **Soil Science**, Baltimore, v. 93, n. 1, p. 39-49, 1962.
- BARBER, S. A. Soil-plant interactions in the phosphorus nutrition of plants. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison, WI: ASA, CSSA, and SSSA, 1980, p. 591-613.
- BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach**. 2. ed. New York, NY: John Wiley e Sons, 1995. 414 p.
- BARROW, N. J. Low solubility of phosphates: Surface reactions of phosphate in soil. **Journal of the Australian Institute of Agricultural Science**, Brisbane, v. 2, n. 1, p. 33-37, 1989.
- BARROW, N. J. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, p. 183-230, 1985.
- BARROW, N. J. Soil phosphate chemistry and the P-sparing effect of previous phosphate applications. **Plant and Soil**, The Hague, v. 397, n. 1, p. 401-409, 2015.
- BASTOS, A.; COSTA, J. P. V.; SILVA, I. F.; RAPOSO, R. W. C.; OLIVEIRA, F. A.; ALBUQUERQUE, A. W. Resposta do milho a doses de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 5, p. 485-491, 2010.
- BENBI, D. K.; GILKES, R. J. The movement into soil of P from superphosphate grains and its availability to plants. **Fertilizer Research**. Dordrecht, n. 1, v. 12, p. 21-36, 1987.
- BINGHAM, F. T. Phosphorus. In: CHAPMAN, H. D. (Ed.). **Diagnostic criteria for plants and soil**. Abilene: Homer D. Chapman, 1966. p. 324-361.
- BLANCHARD, R. W.; CALDWELL, A. C. Phosphate-ammonium moisture relationships in soils: I. Ion concentration in static fertilizer zones and effects on plant. **Soil Science Society of America Proceedings**. Madison, v. 30, p. 39-43, 1966.

BOLAN, N. S.; HEDLEY, M. J. Dissolution of phosphate rocks in soils. 2. Effect of pH on the dissolution and plant availability of phosphate rock in soil with pH dependent charge. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 24, n. 3, p. 125-134, 1990.

BORIN, A. L. D. C.; LANA, R. M. Q.; PEREIRA, H. S. P. Absorção, acúmulo e exportação de macronutrientes no milho doce cultivado em condições de campo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, p. 1591-1597, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes, corretivos, inoculantes, substratos e contaminantes**. Brasília, DF, 2007. 140 p.

CAMARGO, A. O.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1986. 94 p. (Boletim Técnico, 106).

CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; FERNANDES, L. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. C. Dessorção de fósforo por sílcio em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 69-74, 2000.

CASTRO, R. C.; TEIXEIRA, P. C.; BENITES, V. M.; OLIVEIRA, D. F.; OLIVEIRA, L. F.; ANJOS, M. J. Analyzing the mobility in granular forms of P fertilizer in Brazilian soils under laboratory conditions. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE/INAC, 2013. Recife/PE. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Energia Nuclear, 2013.

CESSA, R. M. A.; NOVELINO, J. O.; VITORINO, A. C. T.; MAUAD, M. Absorção de fósforo e crescimento do sorgo em função da aplicação de sílcio e fósforo em Latossolo vermelho distroférico. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 34, n. 1, p. 135-142, 2011.

CHAGAS, W. F. T.; EMRICH, E. B.; GUELFY, D. R.; CAPUTO, A. L. C.; FAQUIM, V. Productive characteristics, nutrition and agronomic efficiency of polymer-coated MAP in lettuce crops. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 2, p. 266-276, 2015.

CHIEN, S. H.; MENON, R. G.; BILLINGHAM, K. S. Phosphorus availability from phosphate rock as enhanced by water-soluble phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 4, p. 1173-1177, 1996.

CIMPEANU, C.; BARNA, C.; ILIESCU, M. ^{32}P - Radioactive tracer for the evaluation of fertilizers influence on nutrients translocation Process from soil to the plants. **Romanian Journal of Physics**, Bucharest, v. 59, n. 9-10, p. 1048-1056, 2014.

