

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

FLAVIA BIASSIO RIFERTE

ANTECIPAÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA NO INVERNO: PRODUTIVIDADE
DAS CULTURAS E FORMAS DE P NO SOLO

PONTA GROSSA – PR

2021

FLAVIA BIASSIO RIFERTE

ANTECIPAÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA NO INVERNO: PRODUTIVIDADE
DAS CULTURAS E FORMAS DE P NO SOLO

Tese apresentada à Universidade Estadual de
Ponta Grossa para obtenção do título de
doutora em Agronomia – Área de
concentração: Agricultura
Linha de pesquisa: Uso e Manejo do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Adriel Ferreira da
Fonseca.

PONTA GROSSA – PR

2021

R564 Riferte, Flavia Biassio
Antecipação da adubação fosfatada no inverno: produtividade das culturas e formas de P no solo / Flavia Biassio Riferte. Ponta Grossa, 2021.
84 f.

Tese (Doutorado em Agronomia - Área de Concentração: Agricultura),
Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca.

1. Adubação de sistemas. 2. Superfosfato simples. 3. Fertilidade química do solo. 4. Labilidade do fósforo. I. Fonseca, Adriel Ferreira da. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Agricultura. III.T.

CDD: 630



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da tese: “**Antecipação da adubação fosfatada no inverno: produtividade das culturas e formas de P no solo.**”

Nome: **Flavia Biassio Riferte**

Orientador: **Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca**

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca

Prof. Dr. Carlos Alberto Casali

Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Müller

Prof. Dr. Leandro Rampim

Dr. Renato Yagi

Data de realização: 12 de março de 2021



Documento assinado eletronicamente por **Adriel Ferreira da Fonseca, Professor(a)**, em 15/03/2021, às 08:44, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **LEANDRO RAMPIM, Usuário Externo**, em 15/03/2021, às 08:46, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Renato Yagi, Usuário Externo**, em 15/03/2021, às 09:19, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **carlos alberto casali, Usuário Externo**, em 15/03/2021, às 10:20, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Marques Lopes Müller, Usuário Externo**, em 15/03/2021, às 14:41, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador **0428030** e o código CRC **CC6FEE9E**.

A Deus.

Ao meu filho Gabriel.

Ao meu marido Jonathas.

À minha mãe Neuraci, meu pai Aristeu e
aos meus irmãos Angela e Bruno

EU DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar comigo em todos os momentos da minha vida.

Ao meu filho Gabriel, que com seu olhar me motiva todos os dias.

Ao meu marido Jonathas, meus pais Neuraci e Aristeu e aos meus irmãos Angela e Bruno pelo apoio, orações, ajuda nos momentos mais difíceis e pelo incentivo a prosseguir e superar as dificuldades encontradas pelo caminho.

Ao Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca, pelo incentivo, confiança, orientação e amizade.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), na qual tive a oportunidade de fazer o curso de graduação e pós-graduação em Agronomia e as instalações de pesquisa.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela contribuição científica para realizar este trabalho e capacitação profissional.

Ao Prof. Dr. Luiz Cláudio Garcia, pela ajuda e parceria no projeto inicial.

À Fundação CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à Fundação Araucária, pela concessão da bolsa e recursos financeiros.

Ao Laboratório de Nutrição de Plantas e Laboratório de Fertilidade do Solo da UEPG, e seus funcionários e técnicos: Verônica Dias Carneiro, Danilo Bachinski e Elias Luiz Meira, pelo auxílio nas análises laboratoriais.

Ao Laboratório Multiusuário da UEPG pelas análises e ajuda.

À DuPont Brasil/divisão Pioneer Sementes, atual Corteva Agriscience e à Sólida Agroconsultoria e Assessoria, pela parceria na realização do projeto a campo.

À Fazenda Estância Vendramin, a todos os seus funcionários, em especial ao proprietário da fazenda, Sr. Aldo Vendramin, e ao engenheiro agrônomo Gernold Schartner, pela concessão da área agrícola em Tibagi-PR e pela ajuda na condução do experimento a campo.

Aos meus colegas e amigos Sandoval Carpinelli, Jessica Alves Nogarolli, Keli Guera, Guilherme Moll, Emerson Homenchuk, Juliano Garda, Fernanda Ribeiro, Matheus Quirelli, Cleber Cavalli Filho, Silvano Harkatin, Gabriel Gregório Soares, Ronaldo Dalzoto, Gaison Sampaio, Hernani Miguel Sales Assis, Arison Jung, Felipe Vaurof, Julienne de Geus Moro, Eduardo Güntzel, Fabrício Siqueira Hennipman, Elton Rech, André Vam Beek, Adriano Xavier Maukoski, Janaine Ritter, Lucas Brigola e Thays Schneider pelo companheirismo e ajuda nas coletas de planta e solo e análises laboratoriais.

À minha família e amigos Jaqueline Aparecida Riferte, Paulina Szanoski Riferte, Angelo Muchinski, Andressa Dranski, Karla Thais Barreto e Marcelo Basso Lacerda pelo incentivo e companheirismo durante todo esse tempo.

E a todas as pessoas que de alguma forma possibilitaram a realização deste trabalho.

RESUMO

RIFERTE, F. B. **Antecipação da adubação fosfatada no inverno: produtividade das culturas e formas de P no solo.** 2021. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa.

A antecipação da adubação fosfatada ainda é um tema bastante complexo, necessitando de maiores investigações sobre seus efeitos no desenvolvimento das culturas, fertilidade do solo e labilidade do fósforo (P) no solo. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos, a médio prazo, da antecipação da adubação fosfatada sobre a nutrição, rendimento e eficiência de uso de P (EUP) das culturas de primavera-verão (milho e soja), atributos de fertilidade do solo e formas de P do solo, em sistema plantio direto (SPD). O experimento foi instalado em setembro de 2012, no município de Tibagi, Paraná, em Latossolo Vermelho Distrófico de textura franco argilo-arenosa, em delineamento de blocos casualizados, com seis repetições e cinco tratamentos, a saber: antecipação de 100, 75, 50, 25 e 0% da adubação fosfatada. A dose total de P_2O_5 durante o ano, para todos os tratamentos, correspondeu a 90 kg ha^{-1} , na forma de superfosfato simples. A antecipação da fertilização fosfatada promoveu alterações na nutrição das culturas e nos atributos químicos do solo. Não houve aumento na produtividade de grãos do milho e da soja com a antecipação da adubação fosfatada. Para o milho, quando houve baixa disponibilidade hídrica durante o ciclo da cultura, a antecipação de 50% da fertilização fosfatada ocasionou maior EUP em relação à antecipação de 75% da adubação fosfatada. Para a soja, a antecipação da adubação fosfatada tendeu a diminuir a produtividade dos grãos e a EUP. As menores doses de P antecipadas e a aplicação total do P na semeadura de primavera-verão aumentaram os teores de P disponível na camada de 5-10 cm do solo, durante o decorrer do experimento. O manejo da adubação fosfatada não alterou os teores de carbono orgânico total (COT) na camada de 0-5 cm, mantendo os teores elevados, beneficiando os outros atributos químicos do solo, sendo fundamental para o sucesso da antecipação da adubação fosfatada como estratégia de adubação de sistemas. Independente da antecipação da adubação fosfatada, o P orgânico (Po) e o P residual foram os principais componentes do P total do solo, em maior quantidade na fração de P moderadamente lábil e não lábil. A antecipação da adubação fosfatada aumentou o Po lábil, P lábil total e P inorgânico não lábil ligado ao cálcio, na camada de 0-5 cm, enquanto a adubação fosfatada na cultura de primavera-verão ou a antecipação de apenas 25% da adubação fosfatada no inverno elevou os teores de P lábil, principalmente o Po, além do Po não lábil na camada de 5-10 cm. A relação COT:Po variou ao longo do perfil do solo, com maiores valores obtidos na camada de 0-5 cm e abaixo dos 20 cm de profundidade do solo. No entanto, todos os valores de COT:Po ficaram abaixo de 100, podendo ser considerado um solo com alto conteúdo de P disponível. Em condições de adequada fertilidade do solo, SPD estabilizado e concentração média a alta de matéria orgânica, a antecipação da fertilização fosfatada para milho e soja é viável, porém sem incrementos na produtividade das culturas.

Palavras-chave: *Zea mays* L.; *Glycine max* (L.) Merril.; *Avena strigosa* Schreb.; *Triticum aestivum* L.; adubação de sistemas; superfosfato simples, fertilidade química do solo, labilidade do fósforo.

ABSTRACT

RIFERTE, F. B. **Anticipation of phosphate fertilization in winter: crop yields and soil P forms.** 2021. Thesis of doctorate degree in Agronomy - University State of Ponta Grossa.

The phosphate fertilization anticipation is still a very complex issue, requiring further investigation on its effects on crop development, soil fertility and soil phosphorus (P) lability. Therefore, the aim of this work was to evaluate the effects of the phosphate fertilization anticipation, in the medium term, on the nutrition, yield and P use efficiency (PUE) of the spring-summer crops (maize and soybean), soil fertility attributes and soil P forms, under no-till (NT). The experiment was installed in September 2012, in Tibagi, Paraná, in a Oxisol with sandy-clay loam texture, in a randomized block design, with six replications and five treatments, namely: anticipation of 100, 75, 50, 25 and 0% of phosphate fertilization. The total dose of P_2O_5 during the year, for all treatments, corresponded to 90 kg ha^{-1} , in the form of single superphosphate. The phosphate fertilization anticipation promoted changes in crop nutrition and in the soil chemical attributes, but with no impact on the crops dry matter and grain yields. There was no increase in the maize and soybean grain yields with the phosphate fertilization anticipation. For maize, when there was low water availability during the crop cycle, the anticipation of 50% of phosphate fertilization caused greater PUE compared to the anticipation of 75% of phosphate fertilization. For soybean, the phosphate fertilization anticipation tended to decrease grain yield and PUE. The lowest P anticipated doses and the P total application in the spring-summer sowing increased the levels of available P in the 5-10 cm soil layer during the course of the experiment. The management of phosphate fertilizer did not alter the levels of total organic carbon (TOC) in the 0-5 cm soil layer, keeping the levels high, benefiting the other soil chemical attributes, being fundamental for the success of the phosphate fertilization anticipation as a strategy of fertilization of systems. Regardless of the phosphate fertilization anticipation, organic P (oP) and residual P were the main components of soil total P, in greater quantity in the moderately labile and non-labile P fraction. The phosphate fertilization anticipation increased labile oP, total labile P and non-labile inorganic P bound to calcium, in the 0-5 cm soil layer, while phosphate fertilization in the spring-summer crop or the anticipation of only 25% of phosphate fertilization in winter it increased the levels of labile P, mainly oP, in addition to non-labile oP in the 5-10 cm layer. The TOC:oP ratio varied along the soil profile, with higher values obtained in the 0-5 cm soil layer (due to the higher TOC content in that layer) and below the 20 cm depth of the soil (due to the low mobility of P on the ground). However, all TOC:oP values were below 100, and a soil with a high content of available P could be considered. Under conditions of adequate soil fertility, stabilized NT and medium to high concentration of organic matter, the phosphate fertilization anticipation for maize and soybean is feasible, but without increases in crop yields.

Keywords: *Zea mays* L.; *Glycine max* (L.) Merrill.; *Avena strigosa* Schreb.; *Triticum aestivum* L.; systems fertilization; single superphosphate, chemical soil fertility, phosphorus lability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Precipitação pluviométrica mensal acumulada (mm) durante o período experimental (2012 a 2017), no município de Tibagi-PR.	26
Figura 4.2 – Rendimento de grãos de milho cultivado sob a antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada em sistema plantio direto. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	34
Figura 4.3 – Rendimento de grãos de soja cultivada sob a antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade....	35
Figura 4.4 – Rendimento relativo de grãos (%) das culturas de verão, nas safras 2012/2013 (Ano 1), 2013/2014 (Ano 2), 2014/2015 (Ano 3), 2015/2016 (Ano 4) e 2016/2017 (ano 5), submetidas à antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada. Letras maiúsculas comparam anos agrícolas no mesmo modo de aplicação do fertilizante fosfatado e letras minúsculas, modos de aplicação do fertilizante fosfatado no mesmo ano agrícola.	37
Figura 6.1 – Teores (em mg kg ⁻¹) de fósforo (P) lábil (A), P moderadamente lábil (B), P não lábil (C) e P total (D) de um Latossolo Vermelho Distrófico, submetido, a médio prazo, à antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada (fonte solúvel) para a cultura de primavera-verão. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	65
Figura 6.2 – Porcentagem das frações fósforo (P) lábil, P moderadamente lábil e P não lábil em relação ao P total do solo, nas camadas de 0-5 cm (A), 5-10 cm (B), 10-20 cm (C) e 20-40 cm (D) de um Latossolo Vermelho Distrófico, submetido, a médio prazo, à antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada (fonte solúvel) para a cultura de primavera-verão..	66
Figura 6.3 – Teores totais (em mg kg ⁻¹) de fósforo inorgânico – Pi (A) e fósforo orgânico – Po (B) ao longo do perfil do solo (Latosolo Vermelho distrófico), submetido, a médio prazo, à antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada (fonte solúvel) para a cultura de primavera-verão. Barras laterais correspondem ao erro padrão da média (n=6).	70
Figura 6.4 – Relação carbono:fósforo orgânico total (COT:Po) ao longo do perfil do solo (Latosolo Vermelho distrófico), submetido, a médio prazo, à antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada (fonte solúvel) para a cultura de primavera-verão. Barras laterais correspondem ao erro padrão da média (n=6).	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Híbridos de milho, cultivares de trigo, aveia preta e soja com suas respectivas datas de semeadura e antecipação do fertilizante fosfatado, espaçamentos e população final de plantas cultivadas durante o período experimental (setembro/2012 a maio/2017).....	25
Tabela 4.2 – Aporte de nutrientes, tipo de fertilizante e estágio das culturas no momento da adubação com fertilizantes contendo nitrogênio (N) e potássio (K ₂ O), durante o período experimental (setembro/2012 a maio/2017).	27
Tabela 4.3 - Rendimento de massa de matéria seca (MS) da parte aérea da aveia preta (<i>Avena strigosa</i> Schreb.), nas safras 2014 e 2015, e rendimento de MS e grãos de trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.), nas safras 2013 e 2016, cultivados sob antecipação da fertilização fosfatada, em sistema plantio direto.	29
Tabela 4.4 – Rendimento de massa de matéria seca da parte aérea (MS, em kg ha ⁻¹) e concentrações (g kg ⁻¹) de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e enxofre (S) na diagnose foliar do milho cultivado nas safras 2012/2013, 2014/2015 e 2015/2016, sob antecipação da adubação fosfatada, em sistema plantio direto.	31
Tabela 4.5 – Rendimento de massa de matéria seca da parte aérea (MS, em kg ha ⁻¹) e concentrações (g kg ⁻¹) de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e enxofre (S) na diagnose foliar da soja cultivada nas safras 2013/2014 e 2016/2017 sob antecipação da adubação fosfatada, em sistema de plantio direto.	33
Tabela 4.6 - Eficiência de uso do fósforo - EUP (kg de grãos produzidos para cada kg de P ₂ O ₅ aplicado) para milho e soja, considerando a antecipação da adubação fosfatada, nas cinco safras avaliadas.....	38
Tabela 5.1 – Valores de pH de amostras de solo submetido à antecipação da adubação fosfatada para cultura de primavera-verão, coletadas aos 9 meses (após milho), 20 meses (após soja), 33 meses (após milho), 45 meses (após milho) e 57 meses (após soja) a partir do início do experimento (setembro/2012).	45
Tabela 5.2 – Teores de alumínio (Al) trocável (cmol _c dm ⁻³) de amostras de solo submetido à antecipação da adubação fosfatada para cultura de primavera-verão, coletadas aos 9 meses (após milho), 20 meses (após soja), 33 meses (após milho), 45 meses (após milho) e 57 meses (após soja) a partir do início do experimento (setembro/2012).	47
Tabela 5.3 – Saturação por bases (V%) de amostras de solo submetido à antecipação da adubação fosfatada para cultura de primavera-verão, coletadas aos 9 meses (após milho), 20 meses (após soja), 33 meses (após milho), 45 meses (após milho) e 57 meses (após soja) a partir do início do experimento (setembro/2012).....	50
Tabela 5.4 – Saturação (%) por cálcio (Ca) na capacidade de troca catiônica (CTC) de amostras de solo submetido à antecipação da adubação fosfatada para cultura de primavera-verão, coletadas aos 9 meses (após milho), 20 meses (após soja), 33 meses (após milho), 45 meses (após milho) e 57 meses (após soja) a partir do início do experimento (setembro/2012).	51
Tabela 5.5 – Teores de fósforo (P) disponível (mg dm ⁻³) de amostras de solo submetido à antecipação da adubação fosfatada para cultura de primavera-verão, coletadas	

aos 9 meses (após milho), 20 meses (após soja), 33 meses (após milho), 45 meses (após milho) e 57 meses (após soja) a partir do início do experimento (setembro/2012).	53
Tabela 5.6 – Teores (%) de carbono orgânico total (COT) de amostras de solo submetido à antecipação da adubação fosfatada para cultura de primavera-verão, coletadas aos 57 meses (após soja) a partir do início do experimento (setembro/2012). ...	54
Tabela 6.1 – Teores de fósforo inorgânico (Pi) e orgânico (Po) extraídos sequencialmente por resina trocadora de ânions (RTA), bicarbonato de sódio (NaHCO_3) $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (bic), hidróxido de sódio (NaOH) $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (hid), NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (hid0,5), ácido clorídrico (HCl) 1 mol L^{-1} e P residual no solo estimado por digestão ácida em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico, submetido, a médio prazo, à antecipação da adubação fosfatada (fonte solúvel) para a cultura de primavera-verão.	61

