



**ANA PAULA PEREIRA NUNES**

**MAP COM POLÍMERO ORGÂNICO BIODEGRADÁVEL E A  
ADIÇÃO DE MICRONUTRIENTES OU MAGNÉSIO NA  
NUTRIÇÃO DO MILHO**

**LAVRAS-MG**

**2019**

**ANA PAULA PEREIRA NUNES**

**MAP COM POLÍMERO ORGÂNICO BIODEGRADÁVEL E A  
ADIÇÃO DE MICRONUTRIENTES OU MAGNÉSIO NA  
NUTRIÇÃO DO MILHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva

Orientador

**LAVRAS-MG**

**2019**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Nunes, Ana Paula Pereira.

MAP com polímero orgânico biodegradável e a adição de micronutrientes ou magnésio na nutrição do milho / Ana Paula Pereira Nunes. - 2019.

79 p.

Orientador(a): Douglas Ramos Guelfi Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Difusão de fósforo. 2. Biodegradabilidade. 3. Revestimento.  
I. Silva, Douglas Ramos Guelfi. II. Título.

**ANA PAULA PEREIRA NUNES**

**MAP COM POLÍMERO ORGÂNICO BIODEGRADÁVEL E A ADIÇÃO DE  
MICRONUTRIENTES OU MAGNÉSIO NA NUTRIÇÃO DO MILHO**

**MAP WITH BIODEGRADABLE ORGANIC POLYMER AND ADDING  
MICRONUTRIENTS OR MAGNESIUM IN CORN NUTRITION**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 15/08/2019

Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva UFLA

Dr. Rodrigo Coqui da Silva ADELAIDE

Dr. Carlos Alberto Silva UFLA

Prof. Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva

Orientador

**LAVRAS-MG**

**2019**

À meus pais, Deus, Marina e Paulo, pelo amor, carinho, apoio e compreensão.

Dedico

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pelo dom da vida, por guiar-me durante o caminho percorrido, por estar sempre ao meu lado.

À meus pais, Paulo e Marina, que sempre foram exemplos de vida para mim, por todo carinho, amor, compreensão, pela imensa paciência, auxílio e principalmente por todo apoio que sempre me deram. Aos meus irmãos, Isabella e João Paulo, assim como toda minha família, por todo o carinho, apoio e compreensão.

À meus amigos de longa data e companheiros que conheci durante o período do mestrado. À uma grande amiga: Bruna Sebastiani, pela grande amizade, por sempre poder contar e por sempre estar comigo.

Ao professor, Douglas Guelfi, pela orientação, paciência e os ensinamentos durante a pós-graduação.

Aos professores e todos os funcionários do DCS/UFLA, pelo auxílio e conhecimento.

À todos que de alguma forma auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Ciência do Solo- DCS, pela oportunidade.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Portanto, ao CNPq pela bolsa de mestrado concedida.

Sou e serei eternamente grata. Muito obrigada!

*“O importante é não parar de questionar. A curiosidade tem a sua própria razão para existir.” (Albert Einstein)*

## RESUMO

Os fertilizantes fosfatados são amplamente utilizados na agricultura mundial e as rochas fosfáticas são consideradas um recurso finito, podendo ser escassas. O fósforo (P) possui uma relação dinâmica complexa em solos ácidos, sendo facilmente adsorvido e grandes quantidades do nutriente são perdidas sem que possam ser aproveitadas pelas plantas. A matéria orgânica apresenta uma relação direta e indireta com o P, podendo diminuir a sua adsorção nos solos. Devido a isto, o revestimento do fosfato monoamônio (MAP) com polímeros, magnésio ou micronutrientes surge como uma opção para melhorar a eficiência agrônômica da adubação fosfatada. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o revestimento do MAP por polímeros orgânicos na cultura do milho cultivado em duas épocas distintas, na safra de verão e na 2ª safra. Os tratamentos utilizados foram o MAP, MAP revestido com polímero orgânico biodegradável (POB), MAP revestido com POB + 1,23% de Zn + 0,33% B e MAP revestido com POB + 1,76% de Mg. A caracterização dos fertilizantes foi avaliada quanto a biodegradabilidade do polímero, difusão, mobilidade e disponibilidade de P. Foram realizadas caracterizações do polímero por MEV e IF-TR. Nos experimentos realizados em condição de campo por duas safras, foram aplicados doses crescentes (0, 50, 100 e 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>) dos tratamentos na adubação de semeadura e foram avaliados os teores foliares e nos grãos dos nutrientes, acúmulo de nutrientes e produtividade de grãos, e a eficiência agrônômica dos fertilizantes. Para a caracterização do polímero, verificou-se uma biodegradabilidade de 17,78% em 44 dias. Quanto a difusão e disponibilidade de P observou-se que a difusão aumentou em função do tempo até as 4 horas após a aplicação do fertilizante, havendo uma redução posterior, seguida de estabilidade da difusão. Quanto a disponibilidade, o P apresentou-se mais disponível em áreas adjacentes ao local que recebera os grânulos de fertilizantes e ocorreram maiores movimentação do P em profundidade no solo arenoso, quando comparado ao solo de textura média. Foi observado que não houve acréscimo na difusão, mobilidade e disponibilidade de P, assim como para a produtividade, devido o revestimento utilizando polímero orgânico, com adição de micronutrientes ou Mg.

**Palavras chaves:** Difusão de fósforo. Biodegradabilidade. Revestimento.



## ABSTRACT

Phosphate fertilizers are widely used in world agriculture and phosphate rocks are considered a finite resource and may be scarce. Phosphorus (P) has a complex dynamic relationship in acid soils, being easily adsorbed and large amounts of nutrient are lost without being able to be used by plants. Organic matter has a direct and indirect relationship with P and may decrease its adsorption in soils. Due to this, the coating of monoammonium phosphate (MAP) with polymers, magnesium or micronutrients appears as an option to improve the agronomic efficiency of phosphate fertilization. In this context, the objective of this study was to evaluate the organic polymers coating of MAP on corn cultivated in two distinct seasons, in the summer and in the second crop. The treatments used were MAP, MAP coated with biodegradable organic polymer (BOP), MAP coated with BOP + 1.23% Zn + 0.33% B and MAP coated with BOP + 1.76% Mg. Fertilizer characterization was evaluated for polymer biodegradability, diffusion, mobility and P availability. Polymer characterization was performed by MEV and IF-TR. In experiments conducted under field conditions for two harvests, increasing doses (0, 50, 100 and 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>) of the treatments in seeding fertilization were applied and the leaf and nutrient grain contents, nutrient accumulation in grain, grain yield, and agronomic efficiency of fertilizers, were evaluated. For the characterization of the polymer, a biodegradability of 17.78% was verified in 44 days. Regarding P diffusion and availability, diffusion increased as a function of time up to 4 hours after fertilizer application, with a subsequent reduction followed by diffusion stability. As for availability, P was more available in areas adjacent to the site that received the fertilizer granules and there was greater P movement in depth in the sandy soil, when compared to the medium textured soil. It was observed that there was no increase in diffusion, mobility and availability of P, as well as productivity, due to the coating using organic polymer, with addition of micronutrients or Mg.

**Keywords:** Phosphorus diffusion. Biodegradability. Coating.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
2.1 Milho.....	10
2.2 Fósforo.....	11
2.3 Fertilizantes fosfatados.....	13
2.4 Micronutrientes no revestimento de fertilizantes e interação P-Mg.....	16
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1 Caracterização dos fertilizantes .....	17
3.1.1 Características do polímero orgânico .....	17
3.1.2 Fertilizantes.....	20
3.1.3 Biodegradabilidade do polímero.....	21
3.1.4 Experimento de incubação.....	22
3.1.5 Movimentação de P no solo.....	23
3.1.6 Caracterização por FT-IR .....	25
3.1.8 Teste de Dureza e índice de salinidade.....	29
3.2 Experimento em campo .....	29
3.2.1 Local .....	29
3.2.2 Delineamento Estatístico .....	30
3.2.3 Preparo do solo e semeadura .....	31
3.3 Parâmetros Analisados.....	32
3.3.1 Teores e acúmulo de nutrientes, produtividade de grãos e Índices de Eficiência ...	32
3.5 Análises Estatísticas.....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1 Dureza dos grânulos .....	33
4.2 Índice Salino (IS) e pH .....	34
4.1 Biodegradabilidade do polímero.....	35
4.2 IF-TR .....	36
4.3 Experimento de difusão em placa de Petri e disponibilidade de P.....	38
4.4 Movimentação e disponibilidade de P.....	42
4.5 Teores de Mg, P, Zn e B nas folhas e nos grãos na cultura do milho.....	43
4.6 Produtividade e acúmulo de nutrientes nos grãos de milho .....	53
4.7 Eficiência Agrônômica e Índice de Eficiência agrônômica .....	61
5 CONCLUSÕES .....	63
REFERÊNCIAS .....	64
APÊNDICES .....	73

## INTRODUÇÃO

Em solos ácidos e intemperizados, como os encontrados em grande parte do Brasil, a dinâmica do fósforo é complexa, sendo adsorvido em grandes quantidades pelas argilas óxidicas presentes em sua composição. Esses solos exigem um manejo de adubação eficiente e a utilização de fertilizantes fosfatados revestidos por polímeros pode ser uma alternativa para reduzir as perdas que podem ocorrer devido ao processo de fixação do fósforo, disponibilizando o nutriente por um maior período.

O revestimento destes fertilizantes com polímeros promove uma redução do contato do elemento com a argila e os óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), diminuindo a possibilidade da formação de compostos estáveis (ligação com a argila e precipitação junto ao Fe e Al encontrado nos óxidos) que viriam a reduzir a disponibilidade do nutriente no solo. Portanto, visando alcançar um melhor aproveitamento do fertilizante, a utilização de revestimento com polímeros seria uma forma de diminuir a fixação, proporcionando menores perdas e maior disponibilidade de P.

Fertilizantes revestidos que possuem ligantes que são capazes de complexar cátions que podem precipitar o P, como o Al e o Fe, vem despertando o interesse devido à possibilidade de se manter o nutriente disponível por mais tempo no solo. Os sítios de adsorção de fosfato no solo podem ser ocupados por ácidos orgânicos, que também são capazes de formar complexos organometálicos com Fe e Al, reduzindo a adsorção do P (HUE, 1991).

O milho (*Zea mays*) é o segundo grão mais produzido no Brasil e para atender as demandas da necessidade da cultura em altas produtividades é necessário a aplicação de fertilizantes. Dada a necessidade de um sistema agrícola mais produtivo é imprescindível a busca por novas tecnologias que aumentem a eficiência da adubação fosfatada. Portanto, torna-se importante o estudo de fertilizantes fosfatados que promovam uma maior eficiência, como os fertilizantes revestidos por polímeros orgânicos que são capazes de complexar os cátions que precipitam o P e diminuir a adsorção deste nutriente, garantindo a nutrição do mesmo para a cultura por um maior período.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Milho

O cultivo de milho (*Zea mays* L.) na agricultura brasileira tem grande importância socioeconômica, tendo o Brasil um papel de destaque no mercado mundial na exportação e produção e ocupando atualmente a terceira posição em média dos últimos quatro anos (CONAB, 2018). Segundo a CONAB (2018), a produção brasileira representa cerca de 8,09%

da produção mundial com uma produção de cerca de 58 milhões de toneladas, ficando atrás de Estados Unidos e China (35,47% e 21,6%, respectivamente), sendo entre os grãos o segundo mais produzido no Brasil (a soja é a primeira) e possuindo uma área de cultivo total de cerca 16.636.800 hectares com uma produtividade média de 4.890 kg ha<sup>-1</sup> de grãos, sendo que a maior parte da produção é concentrada na segunda safra.

É uma planta monocotiledônea que pertence à família Poaceae e teve sua origem na América Central. Faz parte do grupo de cereais mais cultivados e consumidos no mundo, por possuir um alto potencial produtivo, que se alia a composição química, valor nutricional e apresenta uma grande versatilidade de uso, podendo ser utilizado como alimentação animal e humana e serve de matéria-prima em indústrias agrícolas, entre outras, possuindo um importante papel socioeconômico (FANCELLI; DOURADO NETO, 2004; FAO, 2018).

Para que a cultura do milho possa expressar seu potencial genético de produção ao máximo, ela necessita de períodos que apresentem fatores climáticos considerados adequados (CRUZ et al, 2010), sendo que fatores como água, radiação solar e temperatura afetam o desenvolvimento da cultura.

O Brasil possui épocas climáticas distintas que se adequam às exigências da cultura e permitem que o milho seja cultivado em dois períodos diferentes dentro do mesmo ano agrícola (CONAB, 2018). Esses períodos são conhecidos como primeira safra, também conhecida como safra verão, que é semeada nos meses de agosto a dezembro e a colheita é realizada entre novembro a março. Este período corresponde àquele em que a época do ano é considerada mais favorável para a semeadura da cultura, possuindo um clima que permite um ambiente mais propício ao desenvolvimento da planta (GARCÍA-LARA e SERNASALDIVAR, 2019).

A segunda safra corresponde ao segundo período de cultivo e é popularmente conhecida como “safrinha” e seu plantio geralmente é realizado após o cultivo de outra cultura, sendo cultivada nos meses de janeiro a março e tendo sua colheita realizada em abril até junho. Atualmente, a safrinha apresenta maiores valores de produtividade e área plantada que a safra verão, tendo maior contribuição na produção de grãos de milho (CONAB, 2018).

## **2.2 Fósforo**

O P é um elemento químico essencial para o desenvolvimento de plantas, sendo exigido em todas as fases de crescimento e em todas as partes das plantas (BENNETT, 1993; HOPKINS 2015), e diretamente associado à sua nutrição podemos citar alguns fatores como o desenvolvimento de raízes, formação de flor e sementes, qualidade de culturas, crescimento e desenvolvimento de haste e caule, entre outros (MALAVOLTA, 2006; MOHAMMADI, 2012).

Por ser um nutriente, o suprimento inadequado do P pode levar a baixas produtividades, podendo ocorrer em sua ausência a interrupção do ciclo de formação das plantas. É um nutriente exigido principalmente no início da formação e condições de suprimento inadequadas às culturas levam a um mau desenvolvimento de plantas, impedindo-as de se recuperarem mesmo que posteriormente se faça um suprimento adequado (GATIBONI et al., 2007). É considerado um elemento móvel na planta e possui participação ativa nos processos metabólicos, sendo que a principal função do P é armazenar e transferir energia (MALAVOLTA, 2006), fazendo parte de compostos como o ATP, ácidos nucléicos, fosfolipídios, entre outros.

O P apresenta uma dinâmica complexa em solos ácidos e intemperizados, como os que são encontrados em grande parte do Brasil. Os solos tropicais brasileiros se caracterizam pela grande presença de argilominerais 1:1 e óxidos de Fe e Al, também denominados de coloides do solo e que possuem forte interação com o P. Essa interação é relacionada principalmente à fixação que o nutriente sofre, sendo retido por ligações estáveis e permanecendo em grande parte do aplicado indisponível às plantas (FIGUEIREDO et al., 2012).

Estima-se que 80 a 95% do P utilizado no solo seja fixado (VILAR;VILAR, 2013). sendo que esta fixação é exercida de duas formas, sendo a primeira denominada de precipitação que pode ocorrer durante a dissolução de fertilizantes fosfatados, quando os óxidos de Fe e Al ou o Cálcio (Ca), sendo que este último ocorre principalmente em solos básicos, se ligam ao P dando origem à compostos pouco solúveis (SAMPLE et al, 1980;NOVAIS et al., 2007), e a segunda ocorre pela adsorção do P nas superfícies de argilas, sendo denominada de adsorção específica (TIECHER et al., 2012).

Por sofrer tal interação, de maneira geral é considerado o nutriente mais limitante nos solos brasileiros e sua aplicação é feita em quantidades elevadas para atender às demandas das culturas, sendo geralmente utilizado fertilizantes de alta solubilidade devido sua condição e a necessidade das culturas do nutriente no início de seu desenvolvimento. Entretanto, a aplicação de grandes quantidades de fontes solúveis pode ser vista como uma desvantagem, visto que resulta em uma maior adsorção do P devido à elevação da concentração do nutriente na solução do solo (PAVINATO et al., 2010) e quando em contato com grandes volumes de solo ocorre a formação de formas não lábeis de P, diminuindo sua solubilidade e reduzindo sua disponibilidade (NOVAIS & SMYTH, 1999)

No solo, o nutriente pode se apresentar nas formas de P orgânico, P adsorvido aos coloides minerais e o P precipitado, principalmente com Al, Fe e Ca. O P orgânico necessita ser mineralizado para tornar-se disponível às plantas, tendo que haver a liberação dos sítios de adsorção do P adsorvido; e os precipitados necessitam ser dissolvidos. Quando estiver na solução do solo, o P precisa migrar até as raízes por difusão (movimento de íons a favor de um

gradiente de concentração) para só então ser absorvido (PRADO, 2008; OLIVEIRA et al., 2014). Portanto, a água é um fator imprescindível para que haja a difusão e então a absorção do P pelas raízes. As formas disponíveis predominantes do P na solução do solo são os íons fosfato  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ .

### 2.3 Fertilizantes fosfatados

Os fertilizantes são considerados commodities mundial e seus valores são sujeitos à oferta e demanda e flutuações de mercado. Entre as principais forças motrizes que influenciam a elevação no preço dos fertilizantes estão a crescente demanda global e a escassez de oferta destes, a elevação da produção de etanol, os custos de transporte, a flutuação no preço do dólar, os preços elevados das commodities agrícolas e países que restringem a exportação de fertilizantes (ROBERTS, 2009). Os fertilizantes são necessários para se manter e elevar a produção agrícola e o manejo da produção com uso racional de insumos é importante para se manter a produção sustentável das culturas (CASARIN & STIPP, 2013).

A produção de fertilizantes fosfatados depende de utilização de fontes não renováveis, como rochas fosfatadas, o que torna a situação precária (SCHOLZ et al., 2013). Estes fertilizantes representam um percentual elevado do custo de produção agrícola brasileiro, sendo que o país importa cerca de metade de todo o P que usa, e apresentam baixa eficiência de utilização na agricultura (BENITES, 2015; WITHERS et al., 2018). O Brasil ocupa a terceira posição mundial de consumo de P, sendo que em 2017 foram entregues ao Brasil 5.126 mil toneladas de fertilizantes fosfatados (ANDA, 2018) e o consumo de  $\text{P}_2\text{O}_5$  no mesmo ano foi de 5.392,7 milhões de toneladas (IPNI, 2017).

Os fertilizantes fosfatados apresentam diferentes solubilidades que podem ser atribuídas a alguns fatores, estando relacionados principalmente à sua composição química, solubilidade e cátion acompanhante. Estes fatores podem influenciar a taxa de solubilização do fertilizante e as suas reações, como a precipitação e adsorção, especialmente nas regiões localizadas próximas aos grânulos, cuja intensidade é maior (OLIVEIRA et al., 2017).

Cerca de 50% da produção mundial de alimentos é devido à aplicação de fertilizantes (ROBERTS, 2009) e é responsabilidade do setor agrícola sua utilização de forma responsável e eficiente, procurando formas de manejos corretas de práticas de adubação. A aplicação do nutriente no local, tempo e quantidades exigidas pela cultura de forma adequada pode ser citada como um manejo eficiente na adubação (ROBERTS, 2007).

Medidas como a aplicação de fertilizantes fosfatados na linha de semeadura podem ser citadas como formas de se aumentar a eficiência da adubação fosfatada, o que se justifica pela pequena área radicular ocupada pelas culturas anuais e a baixa movimentação por difusão do

nutriente. Em aplicações realizadas à lanço, quase que o total aplicado do fertilizante fosfatado fica em contato com o solo ocasionando adsorção do P, havendo um menor aproveitamento do nutriente pelas plantas. A calagem também contribuí para aumentar a eficiência fosfatada, possuindo uma correlação positiva com a fertilidade dos solos, corrigindo a acidez, fornecendo Ca e Mg e favorecendo a aplicação do P (SOUSA et al., 2004; RAIJ, 2011).

Entre as alternativas para se aumentar a eficiência da fertilização fosfatada destaca-se o uso de fertilizantes revestidos por polímeros. Segundo Figueiredo et al. (2012), o uso de fertilizantes fosfatados polimerizados surgiu como uma opção na redução da adsorção do P pelos colóides do solo, sendo o revestimento o responsável por reduzir e manter um menor contato entre o nutriente e os óxidos de Fe e Al, que seriam responsáveis por indisponibilizá-lo (GAZOLA et al. 2013), tornando-se uma alternativa para aumentar a eficiência do uso desses fertilizantes.

Polímeros são utilizados vastamente na agricultura, especialmente como revestimento de fertilizantes. São macromoléculas com alto peso molecular e que possuem repetição regular de estruturas simples, conhecidas como monômeros, formando as grandes quantidades de cadeias encontrada em sua estrutura. Várias opções de polímeros podem ser utilizadas para o revestimento dos fertilizantes, como exemplo polímeros não biodegradáveis e os polímeros biodegradáveis.

Os polímeros não biodegradáveis podem apresentar um custo elevado e em alguns casos podem ser considerados poluentes ou tóxicos, podendo até serem vistos como potencial fator de impacto ambiental, se forem considerados de difícil degradação (NAZ & SULAIMAN, 2016; CALABY-FLOODY et al., 2018). Levando em consideração esses fatores, torna-se importante a utilização de revestimentos com polímeros biodegradáveis, que são materiais que possuem baixo custo e baixo dano ambiental, devido seu pouco acúmulo no ambiente (NAZ & SULAIMAN, 2016). Os polímeros orgânicos, sintetizados unicamente por substâncias orgânicas, são exemplos de polímeros biodegradáveis que não apresentam riscos para o meio ambiente (TEIXEIRA et al., 2016).

A matéria orgânica se destaca como um dos fatores que alteram as propriedades do solo, e há relatos de sua participação na redução de adsorção de P. No entanto, essa redução está ligada também à concentração de substâncias húmicas no solo. A presença de maiores quantidades seria mais eficiente na redução da adsorção (STEVENSON, 1994; PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Medidas como o menor revolvimento do solo são capazes de promover maiores contribuições de componentes orgânicos, como relatado por Partelli et al. (2009) e Tiecher et al. (2012), que observaram que em sistemas com menor revolvimento e que

promovam a agregação do solo evitam a perda de P por erosão e apresentam maiores contribuições dos componentes orgânicos de P.

Alguns estudos encontrados na literatura relatam sobre o uso de matéria orgânica e seus componentes quando aplicados ao solo. Relatos de Hiradate e Uchida (2004) apontam que a sorção de P era influenciada devido à presença ou não de matéria orgânica. Hua et al. (2008) chegaram à conclusão de que substâncias húmicas poderiam aumentar a disponibilidade dos fertilizantes fosfatados em solos ácidos e Yan et al. (2016), observaram que a adsorção de P em óxidos de Fe é substancialmente reduzida na presença de compostos orgânicos.

As substâncias orgânicas (como os ácidos orgânicos) são ricas em cargas negativas e são capazes de interagir com minerais que possuem cargas positivas, como os óxidos de Fe e Al, tendo como consequência uma redução na adsorção de P (LIU et al., 1999). Os ácidos orgânicos também podem participar da redução de adsorção do P de diversas formas: competindo pelos sítios de adsorção e sendo adsorvidos em seu lugar devido à grande presença de cargas negativas, grupos hidroxila e carboxila (HUNT et al, 2007;CESSA et al., 2010); alterando a carga superficial dos óxidos, ocorrendo a dessorção do P devido à repulsão gerada eletrostaticamente (HUNT et al, 2007; ANTELO et al, 2007; REDEL et al., 2007; ZAMUNER et al., 2008) ou até mesmo solubilizando os óxidos e hidróxidos, diminuindo a superfície de adsorção (SAUNDERS, 1965; HUE; IKAWA; SILVA, 1994; SHEN et al., 2011, ). Com isso, o nutriente fica passível de ser aproveitado pelas plantas por um período maior (EL-SAYED et al., 2011).

Alguns trabalhos têm demonstrado efeitos variados com o revestimento dos fertilizantes fosfatados. Gazola et al. (2013) utilizando formas de MAP revestido por polímeros na cultura do milho verificaram que o teor de P residual no solo e o teor de P foliar não tiveram diferenças em relação ao MAP convencional. Silva et al. (2012) verificaram que a polimerização de MAP comparado ao MAP convencional apresentam efeitos positivos dependendo do nível de saturação por base. Alguns trabalhos também relatam que o uso de revestimento com polímeros permite uma liberação gradual de P, sem reduzir sua eficiência de absorção pelas culturas (MACHADO et al., 2013; FIGUEIREDO et al.,2012). Em estudo realizado com Alface, o revestimento do MAP com polímeros aumentou a eficiência da adubação fosfatada (CHAGAS et al., 2015). Chagas et al. (2016) trabalhando com superfosfato triplo (SFT) na cultura da cebola em solos de diferentes texturas, verificou que o revestimento proporcionou maiores acúmulo de P nos bulbos com o uso do SFT revestido com polímero em Latossolo Vermelho Distroférrico.