COOPER, J.; LOMBARDI, R.; BOARDMAN, D.; CARLIELL-MARQUET, C. The future distribution and production of global phosphate rock reserves. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 57, n. esp., p. 78-86, 2011.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, Oxford, v. 19, n. 2, p. 292-305, 2009.

CORDELL, D.; WHITE, S. Tracking phosphorus security: indicators of phosphorus vulnerability in the global food system. **Food Security**, New York, v. 7, n. 2, p. 337-350, 2015.

CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, F.; SOUZA, S. K. S.; SILVA, G. B. Disponibilidade e níveis críticos de fósforo em milho e solos fertilizados com fontes fosfatadas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, n. 3, p. 218-224, 2008.

DEGRYSE, F.; McLAUGHLIN, M. J. Phosphorus diffusion from fertilizer: Visualization, chemical measurements, and modeling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 78, n. 3, p. 832-842, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Sumário mineral**. Brasília, DF, 2014. 141 p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectiva**. Tradução de Maria Edna Tenório Nunes. Londrina: Editora Planta, 2006. 401 p.

ERRO, J.; BAIGORRI, R.; YVIN, J. C.; GARCÍA-MINA, J. M. ^{31}P NMR characterization and efficiency of new types of water-insoluble phosphate fertilizers to supply plant available phosphorus in diverse soil types. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, DC, v. 59, n. 5, p. 1900-1908, 2011.

ERRO, J.; URRUTIA, O.; BAIGORRI, R.; APARICIO-TEJO, P.; IRIGOYEN, I.; TORINO, F.; MANDADO, M.; YVIN, J. C.; GARCÍA-MINA, J. M. Organic complexed superphosphates (CSP): physicochemical characterization and agronomical properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, DC, v. 60, n. 8, p. 2008-2017, 2012.

FAN, F.; DING, G.; WEN, X. Proteomic analyses provide new insights into the responses of *Pinus massoniana* seedlings to phosphorus deficiency. **Proteomics**, Hoboken, v. 16, n.3, p. 504-515, 2016.

FAO. **World fertilizer trends and outlook to 2018**. Rome, 2015. 66 p.

FARDEAU, J. C. Dynamics of phosphate in soil: an isotopic outlook. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 45, n. 2, p. 91-100, 1996.

FARDEAU, 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, n. 2, p. 101-109, 1996.

FARDEAU, J. C.; MOREL, C.; JAHIEL, M. Does long contact with the soil improve the efficiency of rock phosphate? Results of isotopic studies. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 17, n. 1, p. 3-19, 1988.

FASSBENDER, H. W. Fósforo. In: _____. **Química de suelos**: Com ênfases en suelos da América Latina. Turrialbla: IICA, 1978. p. 262-307.

FEHR, R. M. **Efeito do silício na utilização do fósforo pelas plantas de arroz**. 2014. 68 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

FERNANDEZ, 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.

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

FRANZINI, V. I.; MURAOKA, T.; CORASPE-LEÓN, H. M.; MENDES, F. L. Eficiência de fosfato natural reativo aplicado em misturas com superfosfato triplo em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, n. 9, p. 1092-1099, 2009b.

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

GARCÍA-MINA, J. M. **Fertilising composition and process for the obtainment thereof**. EP Patent 1,612,200, 4 Jan. 2006. Disponível em: <https://data.epo.org/publication-server/pdf-document?pn=1612200&ki=A2&cc=EP>. Acesso em: 15 jan. 2016.

GILKES, R. J.; MANGANO, P. Poorly soluble, iron-aluminium phosphates in ammonium phosphate fertilizers: Their nature and availability to plants. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 21, n. 2, p. 183-194, 1983.

GODOY, L. J. G.; PINHEIRO, D. R.; MENDONÇA, J. C.; FRANÇA, F. G. Teor de silício e de nutrientes no solo e nas folhas de bananeira submetida a doses de silicato de cálcio e magnésio no Vale do Ribeira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2009.