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 GERAL.....	15
2.2 ESPECÍFICOS.....	15
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1 CICLO DO FÓSFORO NO SISTEMA SOLO-PLANTA.....	16
3.2 DINÂMICA DO FÓSFORO NO SOLO NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA EM REGIÕES TROPICAIS E SUBTROPICAIS.....	18
3.3 ADUBAÇÃO FOSFATADA COMO ESTRATÉGIA DE ADUBAÇÃO DE SISTEMAS.....	20
4 ARTIGO 1 – NUTRIÇÃO, RENDIMENTO DE GRÃOS E EFICIÊNCIA DE USO DE FÓSFORO PELO MILHO E SOJA, SOB ANTECIPAÇÃO DA FERTILIZAÇÃO FOSFATADA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	22
RESUMO.....	22
ABSTRACT.....	22
4.1 INTRODUÇÃO.....	23
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	24
4.2.1 Descrição da Área, Delineamento Experimental e Tratamentos.....	24
4.2.2 Descrição e Adubação das Culturas.....	25
4.2.3 Coleta e Preparo das Amostras.....	26
4.2.4 Análises dos Nutrientes nas Plantas.....	28
4.2.5. Análises Estatísticas.....	28
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.3.1 Produtividade das Culturas de Outono-inverno.....	29
4.3.2 Nutrição Mineral do Milho.....	30
4.3.3 Nutrição Mineral da Soja.....	32
4.3.4 Rendimento de Grãos.....	34
4.3.5 Rendimento de Grãos Relativo e Eficiência de Uso de Fósforo.....	36
4.4 CONCLUSÕES.....	38
5 ARTIGO 2 – ALTERAÇÕES NA FERTILIDADE DO SOLO APÓS ANTECIPAÇÃO DE FÓSFORO SOLÚVEL PARA AS CULTURAS DE PRIMAVERA-VERÃO, EM SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	40

RESUMO.....	40
ABSTRACT.....	40
5.1 INTRODUÇÃO.....	41
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	43
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
5.3.1 Acidez do Solo.....	44
5.3.1.1 Acidez ativa.....	44
5.3.1.2 Alumínio trocável.....	46
5.3.2 Saturação por Bases e por Cálcio do Solo.....	49
5.3.3 Fósforo Disponível.....	51
5.3.4 Carbono Orgânico Total.....	53
5.4 CONCLUSÕES.....	55
6 ARTIGO 3 – A ANTECIPAÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA NO INVERNO INTERFERE NAS FORMAS DE P NO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO?.....	56
RESUMO.....	56
ABSTRACT.....	56
6.1 INTRODUÇÃO.....	57
6.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	58
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
6.3.1 Formas de P Extraídas pelo Fracionamento Sequencial.....	60
6.3.2 P Total e Labilidade do P.....	64
6.3.3 Distribuição de Pi e Po Total e Relação COT:Po Total ao Longo do Perfil do Solo...	68
6.4 CONCLUSÕES.....	71
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
REFERÊNCIAS.....	74

1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é considerado um elemento essencial para as plantas, pois é um componente estrutural de enzimas, ácidos nucleicos e fosfolipídios, além de desempenhar um papel crucial nos processos metabólicos de suporte à vida vegetal (BUCHER et al., 2018). Em solos agrícolas brasileiros tropicais e subtropicais, após a correção da acidez do solo, o baixo teor de P disponível é o fator mais limitante para o rendimento das culturas (FAGERIA, 1998; NOVAIS; SMITH, 1999). Isso torna a prática da fertilização fosfatada essencial para garantir altos rendimentos (SHEN et al., 2011). Porém, o uso do fosfato pelas culturas, proveniente dos fertilizantes minerais, é muito baixo (BALLIGAR; FAGERIA; HE, 2001; AMADO, 2011; CORDELL; WHITE, 2014), ficando entre 15-30% (CORDELL; WHITE, 2014). Isso se deve à alta capacidade de adsorção de P, com alta energia de ligação, aos óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), principais constituintes minerais desses solos (NOVAIS; SMYTH, 1999; DELGADO et al., 2016). Assim, um dos principais desafios dos sistemas de produção sustentáveis é aumentar a eficiência de uso de P (EUP) (CORDELL; NESET, 2014; DELGADO et al., 2016; PANG et al., 2018), diminuindo assim a demanda global por fertilizantes fosfatados e postergando o esgotamento das reservas minerais desse nutriente.

Alterações no manejo do solo afetam a disponibilidade de P para as plantas (TIECHER et al., 2012; TIECHER et al., 2017), aumentando as perdas de P ou transformando-o em formas mais recalcitrantes (MARANGUIT; GUILLAME; KUZYAKOV, 2017). No entanto, manejos conservacionistas do solo, como o sistema plantio direto (SPD), podem aumentar os teores de P disponível, seja pelo não revolvimento do solo que reduz o contato dos íons fosfatos com as partículas do solo, diminuindo a adsorção de P (PAULETTI et al., 2009), seja pela produção de ácidos orgânicos que competem pelos sítios de adsorção (PAVINATO; ROSOLEM, 2008; TIECHER et al., 2012; TIECHER et al., 2017; CALEGARI et al., 2013). Ainda, a aplicação superficial de fertilizante fosfatado em sulco e a manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo, em SPD, geram um gradiente de concentração de P, tanto vertical, quanto horizontal (SCHLINDWEIN; ANGHINONI, 2000; PAULETTI et al., 2009; CAIRES et al., 2017), afetando as diferentes frações de P do solo.

Milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* (L.) Merril.) são as duas principais culturas cultivadas durante a safra de primavera-verão no sul do Brasil (CONAB, 2020), em rotação/sucessão com aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) e trigo (*Triticum aestivum* L.) na safra de outono-inverno, manejados em SPD. A fertilização fosfatada para essas culturas é tradicionalmente realizada no momento da semeadura, aplicada predominantemente ao lado e

abaixo do sulco de semeadura (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2017). No entanto, alguns trabalhos (PAVINATO; CERETTA, 2004; FRANCISCO; CÂMARA; SEGATELLI, 2007; GALETTO et al., 2014; CAIRES et al., 2017; GUERA; DA FONSECA; HARKATIN, 2020; ZANELLA et al., 2020) foram realizados com o objetivo de antecipar a fertilização fosfatada durante o cultivo da safra outono-inverno, sendo considerada uma estratégia de adubação de sistemas (ALTMANN, 2012). A antecipação da adubação não beneficia apenas a cultura de primavera-verão, mas também a cultura antecessora, promovendo formação de palhada para o SPD, favorecendo a conservação do solo, a manutenção da umidade e a ciclagem de nutrientes (ALTMANN, 2012).

Porém, a antecipação da fertilização fosfatada é uma questão complexa, considerando a capacidade do fertilizante fosfatado em garantir a liberação de P para a safra primavera-verão. Dessa forma, a compreensão dos efeitos da antecipação da adubação fosfatada sobre as formas de P no solo, nos atributos de fertilidade química do solo, bem como na nutrição e rendimento das culturas utilizadas em rotação/sucessão é fundamental para o sucesso dessa prática nos sistemas de produção agrícolas sustentáveis.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar os efeitos da antecipação da adubação fosfatada, a médio prazo, sobre a nutrição e rendimento de milho e soja, fertilidade do solo e formas de P no solo, em sistema plantio direto (SPD).

2.2 ESPECÍFICOS

Monitorar o estado nutricional, o rendimento de grãos e eficiência de uso de P das culturas de soja e milho, considerando a antecipação de 0, 25, 50, 75 e 100% da fertilização fosfatada, sendo a aplicação na semeadura da cultura de outono-inverno.

Avaliar o rendimento de massa de matéria seca da parte aérea da cultura de cobertura de solo (aveia preta) e/ou da cultura agrícola de importância econômica durante o outono-inverno (trigo), considerando a antecipação de 0, 25, 50, 75 e 100% da fertilização fosfatada aplicada por ocasião da semeadura destas plantas.

Avaliar anualmente os principais atributos de fertilidade do solo, bem como os teores de carbono orgânico total após 57 meses de estudo.

Quantificar as formas de P do solo, de acordo com a sua labilidade após cinco safras de primavera-verão cultivadas sob antecipação da adubação fosfatada em SPD.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 CICLO DO FÓSFORO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

O fósforo (P) do solo é proveniente do material de origem, da mineralização da matéria orgânica do solo (MOS) e da adição de fertilizantes orgânicos e inorgânicos (MARANGUIT; GUILLAME; KUZUYAKOV, 2017). Ainda, a deposição atmosférica de poeira de solos e desertos, aerossóis marinhos, partículas de aerossóis biológicos primários (microrganismos, unidades de dispersão, fragmentos e excreções), cinzas de vulcões, queima de biomassa, combustão de petróleo e carvão e emissões da fabricação de fosfato também pode ser uma fonte de P para o solo (TIPPING et al., 2014).

O P total do solo é composto pelas frações de P inorgânico (Pi) e P orgânico (Po), as quais estão em constantes transformações químicas, alterando suas formas e labilidade (ZIADI et al., 2013). O Pi do solo é composto predominantemente pela forma dos ânions ortofosfatos H_2PO_4^- (predominante em valores de pH do solo $< 7,2$, portanto sendo a forma predominante de Pi na solução dos solos de regiões tropicais e subtropicais) e HPO_4^{2-} (predominante em valores de pH do solo $> 7,2$) (LINDSAY, 1979). Ainda, outras formas de Pi comumente encontradas em solos incluem pirofosfato e polifosfatos, que podem estar associados a altos níveis de atividade fúngica (BÜNEMANN et al., 2008).

O Po do solo é definido como o P constituinte de compostos orgânicos, ou seja, aqueles que contêm ligações carbono-hidrogênio (C – H) (TURNER et al., 2005; WEIHRAUCH; OPP, 2018), sendo classificado em três grupos com base nas diferentes ligações do P: (i) ésteres de fosfato; (ii) fosfonatos; e (iii) anidridos de ácido fosfórico (TURNER et al., 2005; CONDRON; TURNER; CADE-MENUN, 2005). Os ésteres de fosfato são subdivididos em monoésteres (um grupo éster por fosfato) e diésteres (dois grupos ésteres por fosfato) (NASH et al., 2014; TURNER et al., 2005). Os monoésteres de fosfato são a forma de Po predominante no solo em condições aeróbias (CONDRON; TURNER; CADE-MENUN, 2005), comumente aparecendo na forma de fosfato de inositol e, em pequenas quantidades, nas formas de fosfatos de açúcar, fosfo-proteínas e mononucleotídeos (TURNER et al., 2005; HUANG et al., 2017). Os diésteres de fosfato incluem ácidos nucleicos (DNA e RNA), fosfolipídios e ácidos teicóicos (CONDRON; TURNER; CADE-MENUN, 2005), sendo geralmente encontrados em menores proporções no solo do que os monoésteres, porque eles são relativamente lábeis e adsorvidos com menor força aos coloides minerais do solo (TURNER et al., 2005). O grupo dos fosfonatos são caracterizados pela ligação C – P, sendo mais comumente encontrado como ácido 2-

aminoetilfosfônico (TURNER et al., 2005; WEIHRAUCH; OPP, 2018). Já o grupo dos anidridos de ácido fosfórico contém monoésteres de fosfato e ligações anidridas e incluem compostos como adenosina difosfato (ADP) e adenosina trifosfato (ATP), estando envolvidos na transferência de energia bioquímica (TURNER et al., 2005). No entanto, são raramente detectados nos solos (TURNER et al., 2005) devido à sua instabilidade termodinâmica no ambiente natural (DE NOBILI et al. 1996).

Segundo Stevenson e Cole (1999), as formas de P do solo podem ser categorizados como: (i) Pi e Po solúvel na solução do solo; (ii) Pi e Po fracamente adsorvido (lábil), que se difundem prontamente na solução do solo; (iii) P insolúvel, que está associado ao cálcio (Ca) em solos calcários e alcalinos ou ligado a ferro (Fe) e alumínio (Al) em solos ácidos (moderadamente lábil), que ajudam a manter a fração de P lábil à medida que se esgotam através da absorção pelas plantas; (iv) P fortemente adsorvido e/ou ocluso por óxidos hidratados de Fe e Al (Pi não lábil); e (v) Po insolúvel em resíduos vegetais, animais e microbianos não decompostos MOS (Po não lábil), sendo que as duas últimas categorias devem ser mobilizadas em solução pela atividade microbiana e exsudatos radiculares de plantas (NEGASSA; LEINWEBER, 2009; ROWE et al., 2015).

As plantas absorvem o Pi (ortofosfatos) da solução do solo, sendo que o principal mecanismo de contato fosfato-raiz se dá por difusão (BUCHER et al., 2018). Uma vez absorvido, o P vai realizar suas funções dentro da planta, como componente estrutural de compostos orgânicos (ácidos nucleicos, fosfolipídios, proteínas, etc), e transferência de energia para as reações metabólicas, como respiração e fotossíntese (BUCHER et al., 2018), podendo ser exportado do sistema através das partes colhidas das plantas. Após completar seu ciclo de vida, os resíduos vegetais serão decompostos pelos microrganismos do solo, liberando novamente o Pi para a solução do solo (ZIADI et al., 2013).

Além da exportação do P nas partes colhidas das plantas, processos de transporte, como escoamento superficial, fluxo subterrâneo, lixiviação e migração de sedimentos contendo P também podem representar perdas significativas de P da camada cultivada de solo (ZIADI et al., 2013). A imobilização de P por parte da microbiota do solo também reduz temporariamente a disponibilidade de P para as plantas (WU et al., 2007), havendo relação positiva entre o C orgânico do solo e o P da biomassa microbiana (XU et al., 2020).

3.2 DINÂMICA DO FÓSFORO NO SOLO NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA EM REGIÕES TROPICAIS E SUBTROPICAIS

Nos sistemas de produção agrícola brasileiros, devido ao elevado grau de intemperismo dos solos, o fator limitante de rendimento das culturas, depois de realizada a correção da acidez, é a baixa disponibilidade de P (NOVAIS; SMYTH, 1999). Desse modo, a prática da fertilização fosfatada torna-se essencial para suprir a demanda deste nutriente pelas culturas (SHEN et al., 2011). No entanto, a predominância de óxidos e hidróxidos de Fe e Al na constituição mineral desses solos, faz com que estes atuem como dreno de P, competindo com a planta pelo fertilizante aplicado (NOVAIS; SMYTH, 1999; PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Segundo Barrow (2015), a adsorção de P nos solos tropicais e subtropicais se dá em dois estágios: (i) inicialmente ocorre adsorção específica reversível de P às superfícies de óxidos e hidróxidos de Fe e Al; e (ii) a longo prazo, ocorre reações mais lentas, caracterizadas pelo movimento de ânions fosfato através das superfícies adsorptivas, adentrando às partículas do solo por difusão no estado sólido. Este P ocluso dentro dos óxidos é geralmente referido como não lábil. Esse processo de adsorção de P reduz o aproveitamento do P pelas plantas, fornecido via fertilizante. Estima-se que apenas 45% do fertilizante fosfatado aplicado é absorvido pela planta (AMADO, 2011), apresentando uma eficiência de uso menor que 10% (BALLIGAR; FAGERIA, HE, 2001).

Práticas de manejo agrícola podem influenciar a dinâmica do P no solo (ZIADI et al., 2013). Nos sistemas conservacionistas de manejo do solo, como o sistema plantio direto (SPD), o qual se caracteriza pelo mínimo revolvimento, cobertura orgânica permanente e diversidade de espécies utilizadas em rotação/sucessão (SIX et al., 2002; LAL, 2006), a adubação fosfatada é realizada na superfície do solo, seja a lanço em área total ou no sulco de semeadura (OLIVEIRA et al., 2020). A manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo e a aplicação do fertilizante fosfatado no sulco de semeadura geram um gradiente de concentração de P, tanto vertical, quanto horizontal (SCHLINDWEIN; ANGHINONI, 2000; PAULETTI et al., 2009), com grandes quantidades de P_o e P_i lábeis próximas à superfície do solo (OLIBONE; ROSOLEM, 2010; NOACK et al., 2012; RODRIGUES et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2020). Ainda, o não revolvimento do solo nesse sistema de manejo reduz o contato dos íons fosfatos com as partículas do solo, diminuindo a adsorção de P (SÁ, 2004; PAULETTI et al., 2009). Já os resíduos vegetais, durante o processo de decomposição, liberam ácidos orgânicos de baixo peso molecular no solo, como ácido cítrico, málico e oxálico (GUPPY et al., 2005). Esses compostos orgânicos podem competir com os ânions fosfatos pelos sítios de carga positiva dos

coloides inorgânicos (ANDRADE et al., 2003; PAVINATO; ROSOLEM, 2008), além de formar complexos (quelação) com os íons Al^{3+} e Fe^{3+} , diminuindo a adsorção de P no solo (FRANCHINI et al., 1999).

As espécies de plantas utilizadas no sistema de rotação/sucessão dos sistemas de produção agrícolas podem ajudar a reciclar o P do solo, uma vez que a capacidade de absorção de P difere entre as culturas (THIECHER et al., 2012). Essas diferenças são devidas principalmente a: (i) morfologia da raiz (densidade radicular, comprimento, diâmetro), possibilitando a exploração de diferentes camadas de solo (SHEN et al., 2011; ZIADI et al., 2013); (ii) associações com micorrizas, onde o micélio externo aumenta a área de superfície do sistema radicular, possibilitando maior acesso a nutrientes que limitam o crescimento, como o P; e ainda, o pequeno diâmetro das hifas (1-12 μm) permite que elas entrem nos poros do solo não acessíveis às raízes (MARSCHNER, 2012); e (iii) alterações químicas e biológicas na rizosfera, envolvendo liberação de prótons para acidificar a rizosfera, exsudação de carboxilatos para mobilizar P moderadamente lábil por quelação e troca de ligante, e secreção de fosfatases ou fitases para mobilizar P por hidrólise catalisada por enzima, além de microrganismos presentes na rizosfera, como bactérias e fungos solubilizadores de P que solubilizam o P da fase sólida do solo, aumentando a sua disponibilidade (RICHARDSON et al., 2009; SHEN et al., 2011; NEUMANN; RÖMHELD, 2012).