## 2.4 Micronutrientes no revestimento de fertilizantes e interação P-Mg

Os micronutrientes são elementos químicos que desempenham papel fundamental no crescimento das plantas. A maioria se apresenta em baixos teores no solo (variando com o material de origem e grau de intemperização de cada solo) e são exigidos em baixas quantidades pelas plantas, sendo que a falta de algum deles pode causar perdas elevadas na produção agrícola (SOUZA et al., 2017). Devido ao fato de serem exigidos em pequenas quantidades, a uniformidade de aplicação é um problema e o revestimento de fertilizantes com micronutrientes facilita sua aplicação (LOPES, 1999). Como exemplo, pode-se citar o zinco (Zn), que é aplicado principalmente via solo e em baixas doses o que torna difícil sua distribuição isolada no campo, fazendo com que fertilizantes, como os formulados NPK, sejam um bom meio de se aplicar o nutriente devido a maior uniformidade de distribuição, redução de custos, entre outros (SANTOS, 2013).

No Brasil, o micronutriente considerado mais limitante para a produção de milho é o Zn, sendo que a cultura é altamente suscetível a sua deficiência e quando aplicado como fertilizante tem uma maior chance de se obter uma resposta positiva no rendimento da cultura (COELHO, 2006). Esse micronutriente essencial é responsável pelo crescimento e reprodução de plantas, participando de processos metabólicos tal quais a síntese de proteínas, hormônios, carboidratos, auxinas e outros (DECHEN et al. 1991).

O boro (B) é um micronutriente essencial para o crescimento celular, e sua presença é mais acentuada em partes mais novas da planta, como gemas e as pontas das raízes. O nutriente é importante na formação da parede de células, no florescimento, formação de proteínas, metabolismo de carboidratos (ARAÚJO; SILVA, 2012). A disponibilidade de B e Zn no solo é afetada por alguns fatores como o pH, tipo de argila e teor de matéria orgânica. (LEMISKA et al., 2014).

A adição de magnésio (Mg) em fertilizantes fosfatados é interessante, visto que a absorção de  $H_2PO_4$  é otimizada quando se há a presença de Mg na superfície radicular, onde este atua como carregador de P devido sua participação na ativação de ATPases de membranas implicadas na absorção iônica (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MALAVOLTA, 2006). Estudos de diversos autores apontam a interação entre os dois nutrientes e comprovam em diversas culturas a interação benéfica mútua, proporcionando respostas nutricionais e produtivas favoráveis (FAGERIA, 1983; REINBOTT; BLEVINS, 1997; FAGERIA, 2001; SALEQUE et al., 2001).

Diante do pressuposto que as substâncias orgânicas podem ser capazes de complexar os colóides de Fe e Al responsáveis por fixar o P, mantendo-o disponível às plantas por maiores períodos, o objetivo deste estudo foi avaliar a performance do MAP revestido por polímero

orgânico biodegradável e a adição de Mg ou micronutrientes na cultura do milho, bem como realizar a caracterização dos fertilizantes.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização dos fertilizantes

##### 3.1.1 Características do polímero orgânico

O polímero utilizado no revestimento dos fertilizantes deste experimento é orgânico aniônico. Trata-se de um kit constituído por dois produtos, sendo o primeiro um agente adesivo supressor de poeira que reveste o grânulo do fertilizante (podendo apresentar-se na forma fluída, viscosa ou pastosa) e o outro um agente selante (na forma de pó) com grande superfície específica.

O polímero é estável em pH que pode ter variação entre 5,2 a 5,5. Possui matéria orgânica e é formado por aminoácidos e ácidos orgânicos, não apresentando qualquer tipo de metal pesado ou contaminante, tendo por característica sua dissolução gradativa ao entrar em contato com a água, liberando o polímero com grandes quantidades de cargas negativas, aminoácidos e ácidos orgânicos. Possui C orgânico recalcitrante de alta reatividade, que tende a acumular no solo. As concentrações de macro e micronutrientes, carbono orgânico total, pH e densidade do agente adesivo e do agente selante estão nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Caracterização química do polímero orgânico adesivo.

<b>Componentes</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>
Carbono Orgânico Total	30,16	%
Matéria Orgânica	56,55	%
Nitrogênio (N) Total	1,07	%

Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,39	%
Potássio (K)	2,6	%
Cálcio (Ca)	0,8	%
Magnésio (Mg)	0,09	%
Enxofre (S)	0,05	%
Zinco (Zn)	31,95	mg kg <sup>-1</sup>
Cobre (Cu)	10,65	mg kg <sup>-1</sup>
Manganês (Mn)	19,17	mg kg <sup>-1</sup>
Boro (B)	33,46	mg kg <sup>-1</sup>
Ferro (Fe)	55,38	mg kg <sup>-1</sup>
Sódio (Na)	660,24	mg kg <sup>-1</sup>
Relação C/N	28	-
pH	5,0	-
Densidade	1,28	g cm <sup>-3</sup>
Superfície Específica	137.000	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>

Métodos: pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01M; Matéria Orgânica Total e Resíduo mineral por combustão em mulfla; K (K<sub>2</sub>O), Ca, Mg por espectrofotômetro de absorção atômica, extraído com HCl 1+1; N total, digestão sulfúrica (Kjeldahl); Carbono (C) -dicromato seguido de titulação; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>- extração com HCl 1+1, determinação por espectrofotômetro (leitura no comprimento de onda de 430 nm) pelo método com a solução de vanadomolibdica; S- método gravimétrico do sulfato de bário; Fe, Mn, Cu, Na- espectrofotômetro de absorção atômica extraído com HCl 1+1. B- espectrofotômetro com Azometina H monossódica. (Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos. MAPA, 2014)

Tabela 2 - Caracterização química do polímero orgânico pó selante.

<b>Componentes</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>
Carbono Orgânico Total	21,38	%
Matéria Orgânica	42,07	%
N Total	0,19	%
P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,08	%
Potássio (K)	0,37	%
Cálcio	0,77	%
Magnésio	0,09	%
Enxofre	0,04	%
Zinco	12,65	mg kg <sup>-1</sup>
Cobre	6,90	mg kg <sup>-1</sup>
Manganês	81,62	mg kg <sup>-1</sup>
Boro	10,12	mg kg <sup>-1</sup>
Ferro	694,37	mg kg <sup>-1</sup>
Sódio	655,28	mg kg <sup>-1</sup>
Relação C/N	113	-
pH	8,5	-
Densidade	0,2	g cm <sup>-3</sup>
Superfície Específica	1.703,62	m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>

Métodos: pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01M; Matéria Orgânica Total e Resíduo mineral por combustão em mufla; K<sub>2</sub>O, Ca, Mg- espectrofotômetro de absorção atômica, extraído com HCl 1+1; N total, digestão sulfúrica (Kjeldahl); Carbono por dicromato seguido de titulação; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: Extração com HCl 1+1, determinação por espectrofotômetro (leitura no comprimento de onda de 430 nm) pelo método com a solução de vanadomolibdica; S- método gravimétrico do sulfato de bário; Fe, Mn, Cu, Na -espectrofotômetro de absorção atômica extraído com HCl 1+1. B- espectrofotômetro com Azometina H monossódica. (Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos. MAPA, 2014)

Para o tratamento de fertilizantes sólidos, utilizam-se cerca de 1 a 1,5% do agente adesivo e a mesma quantidade do agente selante para cada tonelada de fertilizante que vai ser revestido. Essa tecnologia permite a adição de micronutrientes em pó na mistura utilizada para revestimento de fertilizantes minerais granulados, devido sua elevada adesividade. Para a análise de ácidos orgânicos, aminoácidos e açúcares presentes no polímero orgânico, uma amostra do material foi enviada para o Laboratório Eurofins do Brasil Análises de Alimentos Ltda (tabelas 3 e 4).

Tabela 3. Concentração de aminoácidos presentes no polímero orgânico

<b>Aminoácidos</b>	<b>Concentração (g 100g<sup>-1</sup>)</b>	<b>Aminoácidos</b>	<b>Concentração (g 100g<sup>-1</sup>)</b>
Alanina	0,207	Omitina	<0,05*
Arginina	0,239	Fenilalanina	0,211
Ácido	0,925	Prolina	0,174
Ácido aspártico	0,510	Serina	0,123
Glicina	0,166	Treonina	0,118
Histidina	0,133	Tirosina	0,194
Hidroxiprolina	<0,05*	Valina	0,121
Leucina	0,127	Cisteína + Cistina	0,056
Lisina	0,122	Metionina	0,045
Isoleucina	0,090	Triptofano	0,089

\* Abaixo do limite de detecção. Metodologia: AMSUR, ISSO 13.903: 2005, EU 152/2009

Tabela 4 - Concentração de ácidos orgânicos e açúcares no polímero orgânico

<b>Ácidos orgânicos**</b>	<b>Concentração (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Açúcares***</b>	<b>Concentração (%)</b>
Ácido acético	2000	Frutose	1,53
Ácido butírico	<300*	Glucose	<0,15*
Ácido cítrico	29.000	Lactose	<0,15*
Ácido fórmico	<200	Maltose	0,46
Ácido láctico	24.000	Sacarose	10,4
Ácido oxálico	160	Açúcares totais	12,39
Ácido propiônico	<300*	-	-
Ácido pirúvico	<10*	-	-
Ácido succínico	1.500	-	-

\*Abaixo do limite de detecção. \*\*Analisado por cromatografia líquida de acordo com metodologia interna do laboratório; \*\*\* Metodologia: AOAC 982.14, 1990.

### 3.1.2 Fertilizantes

Os fertilizantes utilizados neste trabalho são experimentais e foram compostos por quatro fontes fosfatadas que possuíam como matéria-prima base o mesmo fertilizante fosfato monoamônio (MAP). As fontes eram constituídas por MAP sem revestimento, MAP revestido com polímero orgânico biodegradável (POB), MAP revestido com POB + 1,23% de Zn +

0,33% B e MAP revestido com POB + 1,76% de Mg. A composição, concentração de nutrientes e o carbono orgânico total (COT) dos fertilizantes utilizados encontram-se na tabela 5.

Tabela 5 - Composição e nomenclatura dos fertilizantes utilizados.

Nomenclatura utilizada	Composição	Concentração de nutrientes %	COT <sup>5</sup> %
MAP	MAP sem revestimento	11,00 N; 52,00 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>4</sup>	-
MO <sup>1</sup>	MAP + POB	10,76 N; 50,69 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5,034
MOM <sup>2</sup>	MAP + POB + Zn + B	11,00 N; 51,38 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ; 1,23 Zn; 0,33 B	6,824
MOMg <sup>3</sup>	MAP + POB + Mg	10,20 N; 48,83 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ; 1,76 Mg	2,719

<sup>1</sup> MAP + polímero orgânico; <sup>2</sup> MAP + polímero orgânico + micro; <sup>3</sup>MAP + polímero orgânico + Mg. <sup>4</sup>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> CNA + H<sub>2</sub>O. <sup>5</sup>Carbono orgânico total.

### 3.1.3 Biodegradabilidade do polímero

A biodegradabilidade do polímero foi determinada conforme Norma ASTM D5988-18. Esta metodologia permite determinar o grau da biodegradabilidade aeróbia de um material medindo o CO<sub>2</sub> produzido em função do tempo que ele fica exposto ao solo, permitindo realizar uma estimativa do tempo que ele permanecerá em um solo aeróbio.

Para a determinação da umidade e capacidade de campo (CC) do solo, 5 g de solo (textura argilosa e pH 4,8) foram pesados e peneirados em peneira de abertura de malha de 2mm. A norma exige que a umidade seja corrigida para 60% da CC. Os respirômetros foram montados e as amostras do polímero (sem o fertilizante) foram pesadas de maneira que cada 100 g do solo recebesse entre 40 mg e 200 mg de C (o CO<sub>2</sub> das amostras foi determinado previamente). Foram adicionados 100 g de solo ao respirômetro, e a relação C:N foi corrigida utilizando fosfato de amônio dibásico (permanecendo entre 10:1 e 20:1). Em seguida, as amostras do polímero foram adicionadas aos respirômetros, que em sequência foram vedados e semanalmente a produção de CO<sub>2</sub> das amostras foi analisada.

A determinação da produção de CO<sub>2</sub> (1) e a biodegradabilidade (2) das amostras foram determinadas pelas equações: pelas equações:

$$\text{Produção de CO}_2 \left( \frac{\text{mg}}{\text{g amostra}} \right) = \frac{\text{Massa de CO}_2 \text{ produzido (mg)}}{\text{Massa da amostra}} \quad (1)$$

$$\text{Biodegradação (\%)} = \frac{\text{Massa de CO}_2 \text{ teórica (mg)}}{\text{Massa de CO}_2 \text{ produzido (mg)}} \quad (2)$$

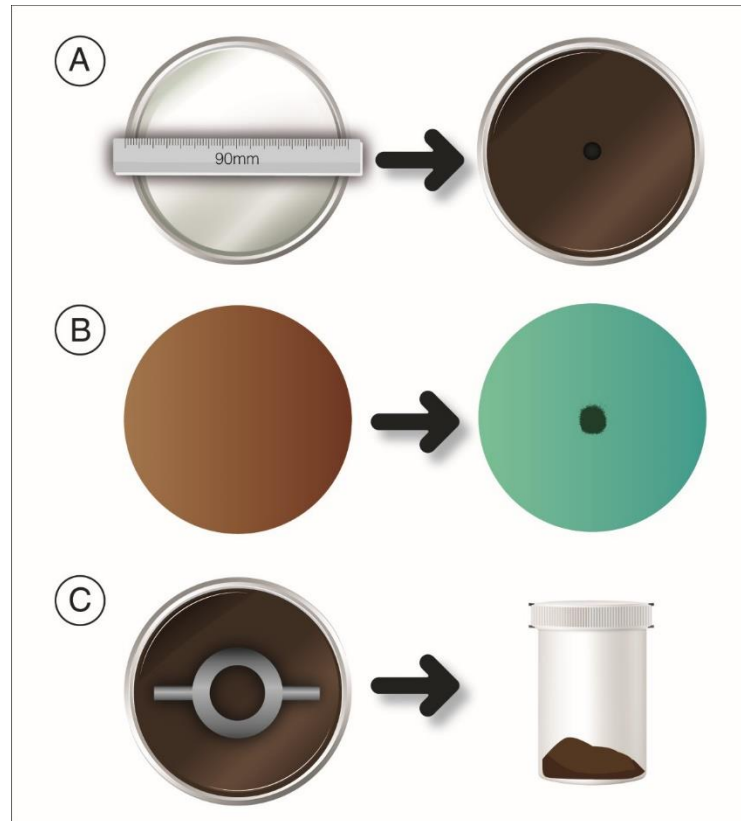
### 3.1.4 Experimento de incubação

Um experimento em placas de Petri foi realizado para comparar a difusão dos fertilizantes e a disponibilidade de P no solo, seguindo metodologia proposta por Degryse e McLaughlin (2014). O princípio do método consiste em capturar o P difusível em um papel filtro impregnado em óxido de Fe. Para isso, placas de Petri foram preenchidas com solo coletado na área de experimentação de campo (tabela 6), os quais foram compactados a 1,2 g cm<sup>-3</sup> e depois umedecidos a 70% da CC do solo utilizando-se água deionizada. Após o acondicionamento do solo, pequenos orifícios de cerca de 3 mm foram feitos no centro de cada placa, onde grânulos dos fertilizantes MAP, MO, MOM e MOMg (contendo cerca de 8,8 mg de P) e utilizando-se do MAP sem revestimento como controle, foram depositados. Em seguida, os orifícios foram cuidadosamente fechados com solo. As placas de Petri foram fechadas, seladas e incubadas à 25°C.

Para quantificar a difusão de P, papéis filtro foram embebidos em nitrato de ferro por cerca de 15 minutos e depois transferidos para uma solução de hidróxido de amônio. O excesso foi retirado com água deionizada e os papéis foram colocados para secar. No momento de uso os papéis foram novamente umedecidos com água deionizada e então colocados na superfície do solo onde permaneceram por alguns minutos, para que pudesse capturar o P difundido. O P capturado no papel foi corado utilizando molibdato de amônio e verde de malaquita, e para retirar o óxido de Fe uma solução de ácido sulfúrico foi utilizada. A visualização da zona de difusão foi feita mediante digitalização dos papéis, que posteriormente foram analisados usando um software de imagem (GNU Image Manipulation Program, GIMP). Como o método não é destrutivo, pode-se realizar várias avaliações e as placas de Petri foram abertas e a difusão medida nos seguintes tempos: 1, 2, 4, 9, 24 horas, 4 dias e 18 dias após adição do fertilizante. A umidade foi constantemente ajustada.

Ao 18º dia após a incubação os grânulos haviam se desfeito, então três zonas concêntricas do solo foram coletadas e o P disponível do solo foi determinada por meio de extração Mehlich-1.

Figura 1 - Esquematização de condução do experimento de incubação em placas de Petri



Na figura: Etapa A- placas de Petri foram preenchidas com solo, depois mantidas a 70% da CC; etapa B- em cada tempo de amostragem os papéis já impregnados pelo óxido de Fe foram colocados em contato com o solo, onde em seguida foram tratados para que se pudesse observar a difusão de P e etapa C- após a última amostragem o solo foi coletado em diferentes áreas concêntricas e o P disponível foi avaliado pelo método Mehlich-1. Fonte: do autor.

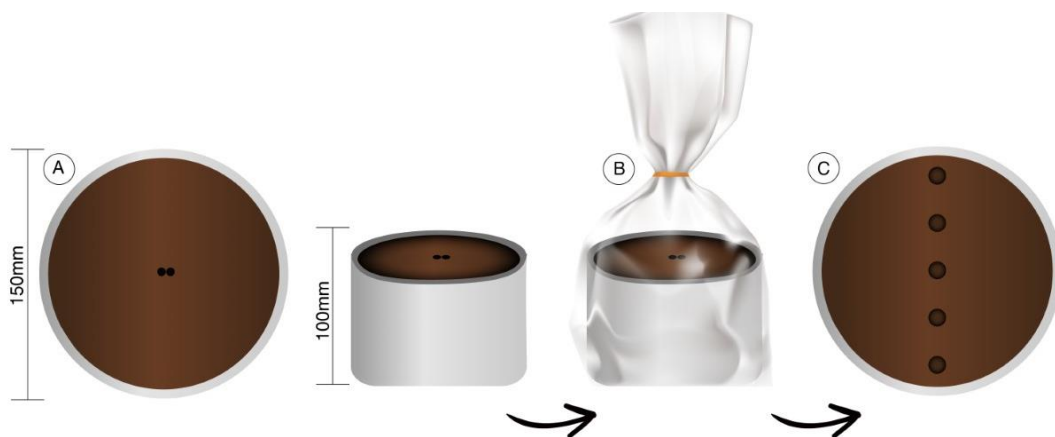
### 3.1.5 Movimentação de P no solo

Para poder observar a movimentação de P no solo, um experimento em vasos foi conduzido, baseado em metodologia proposta por Benbi e Gilkles (1987). Recipientes foram confeccionados utilizando canos de PVC, que foram cortados no tamanho de 15cm (diâmetro) x 10cm (altura) e preenchidos com solo. Os tratamentos foram compostos por MAP, MO, MOM e MOMg e dois tipos de solos foram utilizados, um de textura arenosa e o outro de textura média. Foram pesados 135 mg de fertilizante e colocado no centro de cada recipiente. Cada tratamento recebeu oito recipientes, sendo quatro utilizados para cada solo. Os solos foram mantidos na CC de 60% e a umidade foi preservada utilizando-se sacos plásticos que permaneceram fechados durante o tempo de condução do experimento. Após 6 semanas os solos foram amostrados e o P disponível foi analisado pelo extrator Mehlich-1.



Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 5, 10, 20, 30, 40, 50 e 60 mm e em distâncias de 10 e 20 mm radiais partindo do centro (local onde fora depositado o grânulo de fertilizante). As amostras foram coletadas no mesmo local quanto a profundidade, utilizando-se um amostrador. Para compor uma amostra composta, foram coletadas amostras simples dos quatro recipientes para depois realizar-se a análise de P disponível. A Tabela 4 contém a caracterização química e a granulometria dos solos utilizados.

Figura 2 - Esquematização do experimento de movimentação de P no solo



Na figura: Etapa A- os recipientes foram preenchidos com solo até cerca de 8 cm de altura. Dois grânulos pesando 135 mg (juntos) foram colocados ao centro e o solo foi umedecido à 60% da capacidade de campo; etapa B- os recipientes receberam sacos plásticos para que a umidade fosse mantida e permaneceram fechados até o final do experimento e etapa C- o solo foi amostrado em diferentes locais e profundidades. Fonte: do autor.

Tabela 6 - Granulometria e caracterização química dos solos utilizados

	pH	K	P	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	(H+Al)	SB	t	T
<b>Solo</b>		---mg dm <sup>-3</sup> ---		-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----						
<b>1</b>	5,0	48,61	1,16	0,10	0,10	1,02	3,50	0,32	1,34	3,82
<b>2</b>	6,5	239,08	108,44	7,65	0,82	0,04	2,01	9,08	9,12	11,09
	V	m	M'O	P-REM	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
<b>Solo</b>	----%----		dag kg <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	-----mg dm <sup>-3</sup> -----					
<b>1</b>	8,50	76,12	1,14	48,51	0,64	91,00	4,64	0,10	0,01	10,20
<b>2</b>	81,90	0,44	2,73	38,85	6,14	82,27	131,15	1,40	0,06	78,96
	Classe textural	Argila		Silte			Areia			
<b>Solo</b>		-----dag kg <sup>-1</sup> -----								
<b>1</b>	Arenosa	08		16			76			
<b>2</b>	Média	22		25			53			

pH em água (Relação 1:2,5); P, Sódio (Na), K, Fe, Zn, Mn, Cu- Extrator Mehlich 1;  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$ - Extrator: KCl - 1 mol L<sup>-1</sup>; H + Al- Extrator: SMP; SB= Soma de Bases Trocáveis; CTC (t) - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; CTC (T) - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V= Índice de Saturação de Bases; m= Índice de Saturação de Alumínio; Mat. Org. (MO) - Oxidação:  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  4N+  $\text{H}_2\text{SO}_4$  10N; P-rem: Fósforo Remanescente; B- Extrator água quente

### **3.1.6 Caracterização por FT-IR**

Os fertilizantes revestidos foram submetidos a análise de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR), onde os precursores e produtos das reações foram escaneados.

### **3.1.7 Caracterização por MEV**

Os fertilizantes revestidos foram submetidos a uma caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A caracterização encontra-se na figura 3 e foi feita no departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras, no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultra estrutural.