GRAETZ, D. A.; NAIR, V. D. Phosphorus sorption isotherm determination. In: PIERZYNSKI, G. M. (Ed.). **Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals and waters**. Washington, DC: USDA-CSREES Regional Committee, 2000. p. 35-38. (Southern Cooperative Series Bulletin, 396).

HARDERSON, G. **Use of nuclear techniques in soil plant relationships**. Vienna: IAEA, 1990. (Training Course Series, 2).

HARGER, N.; BRITO, O. R.; RALISCH, R.; ORTIZ, F. R.; WATANABE, T. S. Avaliação de fontes e doses de fósforo no crescimento inicial do milho. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 1, p. 39-44, 2007.

HAVILIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 7. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. 515 p.

HEDLEY, M.; McLAUGHLIN, M. Reactions of phosphate fertilizers and by-products in soils. In: SIMS, J. T.; SHARPLEY, A. N. (Ed.). **Phosphorus: agriculture and the environment**. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 2005. p. 181-252. (Agronomy Monograph, 46).

HEFFER, P.; PRUD'HOMME, M. Fertilizer outlook 2015-2019. In: IFA ANNUAL CONFERENCE, 83., 2015, Istanbul. Paris: IFA, 2015. 8 p. Disponível em: <http://www.fertilizer.org/imis20/images/Library_Downloads/2015_ifa_istanbul_summary.pdf> Acesso em: 20 jan. 2016.

HERNÁNDEZ, I.; MUNNÉ-BOSCH, S. Linking phosphorus availability with photo-oxidative stress in plants. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 66, n. 10, p. 2889-2900, 2015.

HERRING, J. R.; FANTEL, R. J. Phosphate rock demand into the next century: Impact on World food supply. **Non-Renewable Resources**, Heidelberg, v. 2, n. 3, p. 226-246, 1993.

HETTIARACHCHI, G. M.; LOMBI, E.; McLAUGHLIN, M. J.; CHITTLEBOROUGH, D.; SELF, P.; Density changes around phosphorus granules and fluid bands in a calcareous soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 3, p. 960-966, 2006.

HINGSTON, F. J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion desorption by goethite and gibbsite. I. The role of proton in determining the adsorption envelopes. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 23, n. 2, p. 177-192, 1972.

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, The Hague, v. 237, n. 2, p. 173-195, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. **Informações e análise da economia mineral brasileira**. 7. ed. Brasília, DF, 2012. 68 p. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

ISENSEE, A. R.; WALSH, L. M. Influence of banded fertilizer on the chemical environment surrounding the band. II. Effect on soil-solution cation, cation-anion balance and solution phosphorus. **Journal of Science of Food and Agriculture**, London, v. 23, n. 4, p. 509-516, 1972.

ISENSEE, A. R.; WALSH, L. M. Influence of banded fertilizer on the chemical environment surrounding the band. I.- Effect on pH and solution nitrogen. **Journal of Science of Food and Agriculture**, London, v. 22, n. 3 p. 105-109, 1971.

KHATIWADA, R.; HETTIARACHCHI, G. M.; MENGEL, D. B.; FEI, M. Speciation of phosphorus in a fertilized, reduced-till soil system: In-field treatment incubation study. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 76, n. 6, p. 2006-2018, 2012.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizantes**. 1. ed. Uberlândia: Grupo de pesquisa “Silício na Agricultura”, 2004. (Boletim Técnico, 2).

LARSEN, S. Soil phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 19, p. 151-210, 1967.

LAWTON, K.; VOMOCIL, J.A. The dissolution and migration of phosphorus from granular superphosphate in some Michigan soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 18, n. 1, p. 26-32, 1954.

LINDSAY, W. L.; FRAZIER, A.W.; STEPHENSON, H. F. Identification of reaction products from phosphate fertilizers in soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 26, n. 3 p. 446-452, 1962.

LOMBI, E.; McLAUGHLIN, M. J.; JOHNSTON, C.; ARMSTRONG, R. D.; HOLLOWAY, R. E. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 24, p. 682-689, 2004a.