As estratégias de aplicação do fertilizante fosfatado, seja fonte, dose, método e época de aplicação, também afetam os pools de P do solo. Os fosfatos naturais com solubilidade média em ácido cítrico, como os fosfatos de rocha reativos (FRR), apresentam maior efeito residual no solo devido à sua solubilização mais lenta (OLIVEIRA JÚNIOR; PROCHNOW; KLEPKER, 2008; TELES et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2019). Já as fontes de P solúveis, como o superfosfato simples (SPS) e o superfosfato triplo (SPT), são capazes de liberar P rapidamente para as plantas após a dissolução na solução do solo (OLIVEIRA et al., 2020), porém se parte do suprimento de P não for usada adequadamente pela cultura, aumenta o risco do P se transformar em frações de menor labilidade. A aplicação de fertilizantes fosfatados na superfície do solo, em área total tem sido uma prática crescente no Brasil devido ao aumento da eficiência operacional no campo, no entanto, essa prática tem gerado controvérsias quanto à sua eficiência devido à baixa mobilidade do P no solo (OLIVEIRA et al., 2020). O FRR tem apresentado melhores respostas para as culturas (OLIVEIRA JÚNIOR; PROCHNOW; KLEPKER, 2008) e aumentado o P total do solo (OLIVEIRA et al., 2020), principalmente nas frações de P lábil e não lábil (TELES et al., 2017), quando aplicado na superfície do solo em área total, uma vez que há a necessidade de contato entre o solo e a rocha fosfática para

aumentar a taxa de dissolução da rocha e, conseqüentemente, fornecer quantidades de P suficientes para o desenvolvimento das plantas (OLIVEIRA JÚNIOR; PROCHNOW; KLEPKER, 2008). Já a aplicação de fertilizantes fosfatados solúveis, em SPD, pode aumentar o Po do solo, uma vez que o SPD aumenta não só a MOS, mas também aumenta quantidade da biomassa microbiana devido aos exsudatos das raízes e decomposição dos resíduos vegetais. Nessas situações, o Pi é parcialmente transformado em Po na biomassa microbiana, o que poderia contribuir para uma maior disponibilidade de P na camada superficial do solo (OLIBONE; ROSOLEM, 2010). Geralmente, a aplicação do fertilizante fosfatado solúvel é realizada no momento da semeadura das culturas. No entanto, a antecipação da adubação fosfatada para as culturas de primavera-verão no momento da semeadura das culturas de outono-inverno é uma técnica que pode ser interessante como estratégia de adubação de sistema (LANA; VILELA FILHO; ZANÃO JÚNIOR, 2003; BOHAC; CÂMARA; SEGATELLI, 2007; MARTINAZZO et al., 2007).

Um dos principais desafios da sustentabilidade global é aumentar a eficiência de uso de P (EUP) nos sistemas de produção agrícolas (CORDELL; NESET, 2014). Dessa maneira, poderia se reduzir a demanda global por P e assim, adiar o esgotamento das reservas fósseis (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009). Segundo Schröder et al. (2011), entre as ferramentas para aumentar a EUP em sistemas agrícolas estariam a: (i) otimização das áreas agrícolas, (ii) prevenção da erosão, (iii) manutenção da qualidade do solo, principalmente através do aumento do conteúdo de matéria orgânica do solo, (iv) genótipos melhorados eficientes na absorção de P e associação com micorrizas, e (v) métodos de aplicação do fertilizante fosfatado. Entretanto, o aumento de EUP e redução da dependência de altas taxas de fertilizantes minerais nos sistemas de produção agrícola sustentáveis brasileiros requerem melhor entendimento de como as práticas de manejo do solo, das culturas e dos fertilizantes influenciam a disponibilidade de P no solo ao longo do tempo (ROWE et al., 2015; RODRIGUES et al., 2016; LUKOWIAK; GRZEBISZ; SASSENATH, 2016).

3.3 ADUBAÇÃO FOSFATADA COMO ESTRATÉGIA DE ADUBAÇÃO DE SISTEMAS

Atualmente, uma das preocupações da sociedade moderna, é a sustentabilidade da agricultura, visando aumentar a produção de alimentos para atender as necessidades das gerações atual e futura, porém, diminuindo os impactos ambientais e mantendo a qualidade de vida. Para o desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis, a manutenção/melhoria da fertilidade do solo é essencial (AMADO, 2011), adotando estratégias de manejo que

mantenham a fertilidade do solo a níveis adequados, sem degradar o solo e os recursos hídricos (FAGERIA; BALIGAR; JONES, 1997; FOLLAIN et al., 2009). Dentro desses sistemas, a fertilidade do solo requer uma abordagem sistêmica e holística, onde a interação entre os atributos químicos, físicos e biológicos assume papel fundamental (NICOLODI; GIANELLO; ANGHINONI, 2008). Nesse contexto, surge o conceito “adubação de sistema de produção”, no qual, objetiva-se a adubação do sistema como um todo, ao invés de adubar uma única cultura (ALTMANN, 2012). Desse modo, o produto dessa interação reflete em maiores benefícios às culturas, do que os seus efeitos isolados (SÁ, 1993).

A antecipação da adubação fosfatada, como estratégia de adubação de sistemas, beneficia não só a cultura de verão, mas também a cultura antecessora, promovendo formação da palhada para o SPD, favorecendo a conservação do solo, a manutenção da umidade e a ciclagem de nutrientes (ALTMANN, 2012). A adubação antecipada também implica em redução do tempo nas paradas para o abastecimento da semeadora-adubadora, diminuição do número de conjuntos trator-semeadura e dos custos operacionais, possibilitando, desta forma, aumentar a receita líquida se comparado ao sistema tradicional (MATOS; SALVI; MILAN, 2006).

Associada ao SPD e rotação de culturas com espécies de plantas com boa capacidade de reciclar o P do solo, a antecipação da adubação fosfatada pode aumentar a disponibilidade de P para as culturas, mesmo em solos tropicais e subtropicais, com alta capacidade de adsorção de P. Pavinato e Ceretta (2004), verificaram que, em solos com teores muito altos de P disponível, a aplicação da adubação fosfatada na cultura de inverno visando a cultura de verão não afetou o rendimento do milho, mostrando-se viável, devido às facilidades operacionais da adubação em sistemas. Francisco; Câmara e Segatelli (2007) verificaram que a aplicação de P no capim-pé-de-galinha (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.) não implicou em efeitos negativos tanto na nutrição quanto no rendimento da soja. Resultados similares também foram observados por Pauletti et al. (2009) para as culturas de milho e soja cultivadas após a aveia preta fertilizada com P. Em sistema integrado de produção de grãos e forragens, na região dos Campos Gerais, a antecipação da adubação fosfatada com P de alta solubilidade em água + citrato neutro de amônio tem se mostrado promissora (GALETTO et al., 2014; GUERA, DA FONSECA; HARKATIN, 2020). Todavia, a antecipação da fertilização fosfatada é um tema complexo, considerando a capacidade do fertilizante fosfatado em garantir a liberação de P para a cultura de primavera-verão, bem como essa prática afeta as diferentes formas e labilidades do P no solo.

4 ARTIGO 1 – NUTRIÇÃO, RENDIMENTO DE GRÃOS E EFICIÊNCIA DE USO DE FÓSFORO PELO MILHO E SOJA, SOB ANTECIPAÇÃO DA FERTILIZAÇÃO FOSFATADA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

RESUMO

Na adubação de sistema, o fertilizante fosfatado requerido pela cultura de verão é parcial ou totalmente aplicado na cultura anterior de inverno. Essa prática, aliada ao sistema plantio direto (SPD), pode garantir adequados rendimentos das culturas e otimizar o processo operacional de semeadura da safra de verão, particularmente, no Sul do Brasil. Os objetivos deste trabalho foram avaliar os atributos nutrição mineral, rendimentos de grãos e de massa de matéria seca (MS), bem como a eficiência de uso do fósforo (EUP) das culturas de milho e soja, durante cinco anos, sob antecipação da fertilização fosfatada em SPD. O experimento foi conduzido no município de Tibagi-PR, em um Latossolo Vermelho Distrófico de textura franco argilo-arenosa. O delineamento experimental empregado foi o de blocos completos casualizados, com seis repetições e cinco tratamentos, a saber: antecipação de 100, 75, 50, 25 e 0% da adubação fosfatada. A dose total de P_2O_5 durante o ano, para todos os tratamentos, correspondeu a 90 kg ha^{-1} , na forma de superfosfato simples. Nutrição, MS, rendimento de grãos e a EUP pelo milho e soja foram avaliados. A antecipação da adubação fosfatada alterou a nutrição do milho e da soja, porém, os teores foliares dos macronutrientes se encontravam na faixa adequada para as culturas, não alterando MS e produtividade de grãos. Não houve aumento na produtividade de grãos do milho e da soja com a antecipação da adubação fosfatada. Para o milho, quando houve baixa disponibilidade hídrica durante o ciclo da cultura, a antecipação de 50% da fertilização fosfatada ocasionou maior EUP em relação à antecipação de 75% da adubação fosfatada. Para a soja, a antecipação da adubação fosfatada tendeu a diminuir a produtividade dos grãos e a EUP. Em condições de adequada fertilidade do solo e SPD estabilizado, a antecipação da fertilização fosfatada para milho e soja é viável, porém sem incrementos na produtividade de grãos das culturas.

Palavras-chave: *Zea mays* L., *Glycine max* (L.) Merril., nutrição mineral, superfosfato simples, adubação de sistemas, agricultura de baixo carbono.

ABSTRACT

In system fertilization, the phosphate fertilizer required by the summer crop is partially or totally applied in the previous winter crop. This practice, combined with the no-tillage system (NT), can guarantee adequate crop yields and optimize the operational sowing process of the summer crop, particularly in southern Brazil. The aims of this study were to evaluate the attributes of mineral nutrition, grain and dry matter (DM) yields, as well as the phosphorus use efficiency (PUE) of maize and soybean crops, for five years, under the phosphate fertilization anticipation in NT. The experiment was carried out in Tibagi-PR, in a dystrophic Oxisol with sandy clay loam texture. The experimental design used was complete randomized blocks, with six replications and five treatments, namely: anticipation of 100, 75, 50, 25 and 0% of phosphate fertilization. The total dose of P_2O_5 during the year, for all treatments, corresponded to 90 kg ha^{-1} , in the form of single superphosphate. Nutrition, DM, grain yield and PUE for maize and soybean were evaluated. The phosphate fertilization anticipation changed the maize and soybean nutrition; however, the leaf contents of macronutrients were in the appropriate range for the crops, without altering DM and grain yield. There was no increase in the maize and soybean grain yields with the phosphate fertilization anticipation. For maize, when there was low water availability during the crop cycle, the anticipation of 50% of phosphate fertilization

caused greater PUE compared to the anticipation of 75% of phosphate fertilization. For soybean, the phosphate fertilization anticipation tended to decrease grain yield and PUE. Under conditions of adequate soil fertility and stabilized NT, the phosphate fertilization anticipation for maize and soybean is feasible, but without increases in the crops grain yields.

Keywords: *Zea mays* L., *Glycine max* (L.) Merrill., mineral nutrition, single superphosphate, systems fertilization, low carbon agriculture.

4.1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é considerado um elemento essencial para as plantas, pois é um componente estrutural de enzimas, ácidos nucleicos e fosfolipídios, além de desempenhar um papel crucial nos processos metabólicos de suporte à vida vegetal (BUCHER et al., 2018). Nos solos agrícolas brasileiros tropicais e subtropicais, após a correção da acidez do solo, o baixo teor de P disponível é o fator mais limitante para o rendimento das culturas (FAGERIA, 1998; NOVAIS; SMITH, 1999). Isso torna a prática da fertilização fosfatada essencial para garantir altos rendimentos.

O uso do fosfato pelas culturas, proveniente dos fertilizantes inorgânicos, é muito baixo (BALIGAR; FAGERIA, HE, 2001; AMADO, 2011; CORDELL; WHITE, 2014), ficando entre 15-25% (ZANÃO JR. et al., 2020). Isso se deve à perda desse nutriente, principalmente devido à fixação aos coloides inorgânicos do solo e à erosão (NOVAIS; SMYTH, 1999, DELGADO et al., 2016). Assim, um dos principais desafios dos sistemas de produção sustentáveis é aumentar a eficiência de uso de P (EUP) (CORDELL; NESET, 2014; DELGADO et al., 2016; PANG et al., 2018), diminuindo assim a demanda global por fertilizantes fosfatados e postergando o esgotamento das reservas minerais desse nutriente.

Milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* (L.) Merrill.) são as duas principais espécies cultivadas durante a safra de primavera-verão no Sul do Brasil (CONAB, 2020), em rotação/sucessão com aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) e trigo (*Triticum aestivum* L.) na safra de outono-inverno, manejados em sistema plantio direto (SPD). A fertilização fosfatada para essas culturas é tradicionalmente realizada no momento da semeadura, aplicada predominantemente ao lado e abaixo do sulco de semeadura (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2017). No entanto, alguns trabalhos em SPD (FRANCISCO, CÂMARA; SEGATELLI, 2007; GALETTO et al., 2014; GUERA; DA FONSECA; HARKATIN, 2020; ZANELLA et al., 2020) obtiveram sucesso na antecipação da fertilização fosfatada durante o cultivo da safra outono-inverno, consistindo-se em uma estratégia de adubação de sistemas (ALTMANN, 2012). O SPD favorece a antecipação da fertilização fosfatada, pois os resíduos

vegetais presentes neste sistema podem (i) aumentar a fração de P orgânico lábil do solo (OLIBONE; ROSOLEM, 2010; NOACK et al., 2012; RODRIGUES et al., 2016), (ii) liberar ácidos orgânicos que irão competir com fosfato pelos sítios de adsorção nos colóides inorgânicos do solo; e (iii) resultar na diminuição da adsorção de P (FRANCHINI et al., 1999; ANDRADE et al., 2003).

A antecipação da adubação fosfatada para o milho e soja apresenta as seguintes vantagens: (i) maior flexibilidade no uso de máquinas e mão de obra; (ii) semeadura mais rápida da safra de verão, possibilitando o aproveitamento da umidade ideal do solo; (iii) redução dos custos operacionais; (iv) menores danos às sementes, devido à diminuição da quantidade de fertilizantes na linha de semeadura; (v) aumento do desenvolvimento vegetativo da cultura de cobertura, aumentando a quantidade de resíduo cultural; e (vi) ciclagem de nutrientes mais eficiente, que pode aumentar a EUP, melhorando a rentabilidade do produtor (PAVINATO; CERETTA, 2004; MATOS; SALVI; MILAN, 2006).

Porém, a antecipação da fertilização fosfatada é uma questão complexa, considerando a capacidade do fertilizante fosfatado em garantir a liberação de P para a safra primavera-verão. Ainda assim, é considerada uma prática de alto risco, exigindo mais pesquisas em diferentes situações de solo, cultivo e sistemas de produção. Portanto, os objetivos deste trabalho foram avaliar a nutrição mineral, rendimentos de grãos e de massa de matéria seca, bem como a EUP das culturas de milho e soja, durante cinco anos, sob antecipação da fertilização fosfatada em SPD.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Descrição da Área, Delineamento Experimental e Tratamentos

O experimento foi instalado na Estância Vendramin (latitude: 24°57'09"; longitude: 50°23'44"; altitude média: 786 m), município de Tibagi (PR). O clima predominante na região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfb - clima temperado, caracterizado por apresentar temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C (mesotérmico), com verões frescos, temperatura média no mês mais quente acima de 22°C e sem estação seca definida (IAPAR, 1994).

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho Distrófico, manejado em SPD. Por ocasião da instalação do experimento (setembro de 2012), o solo possuía os seguintes atributos na camada de 0-10 cm: pH (CaCl₂) 5,38; concentrações de cálcio (Ca⁺²), magnésio

(Mg⁺²) e potássio (K⁺) trocáveis de 33,4; 26,4 e 2,1 mmol_c dm⁻³, respectivamente; acidez potencial (H+Al⁺³) de 36,8 mmol_c dm⁻³; saturação por bases (V) de 63%; teores de P disponível (P-resina) de 15,6 mg dm⁻³; carbono orgânico total (COT) de 18,5 g dm⁻³ e 294,1; 80,4 e 625,6 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente.

O delineamento experimental adotado foi em blocos completos casualizados com seis repetições e cinco tratamentos: antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) do P₂O₅, aplicado por ocasião da semeadura da cultura de outono-inverno. A dose de 100% correspondeu 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, aplicado na forma de superfosfato simples (180 g kg⁻¹ de P₂O₅). Cada parcela possuía área total de 2730 m² (66,67 x 40,95 m).

A aplicação do fertilizante fosfatado ocorreu em sulco lateral e abaixo do sulco de semeadura, à profundidade de 5 cm do solo durante a semeadura da cultura de outono-inverno; e à profundidade de 7 cm durante a semeadura da cultura de primavera-verão.

4.2.2 Descrição e Adubação das Culturas

Todas as espécies de plantas cultivadas durante o desenvolvimento do projeto, com seus respectivos híbridos/cultivares, data de semeadura, data da antecipação do fertilizante fosfatado, espaçamento entrelinhas e população final de plantas estão descritas na Tabela 4.1. A precipitação pluviométrica acumulada mensal durante o período experimental (2012 a 2017) está presente na Figura 4.1 (TSUKAHARA et al., 2017).

Tabela 4.1 – Híbridos de milho, cultivares de trigo, aveia preta e soja com suas respectivas datas de semeadura e antecipação do fertilizante fosfatado, espaçamentos e população final de plantas cultivadas durante o período experimental (setembro/2012 a maio/2017).