Figura 3 - Fotografia dos fertilizantes fosfatados revestidos por polímeros orgânicos realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (continua)

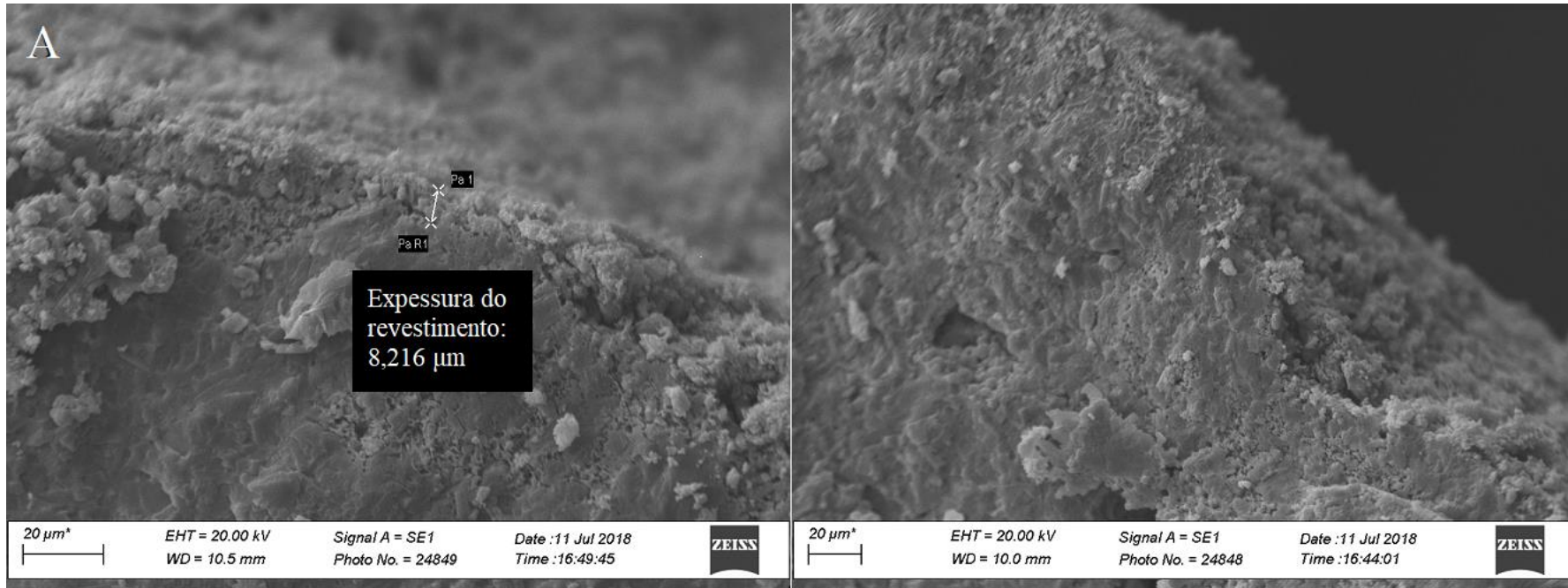


Figura 3 - Fotografia dos fertilizantes fosfatados revestidos por polímeros orgânicos realizada microscopia eletrônica de varredura (MEV)  
(continua)

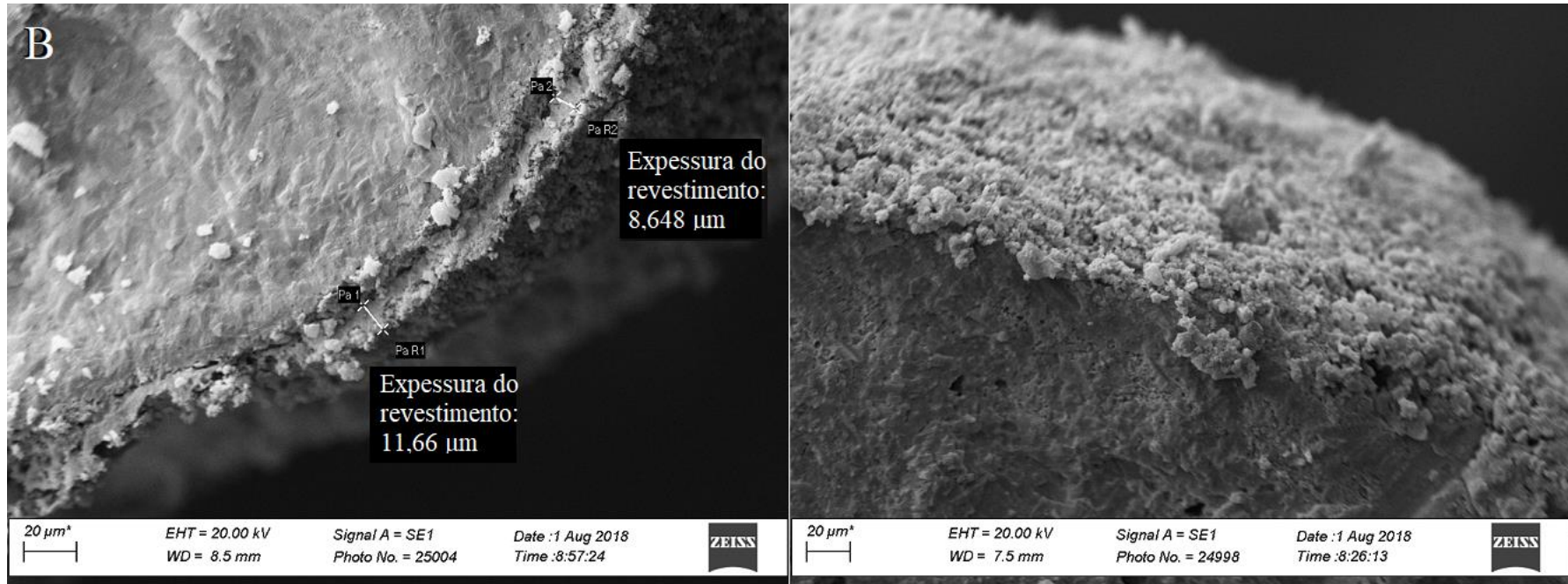
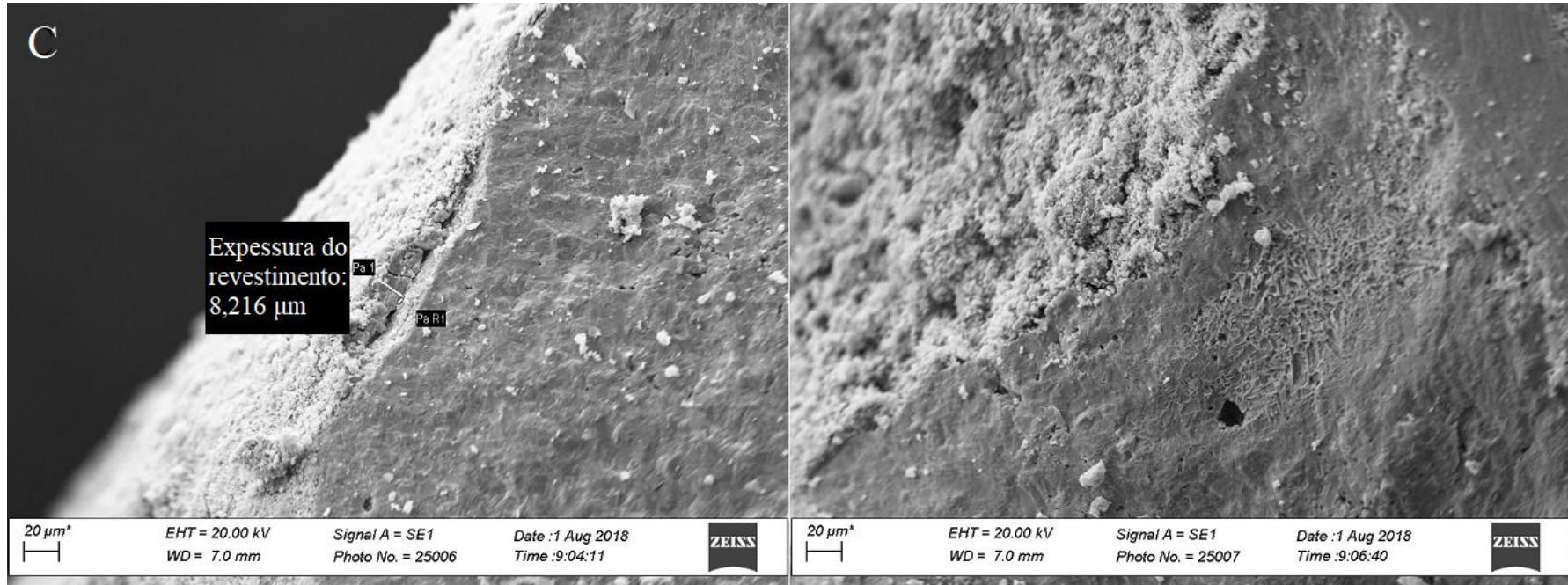


Figura 3 - Fotografia dos fertilizantes fosfatados revestidos por polímeros orgânicos realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (conclusão).



Na figura: A- MAP + polímero orgânico B- MAP + polímero orgânico + micro e C- MAP + polímero orgânico + Mg.

### 3.1.8 Teste de Dureza e índice de salinidade

Para medir a força de esmagamento dos grânulos, amostras dos fertilizantes foram separadas por tamanhos usando peneiras de malha que possibilitaram a seleção de amostras de fertilizantes de classes de tamanhos de 1 a 2 mm, 2 a 3,35 mm e 3,35 a 4 mm. Dentro destas classes, cinco grânulos foram selecionados e esmagados utilizando um penetrômetro (penetrômetro eletrônico de bancada, modelo MA 933, Marconi), com a intenção de medir a resistência mecânica do fertilizante. Para isto, os grânulos foram posicionados individualmente em uma superfície plana acoplada ao compressor. O penetrômetro mediu a pressão (kgf) necessária para quebrar o grânulo. Foi realizada média para as medições para determinar a força necessária para o rompimento dos grânulos.

O índice salino das fontes fosfatadas foi avaliado (MAPA, 2013). Este índice é indicativo da salinidade do material em relação aos íons liberados em solução por este, sendo medidos pela condutividade elétrica (CE), e comparados à CE de uma solução de  $\text{NaNO}_3$ .

Para realização do teste, as fontes fosfatadas foram moídas até que se tornassem partículas finas. Foram adotadas 4 repetições. Em seguida, 1 g do fertilizante foi pesado e solubilizado com água deionizada em um balão de 100 ml. A condutividade elétrica foi mensurada. A condutividade do  $\text{NaNO}_3$  foi medida, preparando-se uma solução a  $10 \text{ g L}^{-1}$ . O índice salino é expresso em porcentagem (%) e é obtido pela equação  $IS = (CE \text{ amostra} / CE \text{ NaNO}_3) / 100$ .

O pH em  $\text{CaCl}_2$  das amostras também foi mensurado (MAPA, 2013). Foram pesados 10 g da amostra, as quais foram transferidas para um béquer de 100 ml, e adicionados 50 mL de solução de  $\text{CaCl}_2$  a  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ . A amostra foi homogeneizada, e agitada, sendo agitada a cada 10 minutos, por 30 minutos. Um medidor de pH (HANNA, HI 98127) foi utilizado medir o pH da solução.

## 3.2 Experimento em campo

### 3.2.1 Local

A pesquisa foi realizada em uma fazenda localizada nas proximidades de Luminárias-MG ( $21^\circ 30' 40'' \text{ S}$ ;  $44^\circ 54' 12'' \text{ W}$ ), com altitude média de 957m e precipitação média anual de 1470 mm. A temperatura média anual é de  $21^\circ \text{ C}$ .

### 3.2.2 Delineamento Estatístico

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial 4 x 3 + 1 (quatro tipos de fertilizantes, três doses e um controle), com quatro blocos, totalizando 52 parcelas. As parcelas foram constituídas por 5 linhas espaçadas de 0,5m com 5m de comprimento, sendo a área da parcela de 12,5 m<sup>2</sup>, totalizando 650m<sup>2</sup>. Os tratamentos foram compostos pelos fertilizantes MAP, MO, MOM e MOMg, os quais foram aplicados em quatro doses, sendo elas 0, 50, 100 e 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. As parcelas sem aplicação de P foram consideradas como controle. As doses aplicadas de N, Mg, B e Zn presentes nos tratamentos encontram-se na tabela 7.

Tabela 7 - Doses de nutrientes adicionais aplicados pelos tratamentos em função da dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Fertilizantes	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	N	Zn	Mg	B
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----				g ha <sup>-1</sup>
MAP	0	0	0	0	0
	50	10,57	-	-	-
	100	21,15	-	-	-
	150	31,73	-	-	-
MO <sup>1</sup>	0	0	0	0	0
	50	10,61	-	-	-
	100	21,22	-	-	-
	150	31,83	-	-	-
MOM <sup>2</sup>	0	0	0	0	0
	50	10,7	1,19	-	321
	100	21,4	2,39	-	642,1
	150	32,11	3,59	-	963,4
MOMg <sup>3</sup>	0	0	0	0	0
	50	10,44	-	1,8	-
	100	20,88	-	3,6	-
	150	31,33	-	5,4	-

<sup>1</sup>MAP + polímero orgânico; <sup>2</sup>MAP + polímero orgânico + micro; <sup>3</sup>MAP + polímero orgânico + Mg.

As doses de N foram corrigidas aplicando-se ureia convencional junto aos fertilizantes aplicados na adubação de sementeira, com o intuito de que todos os

tratamentos recebessem a mesma quantidade de N, a fim de eliminar qualquer possível efeito referente ao também aumento da dose de N contido no MAP, portanto, variando somente as quantidades de P. As doses de micronutrientes não foram balanceadas, alterando a quantidade aplicada somente no tratamento constituído pelo fertilizante MOM.

### 3.2.3 Preparo do solo e semeadura

Foi realizada a amostragem de solo na área experimental, considerando-se a camada superficial e a do subsolo para determinação da granulometria e das características químicas do solo (EMBRAPA, 2011).

Tabela 8 – Granulometria e características químicas do solo da área experimental do milho cultivado em 2ª safra e safra verão.

Profundidade cm	pH	K --- mg dm <sup>-3</sup> ---	P	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	(H+Al)	SB	t	T
				----- cmolc dm <sup>-3</sup> -----						
<b>0-20</b>	5,8	85,42	8,75	3,33	0,20	0,04	3,24	3,75	3,79	6,99
<b>20-40</b>	5,4	90,59	1,69	2,24	0,32	0,05	3,70	2,79	2,84	6,49
Solo safra	6,5	239,08	108,44	7,65	0,82	0,04	2,01	9,08	9,12	11,09
<b>Camada</b>	V	m	MO	P-	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
	REM									
	----%----		dag kg <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	----- mg dm <sup>-3</sup> -----					
<b>0-20</b>	53,63	1,06	2,86	14,10	5,51	59,84	19,03	1,73	0,15	57,08
<b>20-40</b>	43,02	1,76	2,59	10,24	2,89	64,17	11,04	1,53	0,14	87,92
Solo safra	81,90	0,44	2,73	38,85	6,14	82,27	131,15	1,40	0,06	78,96
<b>Camada</b>	Classe textural		Argila	Silte		Areia				
	----- dag kg <sup>-1</sup> -----									
<b>0-20</b>	Argilosa		40	35		25				
<b>20-40</b>	Média		34	42		24				
Solo safra	Média		22	25		53				

pH em água (Relação 1:2,5); P, Na, K, Fe, Zn, Mn, Cu- Extrador Mehlich 1; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>- Extrator: KCl - 1 mol L<sup>-1</sup>; H + Al- Extrator: SMP; SB= Soma de Bases Trocáveis; CTC (t) - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; CTC (T) - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V= Índice de Saturação de Bases; m= Índice de Saturação de Alumínio; Mat. Org. (MO) - Oxidação: Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 4N+ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10N; P-rem: Fósforo Remanescente; B- Extrator água quente



A semeadura foi realizada na mesma fazenda, entretanto, foram realizados cultivos em duas áreas diferentes nas épocas de março e em novembro de 2018, correspondendo a 2ª safra (“safrinha”) e safra verão, respectivamente. A semeadura foi realizada mecanicamente, em sistema plantio direto em área antes cultivada com soja (*Glycine max*), em sulcos espaçados em 50 cm entre linhas e 10 cm de profundidade. Sementes do híbrido simples da Pioneer 3707VYH foram utilizadas, em uma densidade de 60.000 e 69.000 plantas hectare<sup>-1</sup> (para os cultivos de milho 2ª safra e safra verão respectivamente). A adubação fosfatada com os tratamentos foi realizada no momento da semeadura, sendo aplicada manualmente ao lado das sementes de milho. A adubação de cobertura foi realizada aos 45 dias após a semeadura, com a distribuição de 400 kg ha<sup>-1</sup> do fertilizante mineral misto 25-00-15.

### 3.3 Parâmetros Analisados

#### 3.3.1 Teores e acúmulo de nutrientes, produtividade de grãos e Índices de Eficiência

No período do florescimento feminino das plantas de milho, foram realizadas amostragens de folhas na área útil de cada parcela, onde o terço médio dos limbos de folhas situadas abaixo e oposta a espiga central foi coletado, seguindo metodologia proposta por Malavolta *et al.* (1997). Os teores dos nutrientes P, Mg, Zn e B foram analisados.

Para avaliar a produtividade de grãos, foram colhidas e debulhadas espigas em cada linha da área útil da parcela, constituída pelas três linhas centrais. Os grãos foram pesados e a umidade foi medida e ajustada para 13%. Posteriormente, o peso foi convertido para kg ha<sup>-1</sup>. Foram realizadas análises dos grãos, para se obter os teores dos nutrientes P, Mg, Zn e B e o acúmulo de nutrientes foi calculado, multiplicando-se a produtividade de grãos pelo teor dos respectivos nutrientes.

Após a determinação da produtividade de grãos da cultura, o índice de eficiência sgronômica (IEA) e a eficiência agrônômica (EA) dos fertilizantes fosfatados nos cultivos do milho foram calculados, utilizando as equações (3 e 4):

$$EA \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{(Produtividade fonte testada)} - \text{(Produtividade controle)}}{\text{(Dose de P aplicada)}} \quad (3)$$

O índice de eficiência agrônômica (IEA) foi calculado tomando-se o MAP convencional como 100% a partir da fórmula (NOVAIS *et al.*, 2007):

$$IEA = \frac{(\text{Produtividade fonte testada}) - (\text{Produtividade controle}) \times 100}{(\text{Produtividade MAP}) - (\text{Produtividade controle})} \quad (4)$$

### 3.4 Análises Estatísticas

Todos os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Skott Knott ( $p > 0,05$ ). Foram realizadas análises de regressão para as doses aplicadas. A ANOVA foi realizada após a verificação da normalidade (Shapiro–Wilk's test) e homogeneidade de variância (Teste de Bartlett) dos dados. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o programa de análise estatística SISVAR 5.3<sup>®</sup> (FERREIRA, 2011). As barras na vertical utilizadas nos gráficos indicam o desvio padrão amostral ( $n=4$ ).

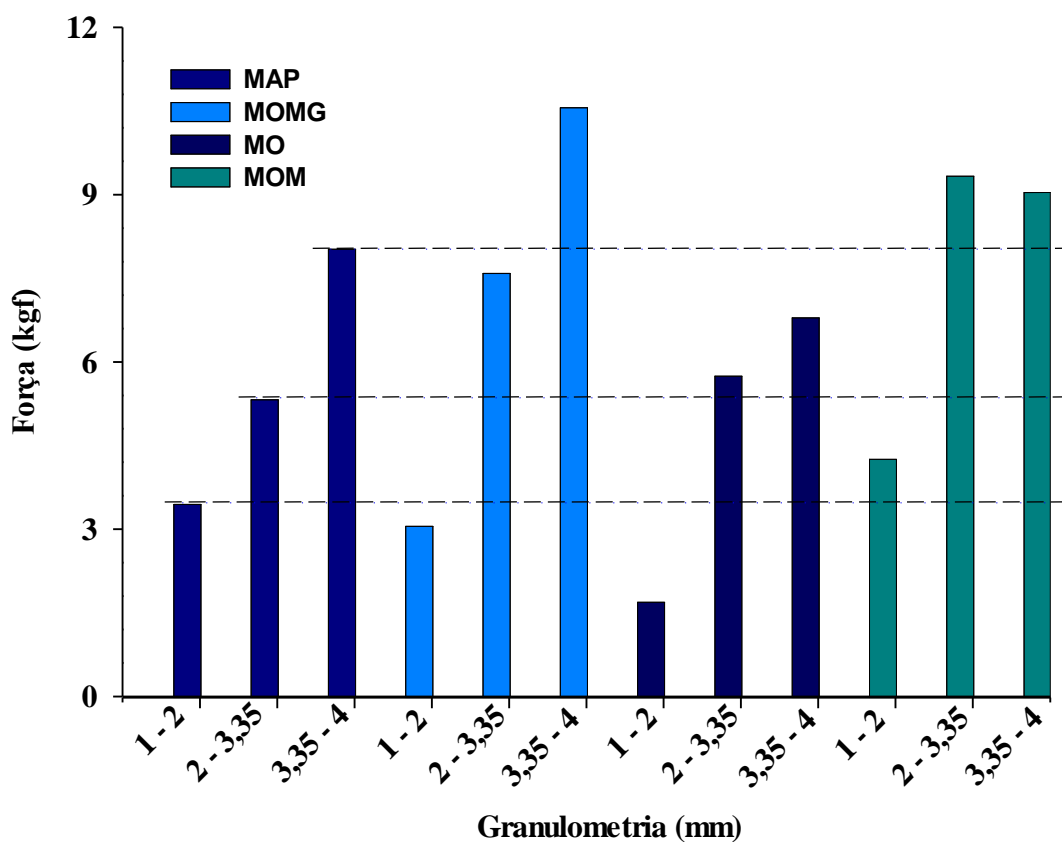
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Dureza dos grânulos

A figura 4 apresenta a dureza dos grânulos dos fertilizantes fosfatados. Pode-se observar que para os grânulos na faixa granulométrica entre 4 a 3,35 mm foi necessária maior força (kgf) para ruptura dos grânulos quando comparado aos de menor diâmetro (1 a 2 mm). Esses valores ficaram entre 6,81 a 10,58 kgf e 1,70 e 4,27 kgf, respectivamente. Os grânulos dos fertilizantes contendo Mg e micronutrientes (MOMG e MOM) em seu revestimento foram mais resistentes a ruptura. Isso ocorreu provavelmente devido à presença de óxido de Mg (MgO) e óxido de Zn (ZnO) em seu revestimento o que tornou o grânulo mais resistente à ruptura. Quando houve o revestimento do grânulo de MAP apenas com o polímero orgânico (MO), não ocorreu alteração na resistência dos grânulos, em comparação ao MAP. Nascimento et al (2019) observaram que quando utilizado como aditivo o MgO na composição de fertilizantes organominerais, houve uma melhora na dureza do grânulo, aumentando para quase quatro vezes em relação ao controle adotado.

Testes de resistência a dureza de MAP revestidos por óxido de grafeno e grafeno que mostraram que à adição destas substâncias aos grânulos de MAP aumentaram a força do grânulo para 18,2 e 16,2 vezes em comparação com o MAP convencional (Kabiri et al., 2018). Valores padrão de resistência a dureza de grânulos de MAP convencional 11-55-00 estão entre 2,0 a 3,0 kgf (UNIDO/IFDC, 1998). Dessa forma, a adição de diferente compostos aos grânulos de fertilizantes convencionais podem aumentar a sua resistência e, conseqüentemente, alterar as suas características físicas e físico-químicas.

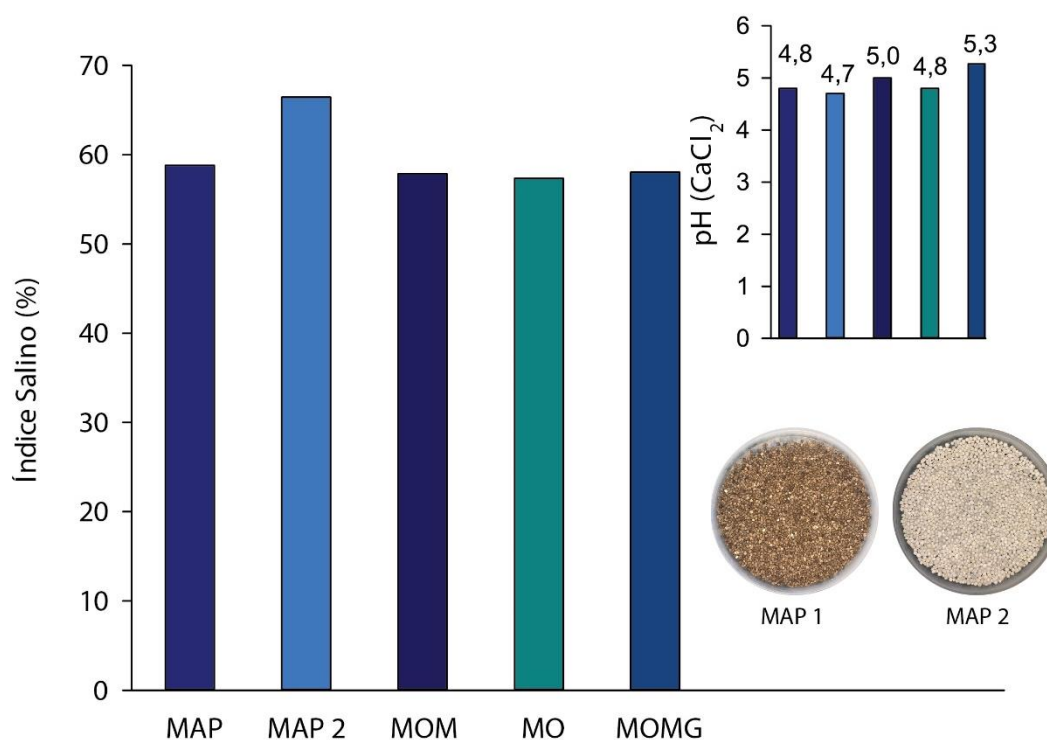
Figura 4 - Resistência à ruptura dos grânulos de diferentes granulometrias dos fertilizantes fosfatados à uma força (kgf) aplicada.