LOMBI, E.; McLAUGHLIN, M. J.; JOHNSTON, C.; ARMSTRONG, R. D.; HOLLOWAY, R. E. Mobility, solubility and lability of fluid and granular forms of P fertilizer in calcareous and non-calcareous soils under laboratory conditions. **Plant and Soil**, The Hague, v. 269, n. 1, p. 25- 34, 2004b.

LOMBI, E.; SCHECKEL, K. G.; ARMSTRONG, R. D.; FORRESTER, E.; CUTLER, J. N.; PATERSON, D. Speciation and distribution of phosphorus in a fertilized soil: A synchrotron-based investigation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 6, p. 2038-2048, 2006.

LOPES, A. S.; GUILHERME, R. L. G. **Uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas: Aspectos agronômicos**. 3. ed. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2000. 72 p.

LOPES, J.; EVANGELISTA, A. R.; FORTES, C. A.; PINTO, J. C.; FURTINI NETO, A. E.; SOUZA, R. M. Calagem, silicatagem e doses de fósforo no crescimento e nutrição mineral de estílozantes. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 2, p. 150-158, 2010.

LUCA, E. F.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; CHITOLINA, J. C. Eficiência de absorção e utilização de fósforo (^{32}P) por mudas de eucalipto e arroz. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 3, p. 543-547, 2002.

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

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3 ed. London: Academic Press, 2012. 643 p.

MARTINELLI, L. A.; OMETTO, J. P. H. B.; FERRAZ, E. S.; VICTORIA, R. L.; CAMARGO, P. B.; MOREIRA, M. Z. **Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 144 p.

McGRATH, S. P.; CUNLIFFE, C. H. A simplified method for the extraction of metals Fe, Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Cr, Co and Mn from soils and sewages. **Journal of Science of Food and Agriculture**, London, v. 36, n. 5, p. 794-798, 1985.

McLAUGHLIN, M. J.; McBEATH, T. M.; SMERNIK, R.; STACEY, S. P.; AJIBOYE, B.; GUPPY, C. The chemical nature of P accumulation in agricultural soils-implications for fertilizer management and design: an Australian perspective. **Plant and Soil**, The Hague, v. 349, n. 1, p. 69-87, 2011.

MONTALVO, D.; DEGRYSE, F.; McLAUGHLIN, M. J. Fluid fertilizers improve phosphorus diffusion but not lability in Andisols and Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 78, n. 1, p. 214-224, 2014.

MOODY, P. W., EDWARDS, D. G.; BELL, L. C. Effect of banded fertilizers on soil solution composition and short term root growth. II. Mono and di-ammonium phosphates. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 33, n. 4, p. 689-707, 1995.

MOREL, C.; FARDEAU, J. C. Uptake of phosphate from soils and fertilizers as affected by soil P availability and solubility of phosphorus fertilizers. **Plant and Soil**, The Hague, v. 121, n. 2, p. 217-224, 1990.

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

NAHAS, E. **Ciclo do fósforo**: Transformações microbianas. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 67 p.

NANZER, S.; OBERSON, A.; BERGER, L.; BERSET, E.; HERMANN, L.; FROSSARD, E. The plant availability of phosphorus from thermo-chemically treated sewage sludge ashes as studied by ³³P labeling techniques. **Plant and Soil**, The Hague, v. 377, n. 1, p. 439-456, 2014.

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 phosphate fertilizer. **Turrialba: Revista Interamericana de Ciências Agrícolas**, Turrialba: Costa Rica, v. 29, n. 1, p. 29-34, 1979.

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

OBIHARA, C. H.; RUSSEL, E. W. Specific adsorption of silicate and phosphate by soils. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 23, n. 1, p. 105-117, 1972.

OWINO-GERROH, C.; GASCHO, G. J. Effect of silicon on low pH soil phosphorus sorption and on uptake and growth of maize. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 35, n. 15-16, p. 2369-2378, 2004.

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 30, p. 1-46, 1978.