Cultura	Híbrido/ Cultivar	Data Semeadura	Data Antecipação do P	Espaçamento (cm)	População final de plantas (plantas ha ⁻¹)
Milho	P32R22H	02/10/2012	02/09/2012	45	71035
Trigo	Quartzo	13/06/2013	-	17	-
Soja	P95Y21	12/11/2013	13/06/2013	45	294550
Aveia Preta	Embrapa 29	30/04/2014	-	17	-
Milho	P32R22H	25/08/2014	30/04/2014	45	72160
Aveia Preta	Embrapa 29 (Garoa)	25/05/2015	-	17	-
Milho	P3456	16/09/2015	25/05/2015	45	72024
Trigo	TB Sinuello	01/07/2016	-	17	-
Soja	P95R51	01/12/2016	01/07/2016	50	315555

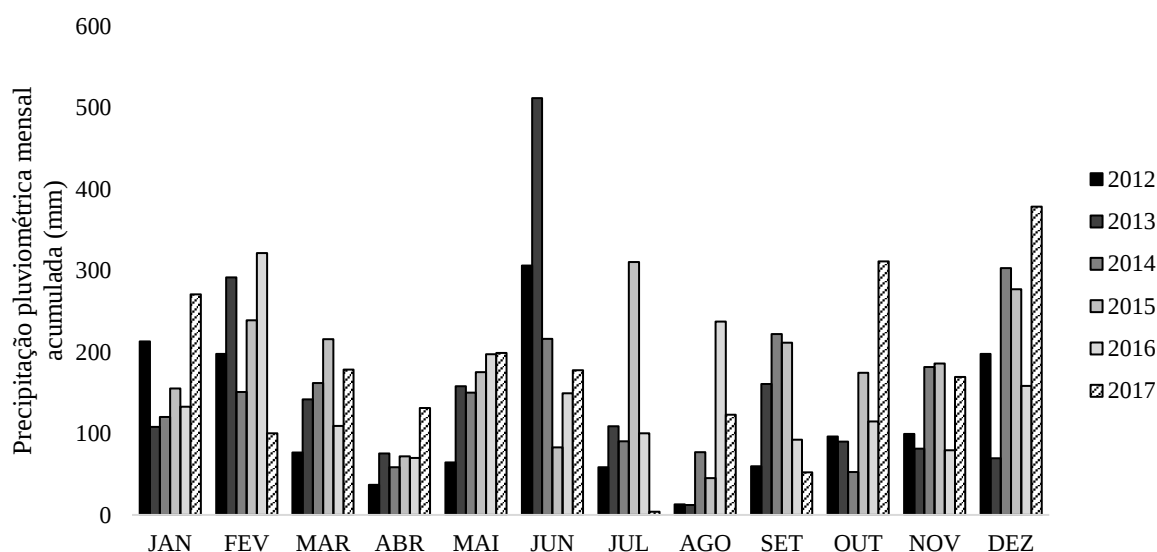


Figura 4.1 – Precipitação pluviométrica mensal acumulada (mm) durante o período experimental (2012 a 2017), no município de Tibagi-PR.

Fonte: TSUKAHARA et al. (2017).

A cultura de aveia preta foi utilizada como planta de cobertura do solo, sendo dessecada pelo menos 20 dias antes da semeadura da cultura de primavera-verão. Após a colheita do milho, na safra de 2014/2015, houve o cultivo de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) segunda safra, apenas como estratégia de rotação de culturas. Essa cultura não foi submetida aos tratamentos, não havendo, portanto, a necessidade de avaliação do seu estado nutricional.

O aporte de nitrogênio (N) e potássio (K₂O) durante o período experimental, bem como o tipo de fertilizante e o estágio da cultura em que foi realizada a adubação, estão descritos na Tabela 4.2. A adubação com N e K sempre foi realizada em área total a lanço, na superfície do solo. Ainda, não foi realizada calagem durante o período experimental. Todas as práticas culturais e manejo fitossanitário necessários, durante a condução do experimento foram realizados de acordo com as recomendações técnicas de cada cultura.

4.2.3 Coleta e Preparo das Amostras

Para a cultura do milho, visando proceder à diagnose foliar, coletou-se, no estágio R1 (RITCHIE; HANWAY, 1982), o terço médio da folha (30 folhas por parcela) imediatamente abaixo e oposta à espiga. O rendimento de massa de matéria seca (MS) da parte aérea foi avaliado pela coleta, em cada parcela, da parte aérea das plantas (rente ao solo) presentes em 1,0 m linear, no estágio R6 (RITCHIE; HANWAY, 1982). No ponto de colheita dos grãos, coletou-se em cada parcela, todas as espigas das plantas presentes em 4 linhas de 3 m, visando

a determinação do rendimento de grãos. A massa dos grãos, para fins de avaliação da produtividade, foi corrigida para 130 g kg⁻¹.

Tabela 4.2 – Aporte de nutrientes, tipo de fertilizante e estágio das culturas no momento da adubação com fertilizantes contendo nitrogênio (N) e potássio (K₂O), durante o período experimental (setembro/2012 a maio/2017).

Cultura	N		K ₂ O	
	Ureia ⁽¹⁾ (kg ha ⁻¹)	Estádio de aplicação	Cloreto de potássio ⁽²⁾ (kg ha ⁻¹)	Estádio de aplicação
Milho	250	V4 ⁽³⁾	100	Pré semeadura
Trigo	100	20 ⁽⁴⁾	45	Pré semeadura
Soja ⁽⁵⁾	-	-	100	Pré semeadura
Aveia preta	36	20 ⁽⁴⁾	12	20 ⁽³⁾

⁽¹⁾ Ureia: 45% de N; ⁽²⁾ Cloreto de potássio: 60% de K₂O; ⁽³⁾ V4: 4 folhas completamente desenvolvidas, segundo escala de Ritchie e Hanway (1982); ⁽⁴⁾ 20: início do afilamento, segundo escala de Zadoks; Chang e Konzak. (1974); ⁽⁵⁾ A soja recebeu tratamento de sementes com 3 g ha⁻¹ de cobalto e 25 g ha⁻¹ de molibdênio e inoculadas com estirpes selecionadas de *Bradyrhizobium japonicum* (200 g de inoculante por 50 kg de sementes).

Para o trigo, no estágio 9.0 (ZADOKS; CHANG; KONZAK, 1974), foram coletadas todas as plantas presentes em 1 metro linear em cada parcela, para determinação da MS. No momento da colheita dos grãos de trigo (no estágio 9.4, segundo ZADOKS; CHANG; KONZAK, 1974), todas as plantas foram colhidas em 4 linhas de 3 m cada, para determinar a produtividade dos grãos. A massa dos grãos, para fins de avaliação da produtividade, foi corrigida para 130 g kg⁻¹.

Para a cultura da soja, no estágio R1 (FEHR; CAVINESS; 1977), foram coletados 30 trifólios por parcela, sendo a folha amostrada, o terceiro trifólio, do ápice para a base. A MS foi avaliada pela coleta de todas as plantas de soja presentes em 1,0 m linear, no estágio R7 (FEHR; CAVINESS; 1977). Já para determinação da produtividade de grãos, foram colhidas todas as plantas em 4 linhas de 3 metros, em cada parcela, no estágio R8 (FEHR; CAVINESS; 1977). A massa dos grãos, para fins de avaliação da produtividade, foi corrigida para 130 g kg⁻¹.

Para a aveia-preta, com o objetivo de determinar a MS, foi coletado 1 m² de parte aérea das plantas em cada parcela, por ocasião do início da floração (estádio 5.0, segundo escala de ZADOKS; CHANG; KONZAK, 1974).

Depois de colhidas, as amostras foram acondicionadas em sacos de papel e encaminhadas ao laboratório para procedimentos de lavagem, secagem, moagem e determinações analíticas. As amostras foram lavadas em água deionizada, secas em estufa a 65°C com circulação forçada de ar até atingir massa constante, moídas em moinho tipo “Wiley” equipado com malha de 0,85 mm e armazenadas em recipientes plásticos tampados até a realização das análises químicas.

4.2.4 Análises dos Nutrientes nas Plantas

As concentrações de N foram determinadas mediante digestão sulfúrica e leitura pelo método semi-micro-Kjeldahl. As determinações das concentrações de P, K e enxofre (S) foram realizadas por meio de digestão nítrico-perclórica e leitura por espectrofotometria de absorção molecular para P; espectrofotometria de emissão em chama para K; e turbidimetria para S. Todas as análises químicas de plantas foram realizadas mediante o emprego dos métodos sugeridos por Malavolta; Vitti e Oliveira (1997). As determinações de nutrientes nas plantas foram realizadas no Laboratório de Nutrição de Plantas e Laboratório Multiusuário da UEPG.

4.2.5. Análises Estatísticas

Todos os atributos avaliados foram submetidos à análise estatística univariada de acordo com o modelo de experimento em blocos completos casualizados, com cinco tratamentos e seis repetições. No caso de F significativo ($P < 0,05$), foi aplicado o teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Para comparar o efeito da antecipação da adubação fosfatada sobre a produtividade de grãos das culturas, durante as cinco safras avaliadas, foi utilizado o delineamento em blocos completos casualizados em esquema de parcelas subdivididas no tempo. Os dados de produtividade de grãos foram transformados em produtividades relativas, tomando-se como referências (100%) as produtividades de grãos do tratamento com 100% da adubação antecipada, para comparar as respostas obtidas nos cultivos de milho e de soja, respectivamente. Todas as análises estatísticas foram realizadas mediante o emprego do programa de computador SAS Versão 9.1 (SAS, 2004).

Para o cálculo de EUP, utilizou-se a medida de rendimento parcial dos fatores (ROBERTS; JOHNSTON, 2015), onde dividiu-se a produtividade acumulada de grãos das culturas por quantidade de P_2O_5 acumulado em cada safra, obtendo-se kg de grão produzido para cada kg de P_2O_5 aplicado. Ainda, considerou-se o tratamento de 0% da antecipação da adubação fosfatada (sem antecipação) como 100% da produtividade de grãos, para comparações na produtividade com os demais tratamentos.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Produtividade das Culturas de Outono-inverno

A MS da aveia preta foi afetada pela antecipação da adubação fosfatada em ambas as safras (Tabela 4.3). A antecipação de 100% (T1) e 50% (T3) da adubação fosfatada apresentou menores MS nas safras de 2014 e 2015 (Tabela 4.3). Diferentemente, Galetto et al. (2014) observaram efeito da antecipação da fertilização fosfatada na MS da aveia preta, onde a fonte solúvel de P proporcionou a maior MS da aveia preta no primeiro ano de cultivo.

Tabela 4.3 - Rendimento de massa de matéria seca (MS) da parte aérea da aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.), nas safras 2014 e 2015, e rendimento de MS e grãos de trigo (*Triticum aestivum* L.), nas safras 2013 e 2016, cultivados sob antecipação da fertilização fosfatada, em sistema plantio direto.

Tratamentos ⁽¹⁾	Aveia preta		Trigo			
	MS		MS		Rendimento de grãos	
	2014	2015	2013	2016	2013	2016
T1	4576 C ⁽²⁾	5335 B	9407 A	9671 A	4030 A	7949 A
T2	7561 A	7705 A	8571 A	8694 A	3941 A	6760 AB
T3	4073 C	5187 B	8589 A	8192 A	3797 A	6263 B
T4	6759 AB	7817 A	8914 A	8184 A	3846 A	5995 B
T5	5744 B	7882 A	8757 A	8208 A	3948 A	5528 B

⁽¹⁾ Antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada.

⁽²⁾ Médias seguidas por letra iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A ausência de P via fertilizante mineral no momento da semeadura (T5) não influenciou a MS da aveia preta. Essa cultura, utilizada como cobertura do solo em SPD, é considerada uma das principais plantas recicladoras de P, sendo eficiente na utilização de P proveniente de resíduos culturais (TIECHER et al., 2012; CALEGARI et al., 2013).

Apesar da antecipação da adubação fosfatada (100% e 50% da antecipação da adubação) reduzirem MS da aveia preta, a MS média nas safras de 2014 e 2015 foi de 5742 kg ha⁻¹ e 6785 kg ha⁻¹, respectivamente. Esses valores são semelhantes aos citados por Restelatto et al. (2013), que obtiveram o maior rendimento de MS da aveia preta, de 6000 kg ha⁻¹, sob a aplicação de 187 kg N ha⁻¹.

Para o trigo, apesar da antecipação da adubação fosfatada não ter alterado o rendimento de MS (Tabela 4.3), este foi elevado, contribuindo para o aporte de carbono no sistema. Apesar do trigo não possuir a mesma capacidade de reciclagem de P como a aveia preta (TIECHER et al., 2012), os nutrientes fornecidos via mineralização dos resíduos vegetais da cultura

antecessora (milho) e a fertilização de manutenção de N e K na cultura do trigo, podem ter resultado em alto rendimento de MS, não sendo afetado pelos tratamentos.

Na safra de 2013, o rendimento de grãos do trigo não foi afetado pelo tratamento (Tabela 4.3). Porém, na safra 2016, a antecipação de 100% da adubação fosfatada (T1) resultou no maior rendimento de grãos, em comparação com a antecipação de 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada (Tabela 4.3). A antecipação da adubação fosfatada pode ter favorecido a nutrição potássica para essas gramíneas devido à presença de gesso agrícola na composição do fertilizante superfosfato simples. Ao antecipar a adubação fosfatada, ocorre a dissolução do fertilizante e a migração do gesso no perfil do solo, melhorando o ambiente radicular das culturas, através do suprimento de nutrientes (Ca e S) e diminuição da toxicidade de Al (CAIRES; JORIS; CHURKA, 2011), bem como pela melhor agregação e estabilidade dos agregados do solo, favorecendo a formação de bioporos e a infiltração de água no solo (ZOCA; PENN, 2017). Isso provavelmente favoreceu o melhor desenvolvimento do sistema radicular dessas culturas, possibilitando a absorção do K presente nas camadas subsuperficiais do solo, uma vez que as gramíneas possuem maior facilidade de absorver cátions monovalentes, como o K^+ , devido a menor capacidade de troca catiônica radicular (MARSCHNER, 1995).

No entanto, o rendimento médio do grão de trigo foi de 3912 kg ha⁻¹ e 6499 kg ha⁻¹, nas safras 2013 e 2016, respectivamente, superando o rendimento de grãos desta safra no Estado do Paraná em 110% e 106%, respectivamente (CONAB, 2013; CONAB, 2016). Essa diferença no rendimento entre as duas safras foi devido à baixa disponibilidade hídrica coincidindo com a fase inicial de floração do trigo na safra 2013 (apenas 13 mm no mês de agosto/2013 – Figura 4.1).

4.3.2 Nutrição Mineral do Milho

O rendimento de MS da parte aérea do milho não foi afetado pela antecipação da fertilização fosfatada nas três safras (Tabela 4.4). No entanto, pode-se observar que a MS média foi maior na safra 2015/2016. A aveia preta, cultura antecessora ao milho, além de ser considerada uma das principais plantas recicladoras de P (TIECHER et al., 2012; CALEGARI et al., 2013) também apresenta boa capacidade de reciclagem dos demais nutrientes (CRUSCIOL et al., 2008). Dessa forma, a mineralização dos resíduos culturais da aveia preta podem ter fornecido boas quantidades de nutrientes para a cultura do milho, favorecendo o rendimento de MS da parte aérea do milho, durante o decorrer do experimento.

Tabela 4.4 – Rendimento de massa de matéria seca da parte aérea (MS, em kg ha⁻¹) e concentrações (g kg⁻¹) de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e enxofre (S) na diagnose foliar do milho cultivado nas safras 2012/2013, 2014/2015 e 2015/2016, sob antecipação da adubação fosfatada, em sistema plantio direto.

Tratamentos ⁽¹⁾	MS	N	P	K	S
	kg ha ⁻¹	g kg ⁻¹			
2012/2013					
T1	16648 A ⁽²⁾	26,31 A	2,33 A	21,52 A	1,62 A
T2	15948 A	23,17 A	2,54 A	24,34 A	1,95 A
T3	14735 A	25,63 A	2,21 A	21,25 A	1,53 A
T4	15983 A	27,1 A	2,43 A	24,95 A	1,63 A
T5	14945 A	24,96 A	2,60 A	24,55 A	1,78 A
2014/2015					
T1	17262 A	32,50 AB	2,42 A	26,07 BC	1,56 AB
T2	17508 A	34,51 A	2,54 A	24,58 C	1,95 A
T3	17132 A	32,38 AB	2,21 A	26,90 B	1,53 B
T4	17094 A	30,64 B	2,43 A	30,81 A	1,63 AB
T5	17301 A	32,85 A	2,60 A	32,72 A	1,78 AB
2015/2016					
T1	18102 A	31,12 A	2,59 A	31,89 A	1,79 A
T2	18133 A	32,27 A	2,46 A	30,03 AB	1,61 A
T3	18442 A	31,61 A	2,68 A	29,61 AB	1,57 A
T4	17885 A	32,69 A	2,59 A	29,10 AB	1,74 A
T5	17585 A	31,46 A	2,49 A	28,43 B	1,57 A

⁽¹⁾ Antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada.

⁽²⁾ Médias seguidas por letra iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na safra 2012/2013, as concentrações de N, P, K e S na diagnose foliar do milho não foram afetadas pela antecipação da adubação fosfatada (Tabela 4.4), atingindo concentrações médias de 25,43; 2,42; 23,32 e 1,64 g kg⁻¹, respectivamente (Tabela 4.4). Para esta cultura, apenas a concentração de N está ligeiramente abaixo da faixa considerada adequada (27 g kg⁻¹) (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2017), sem reflexos negativos no rendimento de MS e grãos de milho.

Para o milho, na safra 2014/2015, apenas as concentrações de P na diagnose foliar do milho não foram afetadas pela antecipação da adubação fosfatada (Tabela 4.4). No entanto, a antecipação da adubação fosfatada alterou, de modo diferenciado as concentrações de N, K e S na diagnose foliar do milho (Tabela 4.4). A baixa disponibilidade hídrica durante a fase do florescimento da cultura (52,6 mm no mês de outubro/2014 – Figura 1.1) pode ter influenciado na absorção desses nutrientes, em função dos tratamentos. No entanto, o efeito nulo dos tratamentos sobre as concentrações de P pode ser porque a disponibilidade desse nutriente é mais afetada pelo manejo do solo, teor de MOS, rotação de culturas, microbiota do solo

(PAVINATO; ROSOLEM, 2008) do que pelas condições climáticas, como temperatura e precipitação pluviométrica. Apesar dessas diferenças entre os tratamentos, as concentrações de N, P, K e S, nesta safra, foram de 32,58; 2,44; 28,22 e 1,69 g kg⁻¹, respectivamente, ficando dentro da faixa considerada adequada para a cultura (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2017).