#### 4.2 Índice Salino (IS) e pH

A figura 5 apresenta os valores de IS (%) e pH ( $\text{CaCl}_2$ ) dados fertilizantes fosfatados avaliados. Não houve variação entre o IS dos fertilizantes fosfatados revestidos quando comparados ao MAP convencional. Somente o MAP 2 apresentou maior IS (66,4%), o que possivelmente está relacionado à sua maior pureza. O pH do MOMG foi o maior (pH = 5,3) dentre os fertilizantes fosfatados, provavelmente devido à presença de MgO em seu revestimento.

Figura 5 – Índice salino (%) e pH em  $\text{CaCl}_2$  (0,01 M) dos fertilizantes fosfatados.

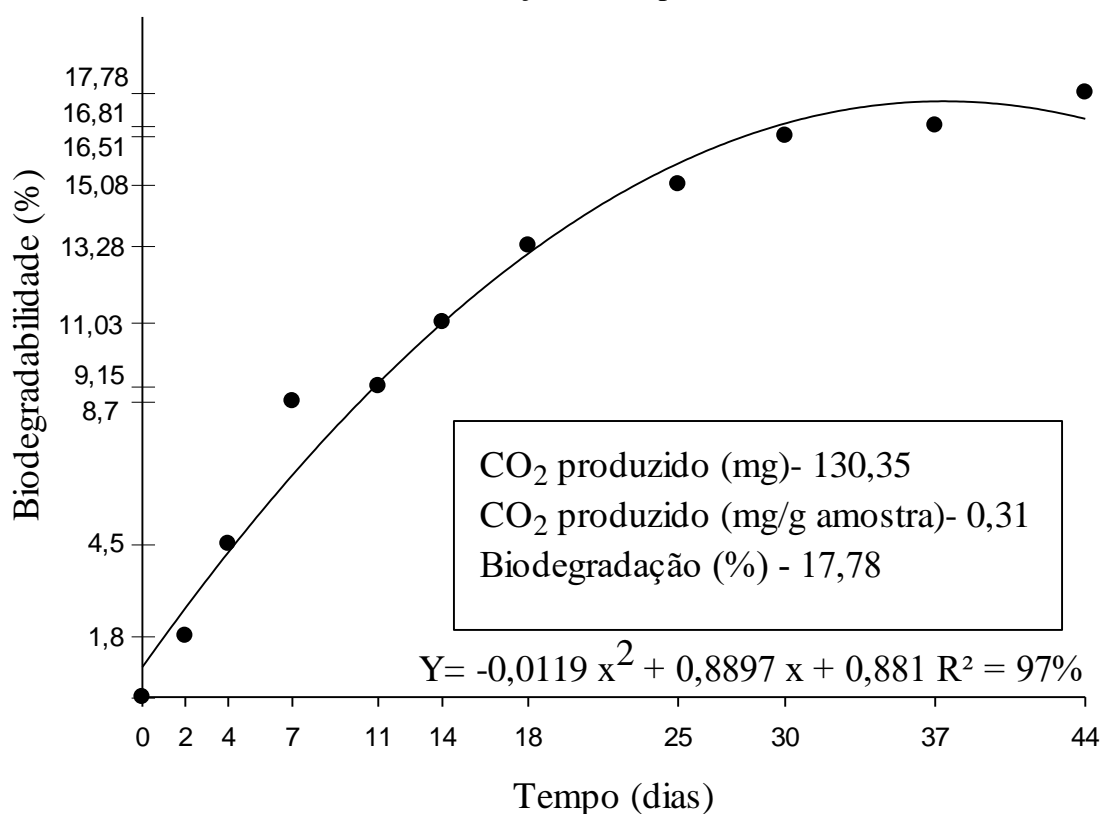


\* MAP 2 foi utilizado como referência.

#### 4.1 Biodegradabilidade do polímero

A biodegradabilidade do polímero orgânico utilizado no revestimento do MAP foi de 17,78% em 44 dias e produção de  $\text{CO}_2$  de 130,3 mg (Figura 6). Os polímeros biodegradáveis são considerados fonte de carbono (C) e energia para os microorganismos, sendo assimilados e mineralizados, ou então utilizados para sua reprodução e crescimento (CHINAGLIA et al., 2017). Surgem como uma opção de revestimento de fertilizantes, sendo produzidos a partir de fontes consideradas renováveis e levam vantagem sobre os polímeros produzidos a partir de fontes não renováveis (como o petróleo), que em sua maioria não são biodegradáveis, o que promove seu acúmulo no meio ambiente (BRITO et al., 2011). De acordo com Shaviv (2005), materiais sintéticos não biodegradáveis que eram utilizados como revestimento apresentavam sérios problemas ambientais, como a baixa biodegradação de poliolefinas.

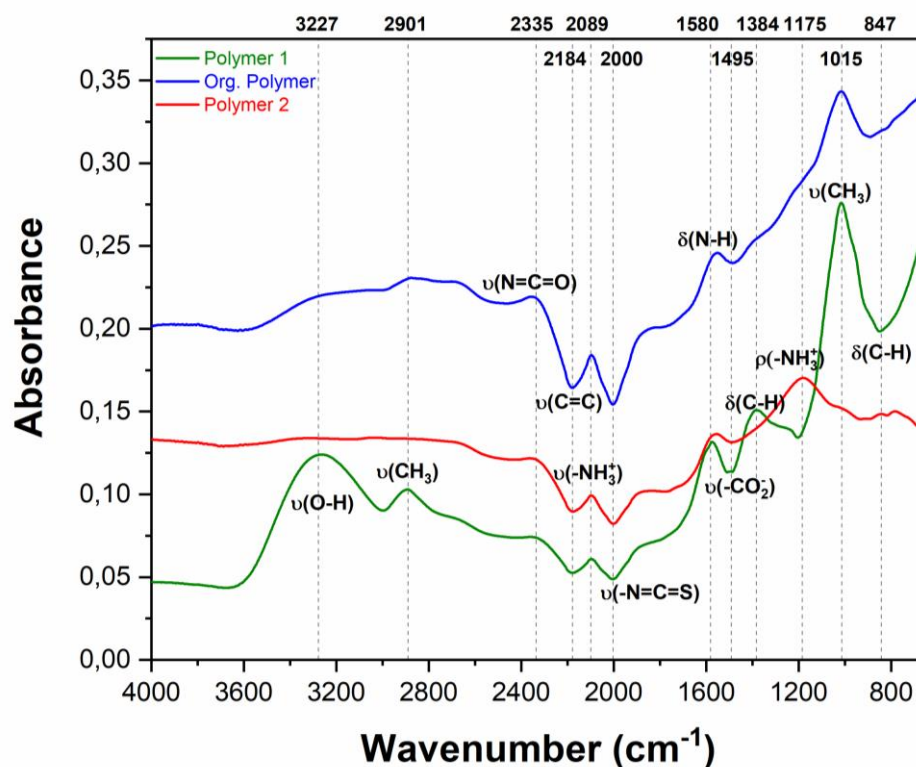
Figura 6 - Biodegradabilidade (%) do polímero orgânico aniônico utilizado no revestimento do MAP em função do tempo (dias).



#### 4.2 IF-TR

Na figura 7, encontra-se a análise realizada por IF-TR das amostras que continham revestimento de polímeros orgânicos aniônicos. Nota-se que no espectro do adesivo (Polímero 1) há a presença de uma banda bastante alargada com pico máximo em 3227  $\text{cm}^{-1}$  que possivelmente está associada as ligações O-H de ácidos carboxílicos e também as ligações de hidrogênio entre as próprias moléculas de ácidos carboxílicos (SILVERSTEIN et al, 2005).

Figura 7 - Análise de infravermelho com transformada de Fourier (IF-TR) dos fertilizantes revestidos por polímeros orgânicos aniônicos e que indica os precursores e produtos das reações



Nos espectros do pó (Polímero 2) e do kit (Polímero Orgânico) a banda não é acentuada, o que indica a interação entre os polímeros 1 e 2 gerando uma possível oxidação dos ácidos carboxílicos, que pode ter sido catalisada pela presença de agentes redutores e oxidantes na composição química dos dois polímeros. Outro fator que corrobora com a degradação do ácido carboxílico é a diminuição de intensidade da banda em  $2901\text{ cm}^{-1}$  associada as ligações  $\text{CH}_3$  características de ácidos carboxílicos. A partir da banda com pico máximo em  $2335\text{ cm}^{-1}$ , que pode estar associada a grupos isocianatos presentes no material polimérico, há apenas diferenças de intensidade entre os espectros.

A banda com pico máximo em  $2000\text{ cm}^{-1}$  indica possivelmente a presença de grupos tiocianatos. As bandas com picos máximos em 2184, 2089, 1580, 1495, 1384, 1175 e  $1015\text{ cm}^{-1}$  são características de proteínas (SILVERSTEIN et al, 2005), comprovado através de análises químicas (tabela 8), a presença de aminoácidos nos materiais. Os aminoácidos se ligam através de grupamentos amida, formando compostos conhecidos como peptídeos, que possuem em suas extremidades dois grupos funcionais, sendo elas uma amino terminal e outra carboxila terminal (TRZESNIAK, 2002).

Os peptídeos possuem duas extremidades uma amino terminal e outra carboxila terminal e relacionado ao pH do meio em que se encontram, podem assumir carga elétrica

positiva, neutra ou negativa. Se o pH do meio for ácido o peptídeo assumirá carga positiva; se ele se encontrar em pH neutro, terá carga neutra e se estiver em pH básicos assumirá carga predominantemente negativa (TRZESNIAK, 2002). Na região com pico máximo em  $847\text{ cm}^{-1}$  há a presença de ligações C-H comumente associadas a compostos aromáticos (TONDI e PETUTSCHNIGG, 2015).

### 4.3 Experimento de difusão em placa de Petri e disponibilidade de P

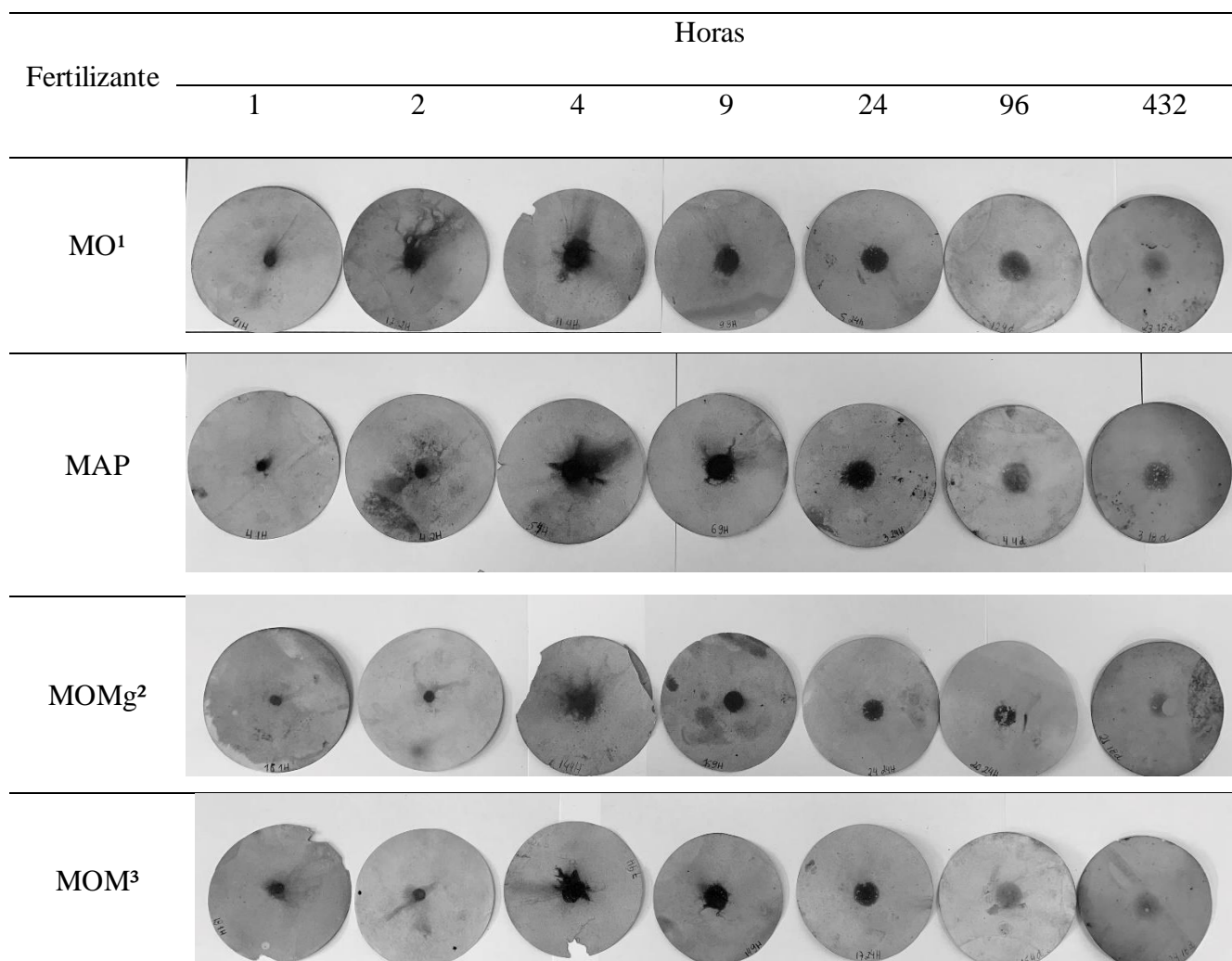
Os raios de difusão dos fertilizantes estão representados na tabela 9 e figura 8. Na primeira hora pode-se observar a maior difusão do P-fertilizante MOM, que apresenta uma queda na difusão duas horas após a incubação do grânulo, comportamento este que não é observado para os demais tratamentos.

Tabela 9- Raio da difusão (mm) dos fertilizantes fosfatados em função do período de incubação (horas).

Tratamentos	Tempo após aplicação (horas)						
	1	2	4	9	24	96	432
MO <sup>1</sup>	7,3 bc	8,7 ab	11,6 b	11,0 a	9,7 a	9,54 a	8,82 a
MAP	8,8 b	9,9 a	15,2 a	10,5 a	9,4 a	9,36 a	8,84 a
MOMg <sup>2</sup>	6,0 c	7,9 b	8,7 c	8,6 b	7,1 b	6,0 b	7,86 a
MOM <sup>3</sup>	11,0 a	7,2 b	10,6 b	9,6 ab	8,4 ab	8,25 a	8,51 a

<sup>1</sup>MAP + polímero orgânico; <sup>2</sup>MAP + polímero orgânico + Mg. <sup>3</sup>MAP + polímero orgânico + micro. Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Figura 8- Fotos dos papéis filtro após captura da difusão do P em placas de Petri



<sup>1</sup>MAP + polímero orgânico; <sup>2</sup>MAP + polímero orgânico + Mg. <sup>3</sup>MAP + polímero orgânico + micro.



Este comportamento possivelmente possa ser explicado por uma precipitação entre os minerais P e Zn, levando a formação de um composto inorgânico de baixa solubilidade, indisponibilizando o P momentaneamente. Apesar da interação entre P e Zn terem resultados contraditórios encontrados na literatura, o antagonismo mútuo entre ambos os nutrientes já foi evidenciado quando ambos excedem seus valores críticos no solo (CORREA et al., 2014), o que corrobora com os achados neste trabalho e que poderia ter impossibilitado que parte da difusão fosse capturada pelo método sendo que depois desta formação, quando os minerais de Zn foram saturados, a difusão é retomada novamente.

Após quatro horas de incubação, o MAP apresentou um pico de difusão (cerca de 15mm), diferindo dos demais fertilizantes que continham o revestimento. Os demais fertilizantes apresentam comportamentos similares, apresentando um pico de liberação maior às quatro horas de incubação. Posteriormente, com o passar do tempo, há uma redução na intensidade da coloração do papel devido a adsorção do P pelos coloides do solo, seguido de estabilidade na coloração. De um modo geral, o MOMg foi o que apresentou a menor difusão nos tempos analisados. Após a última amostragem para análise da difusão, foram retiradas amostras de solo para avaliação do P disponível e os resultados se encontram na tabela 10.

Tabela 10 - P-disponível avaliado em diferentes diâmetros de coleta do solo na placa de Petri ao final do experimento de visualização de difusão

Área (mm)	MO <sup>1</sup>	MAP	MOMg <sup>2</sup>	MOM <sup>3</sup>
	P disponível (mg dm <sup>3</sup> )			
5	725,8 ± 29,09 Aab	798,2 ± 25,39 Aa	684,97 ± 46,74 Ab	787 ± 31,01 Aa
25	43,36 ± 1,24 Ba	58,22 ± 15,06 Ba	42,96 ± 3,13 Ba	49,29 ± 1,66 Ba
45	35,69 ± 1,57 Ba	31,34 ± 0,75 Ba	32,63 ± 1,19 Ba	34,41 ± 0,89 Ba

<sup>1</sup>MAP + polímero orgânico; <sup>2</sup>MAP + polímero orgânico + Mg. <sup>3</sup>MAP polímero orgânico + micro. Médias seguidas de letras iguais na mesma coluna (maiuscula) e na mesma linha (minúscula) não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ± indica o desvio padrão (n=6). P disponível foi avaliado pelo método Mehlich-1.

A área que apresentou maior teor de P disponível foi representada pelo solo coletado no raio de 5 mm e que corresponde ao local em que o grânulo de fertilizante estava situado anteriormente, justificando os altos valores de P disponível apresentados e

que diferiram ( $p > 5\%$ ) das demais áreas coletadas. Nas demais áreas, a quantidade de P reduziu conforme se distanciava da região em que estava localizado os grânulos.

Ainda na área de 5 mm, o tratamento MOMg apresentou uma quantidade de P disponível menor que os tratamentos MAP e MOM, mas não diferiu estatisticamente do tratamento MO. Este resultado concorda com o resultado apresentado na tabela 10, onde o tratamento MOMg apresentou uma menor difusão que os demais tratamentos.

Trabalhos avaliando mobilidade e labilidade de P mostram comportamentos semelhantes (PICOLI, 2017; LOMBI et al, 2006; MONTALVO et al, 2014; DEGRYSE, et al 2013) aos encontrados no presente estudo. A menor quantidade de P disponível e também a menor difusão apresentada pelo tratamento MOMg pode ser explicada pela formação de um composto de P menos solúvel que diminuiria a liberação de P, chamado de pirofosfato de magnésio ( $Mg_2P_2O_7$ ), como relatado em estudo feito por Lustosa Filho et al (2017).

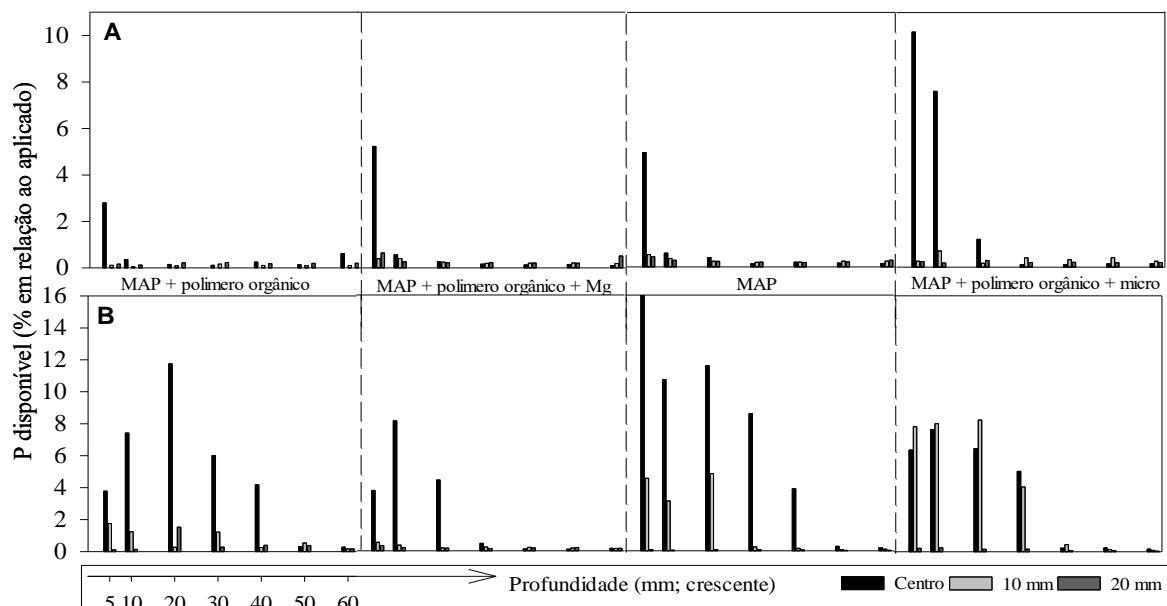
Em estudo avaliando a mobilidade e labilidade do P, Nascimento (2016) relata que o revestimento do MAP por ácido húmico não aumentou a mobilidade e labilidade do P advindo do fertilizante e cita que o ocorrido está relacionado com reações de complexação entre íons fosfato com Fe e Al ligados à ácidos húmicos. Degryse et al (2013) afirma que as substâncias húmicas adicionadas aos fertilizantes neutralizariam as reações de adsorção apenas em regiões muito próximas ao grânulo.

Picoli (2017) observou em estudo que o revestimento da fonte fosfatada com substâncias húmicas não atuou como barreira na solubilização e movimentação do P, porém, como observado na tabela 10, o MAP apresentou resultados superiores na difusão de P nos tempos de 2 e 4h após a incubação do grânulo, o que indica que o revestimento pode ter alterado a solubilidade do fertilizante no solo. Entretanto, ao 18° (ou 432 horas) após a incubação, a difusão de P de todos os fertilizantes avaliados havia se estabilizado, tornando-os similares ( $p < 5\%$ ).

#### 4.4 Movimentação e disponibilidade de P

A figura 9 apresenta os valores de P-disponível (%) em relação ao aplicado para os solos arenosos e textura média.

Figura 9 - Porcentagem de P-disponível (Mehlich-1) das fontes de fertilizantes fosfatados amostrados em solos de textura arenosa e média



Centro: região coletada onde o grânulo de fertilizante fora depositado anteriormente, considerado como ponto de partida para as demais coletas (0 mm); 10 mm a partir da localização do centro; 20 mm: 20 mm a partir do centro. A- Solo textura média; B- Solo textura arenosa

De maneira geral, observa-se que houve maior movimentação do P no solo arenoso visto que este apresentou maiores quantidades de P-disponível na profundidade até 40 mm, quando comparado com as quantidades observadas para o solo de textura média. O solo de textura média apresentou maiores movimentação e quantidades de P-disponível somente até a segunda profundidade amostrada (10 mm). Ao se avaliar o comportamento das diferentes fontes, pode-se observar que os fertilizantes revestidos por polímeros orgânicos apresentaram menor disponibilidade na região mais próxima ao grânulo (profundidade de 5mm, centro) que o MAP, havendo um aumento nas profundidades seguintes de amostragem.

O P no solo arenoso movimentou-se mais que no solo de textura média, possuindo maior valor em porcentagem de um total geral da disponibilidade do P aplicado que o solo argiloso. Esta limitação de movimento pelo nutriente encontrado nos fertilizantes granulados pode ser atribuída à maior concentração de argilas que são capazes de adsorver

o P, e que já foi reportado por outros estudos (BENBI e GILKES, 1987; LOMBI et al., 2004).

Resultados semelhantes à movimentação de P no solo arenoso foram encontrados em estudo avaliando a movimentação de P em solo podzólico amarelo. Neste estudo, foi relatado que a concentração de P diminuía conforme a distância do grânulo de fertilizante aumentava, sendo a distância máxima alcançada de até 37,5 mm após oito semanas de aplicação do fertilizante (WILLIAMS, 1971). Os resultados encontrados nas figuras 7 e 8 concordam com aqueles apresentados na tabela 10, onde os maiores valores de P disponível foram aqueles localizados próximo ao grânulo. Vários estudos apontam este mesmo comportamento (BENBI & GILKES, 1987; MONTALVO et al, 2014; DEGRYSE et al, 2014,).

#### **4.5 Teores de Mg, P, Zn e B nas folhas e nos grãos na cultura do milho**

As figuras de 10 a 16 apresentam os teores foliares e nos grãos, no cultivo de milho em duas épocas distintas. Não houve diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ) entre as fontes testadas, assim como para a interação entre fontes e doses. Para os teores foliares as regressões se ajustaram ao modelo quadrático.

Em relação aos teores foliares, apenas o Zn encontrava-se dentro da faixa considerada adequada para a cultura do milho, segundo valores apresentados como referência por Martinez et al. (1993) e Malavolta et al. (1997), enquanto os outros apresentaram-se em níveis menores do que o recomendado. Para o milho cultivado na safra verão, apenas o B e o Zn se encontravam dentro dos teores recomendados para a cultura.