PAULY, D. G.; MALHI, S. S.; NYBORG, M. Controlled-release P fertilizer concept evaluation using growth and P uptake of barley from three soils in greenhouse. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 82, p. 201-210, 2002.

PIERZYNSKI, G. M.; McDOWELL, R. W.; SIMS, J. T. Chemistry, cycling, and potential moment of inorganic phosphorus in soils. In: SIMS, T. J.; SHARPLEY, A. N. (Ed.). **Phosphorus: agriculture and the environment**. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 2005. p. 53-83. (Agronomy Monografy, 46).

POZZA, A. A. A.; CURI, N.; COSTA, E. T. S.; GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J. G. S. M.; MOTTA, P. E. F. Retenção e dessorção competitivas de ânions inorgânicos em gibbsita natural de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 11, p. 1627-1633, 2007.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 9, p. 1199-1204, 2001.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; ROQUE, C. G. Resposta da cultura do milho a modos de aplicação e doses de fósforo, em adubação de manutenção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 83-90, 2001.

PRASAD, R.; POWER, J. F. **Soil fertility management for sustainable agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1997. 356 p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, 1991. 343 p.

RAIJ, B van. **Fertilidade do solo e manejo dos nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

RAIJ, B. van.; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

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

RAIJ, B van; FEITOSA, C. T.; SILVA, N. M. Comparação de quatro extratores de fósforo de solos. **Bragantia**, Campinas, v. 43, n. 1, p. 17-29, 1984.

RANCZ, G. J.; SOPER, R. J. Reaction products of orthophosphates in soils containing varying amounts of calcium and magnesium. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 47, n. 3, p. 223-230, 1967.

ROSEMARIN, A.; EKANE, N. The governance gap surrounding phosphorus. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 104, n. 3, p. 265-279, 2016.

ROY, A. C.; ALI, M. Y.; FOX, R. L.; SILVA, J. A. Influence of calcium silicate on phosphate solubility and availability in Hawaiian Latosols. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SOIL FERTILITY EVALUATION, 1971, New Delhi. **Proceedings...** Honolulu, Hawaii: University of Hawaii, Department of Agronomy and Soil Science, 1971. v. 1, p. 756-765.

SAKADEVAN, K.; BAVOR, H. J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems. **Water Research**, Amsterdam, v. 32, n. 2, p. 393-399, 1998.

SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 263-310.

SANDIM, A. S.; BÜLL, L. T.; FURIM, A. R.; LIMA, G. S.; GARCIA, J. L. N. Phosphorus availability in oxidic soils treated with lime and silicate applications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1215-1222, 2014.

SCHRÖDER, J. J.; CORDELL, D.; SMIT, A. L.; ROSEMARIN, A. **Sustainable use of phosphorus**. Wageningen: Wageningen University and Stockholm Environment Institute, 2010. 124 p. (Plant Research International Report, 357).

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. chap. 8, p. 379-427.

SILVA, A. A.; SILVA, T. S.; VASCONELOS, A. C. P.; LANA, R. M. Q. Influência da aplicação de diferentes fontes de MAP revestido com polímeros de liberação gradual na cultura do milho. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, p. 240-250, 2012.

SILVA, R. C. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados com solubilidade variada**. 2013. 166 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

SINGH, B.; SINGH, J.; KAUR, A. Applications of radioisotopes in agriculture. **International Journal of Biotechnology and Bioengineering Research**. Atlanta, v. 4, n. 3, p. 167-174, 2013.

SMIL, V. Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. **Annual Review of Energy and the Environment**, Palo Alto, v. 25, p. 53-88, 2000.

SMIT, A. L.; BINDRABAN, P. S.; SCHRÖDER, J. J.; CONIJN, J. G.; VAN DER MEER, H. G. **Phosphorus in agriculture**: Global resources, trends and developments. Wageningen: Wageningen University and Stockholm Environment Institute, 2009. 36 p. (Plant Research International Report, 282).