Na safra de milho 2015/2016, as concentrações de N, P e S não foram afetadas pela antecipação da fertilização fosfatada (Tabela 4.4), com concentrações médias de 31,83; 2,56 e 1,66 g kg⁻¹, respectivamente. Para K, a concentração na folha diagnóstica foi afetada pelos tratamentos, onde a antecipação de 100% da adubação fosfatada (T1) aumentou a concentração deste nutriente, em comparação com a aplicação total da adubação fosfatada no verão (T5) (Tabela 4.4). Apesar das mudanças nas concentrações, todos os nutrientes ficaram dentro da faixa considerada adequada para a cultura (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2017), resultando em altos rendimentos de MS e grãos, em todas as safras.

Importante ressaltar que a aveia preta, cultivada anteriormente à cultura do milho, foi utilizada como cobertura do solo, ou seja, não houve exportação de nutrientes. Por ser considerada uma das principais plantas recicladoras de P (TIECHER et al., 2012) e demais nutrientes (BOKERT et al., 2003; CRUSCIOL et al., 2008), a mineralização dos resíduos culturais da aveia preta, em sincronia com a maior demanda de nutrientes pela cultura sucessora, pode fornecer boas quantidades de nutrientes, contribuindo para o uso mais eficiente dos nutrientes nos sistemas de produção agrícola (CAIRES et al., 2017).

4.3.3 Nutrição Mineral da Soja

A MS da parte aérea da soja não foi afetada pela antecipação da fertilização fosfatada nas duas safras avaliadas (Tabela 4.5). Guera, Da Fonseca e Harkatin (2020), trabalhando com fertilização antecipada de fontes e doses de fosfatos aplicadas anualmente na superfície do solo, observaram aumentos lineares na MS da soja devido às doses de P. Apesar das diferenças nas concentrações de P na diagnose foliar, na safra 2016/2017, devido à antecipação da fertilização fosfatada (Tabela 4.5), tais diferenças na absorção de P não se refletiram na MS da soja. Esses resultados podem ser caracterizados pelo excelente consumo de P pela planta (GALETTTO et al., 2014), pois não houve resposta na MS.

Tabela 4.5 – Rendimento de massa de matéria seca da parte aérea (MS, em kg ha⁻¹) e concentrações (g kg⁻¹) de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e enxofre (S) na diagnose foliar da soja cultivada nas safras 2013/2014 e 2016/2017 sob antecipação da adubação fosfatada, em sistema de plantio direto.

Tratamentos ⁽¹⁾	MS	N	P	K	S
	kg ha ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----			
2013/2014					
T1	6107 A ⁽²⁾	47,61 B	4,15 A	38,02 A	2,92 B
T2	5516 A	49,15 AB	3,61 A	37,85 A	3,52 A
T3	5938 A	49,39 AB	3,94 A	39,06 A	2,72 B
T4	5132 A	54,24 A	3,42 A	37,76 A	3,61 A
T5	5836 A	51,44 AB	3,65 A	40,27 A	3,46 A
2016/2017					
T1	7856 A	51,67 A	2,75 BC	23,66 A	3,02 A
T2	8553 A	49,95 A	3,27 AB	26,27 A	3,32 A
T3	8770 A	50,30 A	2,56 C	23,33 A	2,98 A
T4	8343 A	49,59 A	3,32 A	24,42 A	3,28 A
T5	7546 A	47,90 A	2,53 C	24,84 A	2,94 A

⁽¹⁾ Antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada.

⁽²⁾ Médias seguidas por letra iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na safra 2013/2014, as concentrações de P e K na folha diagnóstica da soja não foram afetadas pela antecipação da fertilização fosfatada (Tabela 4.5). Para as concentrações de N, a antecipação de 100% da adubação fosfatada (T1) resultou nas menores concentrações desse nutriente (Tabela 4.5). Em relação às concentrações de S, a antecipação de 75% (T2), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada resultaram em maiores concentrações desse nutriente, em comparação com a antecipação de 100% (T1) e 50% (T3) da adubação fosfatada (Tabela 4.5). No entanto, as concentrações médias de N, P, K e S foram 50,37; 3,75; 38,59 e 3,25 g kg⁻¹, respectivamente, ficando dentro da faixa considerada adequada e, em alguns casos, como K, com consumo de luxo (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2017).

A antecipação da fertilização fosfatada influenciou apenas a concentração de P na folha diagnóstica da soja, na safra 2016/2017, onde a antecipação de 75% da adubação fosfatada (T2) foi equivalente à antecipação de 25% do P (T4) e superior aos demais tratamentos (Tabela 4.5). As concentrações médias de N, P, K e S foram 49,88; 2,89; 24,5 e 3,11 g kg⁻¹, respectivamente, ficando dentro da faixa considerada adequada para a cultura (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2017), refletindo no alto rendimento de grãos da cultura. Ainda, a exportação de nutrientes pelos grãos de trigo (cultura antecessora à soja) pode ter influenciado na resposta de absorção de nutrientes pela soja, em função da antecipação da adubação fosfatada.

4.3.4 Rendimento de Grãos

Para o milho, o rendimento médio de grãos foi 14565 kg ha⁻¹, 12325 kg ha⁻¹ e 14380 kg ha⁻¹, nas safras 2012/2013, 2014/2015 e 2015/2016, respectivamente, superando em 79%; 43% e 79% o rendimento médio de milho no Estado do Paraná, nas respectivas safras (CONAB, 2013; CONAB, 2015; CONAB, 2016). Nas safras 2012/2013 e 2015/2016, o rendimento de grãos não foi afetado pela antecipação da fertilização fosfatada (Figura 4.2). Galetto et al., (2014) também não observaram os efeitos da antecipação da fertilização fosfatada aplicada na superfície do solo sobre o rendimento de grãos do milho, atribuindo tal resultado, entre outros motivos, à precipitação adequada ao longo de todo o ciclo da cultura. Pavinato e Ceretta (2004) avaliando a antecipação da adubação com P e K na sucessão de trigo/milho, observaram baixa probabilidade de resposta no rendimento de grãos à adubação com P e K em solo com altos teores destes nutrientes, mostrando que, nestas condições, a antecipação da adubação na cultura no inverno, pode ser justificada pelas facilidades operacionais da adubação em sistemas.

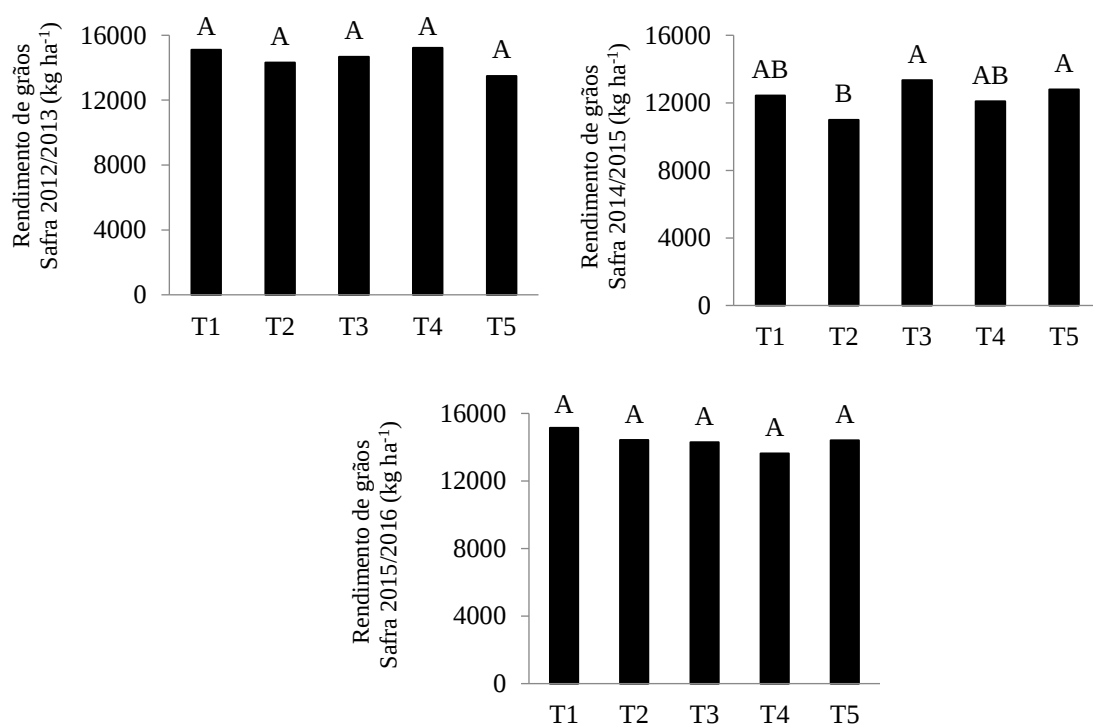


Figura 4.2 – Rendimento de grãos de milho cultivado sob a antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada em sistema plantio direto. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Apenas na safra 2014/2015, o rendimento de grãos do milho foi afetado pela antecipação da fertilização fosfatada, onde os tratamentos com antecipação de 50% (T3) e não antecipação (T5) da adubação apresentaram maior rendimento de grãos em relação à antecipação de 75% da adubação (T2) (Figura 4.2). Nesta safra, ocorreu um período de restrição hídrica (52,6 mm em outubro/2014, sendo 44% abaixo da precipitação média para o mês de outubro nos dois anos anteriores – Figura 4.1), coincidindo com o início da floração da cultura, refletindo no rendimento de grãos e apresentando diferença significativa entre os tratamentos. Apesar da antecipação da adubação fosfatada não aumentar a produtividade de grãos do milho, em comparação ao tratamento convencional (T5) (Figura 4.2), é possível antecipar a fertilização fosfatada, para o milho. A antecipação garantiria bons rendimentos de grãos, mesmo que ocorram condições climáticas adversas para o desenvolvimento ideal da cultura.

Para a soja, o rendimento médio de grãos foi de 4321 kg ha⁻¹ e 5788 kg ha⁻¹ nas safras 2013/2014 e 2016/2017, respectivamente, superando o rendimento de grãos da soja no Estado do Paraná em 47% e 55%, nas respectivas safras (CONAB, 2014; CONAB, 2017). Somente na safra 2016/2017, o rendimento de grãos foi afetado pela antecipação da fertilização fosfatada, onde a antecipação de 75% (T2), 25% (T4) e 0% (T5) do P apresentaram os maiores rendimentos de grãos (Figura 4.3), havendo uma tendência de que, ao aumentar o potencial produtivo da cultura, como ocorreu na safra 2016/2017, em comparação com a safra 2013/2014, a antecipação da adubação fosfatada reduz o rendimento de grãos da soja, em comparação com o tratamento convencional (T5).

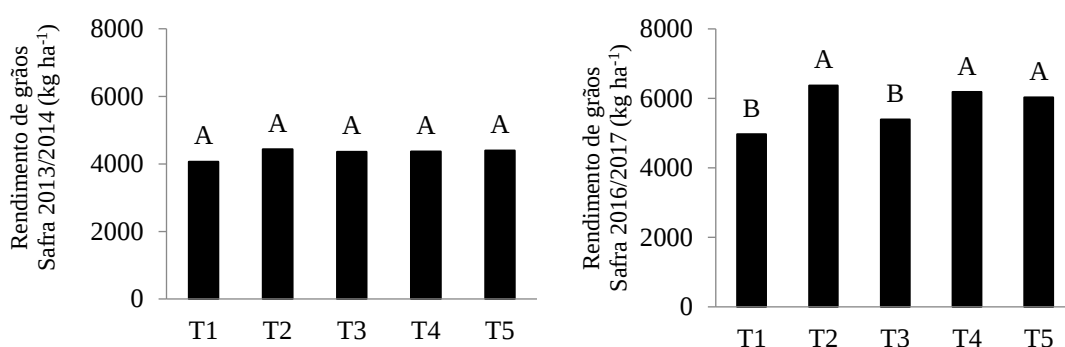


Figura 4.3 – Rendimento de grãos de soja cultivada sob a antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Zanella et al. (2020), avaliando apenas uma safra, não observaram diferença no rendimento de grãos de soja em função da antecipação da aplicação do fertilizante. De maneira similar, Galetto et al. (2014) não observaram diferença no rendimento de grãos da soja,

considerando a antecipação da fertilização fosfatada e doses de P, na segunda safra de primavera-verão (primeira safra para soja) de avaliação do experimento. No entanto, Guera, Da Fonseca e Harkatin (2020), dando prosseguimento ao experimento avaliado por Galetto et al. (2014), observaram diferença entre os tratamentos para o rendimento de grãos da soja na quarta safra de primavera-verão (segunda safra para soja), com aumento linear do rendimento em função das doses de P. Nosso experimento teve uma resposta semelhante, onde, ao longo do tempo, a soja respondeu de forma diferente à antecipação da fertilização fosfatada, mesmo em condições edafoclimáticas adequadas em ambas as safras. A reciclagem de nutrientes pelas plantas de cobertura do solo (TIECHER et al., 2012) e a maior distribuição horizontal do P com a aplicação do fertilizante fosfatado na linha de semeadura das culturas de outono-inverno (PAULETTI et al., 2009) podem ter favorecido a absorção de nutrientes pela soja, refletindo no rendimento de grãos, apesar da antecipação da adubação fosfatada não ter aumentado o rendimento de grãos da soja.

4.3.5 Rendimento de Grãos Relativo e Eficiência de Uso de Fósforo

Não houve interação entre a antecipação da adubação fosfatada e os anos agrícolas (safras) avaliados. A antecipação da adubação fosfatada não afetou o rendimento relativo de grãos das culturas de primavera-verão durante as cinco safras (Figura 4.4). No entanto, o ano agrícola afetou o rendimento relativo de grãos, e o ano 5 (safra 2016/2017), correspondente à soja, apresentou o maior rendimento relativo de grãos, em relação às demais culturas. A deposição anual de fertilizante fosfatado na linha de semeadura associada à ciclagem de nutrientes e a liberação de ácidos orgânicos de resíduos vegetais que ocorre no SPD (FRANCHINI et al., 1999; ANDRADE et al., 2003) podem ter diminuído a adsorção de P no solo, mantendo, ao longo do tempo, níveis médios a altos de P disponível no solo para as plantas. Além disso, para uma cultura como a soja, que geralmente requer mais P do que as não leguminosas (SPRAINT, 1999), principalmente devido à fixação biológica de nitrogênio (TAIZ; ZEIGER, 2004), o aumento da disponibilidade de P no solo pode ter maior efeito na nutrição e rendimento da cultura.

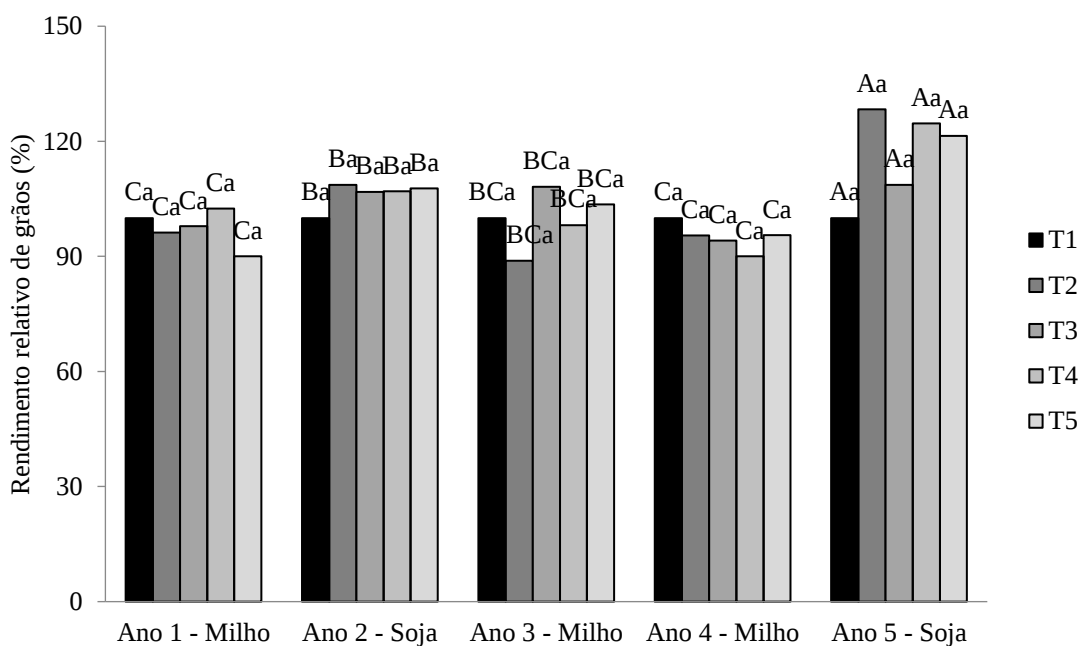


Figura 4.4 – Rendimento relativo de grãos (%) das culturas de verão, nas safras 2012/2013 (Ano 1), 2013/2014 (Ano 2), 2014/2015 (Ano 3), 2015/2016 (Ano 4) e 2016/2017 (ano 5), submetidas à antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada. Letras maiúsculas comparam anos agrícolas no mesmo modo de aplicação do fertilizante fosfatado e letras minúsculas, modos de aplicação do fertilizante fosfatado no mesmo ano agrícola.

A cultura do milho apresentou diferença na EUP apenas na safra 2014/2015, onde a antecipação de 50% da adubação fosfatada (T3) foi mais eficiente na utilização do P aplicado do que a antecipação de 75% da adubação fosfatada (T2) (Tabela 4.6). A safra 2014/2015 foi a qual ocorreu baixa disponibilidade hídrica durante o início do florescimento do milho (Figura 4.1). De maneira similar, Pavinato et al. (2017) constataram que a maior EUP foi obtida quando a produtividade de grãos do milho foi restringida pela baixa precipitação pluviométrica. Segundo esses autores, é esperado maior efeito do fertilizante fosfatado no rendimento do milho sob condições de baixa precipitação pluviométrica, porque a difusão do P do solo para a superfície da raiz é limitada em condições de solo muito seco, e o sistema radicular é menos capaz de explorar novas zonas de P disponível no solo (LAMBERS et al., 2006).