Figura 10 - Teores foliares de P em função da interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no florescimento feminino do milho cultivado em segunda safra

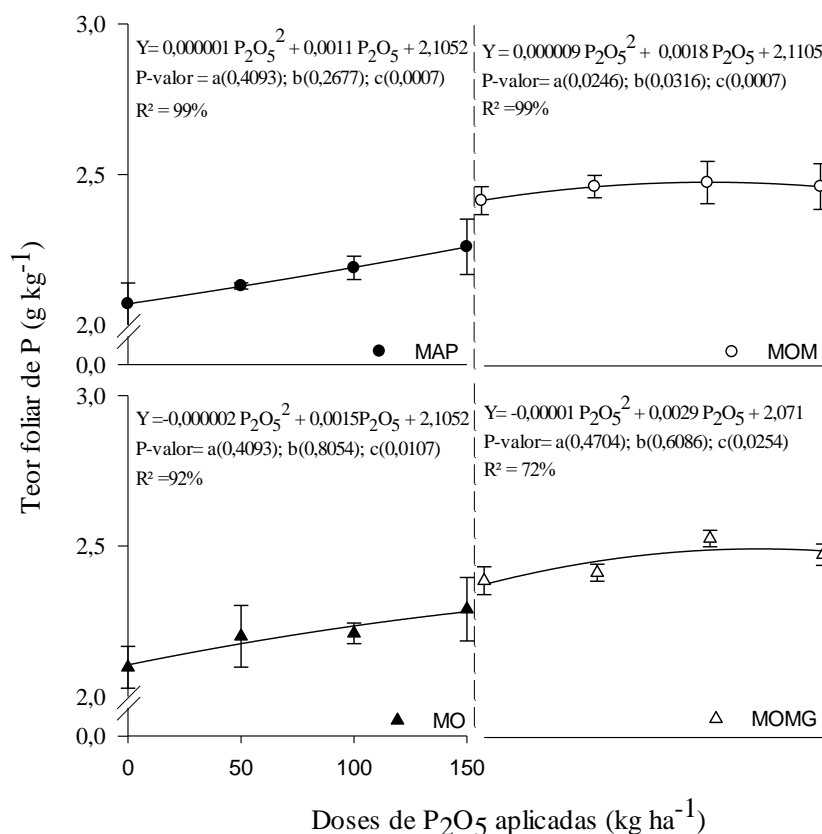


Figura 11 - Teores foliares de Mg em função da interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no florescimento feminino do milho cultivado em segunda safra

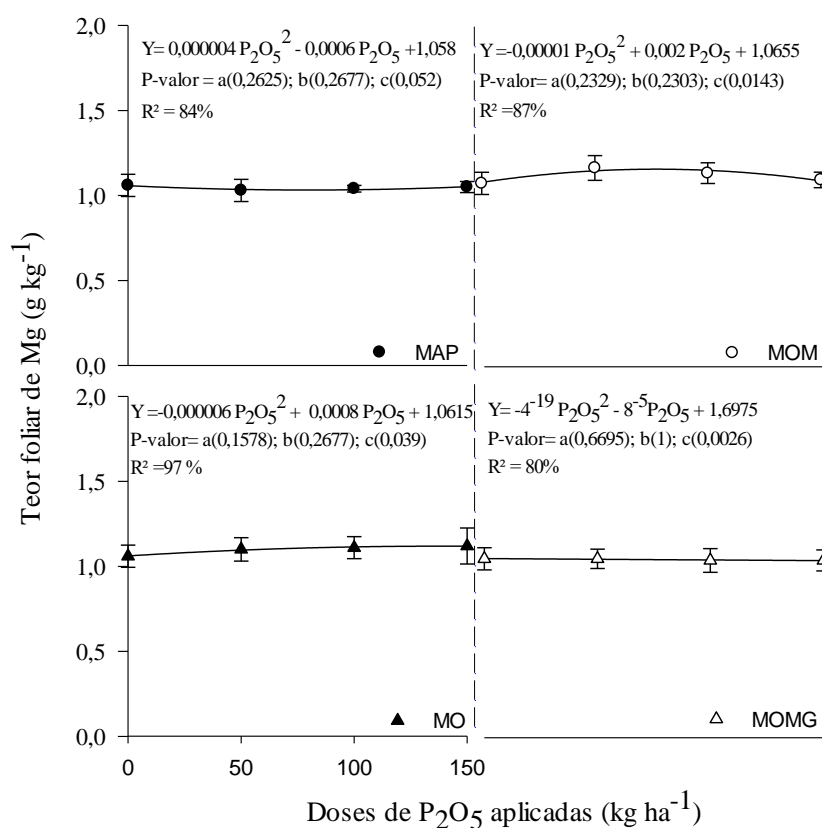


Figura 12 - Teores foliares de B em função da interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no florescimento feminino do milho cultivado em segunda safra

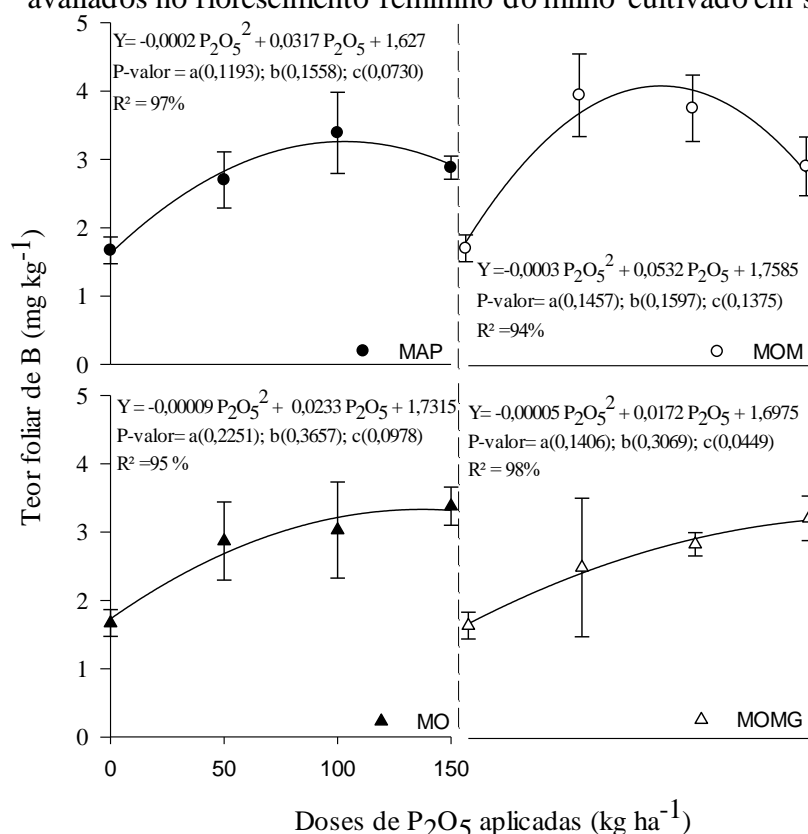


Figura 13 - Teores foliares de Zn em função da interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no florescimento feminino do milho cultivado em segunda safra

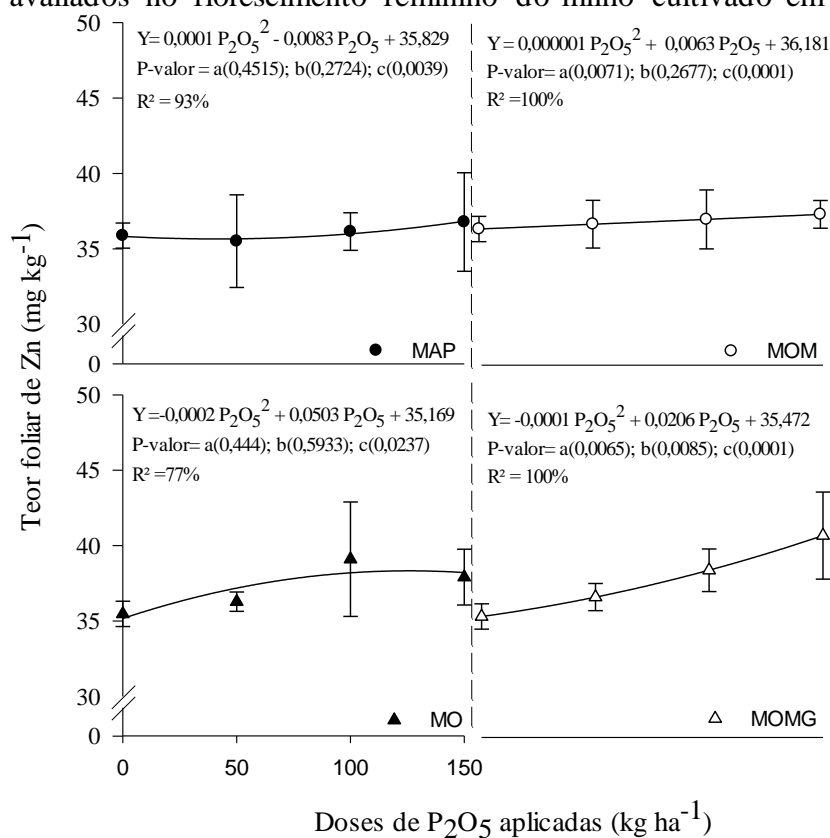


Figura 14 - Teores foliares de P em função da interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no florescimento feminino do milho cultivado em safra verão

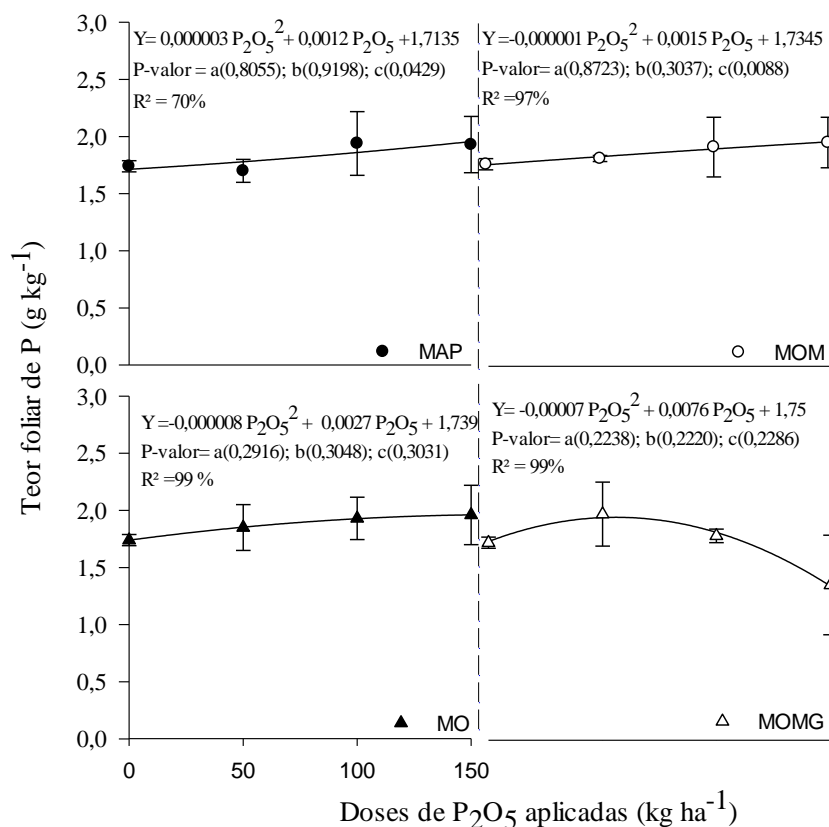


Figura 15 - Teores foliares de Mg em função da interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no florescimento feminino do milho cultivado em safra verão

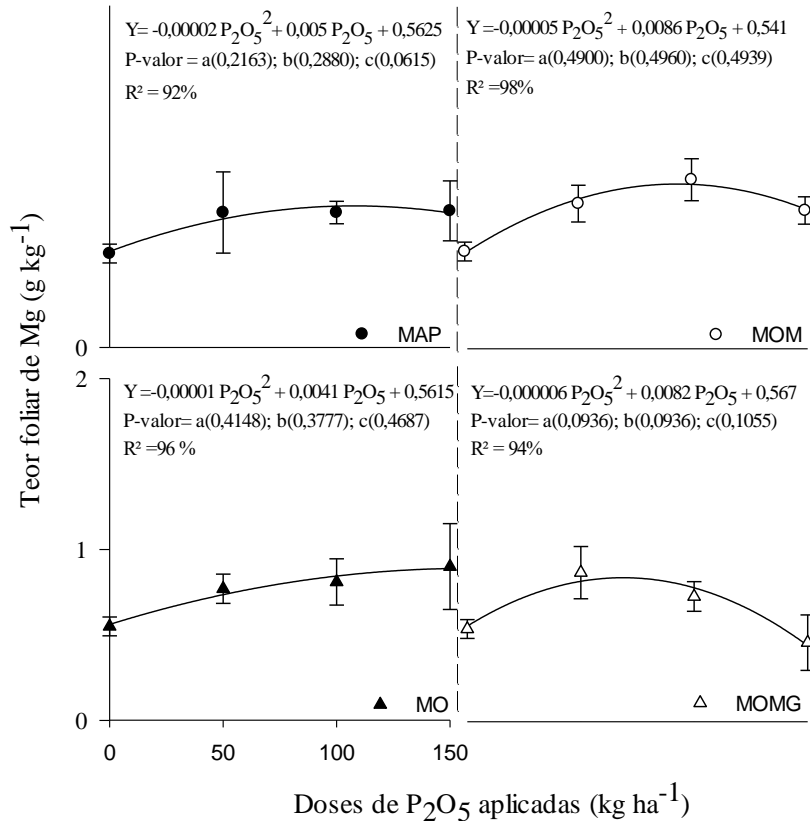


Figura 16 - Teores foliares de B em função da interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no florescimento feminino do milho cultivado em safra verão

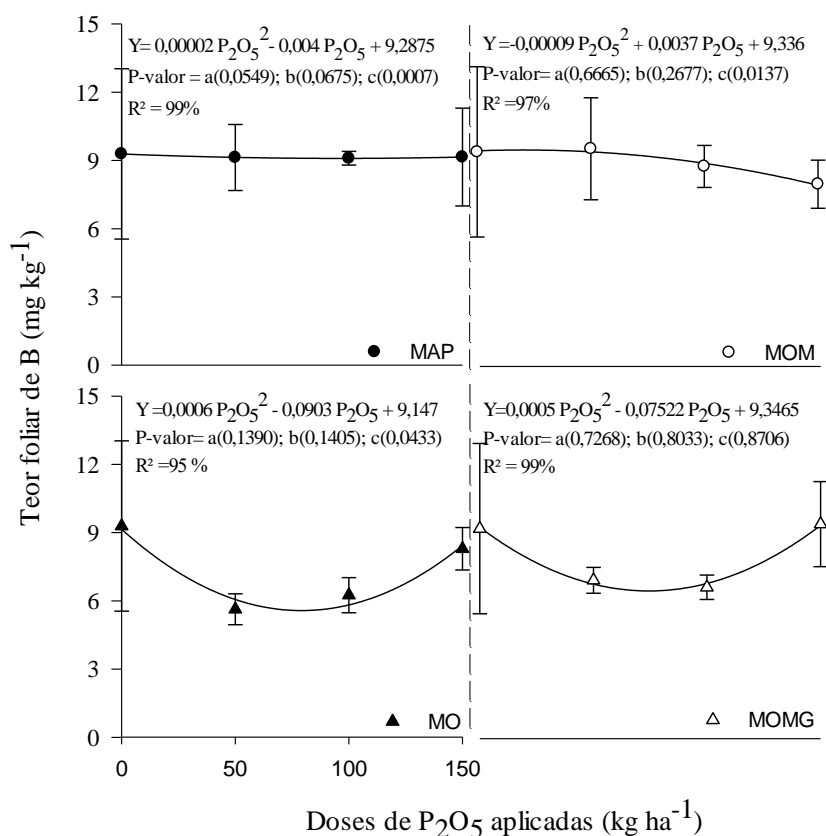
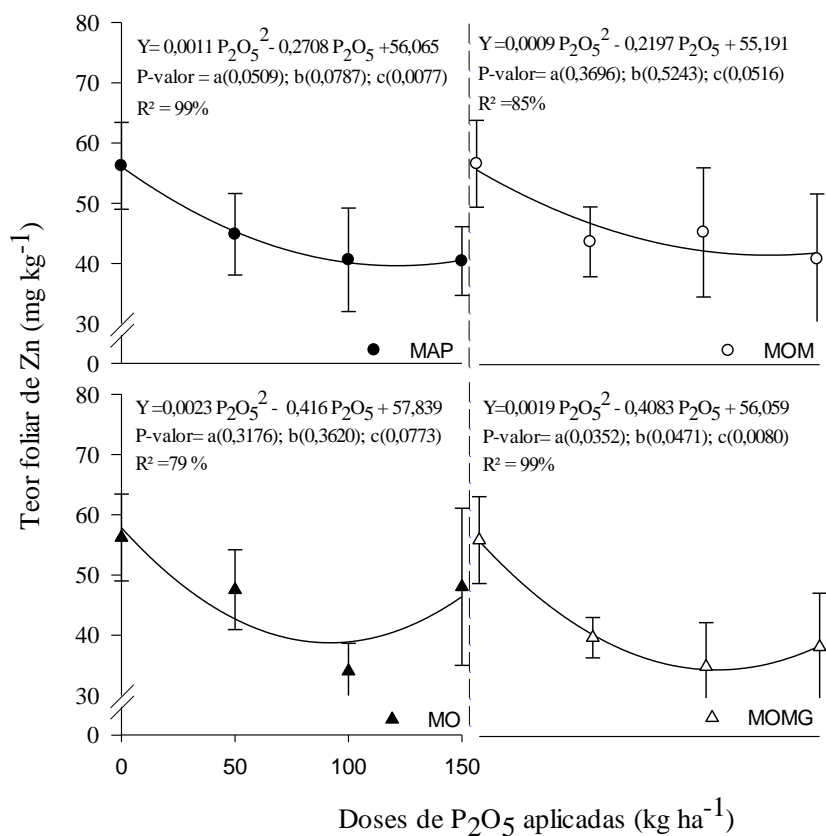


Figura 17 - Teores foliares de Zn em função da interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no florescimento feminino do milho cultivado em safra verão





As figuras de 18 a 25 apresentam os valores de teores de nutrientes nos grãos dos milhos cultivados em duas épocas distintas.

Figura 18 – Teores de P nos grãos na interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no milho cultivado em segunda safra

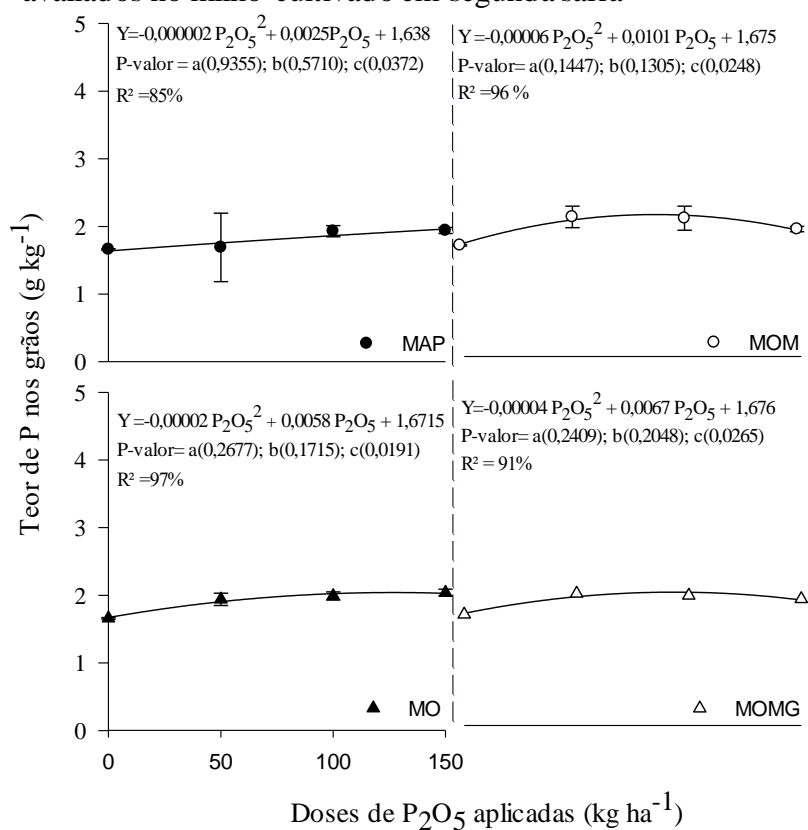


Figura 19 – Teores de Mg nos grãos na interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no milho cultivado em segunda safra

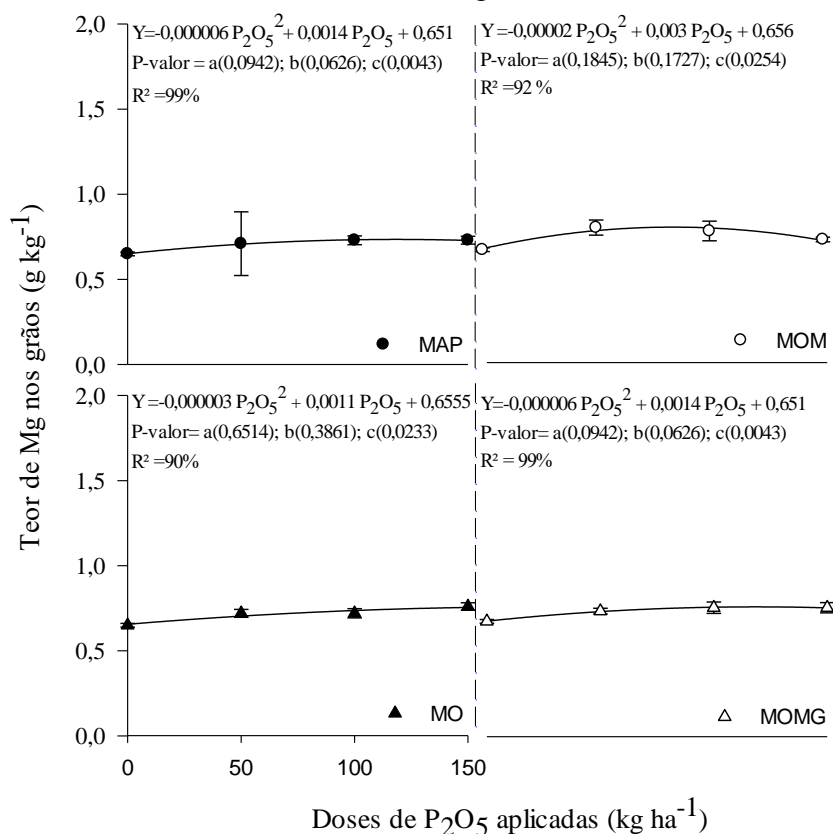


Figura 20 - Teores de B nos grãos na interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no milho cultivado em segunda safra

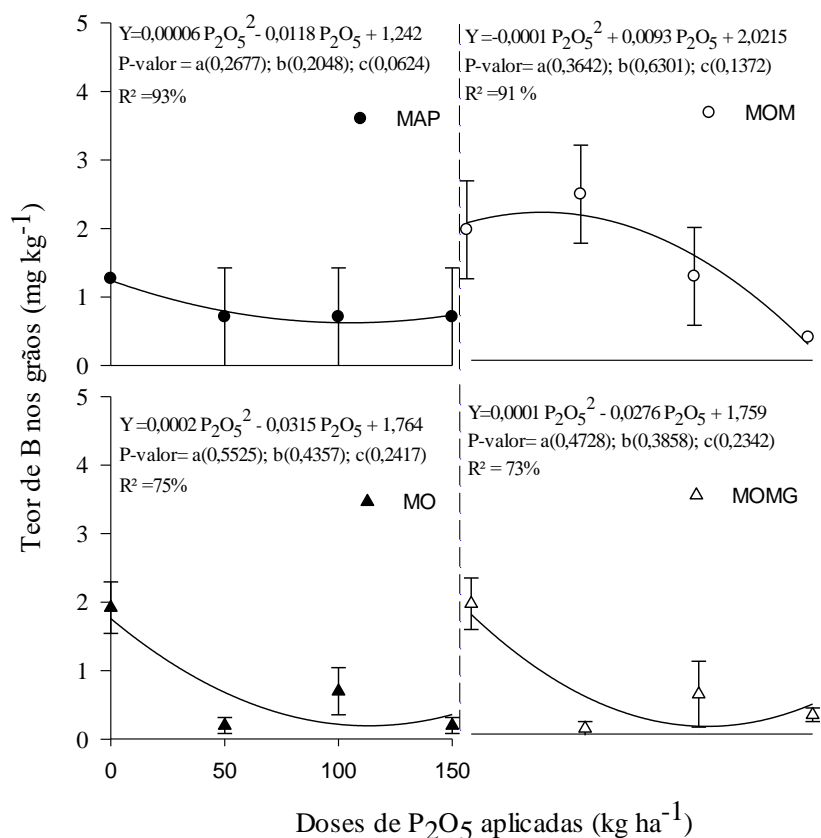


Figura 21 – Teores de Zn nos grãos na interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no milho cultivado em segunda safra