STEEN, I. Phosphorus availability in the 21st Century: management of a nonrenewable resource. **Phosphorus and Potassium**, London, v. 217, n. esp., p. 25-31, 1998.

STOOP, W. A. Phosphate adsorption mechanisms in oxidic soils: Implications for P-availability to plants. **Geoderma**, Amsterdam, v. 31, n. 1, p. 57-69, 1983.

SYSTAT SOFTWARE. **Sigmaplot for Windows, version 10**. San Jose, CA. Disponível em: <<http://www.systat.com/products/sigmaplot/>>. Acesso em: 20 Ago. 2014.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

TAVAKKOLI, E.; ENGLISH, P.; GUPPY, C. N. Interaction of silicon and phosphorus mitigate manganese toxicity in rice in a highly weathered soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 42, n. 5, p. 503-513, 2011.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Macmillan, 1993. 634 p.

TRENKEL, M. E. Definitions of slow and controlled release fertilizer and nitrification and urease inhibitors. In: INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION. **Slow and controlled release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture**. Paris: IFA, 2010. chap. 1. p. 14-16.

URRUTIA, O.; ERRO, J.; GAURDADO, I.; FRANCISCO, S. S.; MANDADO, M.; BAIGORRI, R.; YVIN, J. C.; GARCÍA-MINA, J. M. Physico-chemical characterization of humic-metal-phosphate complexes and their potential application to the manufacture of new types of phosphate-based fertilizers. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 177, n. 2, p. 128-136, 2014.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. **Mineral commodity summaries**. Phosphate rock. Reston, Virginia, 2015. p. 118-119. Disponível em: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2015-phosp.pdf.

VALLE, L. A. R.; RODRIGUES, S. L.; RAMOS, S. J.; PEREIRA, H. S.; AMARAL, D. C.; SIQUEIRA, J. O.; GUILHERME, L. R. G. Beneficial use of a by-product from the phosphate fertilizer industry in tropical soils: effects on soil properties and maize and soybean growth. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 112, pt. 1, p. 113-120, 2016.

Van KAUWENBERGH, S. J. **World phosphate rock reserves and resources**. Muscle Shoals, AL: IFDC, 2010. 60 p. (Technical Bulletin IFDC-T-75).

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

WELLMER, F. W.; BECKER-PLATEN, J. D. Global nonfuel mineral resources and sustainability. In: WORKSHOP ON DEPOSIT MODELING, MINERAL RESOURCE ASSESSMENT, AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2007, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Reston, VA: USGS, 2007. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/circ/2007/1294/paper1.html>>. Acesso em: 25 fev. 2016.