Para a soja, a antecipação de 100% da adubação fosfatada apresentou menor EUP nas duas safras avaliadas (Tabela 1.6), sendo que na safra 2016/2017, a antecipação de 50% da adubação fosfatada também reduziu a EUP (Tabela 1.6). Isso demonstra que a antecipação da adubação fosfatada, em pelos menos 50%, principalmente com maior potencial produtivo da cultura (como ocorreu na safra 2016/2017), pode reduzir a produtividade de grãos, bem como a EUP pela soja. Por ser uma leguminosa que realiza fixação biológica de N, a soja geralmente

requer mais P do que as não leguminosas (SPRAINT, 1999). Dessa forma, quando aplicado de forma antecipada, pode ter ocorrido baixa disponibilidade de P para a soja, refletindo na produtividade dos grãos e na EUP.

Tabela 4.6 - Eficiência de uso do fósforo - EUP (kg de grãos produzidos para cada kg de P_2O_5 aplicado) para milho e soja, considerando a antecipação da adubação fosfatada, nas cinco safras avaliadas.

Tratamentos (1)	Milho	Milho	Milho	Soja	Soja
	90 kg ha ⁻¹ P_2O_5	270 kg ha ⁻¹ P_2O_5	360 kg ha ⁻¹ P_2O_5	180 kg ha ⁻¹ P_2O_5	450 kg ha ⁻¹ P_2O_5
T1	159,33 A	99,13 AB	42,08 A	22,67 B	11,04 B
T2	159,18 A	93,74 B	40,05 A	24,62 A	14,16 A
T3	163,08 A	103,80 A	39,71 A	24,21 A	11,98 B
T4	169,24 A	101,18 AB	37,88 A	24,24 A	13,74 A
T5	149,92 A	97,33 AB	40,01 A	24,41 A	13,39 A

(1) Antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada.

De acordo com Schröder et al. (2011), entre as ferramentas para aumentar a EUP em sistemas agrícolas estariam: (i) otimização de áreas agrícolas, (ii) prevenção da erosão, (iii) manutenção da qualidade do solo, principalmente pelo aumento do teor de MOS, (iv) genótipos melhorados eficientes na absorção de P e associação com micorrizas; e (v) métodos de aplicação de fertilizante fosfatado. Portanto, a antecipação da adubação fosfatada pode ser uma ferramenta importante para aumentar a EUP em sistemas de produção sustentáveis.

4.4 CONCLUSÕES

A antecipação de 100% e 50% da adubação fosfatada reduziram o rendimento de massa de matéria seca da parte aérea da aveia preta. Para o trigo, este atributo não foi afetado pela antecipação da adubação fosfatada em ambas as safras. No entanto, a aplicação total do fósforo no momento da semeadura da cultura do trigo, tendeu a aumentar o rendimento de grãos do trigo em condições de adequada disponibilidade hídrica durante o ciclo da cultura.

A antecipação da adubação fosfatada alterou a nutrição do milho e da soja, porém, os teores foliares dos macronutrientes se encontravam na faixa adequada para as culturas, e desse modo, não refletiram em mudanças no rendimento de massa de matéria seca da parte aérea e produtividade de grãos.

Não houve aumento na produtividade de grãos do milho e da soja com a antecipação da adubação fosfatada.

Para o milho, quando houve baixa disponibilidade hídrica durante o ciclo da cultura, a antecipação de 50% da fertilização fosfatada ocasionou maior eficiência de uso de fósforo em relação à antecipação de 75% da adubação fosfatada. Para a soja, a antecipação da adubação fosfatada tendeu a diminuir a produtividade dos grãos e a eficiência de uso de fósforo.

Em condições de adequada fertilidade do solo e sistema plantio direto estabilizado, a antecipação da fertilização fosfatada para milho e soja é viável, porém sem incrementos na produtividade de grãos das culturas.

5 ARTIGO 2 – ALTERAÇÕES NA FERTILIDADE DO SOLO APÓS ANTECIPAÇÃO DE FÓSFORO SOLÚVEL PARA AS CULTURAS DE PRIMAVERA-VERÃO, EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos, a médio prazo, da antecipação da adubação fosfatada, em sistema plantio direto, sobre os principais atributos químicos de fertilidade do solo. O experimento foi conduzido no município de Tibagi-PR, em um Latossolo Vermelho Distrófico de textura franco argilo-arenosa. O delineamento experimental empregado foi o de blocos completos casualizados, com seis repetições e cinco tratamentos, a saber: antecipação de 100, 75, 50, 25 e 0% da adubação fosfatada. A dose total de P_2O_5 durante o ano, para todos os tratamentos, correspondeu a 90 kg ha^{-1} , na forma de superfosfato simples. Amostras de solo das camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm foram coletadas após a colheita das culturas de primavera-verão, durante 5 safras. Avaliou-se a acidez ativa e trocável, saturação por bases (V%); % de cálcio (Ca) na capacidade de troca catiônica (CTC) e fósforo disponível (P). No último ano também foi avaliado o carbono orgânico total (COT). A antecipação da adubação fosfatada afetou de modo diferenciado os atributos químicos avaliados, porém sem prejudicar a fertilidade química do solo. Houve aumento na acidez do solo durante o decorrer do experimento, diminuindo a saturação por bases ao longo do tempo. A acidez ativa foi afetada pelos tratamentos nos primeiros 10 cm de profundidade do solo, onde a antecipação de 100% da adubação fosfatada resultou nos maiores valores de pH do solo aos 20 meses após o início do experimento. Já a acidez trocável do solo foi menor com a antecipação de 100% da adubação fosfatada, devido ao maior tempo de reação e migração do sulfato de cálcio, fornecido via fertilizante superfosfato simples. A antecipação de 100% da adubação fosfatada tendeu a aumentar V e %Ca na CTC do solo, principalmente na camada superficial, ao longo do período experimental. As menores doses de P antecipadas e a aplicação total do P na semeadura de primavera-verão aumentaram os teores de P disponível na camada de 5-10 cm do solo, durante o decorrer do experimento. O manejo da adubação fosfatada não alterou os teores de COT na camada de 0-5 cm, mantendo os teores elevados, beneficiando os outros atributos químicos do solo, sendo fundamental para o sucesso da antecipação da adubação fosfatada como estratégia de adubação de sistemas.

Palavras-chave: adubação de sistemas, superfosfato simples, reação no solo, disponibilidade de nutrientes.

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the effects, in the medium term, of the phosphate fertilization anticipation, in no-tillage system, on the main chemical attributes of soil fertility. The experiment was carried out in Tibagi-PR, in a dystrophic Oxisol with sandy clay loam texture. The experimental design used was complete randomized blocks, with six replications and five treatments, namely: anticipation of 100, 75, 50, 25 and 0% of phosphate fertilization. The total dose of P_2O_5 during the year, for all treatments, corresponded to 90 kg ha^{-1} , in the form of single superphosphate (180 g kg^{-1} of P_2O_5). Soil samples from layers 0-5, 5-10, 10-20 and 20-40 cm were collected after harvesting the spring-summer crops, during five seasons. Active and exchangeable acidity, base saturation (BS); calcium (Ca) in the cation exchange capacity (CEC) and available phosphorus (P). In the last year, total organic carbon (TOC) was also assessed. The phosphate fertilization anticipation affected differently the chemical attributes evaluated, but without impairing the soil chemical fertility. There was an increase in

soil acidity during the experiment, decreasing base saturation over time. The active acidity was affected by the treatments in the first 10 cm of soil depth, where the anticipation of 100% of the phosphate fertilization resulted in the highest pH values of the soil at 20 months after the experiment beginning. The soil exchangeable acidity was lower with the anticipation of 100% of the phosphate fertilizer, due to the longer reaction time and migration of the calcium sulfate, supplied via single superphosphate fertilizer. The anticipation of 100% of the phosphate fertilization tended to increase V and %Ca in the CEC of the soil, mainly in the superficial layer, throughout the experimental period. The lowest P anticipated doses and the P total application in the spring-summer sowing increased the levels of available P in the 5-10 cm soil layer during the course of the experiment. The management of phosphate fertilization did not change the TOC content in the 0-5 cm layer, keeping the levels high, benefiting the other chemical attributes of the soil, being fundamental for the success of the anticipation of phosphate fertilization as a strategy of systems fertilization.

Keywords: systems fertilization, single superphosphate, soil reaction, nutrients availability.

5.1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é o segundo macronutriente (depois do nitrogênio) que mais limita o crescimento das plantas, devido ao baixo suprimento pelo solo (BUCHER et al., 2018). Em solos de regiões tropicais e subtropicais, a sua baixa disponibilidade é devido à alta capacidade de adsorção, com alta energia de ligação, aos óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), principais constituintes minerais desses solos altamente intemperizados (NOVAIS; SMITH, 1999). Dessa forma, para obtenção de altos rendimentos das culturas agrícolas, a aplicação de fertilizantes fosfatados é fundamental (SHEN et al., 2011).

O P aplicado via fertilizante inorgânico solúvel em água, como o superfosfato simples, pode afetar os atributos físico-químicos do solo (SHEN et al., 2011). Quando aplicado no sulco de semeadura, os grânulos do fertilizante absorvem água, por capilaridade da água do solo para o grânulo ou por difusão do vapor de água (HEDLEY; MCLAUGHLIN, 2005) e, liberam para o solo uma solução saturada de fosfato e cátions, como cálcio (Ca) (SHEN et al., 2011), formando precipitados de fosfatos de Ca independente do pH do solo (HEDLEY; MCLAUGHLIN, 2005). Essa solução apresenta caráter fortemente ácido (pH 1,0-1,6), causando a dissolução de aluminossilicatos, óxidos de Fe, Al e manganês (Mn) em solos ácidos. Consequentemente, a concentração de silício (Si), Fe, Al, Mn, Ca, magnésio (Mg) e potássio (K) na solução saturada de fosfato aumentará e seu pH diminuirá, forçando a co-precipitação de complexos coloidais, envolvendo fosfatos, metais e substâncias húmicas, como fosfatos de Fe e Al amorfos (HEDLEY; MCLAUGHLIN, 2005).

Depois de solubilizado, a dinâmica do P no solo é afetada pelo sistema de manejo do solo, pela rotação de culturas, além da estratégia de aplicação do fertilizante. O sistema plantio

direto (SPD) é um sistema conservacionista de manejo do solo, fundamentado em práticas agronômicas como o não revolvimento do solo e o acúmulo de resíduos vegetais para a cobertura do solo (SIX et al., 2002), resultando no aumento da matéria orgânica do solo (MOS), principalmente nas camadas superiores do solo. A MOS, além de disponibilizar P às plantas através da mineralização dos resíduos orgânicos, também pode reduzir a adsorção do P aos colóides do solo, através da liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, os quais irão competir com os ânions fosfatos nos sítios de adsorção dos colóides do solo (PAVINATO; ROSOLEM, 2008; PAULETTI et al., 2009; GALVANI; HOTTA; ROSOLEM, 2008; CALEGARI et al., 2013).

As espécies vegetais utilizadas na rotação de culturas também vão influenciar diretamente a disponibilidade de P, seja, por exemplo, através da morfologia e arquitetura das raízes, alcançando um maior volume de solo e consequentemente aumentando sua área de absorção de nutrientes em geral (MARSCHER, 2012), ou seja pela exsudação de compostos orgânicos capazes de solubilizar precipitados de fosfato-metais (LI et al., 2010; CALEGARI et al., 2013).

A estratégia de aplicação do fertilizante fosfatado vai afetar as formas de P no solo, sendo que para se obter a maior eficiência de uso do fertilizante é necessário levar em consideração a época, dose, fonte e o método de aplicação certos (4Cs) (CASARIN; STIPP, 2013). Nesse contexto, destaca-se a antecipação da adubação fosfatada, como estratégia de adubação de sistemas. Essa prática beneficia não só a cultura de verão, mas também a cultura antecessora, promovendo formação da palhada para o SPD, favorecendo a conservação do solo, a manutenção da umidade e a ciclagem de nutrientes (ALTMANN, 2012). A antecipação da fertilização com P implica, acima de tudo, no uso de fonte fosfatada de maior solubilidade que garanta suprimento contínuo deste nutriente ao longo do ano: (i) P para o período de cobertura do solo no outono-inverno, (ii) fornecimento de P (e/ou liberação de P ligado à fração lábil da matéria orgânica do solo) para promover o adequado crescimento, desenvolvimento e produção de grãos de milho e soja, cultivados na primavera-verão. No entanto, pouco se sabe sobre os efeitos da antecipação da adubação fosfatada sobre os atributos químicos de fertilidade do solo.

Portanto, o objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos, a médio prazo, da antecipação da adubação fosfatada, por ocasião da semeadura da cultura de outono-inverno, sobre os atributos químicos do solo manejado em SPD.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado na Estância Vendramin (latitude: 24°57'09"; longitude: 50°23'44"; altitude média: 786 m), município de Tibagi (PR). O clima predominante na região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfb - clima temperado, caracterizado por apresentar temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C (mesotérmico), com verões frescos, temperatura média no mês mais quente acima de 22°C e sem estação seca definida.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho Distrófico, manejado em SPD. Por ocasião do experimento (setembro de 2012), o solo possuía os seguintes atributos na camada de 0-10 cm: pH (CaCl₂) 5,38; concentrações trocáveis de cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺) e potássio (K⁺) de 33,4; 26,4 e 2,1 mmol_c dm⁻³, respectivamente; acidez total (H+Al) de 36,8 mmol_c dm⁻³; saturação por bases (V) de 63%; concentrações de fósforo (P-resina) de 15,6 mg dm⁻³ e carbono orgânico total (COT) de 18,5 g dm⁻³ e 294,1; 80,4 e 625,6 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente.

O delineamento experimental adotado foi em blocos completos casualizados com seis repetições e cinco tratamentos: antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) do P₂O₅, aplicado por ocasião da semeadura da cultura de outono-inverno. A dose de 100% correspondeu 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, aplicado na forma de superfosfato simples (180 g kg⁻¹ de P₂O₅). Cada parcela possuía área total de 2730 m² (66,67 x 40,95 m).

A aplicação do fertilizante fosfatado ocorreu em sulco lateral e abaixo do sulco de semeadura, à profundidade de 5 cm do solo durante a semeadura da cultura de outono-inverno; e à profundidade de 7 cm durante a semeadura da cultura de primavera-verão.

A sucessão de culturas conduzidas durante do período experimental foi: milho (safra 2012/2013), trigo (safra 2013), soja (safra 2013/2014), aveia preta (safra 2014), milho (safra 2014/2015), feijão (segunda safra 2015), aveia preta (safra 2015), milho (safra 2015/2016), trigo (safra 2016) e soja (safra 2016/2017). Para o primeiro cultivo de milho (safra 2012/2013), a antecipação da adubação fosfatada foi realizada no sulco de semeadura (marcação das linhas de semeadura por GPS) 30 dias antes da semeadura de milho. Ainda, a cultura de feijão não recebeu os tratamentos, sendo conduzida apenas como estratégia de rotação de culturas, não havendo, portanto, a necessidade de avaliação do seu estado nutricional.

Não foi realizada a correção da acidez do solo durante o período experimental, sendo, portanto, a variação na reação no solo devido aos tratamentos e seus efeitos sobre a nutrição e produtividade das culturas (como demonstrado no Artigo 1). Adubações de manutenção para nitrogênio (N) e K foram realizadas de acordo com a necessidade de cada cultura, sendo os

fertilizantes aplicados na superfície do solo, em área total. Todas as práticas culturais e manejo fitossanitário necessários, durante a condução do experimento foram realizados de acordo com as recomendações técnicas de cada cultura. Maiores detalhes podem ser encontrados no Artigo 1.

Os atributos de fertilidade foram monitorados aos 9 meses (após milho), 20 meses (após soja), 33 meses (após milho), 45 meses (após milho) e 57 meses (após soja) a partir do início do estudo, amostrando-se as camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, sendo que 12 pontos por parcela foram coletados para constituir uma amostra composta. Três pontos foram coletados na linha de semeadura e nove pontos foram coletados nas entrelinhas de semeadura, conforme metodologia proposta por Kitchen, Westfall e Havlin (1990). Essas amostras compostas foram levadas ao laboratório, secas em estufa a 40°C com circulação forçada de ar, moídas e peneiradas em peneira de malha de 2,0 mm. Na sequência foram determinados os atributos: acidez ativa (pH em CaCl_2) e trocável (Al^{3+}), P disponível (por resina trocadora de ânions) e os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ trocáveis para a obtenção dos valores de V, bem como a % de Ca na capacidade de troca catiônica (CTC) do solo, empregando os métodos sugeridos por Pavan et al. (1992), exceto para P disponível, avaliado conforme Raij, Quaggio e Silva (1986). Ainda, aos 57 meses foram avaliados os teores de COT, pelo método colorimétrico, proposto por Nelson e Sommers (1996).

Todos os atributos avaliados foram submetidos à análise estatística univariada de acordo com o modelo de experimento em blocos completos casualizados, com cinco tratamentos e seis repetições. No caso de F significativo ($P < 0,05$), foi aplicado o teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Acidez do Solo

5.3.1.1 Acidez ativa

Os valores de pH do solo não foram alterados pela antecipação da adubação fosfatada aos 9, 33 e 44 meses após o início do experimento, em todas as camadas do solo avaliadas (Tabela 5.1). Ou seja, depois do cultivo do milho, como cultura de primavera/verão, o manejo da adubação fosfatada não afetou o pH do solo. Já quando a cultura de primavera/verão foi a soja, os valores de pH foram afetados pela antecipação da adubação fosfatada, nas camadas de

0-5 cm e 5-10 cm aos 20 meses e na camada de 5-10 cm aos 57 meses (Tabela 5.1). As leguminosas podem alterar o pH do solo com mais facilidade do que gramíneas. A fixação biológica de nitrogênio resulta na liberação líquida de íons H^+ , acidificando o solo (FAGERIA; NASCENTE, 2014). A concentração de cátions em excesso nos resíduos de leguminosas associada à descarboxilação de ânions orgânicos e a amonificação do nitrogênio dos resíduos vegetais, pode aumentar o pH (TANG; FANG; RAPHAEL et al., 1998).