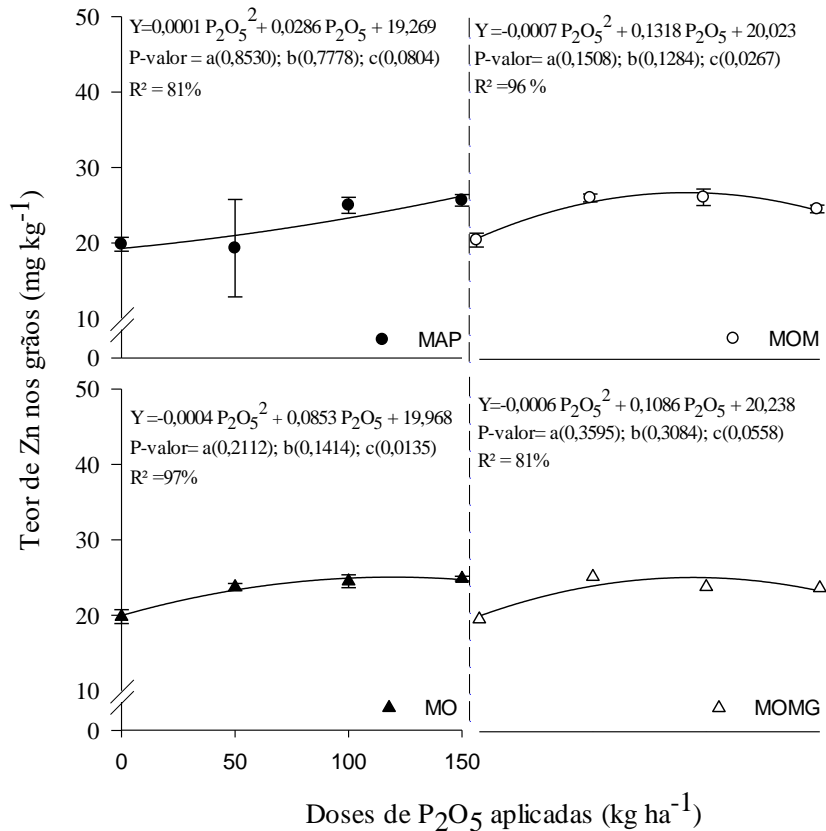


Figura 22 - Teores de P nos grãos na interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no milho cultivado em safra verão

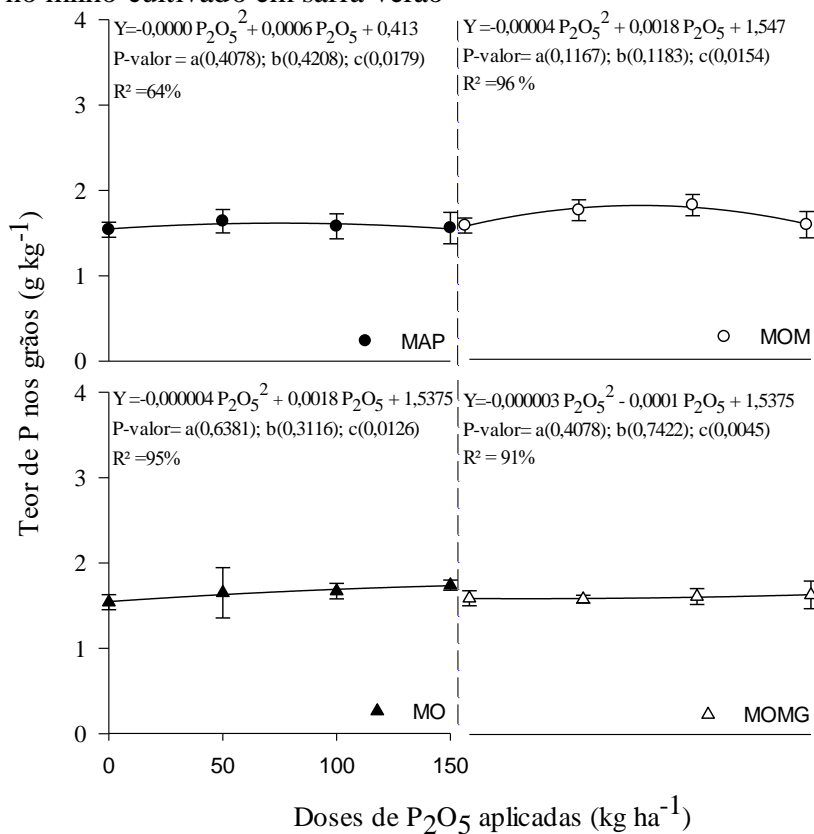


Figura 23 - Teores de Mg nos grãos na interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no milho cultivado em safra verão

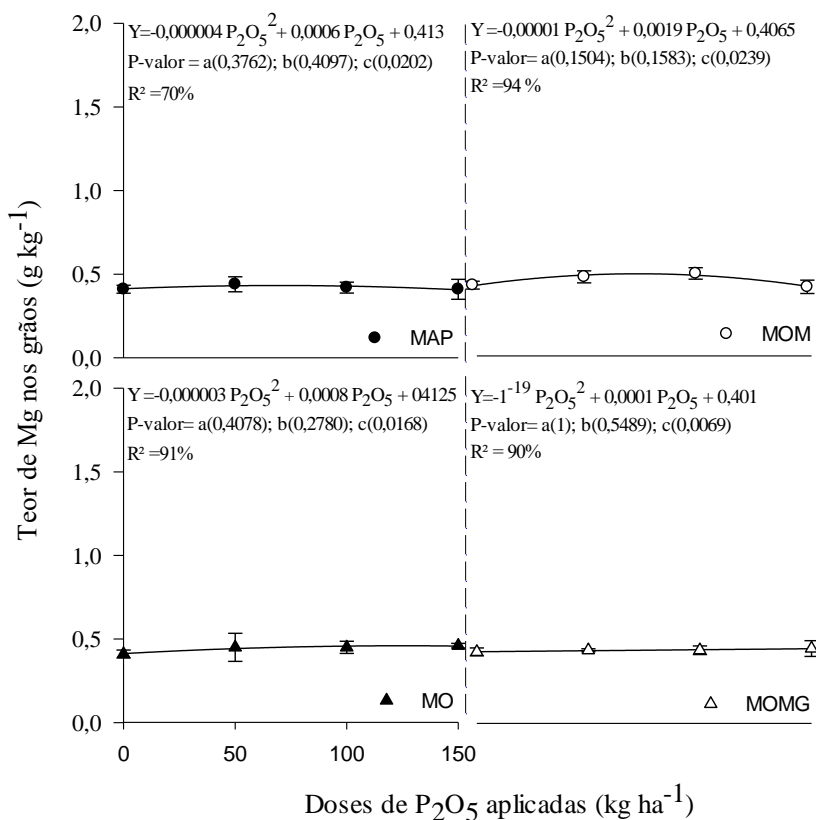


Figura 24 - Teores de B nos grãos na interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no milho cultivado em safra verão

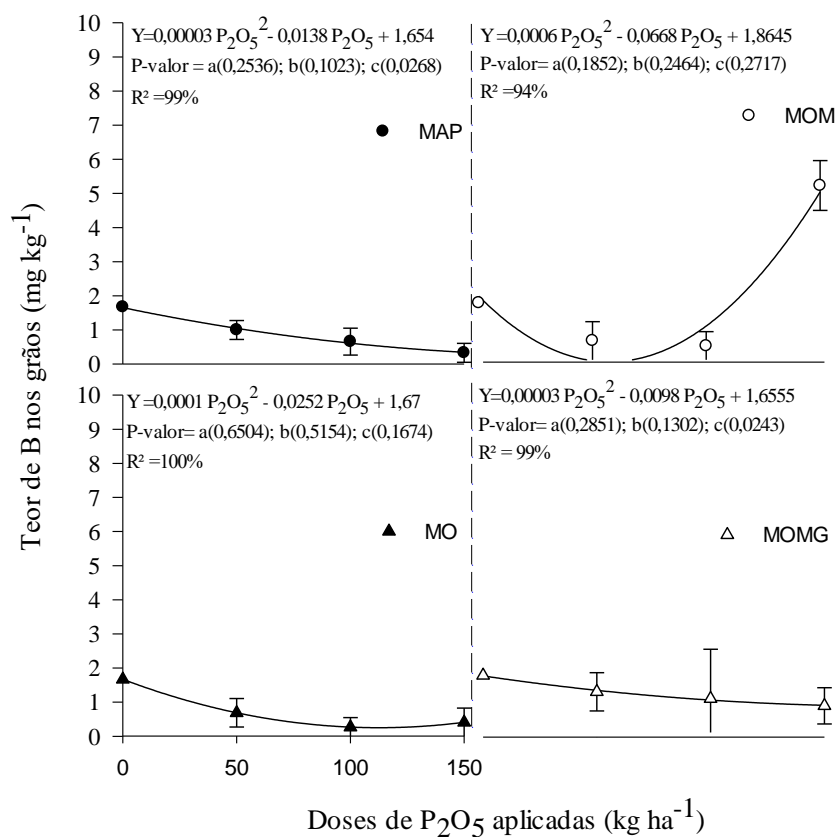
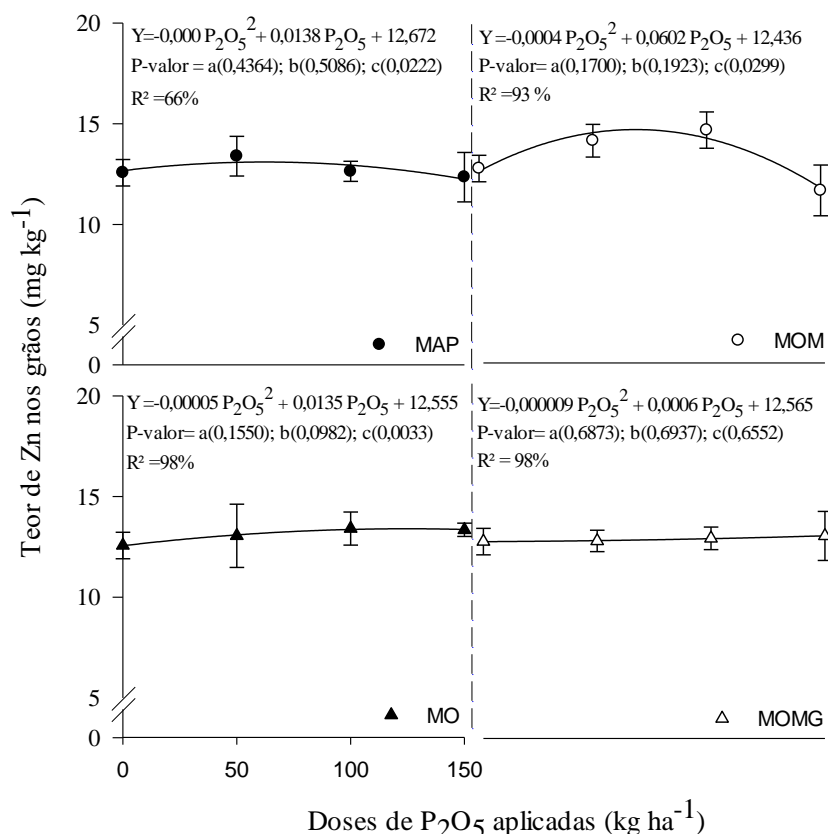


Figura 25 - Teores de Zn nos grãos na interação entre doses e fontes fosfatadas avaliados no milho cultivado em safra verão



É conhecido que alguns nutrientes apresentam antagonismo e sinergismo entre si, prejudicando ou favorecendo a absorção de outros elementos. Entre os elementos que apresentam inibição podemos citar o Zn, atuando como competidor por sítio de absorção entre o Mg e não competitivo entre o P e o B (MALAVOLTA et al, 1989), o que pode justificar os baixos teores apresentados para estes elementos. As análises de solo das áreas de cultivo encontradas na tabela 8 indicam valores na classe de disponibilidade “alto” para o Zn, porém o B e o Mg apresentavam-se com valores que se enquadravam na classe “muito baixo” e “baixo”, respectivamente (ALVAREZ et al, 1999). Sabe-se também que a disponibilidade do B em solos diminui consideravelmente em condições de baixa disponibilidade de água, devido à menor difusão e fluxo de massa do nutriente, que é absorvido principalmente por esses mecanismos. Levando-se em consideração a época do cultivo, pode-se atribuir a menor concentração de B nas folhas a esse fator.

Segundo Raij (1996), o teor adequado de P encontrado nos grãos de milho é de 4 a 5 g kg<sup>-1</sup>, o que difere do encontrado neste estudo, o que assim como para o B, pode ser atribuído à época de cultivo do milho de 2<sup>a</sup> safra visto que a absorção de P pelas plantas

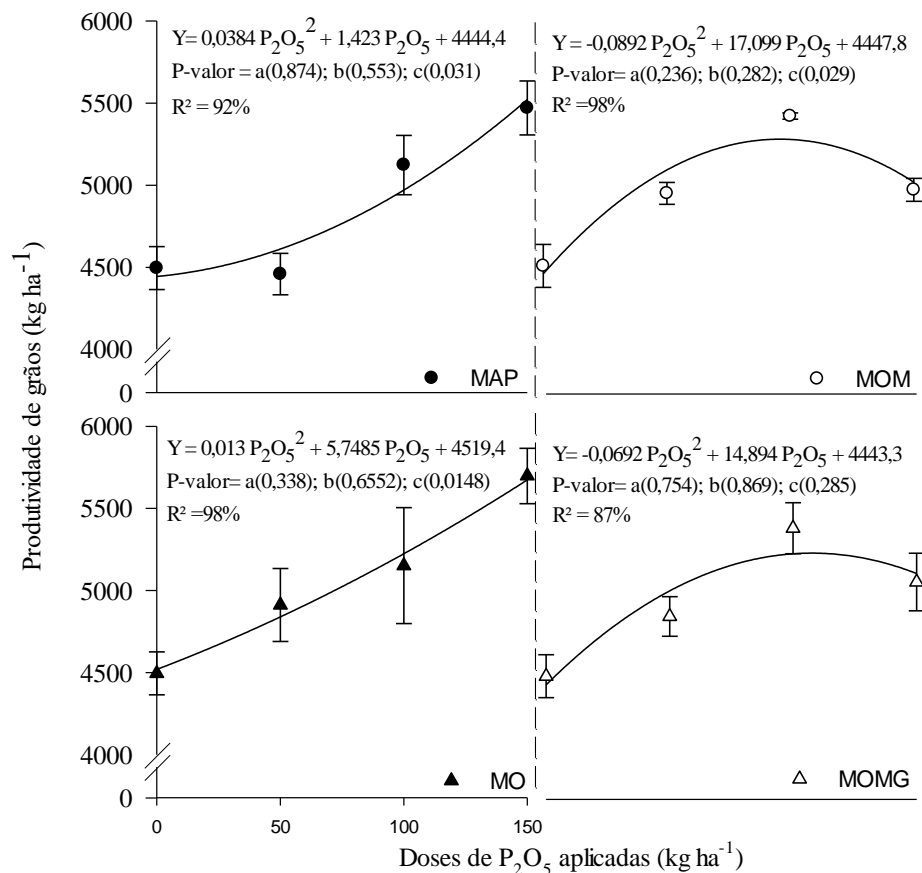
é afetada pela menor disponibilidade de água, dependendo quase que inteiramente da difusão.

#### 4.6 Produtividade e acúmulo de nutrientes nos grãos de milho

A figura 26 a apresenta as variações de produtividade de milho cultivado em 2ª safra em função da interação entre doses de  $P_2O_5$  e fontes fosfatadas aplicadas em adubação de semeadura da cultura. Não houve diferença estatística entre as fontes de fertilizantes testadas e para a interação entre fontes e doses, apresentando uma média de produção de grãos de  $4938 \text{ kg ha}^{-1}$ .

A análise de regressão apresentou um ajuste quadrático, possuindo ponto de máxima produção de grãos para o MAP de  $5471 \text{ kg ha}^{-1}$  quando aplicados  $150 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ , para o MOM de  $5267,23 \text{ kg ha}^{-1}$  quando aplicados  $95,84 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ , para o MO de  $5698,19 \text{ kg ha}^{-1}$  quando aplicados  $150 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  e para o MOMG de  $5244,7$  quando aplicados  $107,61 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ .

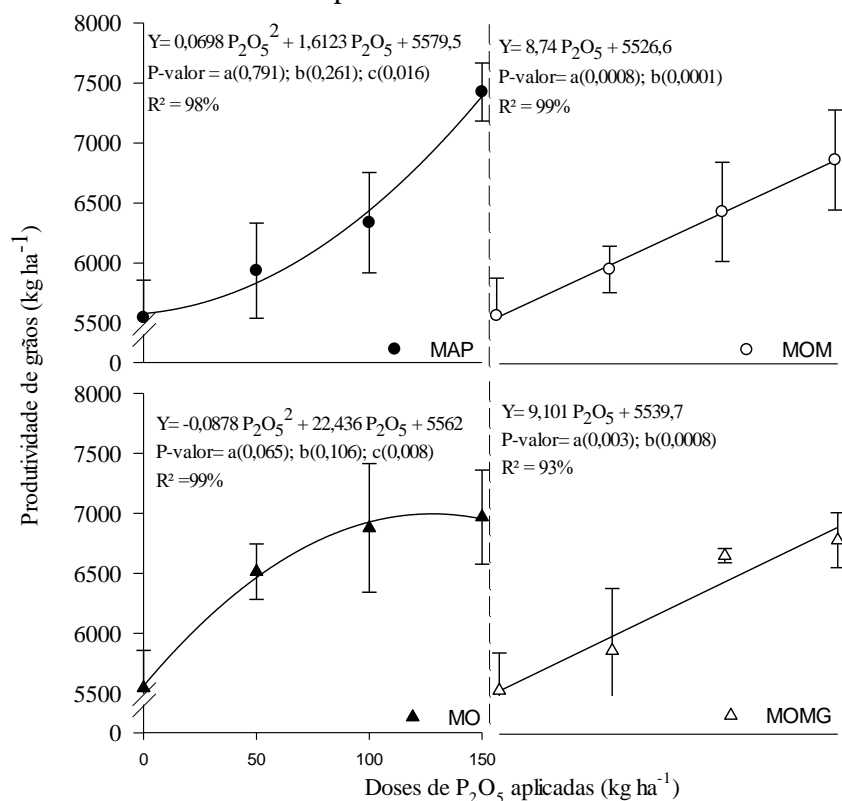
Figura 26 - Produtividades de grãos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) na interação entre doses de  $P_2O_5$  ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e fontes fosfatadas aplicadas no cultivo de milho 2ª safra



De acordo com os valores obtidos de P na análise foliar, os teores de P encontrados estavam abaixo (figuras 10 e 14) dos valores tidos como referência (de 2,5 a 3,5 g kg<sup>-1</sup>) para a cultura do milho, enquanto os valores de Zn (figura 13 e 17) se mostravam dentro da faixa de referência (valor referência é de 20 mg kg<sup>-1</sup> de Zn), segundo proposto como referência (MALAVOLTA et al 1997; MARTINEZ, 1999). Para o milho cultivado em 2<sup>a</sup> safra, SICHOCKI et al (2014) encontraram valor em torno de 2 g kg<sup>-1</sup> de P. Apesar destes valores foliares não diferirem entre as fontes isoladamente, quando se aplicou a fonte fosfatada MOM na dose acima de 100 kg ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> houve um incremento de 2,39 kg de Zn ha<sup>-1</sup> no solo.

O solo da área de cultivo de milho 2<sup>a</sup> safra apresentava disponibilidade considerada “alta” de Zn (5,51 mg dm<sup>-3</sup>), o que pode ter ocasionado um antagonismo entre os elementos P-Zn, prejudicando a absorção de P pelas plantas. Porém, deve-se também levar em consideração a época de cultivo do milho 2<sup>a</sup> safra, em que as chuvas são reduzidas e a presença de pouca quantidade de água pode ter colaborado para a menor absorção do P-fertilizante pela cultura, visto que o transporte desse nutriente para as raízes é feito principalmente por difusão (devido sua baixa mobilidade nos solos), corroborando com a menor produtividade da cultura e com os baixos valores de P encontrados nas folhas (figura 10), enquanto os valores encontrados para Zn (figura 13) estavam dentro do considerado ideal para a cultura. Apesar de o Zn também ser absorvido pelo mesmo mecanismo, as exigências da cultura para esse micronutriente são menores que quantidades exigidas de P.

Figura 27 - Produtividade de grãos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) na interação entre doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e fontes fosfatadas aplicadas no cultivo de milho na safra verão.



A produtividade de grãos para o milho cultivado em safra de verão (figura 24) não apresentou diferença significativa ( $p > 0,05$ ) para as fontes de fertilizantes analisadas e para a interação entre fontes e doses, apresentando uma produtividade média de  $6297 \text{ kg ha}^{-1}$ . Para a análise de regressão realizada, as doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aplicadas apresentaram ajuste quadrático para as fontes MAP e MO, cuja função atinge um ponto de máxima produção de grãos de  $7425,25 \text{ kg ha}^{-1}$  quando aplicados  $150 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  e  $6995,2 \text{ kg ha}^{-1}$  quando aplicados  $127,7 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ , respectivamente. Para as fontes MOM e MOMG, houve ajuste linear, sendo as produtividades máximas respectivas de  $6842,2$  e  $6798 \text{ kg ha}^{-1}$ , quando aplicados  $150 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ . A produtividade de grãos não foi influenciada pela aplicação de diferentes fontes de fertilizantes fosfatados nas duas épocas de cultivos (safra verão e 2ª safra).

Os acúmulos de nutrientes nos grãos de milho se encontram nas figuras de 25 a 32. Não houve diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre as fontes utilizadas, bem como para a interação entre fontes e doses, para ambos os cultivos. Para o milho cultivado em 2ª safra (figuras de 28 a 31), as análises de regressão para os acúmulos apresentaram ajuste quadrático.



Os acúmulos máximos de  $P_2O_5$  foram: para o MAP 10,34  $kg\ ha^{-1}$ ; para o MOM de 10,9  $kg\ ha^{-1}$ ; para o MO de 9,05  $kg\ ha^{-1}$ , e para o MOMG de 9,82  $kg\ ha^{-1}$  nas respectivas doses de 150, 81,6, 55,8 e 109  $kg\ de\ P_2O_5\ ha^{-1}$ . Para o Mg os acúmulos máximos foram: para o MAP 3,80  $kg\ ha^{-1}$ ; para o MOM de 4,32  $kg\ ha^{-1}$ ; para o MO de 4,18  $kg\ ha^{-1}$ , e para o MOMG de 3,48  $kg\ ha^{-1}$  nas respectivas doses de 150, 79,5, 150 e 150  $kg\ de\ P_2O_5\ ha^{-1}$ . Para o B os acúmulos máximos foram: para o MAP 1,92  $kg\ ha^{-1}$ ; para o MOM de 2,23  $kg\ ha^{-1}$ ; para o MO de 1,92  $kg\ ha^{-1}$ , e para o MOMG de 1,92  $kg\ ha^{-1}$  nas respectivas doses de 150, 46,5, 150 e 150  $kg\ de\ P_2O_5\ ha^{-1}$ . E por fim, os acúmulos máximos de Zn foram: para o MAP 136,65  $kg\ ha^{-1}$ ; para o MOM de 138,86  $kg\ ha^{-1}$ ; para o MO de 131,3  $kg\ ha^{-1}$ , e para o MOMG de 118,76  $kg\ ha^{-1}$  nas respectivas doses de 150, 93,5, 112 e 90,3  $kg\ de\ P_2O_5\ ha^{-1}$ .

Figura 28 – Acúmulo de  $P_2O_5$  em grãos em função de doses de  $P_2O_5$  e fontes fosfatadas aplicadas no cultivo de milho 2ª safra.