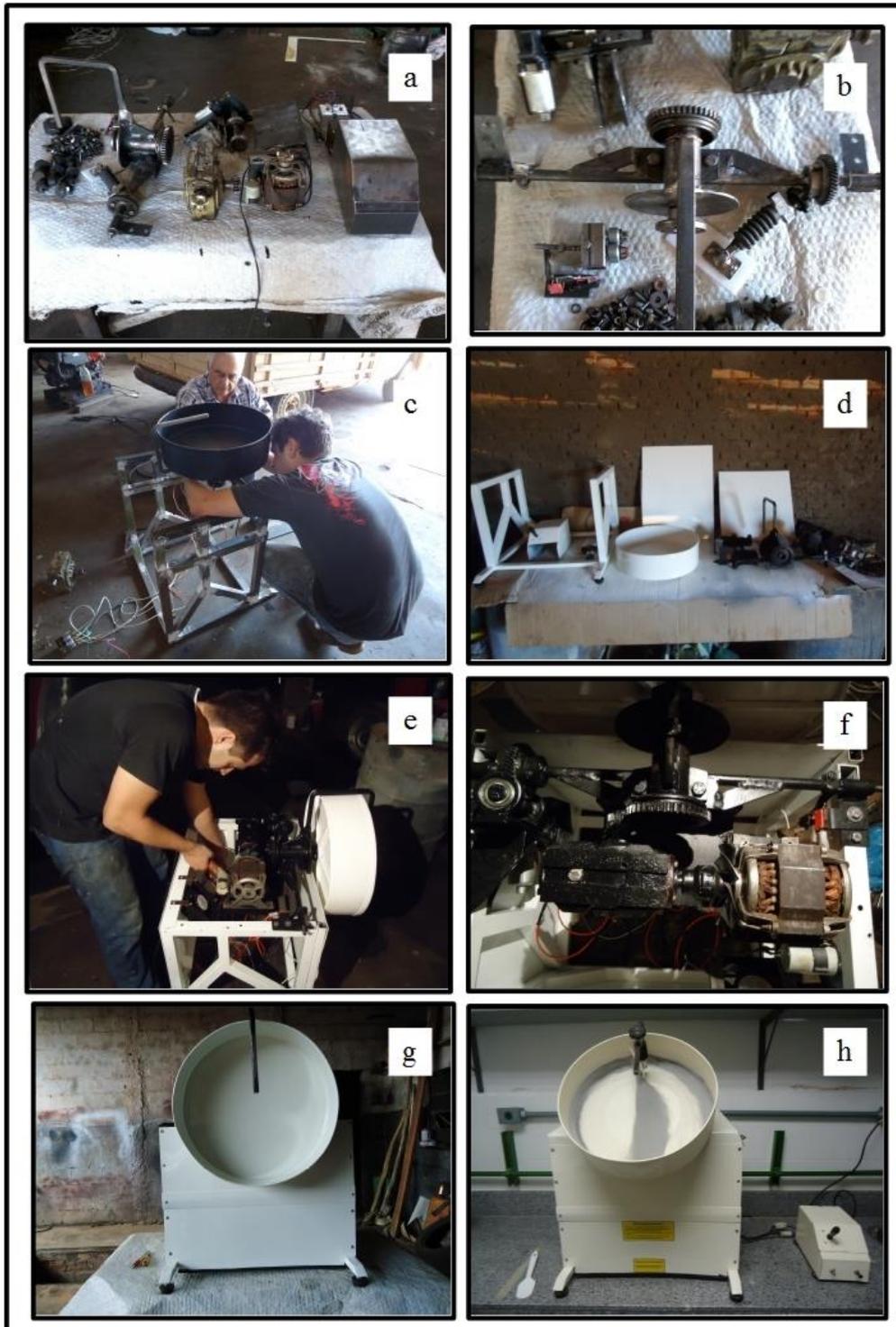
WILLIAMS, R. F. The effects of phosphorus supply on the rates of intake of phosphorus and nitrogen and upon certain aspects of phosphorus metabolism in gramineous plants. **Australian Journal of Scientific Research**, Armidale, v. 1, n. 3, p. 333-341, 1948.

ZAPATA, F.; HERA, C. Role of isotopes in mineral plant nutrition studies. **Romanian Agricultural Research**, Calarasi, Romania, v. 5, n. 7-8, p. 49-53, 1997.

ZAVASCHI, E. **Avaliação de superfosfato orgânico-complexado**. 2014. 75 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

APÊNDICES

Apêndice A - Imagem 1. Etapas do processo de construção do granulador de prato-rotativo, sendo: (a) materiais reciclados e peças em confecção dispostas sobre a bancada; (b) detalhe dos componentes já confeccionados; (c) início da montagem estrutural do dispositivo e ajuste dos componentes; (d) peças e componentes já ajustados e pintados, prontos para montagem final; (e) montagem do sistema interno; (f) componentes internos instalados; (g) granulador em fase final de acabamento e testes; (h) granulador em uso no Laboratório de Fertilidade do Solo CENA-USP. Fonte: do autor.



Apêndice B - Imagem 2. Resposta das plantas de milho cultivadas no LVAd (a) e no LVd (b) em função das doses de P (da esquerda para direita 0, 30, 60, 90 mg kg⁻¹); (c) sintomas característicos da deficiência de P apresentada no tratamento controle (sem adição de P).