Tabela 5.1 – Valores de pH de amostras de solo submetido à antecipação da adubação fosfatada para cultura de primavera-verão, coletadas aos 9 meses (após milho), 20 meses (após soja), 33 meses (após milho), 45 meses (após milho) e 57 meses (após soja) a partir do início do experimento (setembro/2012).

Tratamentos ⁽¹⁾	9 meses	20 meses	33 meses	44 meses	57 meses
<i>Camada 0-5 cm</i>					
T1	5,88 A ⁽²⁾	5,47 A	5,65 A	4,94 A	4,96 A
T2	5,71 A	5,18 B	5,31 A	5,12 A	4,96 A
T3	5,83 A	5,51 A	5,26 A	5,04 A	4,98 A
T4	5,69 A	5,41 AB	5,43 A	4,99 A	5,08 A
T5	5,67 A	5,35 AB	5,28 A	5,03 A	4,89 A
CV ⁽³⁾ (%)	3,60	2,76	6,38	2,63	2,40
<i>Camada 5-10 cm</i>					
T1	5,18 A	5,29 A	5,32 A	4,97 A	4,84 AB
T2	5,33 A	4,92 C	5,01 A	4,83 A	4,81 AB
T3	5,22 A	5,21 AB	4,98 A	4,90 A	4,75 AB
T4	5,01 A	5,07 BC	5,10 A	4,89 A	4,86 A
T5	5,19 A	5,02 BC	5,03 A	4,83 A	4,63 B
CV (%)	3,70	2,49	5,08	2,75	2,60
<i>Camada 10-20 cm</i>					
T1	4,63 A	4,97 A	4,83 A	4,73 A	4,47 A
T2	4,84 A	4,85 A	4,63 A	4,62 A	4,48 A
T3	4,79 A	4,97 A	4,61 A	4,64 A	4,47 A
T4	4,72 A	4,93 A	4,70 A	4,62 A	4,55 A
T5	4,78 A	4,84 A	4,70 A	4,59 A	4,43 A
CV (%)	3,42	2,63	4,16	2,84	2,85
<i>Camada 20-40 cm</i>					
T1	4,52 A	4,85 A	4,69 A	4,57 A	4,34 A
T2	4,75 A	4,73 A	4,53 A	4,55 A	4,28 A
T3	4,70 A	4,81 A	4,59 A	4,59 A	4,44 A
T4	4,64 A	4,80 A	4,54 A	4,58 A	4,38 A
T5	4,67 A	4,73 A	4,60 A	4,56 A	4,44 A
CV (%)	2,97	2,16	3,63	1,92	2,63

⁽¹⁾ Antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada.

⁽²⁾ Letras maiúsculas iguais coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

⁽³⁾ CV: coeficiente de variação.

A antecipação de 75% da dose do fertilizante fosfatado (T2) resultou nos menores valores de pH do solo, em comparação com a antecipação de 100% (T1) e 50% (T3) da

adubação fosfatada, nos primeiros 10 cm de profundidade do solo, aos 20 meses após o início do experimento (Tabela 5.1). Já aos 57 meses, os menores valores de pH, na camada de 5-10 cm, foram obtidos quando não se antecipou a adubação fosfatada (T5) em comparação com a antecipação de 25% da dose do fertilizante fosfatado (T4) (Tabela 5.1). Apesar dessa diferença no pH do solo com a antecipação da adubação fosfatada, os valores de pH continuaram dentro da mesma classe de interpretação nas camadas de solo onde foram observados esses efeitos, sendo que nas camadas de 0-5 cm e 10-20 cm, aos 20 meses, os valores de pH foram considerados altos (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2017), e na camada de 5-10 cm, aos 57 meses, os valores de pH foram considerados médios (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2017).

A aplicação de fertilizante fosfatado solúvel em água pode afetar as propriedades físico-químicas do solo (CAKMAK et al., 2010; SHEN et al., 2011). Segundo Hedley e McLaughlin (2005), a solução do solo, após a solubilização do fosfato presente nos grânulos do fertilizante, apresenta como características mais importantes, as altas concentrações de íons fosfato e cátions de Ca e sua natureza fortemente ácida (pH 1,5), bem como seu potencial para formar precipitados de fosfatos de cálcio independente do pH do solo. A solução de P fortemente ácida causa a dissolução de aluminossilicatos, óxidos de Fe, Al e manganês (Mn) e MOS em solos ácidos. Consequentemente, as concentrações de silício (Si), Fe, Al, Mn, Ca, Mg e K na solução saturada de P aumentará e seu pH diminuirá, forçando a co-precipitação de complexos coloidais, envolvendo fosfatos, metais e substâncias húmicas, como fosfatos de Fe e Al amorfos.

Pode-se observar que quando os tratamentos afetaram o pH do solo, o efeito foi apenas nas camadas de 0-5 cm e 5-10 cm (Tabela 5.1), mostrando que a aplicação do fertilizante fosfatado no sulco de semeadura afeta a acidez ativa do solo apenas nas camadas mais superficiais, devido à baixa mobilidade do P ao longo do perfil de solos altamente intemperizados. Tem sido observado mudanças no status de P, no subsolo, em situações de alta doses de P oriundo de resíduos orgânicos ou em estudo de longo prazo com adição de P mineral (CAKMAK et al., 2010).

5.3.1.2 Alumínio trocável

Até o 3º ano de cultivo (9, 20 e 33 meses), os teores de Al trocável na camada superficial do solo foram nulos ou muito baixos, devido aos maiores valores de pH do solo (Tabela 5.2), bem como aos maiores teores de COT, uma vez que a MOS pode complexar o Al,

tornando-o não trocável (ZAMBROSI; ALLEONI; CAIRES, 2007). Maiores teores de Al trocável foram observados com o aumento da profundidade do solo e durante os anos de condução do experimento, já que a calagem não foi realizada durante o período experimental. Cakmak et al. (2010) também observaram aumentos nos teores de Al trocável ao longo do perfil do solo, com a aplicação de fertilizante fosfatado, sendo esses valores diretamente correlacionados com a redução do pH do solo.

Tabela 5.2 – Teores de alumínio (Al) trocável ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) de amostras de solo submetido à antecipação da adubação fosfatada para cultura de primavera-verão, coletadas aos 9 meses (após milho), 20 meses (após soja), 33 meses (após milho), 45 meses (após milho) e 57 meses (após soja) a partir do início do experimento (setembro/2012).

Tratamentos ⁽¹⁾	9 meses	20 meses	33 meses	44 meses	57 meses
<i>Camada 0-5 cm</i>					
T1	0,00 A ⁽²⁾	0,00 A	0,01 A	0,15 AB	0,07 A
T2	0,00 A	0,00 A	0,01 A	0,11 B	0,07 A
T3	0,00 A	0,00 A	0,01 A	0,14 AB	0,07 A
T4	0,00 A	0,00 A	0,01 A	0,14 AB	0,09 A
T5	0,00 A	0,00 A	0,02 A	0,16 A	0,07 A
CV ⁽³⁾ (%)	0,00	0,00	38,21	19,75	22,47
<i>Camada 5-10 cm</i>					
T1	0,03 B	0,04 A	0,04 B	0,16 A	0,09 A
T2	0,05 AB	0,04 A	0,11 A	0,15 A	0,13 A
T3	0,06 A	0,04 A	0,03 B	0,18 A	0,09 A
T4	0,07 A	0,04 A	0,04 B	0,15 A	0,12 A
T5	0,05 AB	0,03 A	0,07AB	0,19 A	0,11 A
CV (%)	26,79	30,37	20,11	17,04	23,16
<i>Camada 10-20 cm</i>					
T1	0,12 B	0,15 A	0,12 B	0,18 C	0,19 A
T2	0,18 A	0,15 A	0,23 A	0,19 C	0,18 A
T3	0,11 B	0,14 A	0,24 A	0,29 AB	0,25 A
T4	0,12 B	0,14 A	0,17 AB	0,24 BC	0,21 A
T5	0,16 A	0,14 A	0,19 AB	0,38 A	0,17 A
CV (%)	14,61	17,96	29,1	20,89	37,41
<i>Camada 20-40 cm</i>					
T1	0,18 A	0,21 A	0,25 A	0,31 AB	0,24 A
T2	0,16 A	0,23 A	0,20 A	0,29 B	0,24 A
T3	0,19 A	0,23 A	0,24 A	0,31 AB	0,33 A
T4	0,14 A	0,22 A	0,23 A	0,32 AB	0,29 A
T5	0,19 A	0,20 A	0,24 A	0,41 A	0,24 A
CV (%)	18,84	12,43	18,32	21,41	22,29

⁽¹⁾ Antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada.

⁽²⁾ Letras maiúsculas iguais coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

⁽³⁾ CV: coeficiente de variação.

A antecipação da adubação fosfatada alterou os teores de Al trocável nas camadas de (i) 5-10 cm e 10-20 cm aos 9 meses; (ii) 5-10 cm e 10-20 cm aos 33 meses e (iii) 0-5 cm, 10-20 cm e 20-40 cm aos 44 meses, com a tendência da não antecipação da adubação fosfatada (T5) aumentarem os teores de Al (Tabela 5.2). De maneira geral, pode-se observar que, quando os teores de Al trocável foram afetados pelos tratamentos, a antecipação de 100% da adubação fosfatada (T1) apresentou os menores valores ou valores intermediários de Al (Tabela 5.2). As menores doses de P antecipadas ou a aplicação total do P na semeadura de verão podem favorecer o aumento do Al trocável, devido ao menor tempo entre a aplicação do fertilizante fosfatado e a coleta de solo, uma vez que o fertilizante acidifica a solução do solo e o solo foi coletado, ao menos algumas subamostras, no sulco de semeadura.

Pode-se observar que os teores de Al trocável foram alterados pela antecipação da adubação fosfatada sempre após o cultivo de milho (Tabela 5.2). Em solos ácidos, o P na solução do solo pode precipitar com cátions formando compostos amorfos de Fe-P e/ou Al-P de baixa labilidade (CHIEN et al., 2011). Dessa forma, a cultura do milho pode ter liberado exsudatos radiculares capazes de quebrar a ligação entre o P-Al, absorvendo o P e deixando o Al na solução, na forma trocável. Após a adubação fosfatada, pode ocorrer aumento na exsudação de carboxilatos pelas raízes do milho (LI et al., 2010). A exsudação de ácidos orgânicos como citrato, malato, fumarato pelas raízes das plantas, pode promover a mobilização de P por troca de ligantes, pela ocupação ou dissolução de sítios de adsorção de P e pela complexação de cátions ligados a P, como Ca, Fe ou Al (LI et al., 2010; CALEGARI et al., 2013), aumentando o P disponível nas camadas mais superficiais do solo. Ainda, a aveia preta, cultura antecessora do milho, é considerada como uma das principais plantas recicladoras de P, aumentando as frações de P de maior labilidade nas camadas superficiais do solo, em SPD (TIECHER et al., 2012; CALEGARI et al., 2013). Ainda, a aplicação de ureia como fonte de N para as culturas de milho e aveia preta também pode ter contribuído para as alterações nos teores de Al trocável do solo, após o cultivo dessas gramíneas, uma vez que a ureia acidifica o solo.

Galvani, Hotta e Rosolem (2008), avaliando as frações de P do solo antes e após o cultivo da soja, com aplicação de fertilizante fosfatado na cultura de inverno e no momento da semeadura da soja, constataram a ausência da fração de P ligado ao Al antes do cultivo da soja, sendo atribuído à calagem realizada dois anos antes do início do experimento e à complexação do Al pelos ácidos orgânicos liberados pela MOS. No entanto, após a colheita da soja, foi observada a presença do P ligado ao Al, sendo justificada pela acidificação do solo resultante da fixação de nitrogênio pelas plantas de soja, solubilizando o Al. No presente estudo, tais

resultados não foram visualizados, sendo que a cultura da soja afetou mais a acidez ativa (Tabela 5.1) do que a acidez trocável do solo (Tabela 5.2), durante o período experimental. Ainda, o trigo, cultura antecessora a soja, não possui a mesma capacidade de reciclagem de P como a aveia preta (TIECHER et al., 2012), não sendo detectada a presença de carboxilatos na rizosfera do trigo, quando submetido à adubação fosfatada (ROSE; HARDIPUTRA; RENGEL, 2010).

Vale ressaltar que aos 44 meses, os teores médios de Al trocável, em todas as camadas do solo, foram maiores em comparação com os teores médios de Al aos 33 e 57 meses. Primeiramente porque, como não houve calagem na área durante o período experimental, o aumento da acidez do solo ao longo do tempo levou à solubilização do Al (PAVAN; BINGHAM; PRATT, 1982), aumentando-se naturalmente os teores de Al. Ainda, a influência do milho como cultura conduzida durante essa safra pode ter contribuído para o aumento da acidez trocável do solo, pela solubilização dos compostos precipitados de Al-P e pela acidificação do solo causada pela reação da ureia, utilizada como fonte de N para a cultura.

5.3.2 Saturação por Bases e por Cálcio do Solo

A antecipação da adubação fosfatada alterou V% em todos os anos experimentais, com exceção aos 33 meses (Tabela 5.3), com tendência que a antecipação, de principalmente 100% da dose (T1) resulte em maiores V% nas camadas mais profundas do solo. Isso pode ser devido à ação do gesso agrícola presente no fertilizante superfosfato simples, que, quando aplicado de forma antecipada, possibilitou a reação e a migração do gesso ao longo do perfil do solo. Além de fornecer Ca para a solução do solo, o SO_4^{2-} pode reagir com cátions como o K^+ , Mg^{2+} , além do Ca^{2+} , formando pares iônicos neutros (K_2SO_4^0 , MgSO_4^0 e CaSO_4^0), os quais apresentam grande mobilidade no perfil (PAVAN; BINGHAM; PRATT, 1984), aumentando, dessa forma V% em profundidade.

Em relação ao Ca do solo, pode-se observar que a antecipação da adubação fosfatada apresentou menores %Ca na CTC do solo, na camada de 0-5 cm (Tabela 5.4). No entanto, com o decorrer do experimento, observou-se que a antecipação da adubação fosfatada (T1) resultou na maior %Ca na CTC, aos 33 meses, em comparação com a não antecipação da adubação, para essa mesma camada de solo (Tabela 5.4). Isso se deve possivelmente ao fornecimento anual de gesso agrícola, via superfosfatos simples e sua reação no solo ao longo do tempo.

Pode-se observar maior %Ca na CTC do solo após o cultivo de soja, aos 20 e 57 meses (Tabela 5.4). As dicotiledôneas apresentam maior CTC radicular, tendendo a absorver mais

eficientemente cátions divalentes, como o Ca (MARSCHNER, 1995), consequentemente, liberando maior quantidade desse nutriente, durante a decomposição de resíduos vegetais, do que as gramíneas.

Menores %Ca na CTC foram encontrados nas camadas mais profundas do solo (Tabela 5.4), devido à maior acidez (Tabela 5.1). Ainda, a reciclagem de nutrientes pelas culturas sob SPD pode contribuir para o acúmulo de Ca na superfície do solo e a formação de gradiente de disponibilidade (CALEGARI et al., 2013).

Tabela 5.3 – Saturação por bases (V%) de amostras de solo submetido à antecipação da adubação fosfatada para cultura de primavera-verão, coletadas aos 9 meses (após milho), 20 meses (após soja), 33 meses (após milho), 44 meses (após milho) e 57 meses (após soja) a partir do início do experimento (setembro/2012).

Tratamentos ⁽¹⁾	9 meses	20 meses	33 meses	44 meses	57 meses
<i>Camada 0-5 cm</i>					
T1	83,65 A ⁽²⁾	72,73 A	63,51 A	65,86 AB	64,70 A
T2	85,53 A	68,24 B	63,10 A	61,15 AB	62,40 A
T3	85,61 A	68,69 B	62,24 A	60,97 AB	63,88 A
T4	85,49 A	68,59 B	63,09 A	66,90 A	62,95 A
T5	85,12 A	68,28 B	61,44 A	59,17 B	61,67 A
CV ⁽³⁾ (%)	2,51	2,94	2,61	6,66	4,65
<i>Camada 5-10 cm</i>					
T1	69,41 A	66,07 A	54,91 A	56,99 A	44,75 A
T2	73,21 A	63,88 A	55,21 A	53,76 A	36,29 B
T3	70,65 A	63,02 A	55,62 A	52,80 A	42,39 AB
T4	72,67 A	64,05 A	55,38 A	56,35 A	39,51 AB
T5	73,23 A	62,67 A	55,18 A	52,34 A	40,46 AB
CV (%)	4,80	3,63	2,71	8,13	9,18
<i>Camada 10-20 cm</i>					
T1	55,37 A	60,99 A	48,20 A	46,59 A	30,15 A
T2	56,57 A	54,18 AB	46,00 A	37,65 B	22,35 B
T3	55,23 A	55,15 AB	46,15 A	41,57 AB	28,33 AB
T4	55,50 A	54,63 AB	46,55 A	38,27 B	24,43 AB
T5	60,32 A	52,35 B	46,13 A	37,44 B	25,61 AB
CV (%)	5,72	7,18	5,16	8,10	13,95
<i>Camada 20-40 cm</i>					
T1	52,12 A	47,61 AB	40,63 A	35,74 A	21,92 A
T2	55,43 A	47,11 AB	39,22 A	30,04 B	19,74 A
T3	45,70 B	48,17 AB	43,10 A	29,29 B	20,06 A
T4	57,13 A	49,92 A	42,09 A	30,55 AB	20,64 A
T5	57,72 A	43,37 B	39,53 A	30,49 AB	21,40 A
CV (%)	6,24	6,64	6,25	10,37	16,77

⁽¹⁾ Antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada.