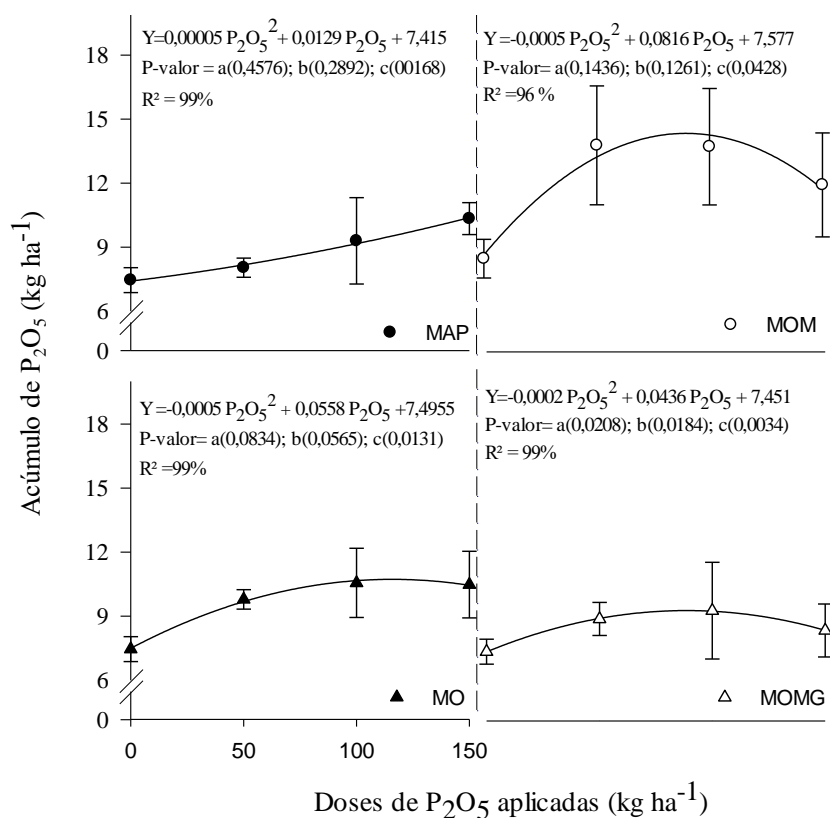


Figura 29 – Acúmulo de Mg em grãos em função de doses de  $P_2O_5$  e fontes fosfatadas aplicadas no cultivo de milho 2ª safra.

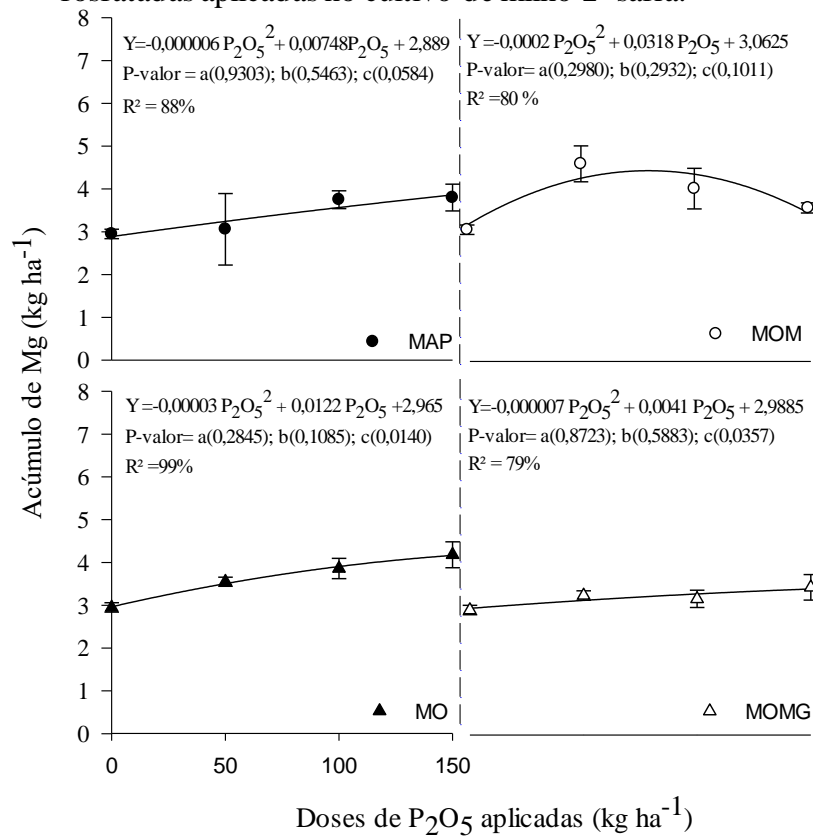


Figura 30 – Acúmulo de B em grãos em função de doses de  $P_2O_5$  e fontes fosfatadas aplicadas no cultivo de milho 2ª safra.

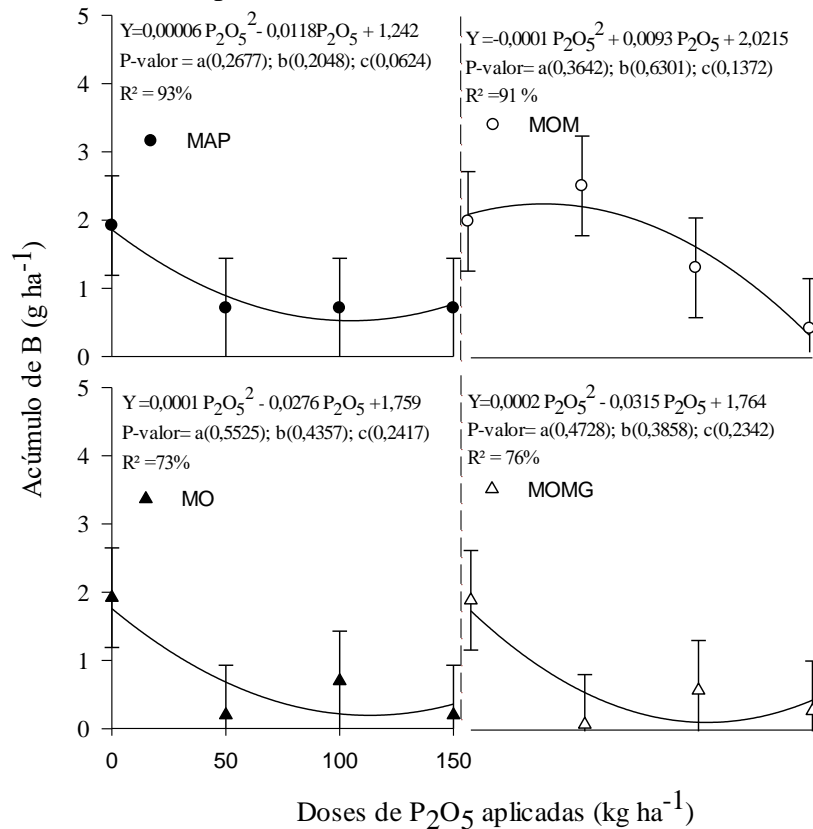
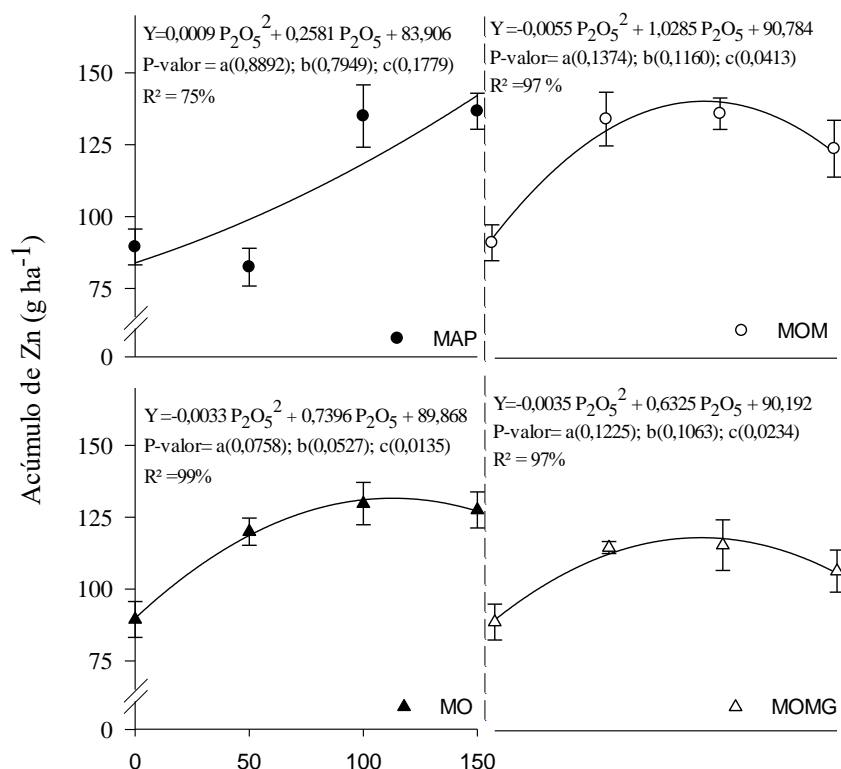


Figura 31 – Acúmulo de Zn em grãos em função de doses de  $P_2O_5$  e fontes fosfatadas aplicadas no cultivo de milho 2ª safra.



Para o cultivo do milho em safra verão (figuras de 32 a 35) os acúmulos apresentaram ajuste quadrático. Os acúmulos máximos de  $P_2O_5$  foram: para o MAP 25,02 kg ha<sup>-1</sup>; para o MOM de 24,9 kg ha<sup>-1</sup>; para o MO de 26,71 kg ha<sup>-1</sup>, e para o MOMG de 24,62 kg ha<sup>-1</sup> nas respectivas doses de 93,57, 93,42, 130,6, 100 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup>. Para o Mg os acúmulos máximos foram: para o MAP 2,95 kg ha<sup>-1</sup>; para o MOM de 2,91 kg ha<sup>-1</sup>; para o MO de 3,22 kg ha<sup>-1</sup>, e para o MOMG de 2,85 kg ha<sup>-1</sup> nas respectivas doses de 91, 90,71, 123,3 e 100 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup>. Para o B os acúmulos máximos foram: para o MAP 7,19 kg ha<sup>-1</sup>; para o MOM de 4,63 kg ha<sup>-1</sup>; para o MO de 15 kg ha<sup>-1</sup>, e para o MOMG de 4,63 kg ha<sup>-1</sup> nas respectivas doses de 150, 46,5, 150 e 150 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup>. E por fim, os acúmulos máximos de Zn foram: para o MAP 88,09 kg ha<sup>-1</sup>; para o MOM de 88,67 kg ha<sup>-1</sup>; para o MO de 93,26 kg ha<sup>-1</sup>, e para o MOMG de 84,29 kg ha<sup>-1</sup> nas respectivas doses de 89, 82,68, 150 e 150 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup>.

Figura 32 – Acúmulo de  $P_2O_5$  em grãos em função de doses de  $P_2O_5$  e fontes fosfatadas aplicadas no cultivo de milho em safra verão.

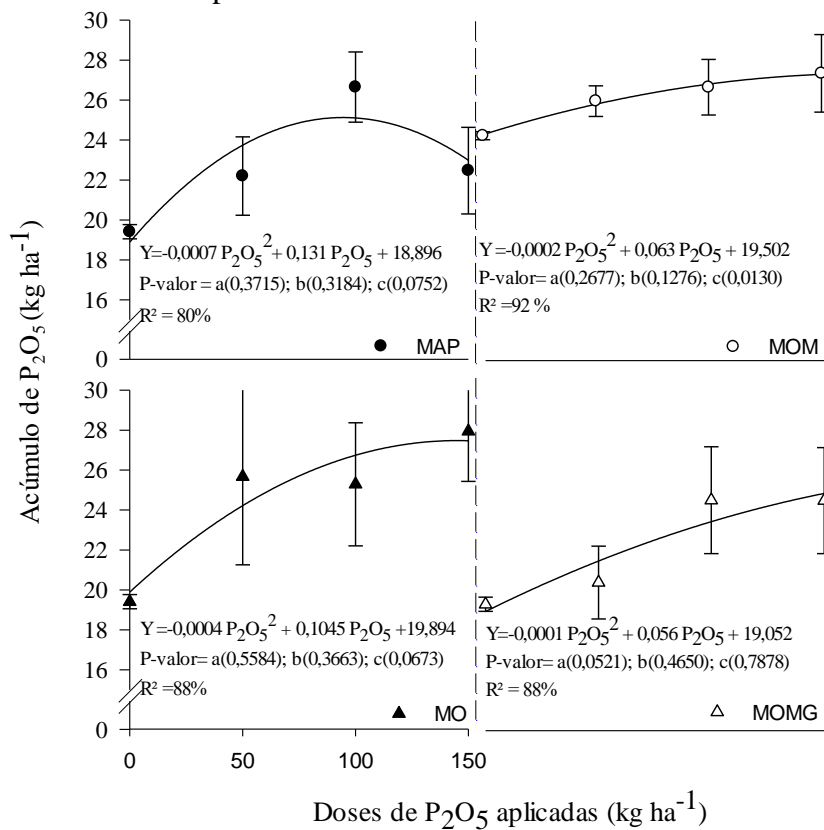


Figura 33 – Acúmulo de Mg em grãos em função de doses de  $P_2O_5$  e fontes fosfatadas aplicadas no cultivo de milho em safra verão.

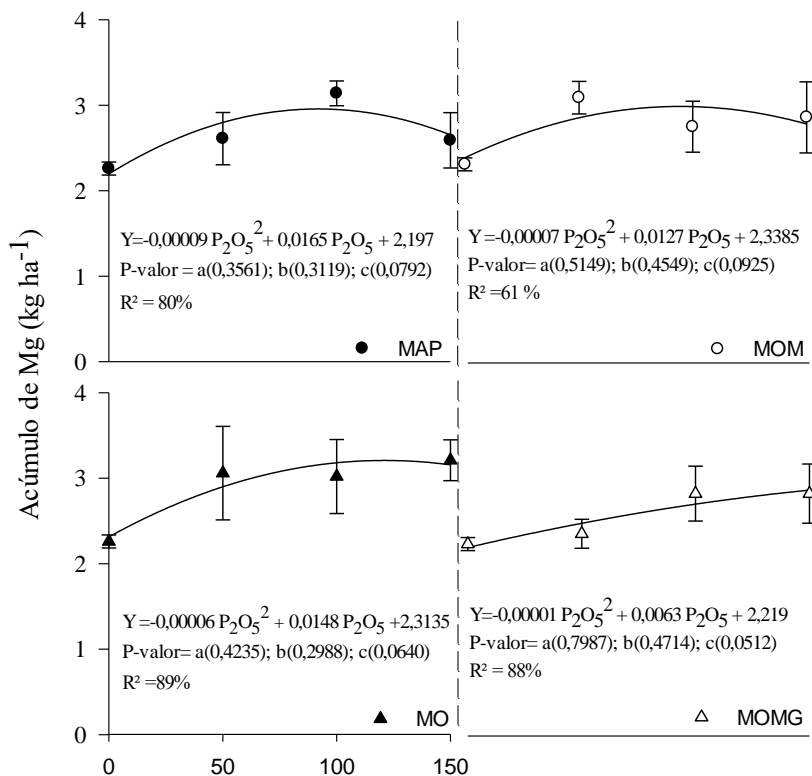


Figura 34 – Acúmulo de B em grãos em função de doses de  $P_2O_5$  e fontes fosfatadas aplicadas no cultivo de milho em safra verão.

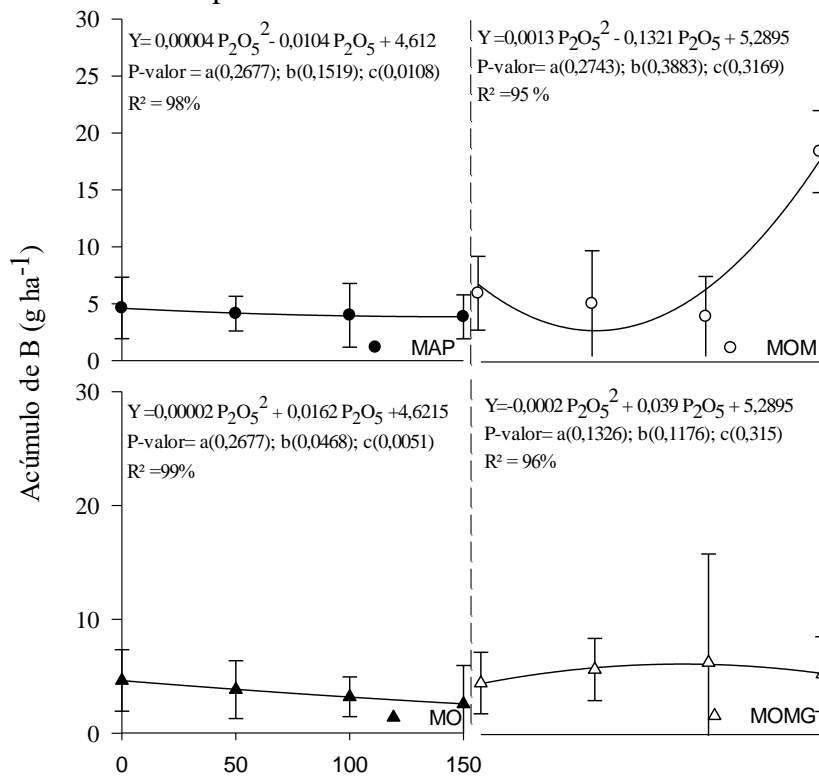
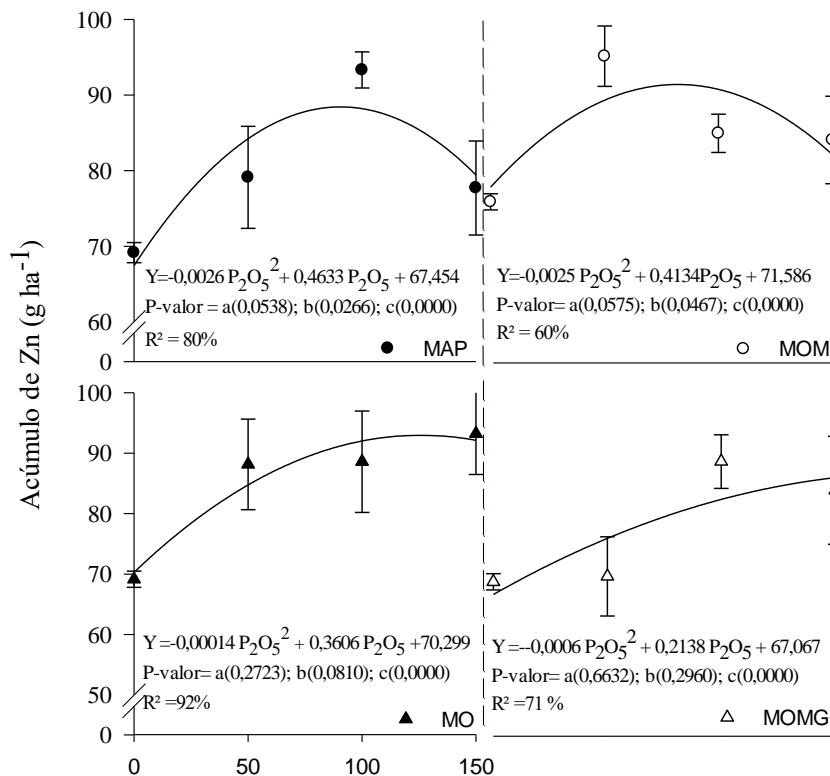


Figura 35 – Acúmulo de Zn em grãos em função de doses de  $P_2O_5$  e fontes fosfatadas aplicadas no cultivo de milho em safra verão.



Nota-se que o nutriente mais acumulado nos grãos foi o P, seguido pelo Mg. A cultura tem grande exigência pelo P, por sua alta taxa de exportação nos grãos (DUARTE e CANTARELLA, 2007). Devido a finalidade de cultivo ser a produção de grãos, cerca de 77 a 86% do P e 47 a 69% do Mg absorvido pela cultura é translocado para os grãos (Coelho, 2006).

Alguns trabalhos na literatura apontam diferentes valores para a extração de nutrientes na cultura do milho. Ritchie et al. (2003) observaram que são exportados cerca de 9 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para cada tonelada de grãos produzida. Em trabalho desenvolvido com híbridos de milho, Padilha (2014) apontou uma exportação média de 55 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> para uma produtividade de 13 t ha<sup>-1</sup> de grãos. Trabalhando com milho 2<sup>a</sup> safra, Broch & Ranno (2012) apresentaram exportação de Zn de 27,6 g t<sup>-1</sup>. Outros valores foram apontados para exportação, como 6 a 10 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (COELHO e ALVES, 2004); 3,4 a 9,8 kg t<sup>-1</sup> exportados no cultivo em 2<sup>a</sup> safra (DUARTE e CANTARELLA, 2008) e 8,7 kg t<sup>-1</sup> (ROSCOE e MIRANDA, 2013).

Os teores e a exportação de nutrientes encontrados neste estudo diferem dos trabalhos presentes na literatura (COELHO e FRANÇA, 1995; COELHO et al, 2006; MALAVOLTA, 2006; MARCELO et al, 2012). Essas diferenças podem ser explicadas devido ao genótipo utilizado, a disponibilidade de nutrientes no solo e as condições ambientais, que são apontadas como os principais motivos pelos quais há variações em concentrações de nutrientes (FERREIRA, 2009).

#### **4.7 Eficiência Agronômica e Índice de Eficiência agronômica**

Nas figuras 36 e 37 encontram-se os valores para a eficiência agronômica (EA) para o milho cultivado em 2<sup>a</sup> safra e safra verão, respectivamente. Não houve diferença estatística para o IEA. A EA não foi influenciada pela interação doses e fontes de P ( $p < 0,05$ ), para ambas as safras.

Figura 36 - Eficiência agrônômica (EA) em função da interação entre doses de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$  e fontes fosfatadas aplicadas ao solo no cultivo de milho em 2ª safra.

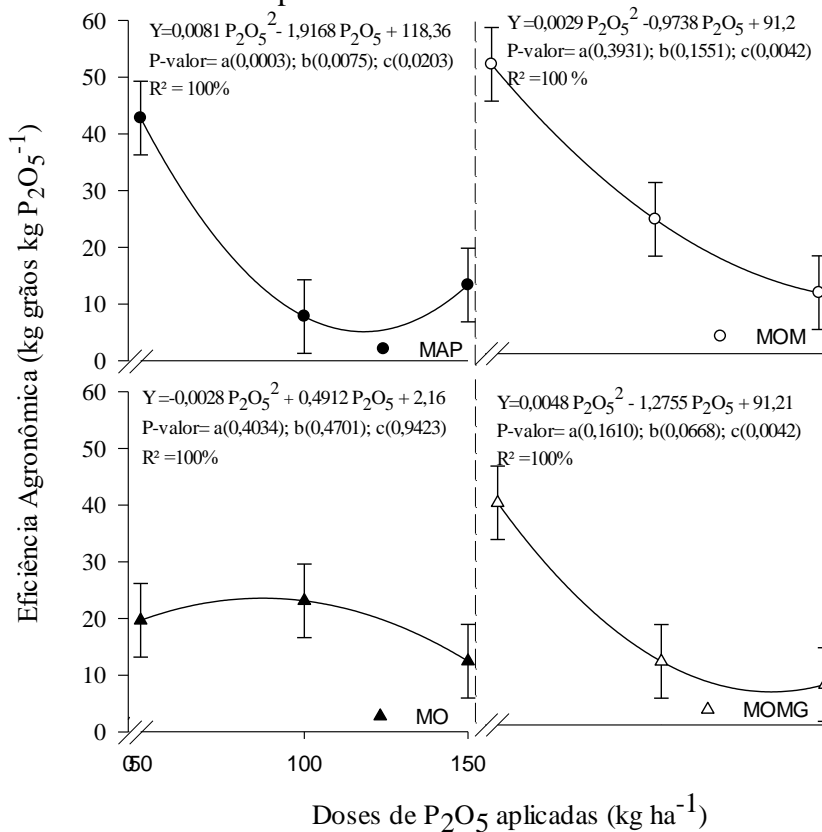
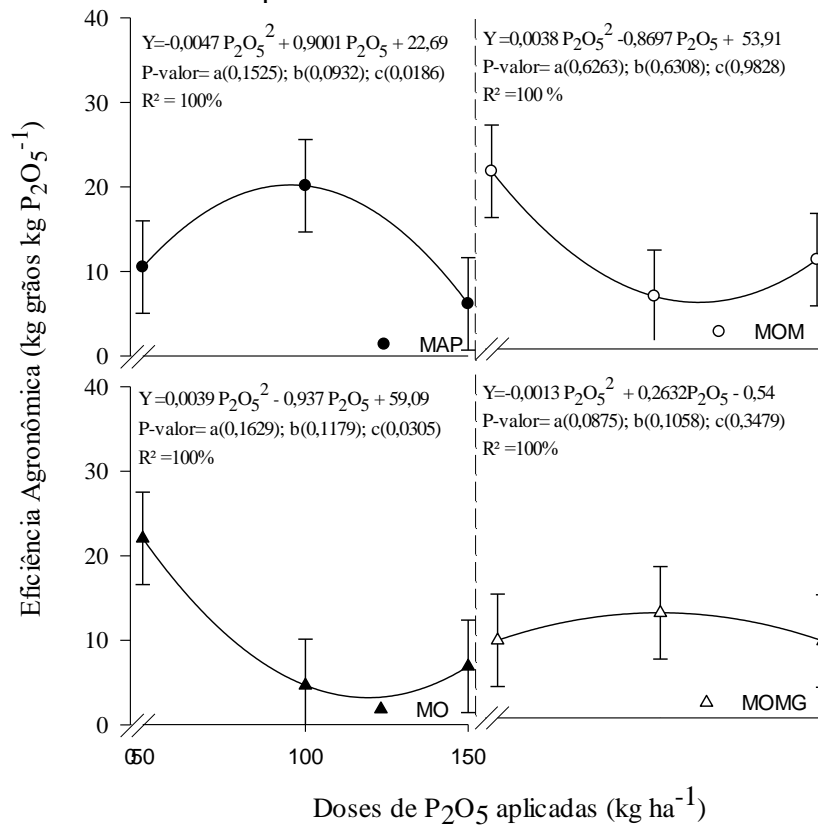


Figura 37 - Eficiência agrônômica (EA) em função da interação entre doses de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$  e fontes fosfatadas aplicadas ao solo no cultivo de milho em safra verão.



Com o aumento das doses de  $P_2O_5$  no cultivo de milho, a EA diminuiu significativamente, apresentando um ajuste quadrático. O decréscimo em função do aumento de doses demonstra que há menor eficiência no aproveitamento de  $P_2O_5$  pela cultura para a aplicação de doses acima de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ , portanto, sendo esta a dose mais adequada. Bento et al (2015) observaram que com o aumento da dosagem de adubação fosfatada na cultura do milho, houve redução da EA, o que também ocorreu no presente estudo. Pode-se afirmar que a aplicação de maiores doses não reflete em ganhos de EA. Para grande parte das culturas no Brasil, a EA da adubação fosfatada é considerada baixa, sendo que para a cultura do milho safra este valor é de  $37 \text{ kg de grãos kg de P}^{-1}$  aplicado (CONAB, 2011).

## 5 CONCLUSÕES

O revestimento do MAP utilizando polímeros orgânicos biodegradáveis não proporcionou maior disponibilidade e mobilidade do fósforo no solo.

A maior movimentação do fósforo ocorre em áreas adjacentes ao grânulo do fertilizante fosfatado, independente da fonte utilizada.

O revestimento do MAP com polímeros orgânicos biodegradáveis não proporcionou incremento de produtividade na cultura do milho cultivado nas safras de verão e 2ª safra.

As diferentes doses de fósforo proporcionaram incremento na produtividade do milho cultivados em duas épocas de cultivo do milho.

Como consideração final, o fertilizante fosfatado revestido poderia ser utilizado em locais sob estresse, onde o acúmulo de matéria orgânica é impossibilitado, solos de baixa fertilidade natural e em sistemas onde a fertilidade não é construída. Levando isso em consideração, as substâncias orgânicas contidas no fertilizante poderiam ser de grande auxílio para estas áreas.



## REFERÊNCIAS

- ALVAREZ V. V.H.; NOVAES, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A.S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARAES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Ed.). *Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5º Aproximação*. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, p. 25-32, 1999.
- ANDERSON, J. P. E. Soil Respiration. In: Page, A. L.; Miller, R. H.; Keeney, D. R. (eds.) *Methods of Soil Analysis*, part 2, 2º ed. **ASA/SSSA**, Madison, Wis; p. 837-871, 1982
- ANTELO, J. et al. Adsorption of soil humic acid at the surface of goethite and its competitive interaction with phosphate. **Geoderma**, 138:12-19, 2007.
- ARAÚJO, E. de O; SILVA, M.A.C da.; Interação boro e zinco no crescimento, desenvolvimento e nutrição do algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. V.7, p. 720 – 727. Recife, 2012.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS - ANDA. Anuário do setor de fertilizantes. 176 p., Estatísticas, 2017
- BENBI, D. K. and GILKES, R. J.; The movement into soil of P from superphosphate grains and its availability to plants. **Fertilizer research**. v.12 p.21–36, 1987.
- BENNETT, W. F. Plant nutrient utilization and diagnostic plant symptoms. In *Nutrient Deficiencies & Toxicities in Crop Plants*, ed. W. F. Bennett, 1–7. St. Paul, Minnesota: American Phytopathological Society Press, 1993.
- BENITES, V. M. A importância da pesquisa na avaliação da eficiência das tecnologias em fertilizantes fosfatados no Brasil. **Boletim da SBCS**, v. 40(2): p. 36-38, 2015.
- BENTO, R. U ; GUIMARÃES, D.; DE OLIVEIRA, G. G. L.; MENDES, R.; PELÁ, A.; REIS JR, R. Eficiência Agronômica e Produtividade Milho em resposta à Fontes e Doses de Fósforo. **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Anais, 2015.
- BRITO, G. F.; AGRAWAL, P.; ARAÚJO, E. M.; MÉLO, T. J. A. Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. **Revista eletrônica de materiais e Processos**, v.6, n.2, p.127-139, 2011.
- BROCH, D. L.; RANNO, S. K. Fertilidade do solo, adubação e nutrição da cultura do milho safrinha, in: **Tecnologia e Produção: Milho Safrinha e Culturas de inverno**. Fundação MS, Maracaju-MS, p. 5-29, 2009.
- CALABY-FLOODY, M., MEDINA, J., RUMPEL, C., CONDRON, L.M., HERNANDEZ, M., DUMONT, M., & de la LUZ MORA, M. “Chapter three—Smart fertilizers as a strategy for sustainable agriculture.” **Advances in Agronomy**, v.147, p. 119–157, 2018
- CASARIN, V.; STIPP, S. R. Quatro medidas corretas que levam ao uso eficiente dos fertilizantes. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, (142), p.14-20, 2013.

CESSA, R. M. A.; VITORINO, A. C. T.; CELI, L.; NOVELINO, J. O.; BARBERIS, E. Phosphorus adsorption by clay fractions in the presence of fulvic acid. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n.5, p.1535-1542, 2010.

CHAGAS, W. F. T.; EMRICH, E. B.; GUELFY, D. R., CAPUTO, A. L. C.; FAQUIN, 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.

CHAGAS, W. F. T.; GUELFY, D. R.; EMRICH, E. B.; SILVA, A. L.; FAQUIN, V. Agronomic efficiency of polymer-coated triple superphosphate in onion cultivated in contrasting texture soils. **Revista Ciência Agronômica.**, Fortaleza , v. 47, n. 3, p. 439-446, 2016 .

CHINAGLIA, S.; TOSIN, M.; DEGLI-INNOCENTI, F. Biodegradation rate of biodegradable plastics at molecular level. **Polymer Degradation and Stability**, v. 147, p.237-244, 2018.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. D. Seja o doutor do seu milho. Piracicaba: Potafos, 1995.

COELHO, A. M. Nutrição e adubação do milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. **Circular Técnica** n 78, 10p, 2006

COELHO, A.M.; ALVES, V.M.C. Adubação fosfatada na cultura do milho. In: YAMADA, T; STIPP e ABDALLA, S.R. (Ed.). Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato; Piracicaba-SP, p.243-283. 2004.

COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de grãos - Levantamento. Monitoramento Agrícola, v. 5, n. 4, p. 1-132, 2018.

COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO (CONAB). Levantamento milho total (1º e 2º safra). Brasília, 2011.

CORREA, M.C.M.; ALMEIDA, B.E.I; MARQUES, V.B; SILVA, J.C.V.; AQUINO, B.F.; Crescimento inicial de pitaia em função de combinações de fósforo e zinco; **Revista Bras. Fruticultura**. Jaboticabal. v. 21, 2014.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALVARENGA, R. C.; GONTIJO NETO, M. M.; VIANA, J. H. M.; OLIVEIRA, M. F.; MATRANGOLO, W. J. R.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. Cultivo do milho- Plantio. Embrapa Milho e Sorgo. **Sistemas de Produção**, v. 6, p. 1-10, 2010

DE FIGUEIREDO, C. C.; BARBOSA, D. V.; de OLIVEIRA, S. A.; FAGIOLI, M.; SATO, J. H. Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e parâmetros morfológicos de milho. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 43, n. 3, p. 446–452, 2012.

DECHEN, A.R. HAAG, H.P., CARMELLO, Q.A.C. Funções dos micronutrientes nas plantas. In: FERREIRA, M.E, CRUZ, M.C.P **Micronutrientes na agricultura**. p. 65-78, 1991

DEGRYSE, F.; AJIBOYE, B.; ARMSTRON, R.D.; McLAUGHLIN, M.J. Sequestration of phosphorus-binding cations by complexing compounds is not a viable mechanism to increase phosphorus efficiency. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 6, p. 2050-2059, 2013.

DEGRYSE, F.; McLAUGHLIN, M.J. Phosphorus Diffusion from Fertilizer: Visualization, Chemical Measurements, and Modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 3, p. 832-842, 2014.

De OLIVEIRA, J. P. M.; ERNANI, P. R.; GATIBONI, L. C.; & PEGORARO, A. Alterações químicas e avaliação de P disponível na região adjacente aos grânulos de superfosfato triplo e diamônio fosfato em solos ácidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1526–1536, 2014.

De SOUZA, I. M., ROCHA, D. R. R., CUNHA, C. S. M., GONÇALVES, I. C. R., & CASTRO, J. I. A. Adubação nitrogenada e modos de disponibilização de micronutrientes na produção de milho verde. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v.13 n.1, p.15-21, 2017.

DUARTE, A.P.; CANTARELLA, H. Adubação em sistemas de produção de soja e milho safrinha. In: Seminário Nacional de Milho Safrinha: rumo a estabilidade, 9.Dourados,. Anais. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, p.44-61, 2007.

DUARTE, A. P.; CANTARELLA, H.; BATISTA, K. Manejo de nitrogênio e ciclagem de nutrientes na cultura do milho safrinha. In: Seminário Nacional de Milho Safrinha, 10., 2009, Rio Verde. Anais. Rio Verde: FESURV, p.89-105, 2009.

EL-SAYED, H. E. A; SAIF-EL-DEAN, A.; EZZAT, S.; EL-MORSY, A. H. A. Responses of productivity and quality of sweet potato to phosphorus fertilizer rates and application methods of the humic acid. **International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science**, v. 1, n. 9, p. 383-393, 2011.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p

FAGERIA, N.K. Ionic interactions in rice plants from dilute-solutions. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.70, p.309-316, 1983.

FAGERIA, V.D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v.24, p.1269-1290, 2001.

FAO, F. A. A. O. FAOSTAT, FAO Statistical Databases. 2018

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Produção de milho. 2.ed. Guaíba: Agropecuária 360p., 2004.

FERREIRA, C.F. Diagnose nutricional de diferentes cultivares de milho (*Zea mays* L.) de diferentes níveis tecnológicos. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

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

GARCÍA-LARA, S.; SERNA-SALDIVAR, S. O. Chapter 1 - Corn History and Culture. In: SERNA-SALDIVAR, S. O. (Ed.). Corn (Third Edition). Oxford: **AACC International Press**, p.1-18, 2019.

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

GAZOLA, R. N. et al. Efeito residual da aplicação de fosfato monoamônio revestido por diferentes polímeros na cultura do milho. **Revista Ceres**, v. 60, n.6, p. 876-884, 2013.

HIRADATE, S., & UCHIDA, N. Effects of soil organic matter on pH-dependent phosphate sorption by soils. **Soil science and plant nutrition**, v.50, n.5, p.665-675. 2004

HOPKINS, B. G. Phosphorus in plant nutrition. In Plant nutrition handbook. eds. D. J. Pilbeam and A. V. Barker, 2nd ed., Ch. 3, p.65–26, 2015.

HUA Q. X.; LI J. Y.; ZHOU J. M.; WANG H. Y.; DU C. W.; CHEN X. Q. Enhancement of phosphorus solubility by humic substances in ferrosols. **Pedosphere**. 18:533–538, 2008.

HUE, N. V.; IKAWA, H.; SILVA, J. A. Increasing plant-available phosphorus in an Ultisol with a yard-waste compost. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 25, n. 19-20, p. 3291-3303, 1994.

HUE, N.V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. **Soil Science**, Oxford, v.152, p. 463-471, 1991

HUNT J. F.; OHNO T, HE Z.; HONEYCUTT C. W.; DAIL D. B. Inhibition of phosphorus sorption to goethite, gibbsite and kaolin by fresh and decomposed organic matter. **Biology and Fertility of Soils**. v. 44, p. 277–288, 2007.

MANUAL, F. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) and International Fertilizer Development Center (IFDC). The Netherlands, 1998.

LEMISKA, A.; PAULETTI, V; LUQUEL, F.L.; ZAWADNEAK, M.A.C.; Produção e qualidade da fruta do morangueiro sob influência da aplicação de boro. **Ciência Rural**, v. 44 n. 4. Santa Maria. 2014.

KABIRI, S.; BAIRD, R.; TRAN, D.N.H., ANDELKOVIC, I.; MCLAUGHLIN, M.J.; LOSIC, D. Cogranulation of low rates of graphene and graphene oxide with macronutrient fertilizers remarkably improves their physical properties, **ACS Sustain. Chemistry & Engineering**. v. 6 , p . 1299–1309, 2018.

LIU, F.; HE, J.; COLOMBO, C. Competitive adsorption of sulfate and oxalate on goethite in the absence or presence of phosphate. **Soil Science**, v. 164 p.180-189, 1999.

LOPES, A. S.; Micronutrientes - Filosofias de aplicação e eficiência agronômica, 1ª ed., **ANDA**: São Paulo, 1999.

- LOMBI, E., M.J. MCLAUGHLIN, C. JOHNSTON, R.D. ARMSTRONG, and R.E. Holloway. Mobility, solubility and lability of fluid and granular forms of P fertiliser in calcareous and noncalcareous soils under laboratory conditions. **Plant and Soil** 269:25-34, 2004.
- LOMBI, E.; SCHECKEL, K. G.; ARMSTRONG, R. D.; FORRESTER, S.; CUTLER, J. N.; PATERSON, D. Speciation and distribution of phosphorus in a fertilized soil. **Soil Science Society American Journal**, Madison, 70:2038-2048, 2006.
- LUSTOSA FILHO, J. F., PENIDO, E. S., CASTRO, P. P., SILVA, C. A., MELO, L. C. A. Co-pyrolysis of poultry litter and phosphate and magnesium generates alternative slow-release fertilizer suitable for tropical soils. **ACS Sustainable Chemistre & Engineering**. v.5, p. 9043–9052, 2017.
- MOHAMMADI, K. Phosphorus Solubilizing Bacteria: Occurrence, Mechanisms and their Role in Crop Production. **Resources and Environment**, v. 2, n. 1, p. 80–85, 2012.
- MACHADO, V. J.; de SOUZA, C. H. E.; RIBEIRO, V. J.; CAIXETA, C. G. Activity of nitrate reductase and development of maize irrigated and fertilized with monoammonium phosphate polymerized. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 12, n. 3, p. 203–213, 2013.
- MALAVOLTA, E. et al. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: **Potafós**, 1997
- MALAVOLTA, E. Manual de química agrícola: Agrônômica Ceres adubos e adubação. 3 ed. São Paulo, 1981. 596 p.
- MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. Piracicaba: Editora Agrônômica Ceres, 2006. 638p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. ; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: **POTAFÓS**, 1997. 319p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, A.S. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 1989. 201p.
- MAPA-MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos, 2013.
- MARCELO, A. V.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Sequência de culturas em sistema de semeadura direta. I- Produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.5, p.1553-1567, 2012.
- MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. In: COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em minas Gerais: 5a aproximação. Viçosa, p. 143-168, 1999.
- 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**, v. 78, n. 1, p. 214-224, 2014.

NASCIMENTO, C.A.C. Frações de fósforo no solo e aproveitamento de fosfatos pela cana-de-açúcar. Tese de Doutorado. Área de concentração: Solos e Nutrição de plantas, Escola Superior de Agricultura —Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

Nascimento, C. O.; MATTOS, B. B.; FIALHO, R. L.; CABRAL-ALBUQUERQUE, E. C.; BENITES, V. M. The effect of different ceramic materials to improve hardness of organomineral fertilizer granules. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2019.

NAZ, M.Y., SULAIMAN, S.A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. **Journal of Controlled Release** v. 225, p.109–120, 2016.

NOVAIS R. F. de; SMYTH, T. J. Fósforo em solo e em plantas em condições tropicais Viçosa, Brasil- Universidade Federal de Viçosa. 1999.

OLIVEIRA, P. M. DE; FILHO, I. D. O.; CARLOS, L. Localized application of monoammonium phosphate favors the availability of P in the soil and its absorption. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 1, p. 12–19, 2017.

PADILHA, F. A. Desempenho de híbridos de milho e dois níveis de investimento tecnológico na região de Sete Lagoas – MG. Tese. 72p, 2014.

PARTELLI, F. L.; BUSATO, J. G.; VIEIRA, H. D.; VIANA, A. P.; CANELLAS, L. P. Qualidade da matéria orgânica e distribuição do fósforo no solo de lavouras orgânicas de café Conilon. **Ciência Rural**, v. 39, n. 7, p. 2065–2072, 2009.

PAVINATO, P.; DAO T.; ROSOLEM C.A.. 2010. Tillage and phosphorus management effects on enzyme-labile bioactive phosphorus availability in Cerrado Oxisols. **Geoderma**, v.156(3-4): p.207–215, 2010

PAVINATO, P.S.; ROSOLEM, C.A. Disponibilidade de nutrientes no solo de decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 911-920, 2008.

PICOLI, L. B. Disponibilidade de fósforo em função do revestimento do fertilizante por substâncias húmicas. Dissertação. Universidade Estadual Paulista. 102 p., 2017.

PRADO, R. M. Nutrição de plantas ed. Unesp - São Paulo. p.139-160, 2008.

Raij B. van. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2ª ed. Campinas, Instituto Agrônomico. 285p. (Boletim técnico, 100), 1996.

RAIJ, B. van Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute.. p. 195- 217, 2011.

REDEL, Y.D.; RUBIO, R.; ROUANET, J.L.; BORIE, F. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. **Geoderma**, v. 139, n. 3, p. 388-396, 2007.

REINBOTT, T.M.; BLEVINS, D.G. Phosphorus and magnesium fertilization interaction with soil phosphorus level: tall fescue yield and mineral element content. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v.10, p.260-265, 1997.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J. & BENSON, G.O. Como a planta de milho se desenvolve. Piracicaba, Potafos. Informações Agronômicas, v. 103, 20 p., 2003.

20p. (Informações Agronômicas, 103)

ROBERTS, T. L. Right product, right rate, right time and right place... the foundation of best management practices for fertilizer. **Fertilizer best management practices**, v. 29, 2007.

ROBERTS, T. L. et al. The role of fertilizer in growing the world's food. **Better crops**, v. 93, n. 2, p. 12-15, 2009.

SCHABENBERGER, O.; PIERCE, F.J. Contemporary statistical models for the plant and soil sciences. 2.ed. Boca Raton: CRC, 738 p., 2002.

SALEQUE, M. A.; ABEDIN, M. J.; AHMED, Z. U.; HASAN, M.; PANAUULLAH, G. M. Influences of phosphorus deficiency on the uptake of nitrogen, potassium, calcium, magnesium, sulfur, and zinc in lowland rice varieties. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.24, n.10, p.1621-1632, 2001.

SAMPLE, E. C.; SOPER R. J.; RACZ G. J.. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In F. E. Khasawneh, E. C. Sample & E. J. Kamprath (eds.). The role of phosphorus in agriculture. Am. Soc. Agronomy, Crop Sci. Soc. Am., Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin: p.263-310, 1980.

SANTOS, G. A. Formas de adição de micronutrientes a um formulado de PK e seus efeitos sobre o desenvolvimento do milho. 79p. Dissertação (Mestrado), Uberlândia, 2013.

SAUNDERS, W. M. H. Phosphate retention by New Zealand soils and its relationship to free sesquioxides, organic matter, and other soil properties. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 8, n. 1, p. 30-57, 1965.

SCHOLZ, R. W.; SCHOLZ, R. W.; ULRICH, A. E.; EILITTÄ, M.; ROY, A. Sustainable use of phosphorus: A finite resource. **Science of the Total Environment**, v. 461-462, p. 799-803, 2013.

SICHOCKI, D.; GOTT, R. M.; FUGA, C. A. G.; AQUINO, L. A.; RUAS, R. A. A.; NUNES, P. H. M. P. Resposta do milho safrinha à doses de nitrogênio e de fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.13, n.1, p. 48-58, 2014.

SILVA, A. de A.; SILVA, T. S.; VASCONCELOS, A. C. P. de; LANA, R. M. Q. Aplicação de diferentes fontes de ureia de liberação gradual na cultura do milho. **Bioscience Journal**, v. 28, n. SUPPL. 1, p. 104-111, 2012.

SILVA, A. A.; SILVA, T. S.; VASCONCELOS, 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**, 28:240-250, 2012.

- SILVERSTEIN R.M.; WEBSTER F.X.; KIEMLE D.; EINHOLM E.J. Spectrometric Identification of Organic Compounds. 7th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- SHAVIV A. Controlled release fertilizers. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt. International Fertilizer Industry Association Paris, France, p. 28–30, 2005.
- SHEN, J.; YUAN L.; ZHANG J.; LI H.; BAI Z.; CHEN X., et al. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997-1005, 2011.
- SOUSA, D. G. M.; LOBATO, E. ; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. G. M. ; LOBATO, E. Cerrado: Correção do solo e adubação - 2ª ed. - Brasília : **Embrapa Informação Tecnológica**. p. 147-168, 2004.
- STEVENSON, F. J. Humus Chemistry: genesis, composition, reactions. 2.ed. New York: Wiley 496 p., 1994.
- TEIXEIRA, R. S., da SILVA, I. R.; SOUSA, R. N.; MATTIELLO E. M.; SOARES, E. M. B. Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. **Journal of soil science and plant nutrition**, V. 16 (4), p. 1097-1112, 2016.
- TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D. S.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil and Tillage Research**, v. 124, p. 57–67, 2012.
- TONDI G.; PETUTSCHNIGG A. Middle infrared (ATR FT-MIR) characterization of industrial tannin extracts. **Ind Crops Prod**, 422–8, 2015.
- TRZESNIAK, D. Modelagem Quântica de Inibidores Enzimáticos. Dissertação (Mestrado em Física) – USP, Instituto de Física, São Paulo, 2002.
- VILAR, C.; VILAR, F. C. M. Phosphorus Behavior in Soil and Plant. **Rev. Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias**, v. 8, p. 37–44, 2013.
- WITHERS P. J. A, RODRIGUES M.; SOLTANGHEISI A, de Carvalho TS, GUILHERME L. R. G.; BENITES V. M.; GATIBONI L. C.; de SOUSA D. M.G.; NUNES R. S.; ROSOLEM C. A.; ANDREOTE F. D.; OLIVEIRA A. Jr, COUTINHO E. L. M.; PAVINATO P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**. v.8, n.1, p. 2537, 2018.
- WILLIAMS, C.H. Reactions of surface applied superphosphate with soil II. Movement of the phosphorus and sulphur into the soil. **Aust J Soil Res** v.9 p.95-106, 1971.
- YAN, J.; JIANG, T.; YAO, Y., LU, S.; WANG, Q.; WEI, S. Preliminary investigation of phosphorus adsorption onto two types of iron oxide-organic matter complexes. **Journal of Environmental Sciences**, v.42, p. 152-162, 2016.
- ZAMUNER, E. C.; PICONE, L. I.; ECHEVERRIA, H. E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. **Soil Tillage Research** , v.99, p.131-138, 2008.



ZEVIANI, W. M.; JÚNIOR, P.; BONAT, W. H. Modelos de regressão não linear. Campina Grande: Laboratório de Estatística e Geoinformação, Departamento de Estatística UFPR, 2013.

## APÊNDICES

Apêndice 1 – Placa de Petri preenchida com solo contendo grânulo do fertilizante para a visualização da difusão de P.



Apêndice 2 – Placas de Petri seladas para incubação de 25°C após o depósito dos grânulos de fertilizantes.



Apêndice 3 – Recipientes de PVC selados após o preenchimento por solo e depósito dos grânulos de fertilizantes.



Apêndice 5 – Condução do experimento em campo.



Apêndice 6 – Condução do experimento em campo, apresentando plantas de milho no florescimento feminino.



Apêndice 7 – Respirômetro utilizado para quantificar a biodegradabilidade do polímero.