⁽²⁾ Letras maiúsculas iguais coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

⁽³⁾ CV: coeficiente de variação.

Tabela 5.4 – Saturação (%) por cálcio (Ca) na capacidade de troca catiônica (CTC) de amostras de solo submetido à antecipação da adubação fosfatada para cultura de primavera-verão, coletadas aos 9 meses (após milho), 20 meses (após soja), 33 meses (após milho), 44 meses (após milho) e 57 meses (após soja) a partir do início do experimento (setembro/2012).

Tratamentos ⁽¹⁾	9 meses	20 meses	33 meses	44 meses	57 meses
<i>Camada 0-5 cm</i>					
T1	38,21 B ⁽²⁾	43,91 A	36,71 A	35,17 AB	48,93 A
T2	38,77 B	45,30 A	32,51 AB	32,57 B	45,71 A
T3	32,78 C	43,65 A	31,75 AB	36,16 AB	47,55 A
T4	36,85 BC	44,49 A	33,82 AB	40,35 A	44,51 A
T5	44,86 A	43,98 A	31,20 B	34,37 AB	43,45 A
CV ⁽³⁾ (%)	7,66	3,48	9,52	11,47	7,98
<i>Camada 5-10 cm</i>					
T1	24,57 B	36,11 A	26,67 A	29,81 A	39,80 A
T2	30,26 A	37,14 A	22,86 A	28,58 A	33,17 B
T3	27,96 AB	37,61 A	23,69 A	30,91 A	37,77 AB
T4	28,53 AB	35,90 A	23,50 A	29,94 A	40,77 A
T5	28,14 AB	38,50 A	23,94 A	25,96 A	36,16 AB
CV (%)	10,31	6,18	13,66	13,65	9,96
<i>Camada 10-20 cm</i>					
T1	20,41 A	27,78 A	18,67 A	22,30 A	30,84 A
T2	24,01 A	30,66 A	12,95 B	13,73 B	27,79 A
T3	20,89 A	29,27 A	15,54 AB	16,74 AB	32,54 A
T4	21,19 A	28,87 A	17,35 AB	15,66 AB	28,99 A
T5	22,85 A	30,26 A	19,43 A	16,80 AB	31,64 A
CV (%)	14,48	6,65	16,52	27,47	13,07
<i>Camada 20-40 cm</i>					
T1	17,54 B	21,83 A	18,44 A	12,82 AB	28,48 A
T2	23,22 A	22,79 A	12,37 B	9,89 B	24,57 AB
T3	18,59 AB	24,22 A	13,82 B	16,11 A	29,31 A
T4	19,72 AB	21,94 A	13,64 B	14,45 AB	21,60 B
T5	18,61 AB	22,70 A	16,14 AB	15,88 A	26,80 AB
CV (%)	14,63	6,47	17,78	22,90	12,11

⁽¹⁾ Antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada.

⁽²⁾ Letras maiúsculas iguais coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

⁽³⁾ CV: coeficiente de variação.

5.3.3 Fósforo Disponível

A antecipação da adubação fosfatada afetou, de modo diferenciado os teores de P disponível do solo, durante o período experimental (Tabela 5.5), sendo aos 44 e 57 meses, houve a tendência da antecipação de 50% (T3) da adubação fosfatada aumentar os teores de P disponível ao longo do perfil do solo, equivalendo-se aos teores de P no tratamento sem

antecipação da adubação (T5) (Tabela 5.5). Caires et al. (2017) também observaram baixos teores de P do solo quando a adubação fosfatada foi realizada na cultura de inverno (aveia preta), de forma antecipada, e teores médios de P quando foi realizada no momento da semeadura da cultura de verão (soja). Tais autores atribuíram essa diferença a: (i) amostragem sistemática do solo, com coleta de pontos na linha de semeadura da soja (onde o fertilizante foi concentrado); (ii) a aplicação de P na aveia preta aumentou potencialmente o teor de P orgânico, devido à decomposição gradual do resíduo após a absorção de P e, este teor não é extraído pela resina trocadora de ânions; (iii) as aplicações no sulco de semeadura da soja resultaram em maiores quantidades de fertilizante fosfatado por volume de solo, reduzindo o potencial de adsorção em relação à aplicação no sulco de semeadura da aveia preta (menor relação fertilizante por volume do solo); (iv) a amostragem de solo foi realizada aproximadamente 10 meses após a última adubação da aveia preta e 5 meses após a última adubação da soja.

Maiores teores de P disponível foram observados na camada de 0-5 cm, para todos os tratamentos e em todos os meses avaliados (Tabela 5.5). A menor adsorção de P nas camadas superficiais do solo, em SPD, ocorre devido ao recobrimento dos sítios de adsorção por radicais orgânicos e substituição de íons fosfatos por íons orgânicos nesses sítios (TISDALE et al., 1985), além do menor contato do P com os sítios de adsorção por falta de revolvimento do solo (PAULETTI et al., 2009). Ainda, o sulfato fornecido via superfosfato simples pode competir com o fosfato por locais de sorção não-específica de ânions nos colóides do solo, permitindo que o íon fosfato se difunda mais longe do local de aplicação do fertilizante (HEDLEY; MCLAUGHLIN, 2005).

Pode-se observar maiores teores de P disponível nos primeiros 10 cm do solo, aos 20 e 33 meses, após o cultivo de milho (Tabela 5.5). A cultura antecessora ao milho foi a aveia preta, utilizada como cobertura do solo. A aveia preta é considerada uma das culturas agrícolas mais eficientes na reciclagem do P, favorecendo o aumento de P disponível nas camadas superficiais do solo, principalmente sob SPD (TIECHER et al., 2012; CALEGARI et al., 2013). No entanto, quando a cultura de outono-inverno foi o trigo, observou-se menores teores médios de P disponível na camada de 0-5 cm do solo, provavelmente devido ao P exportado nos grãos de trigo no momento da colheita. Calegari et al. (2013) encontraram resultados semelhantes, porém a cultura de trigo favoreceu os teores de P disponível nas camadas superficiais do solo em comparação com a área de pousio durante o período de outono-inverno. Dessa forma, o cultivo do solo durante o outono-inverno, seja com plantas de cobertura ou produtoras de grãos, é fundamental para manter maiores frações de P lábil no solo (CARVALHO et al., 2014), sendo fator chave para estratégias de adubação fosfatada visando o sistema como um todo.

Tabela 5.5 – Teores de fósforo (P) disponível (mg dm^{-3}) de amostras de solo submetido à antecipação da adubação fosfatada para cultura de primavera-verão, coletadas aos 9 meses (após milho), 20 meses (após soja), 33 meses (após milho), 45 meses (após milho) e 57 meses (após soja) a partir do início do experimento (setembro/2012).

Tratamentos ⁽¹⁾	9 meses	20 meses	33 meses	44 meses	57 meses
<i>Camada 0-5 cm</i>					
T1	17,37 A ⁽²⁾	20,28 A	24,50 A	20,00 A	17,97 AB
T2	16,36 A	19,54 A	14,99 BC	19,38 A	18,38 AB
T3	18,85 A	19,27 A	18,34 AB	19,32 A	19,50 A
T4	17,29 A	20,40 A	13,79 BC	18,74 A	16,57 B
T5	18,60 A	20,09 A	10,80 C	18,72 A	16,78 AB
CV ⁽³⁾ (%)	18,32	21,08	23,72	14,09	9,11
<i>Camada 5-10 cm</i>					
T1	12,71 BC	12,47 A	18,32 A	11,08 B	8,60 BC
T2	21,60 A	13,81 A	10,95 B	12,36 B	8,47 C
T3	16,17 AB	12,60 A	7,73 B	18,80 A	11,06 ABC
T4	6,86 C	12,14 A	10,91 B	17,14 A	11,75 AB
T5	9,33 BC	11,82 A	16,78 A	18,84 A	12,32 A
CV (%)	32,72	23,66	20,96	14,46	17,99
<i>Camada 10-20 cm</i>					
T1	9,40 A	6,48 A	4,52 AB	9,34 AB	8,05 BC
T2	9,95 A	6,80 A	2,88 C	8,21 B	7,50 C
T3	4,95 B	5,45 A	5,11 A	10,98 A	9,20 A
T4	4,78 B	5,38 A	3,93 B	7,99 B	8,69 AB
T5	8,23 A	5,21 A	4,74 A	11,10 A	9,05 AB
CV (%)	19,34	28,02	10,40	15,04	7,60
<i>Camada 20-40 cm</i>					
T1	4,03 BC	3,16 A	5,40 AB	4,71 B	3,62 B
T2	5,51 A	3,08 A	5,18 AB	5,63 AB	4,15 AB
T3	3,63 C	2,59 A	6,30 A	6,15 AB	4,79 A
T4	2,19 D	2,99 A	3,96 B	5,63 AB	3,78 B
T5	5,20 AB	2,58 A	4,08 B	7,32 A	3,51 B
CV (%)	19,26	12,69	25,08	19,16	13,69

⁽¹⁾ Antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada.

⁽²⁾ Letras maiúsculas iguais coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

⁽³⁾ CV: coeficiente de variação.

5.3.4 Carbono Orgânico Total

Aos 57 meses após o início do experimento foi possível constatar que o manejo da adubação fosfatada não alterou os teores de COT na camada de 0-5 cm do solo (Tabela 5.6). O mínimo revolvimento do solo, a ausência de incorporação de resíduos orgânicos e crescimento

das raízes predominantemente nas camadas superiores do solo contribuem para a formação de gradiente dos níveis de COT manejado em SPD (BORDIN et al., 2008; FINK et al., 2016). Ainda, a adubação fosfatada favorece o aumento da biomassa na superfície do solo e melhora a qualidade da MOS por aumentar a fração de ácido húmico, sendo este diretamente correlacionado com os parâmetros de fertilidade e qualidade da MOS (SOUZA et al., 2016).

Tabela 5.6 – Teores (%) de carbono orgânico total (COT) de amostras de solo submetido à antecipação da adubação fosfatada para cultura de primavera-verão, coletadas aos 57 meses (após soja) a partir do início do experimento (setembro/2012).

Tratamentos ⁽¹⁾	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	20-40 cm
T1	3,58 A ⁽²⁾	3,08 A	2,30 AB	2,23 A
T2	3,50 A	2,27 B	2,25 AB	2,08 A
T3	3,82 A	2,57 AB	2,12 B	1,98 A
T4	3,58 A	2,65 AB	2,28 AB	2,07 A
T5	3,65 A	2,63 AB	2,52 A	2,12 A
CV ⁽³⁾ (%)	7,20	17,86	8,33	7,43

⁽¹⁾ Antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada.

⁽²⁾ Letras maiúsculas iguais coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

⁽³⁾ CV: coeficiente de variação.

Na camada de 5-10 cm do solo, a antecipação de 100% da adubação fosfatada (T1) resultou nos maiores teores de COT, em comparação com a antecipação de 75% da adubação fosfatada (Tabela 5.6). No entanto, na camada de 10-20 cm, a aplicação total do P na semeadura de verão, resultou nos maiores teores de COT, em comparação com a antecipação de 50% da adubação fosfatada (Tabela 5.6). Na camada de 20-40 cm do solo, o manejo da adubação fosfatada não influenciou os teores de COT (Tabela 5.6), indicando a baixa mobilidade do P ao longo do perfil do solo.

Os benefícios provenientes dos maiores teores de COT na camada superficial do solo foram visualizados em todos os atributos químicos avaliados, como maiores valores de pH, por promover a complexação do H^+ e Al^{3+} com compostos do resíduo vegetal, deixando Ca, Mg e K mais livres em solução, o que pode ocasionar aumento na saturação da CTC por estes cátions de reação básica (PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Também observou-se aumento na disponibilidade de P no solo com a adição de resíduos vegetais, tanto pelo P presente no resíduo como por competição de compostos orgânicos dos resíduos pelos sítios de troca no solo (PAVINATO; ROSOLEM, 2008; PAULETTI et al., 2009; GALVANI, HOTTA, ROSOLEM, 2008; CALEGARI et al., 2013).

5.4 CONCLUSÕES

A antecipação da adubação fosfatada afetou de modo diferenciado os atributos químicos avaliados, porém sem prejudicar a fertilidade química do solo.

Houve aumento na acidez do solo durante o decorrer do experimento, diminuindo a saturação por bases ao longo do tempo. A acidez ativa foi afetada pelos tratamentos nos primeiros 10 cm de profundidade do solo, onde a antecipação de 100% da adubação fosfatada resultou nos maiores valores de pH do solo aos 20 meses após o início do experimento. Já a acidez trocável do solo foi menor com a antecipação de 100% da adubação fosfatada, nas camadas de 5-10 cm e 10-20 cm, aos 9 e 33 meses após o início do experimento, devido ao maior tempo de reação e migração do sulfato de cálcio, fornecido via fertilizante superfosfato simples.

A antecipação de 100% da adubação fosfatada tendeu a aumentar a saturação por bases e a saturação de cálcio, principalmente na camada superficial do solo, ao longo do período experimental.

As menores doses de fósforo antecipadas e a aplicação total do fósforo na semeadura de primavera-verão aumentaram os teores de fósforo disponível na camada de 5-10 cm do solo, durante o decorrer do experimento.

O manejo da adubação fosfatada não alterou os teores de carbono orgânico total na camada de 0-5 cm, mantendo os teores elevados, beneficiando os outros atributos químicos do solo, sendo fundamental para o sucesso da antecipação da adubação fosfatada como estratégia de adubação de sistemas.

6 ARTIGO 3 – A ANTECIPAÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA NO INVERNO INTERFERE NAS FORMAS DE P NO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO?

RESUMO

A antecipação do fertilizante fosfatado solúvel é uma prática de alto risco e pouco se sabe sobre o que isso implica nas mudanças, ao longo do tempo, das formas de fósforo (P) no solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos, a médio prazo, da antecipação da adubação fosfatada para a cultura de verão sobre as frações de P no solo, em sistema plantio direto. O experimento foi conduzido no município de Tibagi-PR, em um Latossolo Vermelho distrófico de textura franco argilo-arenosa. O delineamento experimental empregado foi o de blocos completos casualizados, com seis repetições e cinco tratamentos, a saber: antecipação de 100, 75, 50, 25 e 0% da adubação fosfatada. A dose total de P_2O_5 durante o ano, para todos os tratamentos, correspondeu a 90 kg ha^{-1} , na forma de superfosfato simples (180 g kg^{-1} de P_2O_5). Após 57 meses do início do experimento, foram coletadas amostras de solo das camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm. As amostras foram secas, moídas, peneiradas e submetidas à análise de fracionamento das formas de P pelo método de Hedley e determinação dos teores de carbono orgânico total (COT). A antecipação da adubação fosfatada aumentou o Po lábil, P lábil total e P inorgânico não lábil ligado ao cálcio na camada de 0-5 cm. A adubação fosfatada na cultura de primavera-verão ou a antecipação de apenas 25% da adubação fosfatada no inverno elevou os teores de P lábil, principalmente o Po, além do Po não lábil na camada de 5-10 cm. A relação COT:Po variou ao longo do perfil do solo, com maiores valores obtidos na camada de 0-5 cm (devido ao maior teor de COT nessa camada) e abaixo dos 20 cm de profundidade do solo (devido à baixa mobilidade de P no solo). No entanto, todos os valores de COT:Po ficaram abaixo de 100, podendo ser considerado um solo com alto conteúdo de P disponível.

Palavras-chave: superfosfato simples, fracionamento sequencial, labilidade do fósforo, agricultura de baixo carbono.

ABSTRACT

The soluble phosphate fertilizer anticipation is a high-risk practice and little is known about what this implies in the soil phosphorus (P) forms over time. The aim of this study was to evaluate the effects, in the medium term, of the phosphate fertilization anticipation for the summer crops on the soil P fractions, under no-tillage system (NT). The experiment was carried out in Tibagi-PR, in a dystrophic Oxisol with sandy clay loam texture. The experimental design used was complete randomized blocks, with six replications and five treatments, namely: anticipation of 100, 75, 50, 25 and 0% of phosphate fertilization. The total dose of P_2O_5 during the year, for all treatments, corresponded to 90 kg ha^{-1} , in the form of single superphosphate. Fifty-seven months after the beginning of the experiment, soil samples were collected from layers 0-5, 5-10, 10-20 and 20-40 cm. The samples were submitted to fractionation analysis of P forms by the Hedley method and determination of the total organic carbon (TOC) content. The phosphate fertilization anticipation increased the labile organic P (oP), total labile P and non-labile inorganic P bound to calcium in the 0-5 cm soil layer. The phosphate fertilization in the spring-summer crop or the anticipation of only 25% of the phosphate fertilization in the winter increased the levels of P labile, mainly oP, in addition to non-labile oP in the 5-10 cm layer. The TOC:oP ratio varied along the soil profile, with higher values obtained in the 0-5 cm layer (due to the higher TOC content in that layer) and below the 20 cm depth of the soil (due to the low mobility of P on the subsoil). However, all TOC:oP values were below 100, and a soil with a high content of available P could be considered.

Keywords: single superphosphate, sequential fractionation, phosphorus lability, low carbon agriculture.

6.1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um elemento essencial para o adequado desenvolvimento das plantas e obtenção de altos rendimentos das culturas agrícolas (SHEN et al., 2011). No entanto, o P tem uma dinâmica bastante complexa em solos de regiões tropicais e subtropicais, devido à alta capacidade de fixação aos coloides do solo, principalmente aos óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), principais componentes minerais desses solos (NOVAIS; SMITH, 1999; FINK et al., 2016). Isso faz com que, depois de corrigida a acidez do solo, a baixa disponibilidade de P no solo se torne o principal fator limitante ao rendimento das culturas (NOVAIS; SMITH, 1999).

Alterações no manejo do solo afetam a disponibilidade de P para as plantas (TIECHER et al., 2012; TIECHER et al., 2017), aumentando as perdas de P ou transformando-o em formas mais recalcitrantes (MARANGUIT; GUILLAME; KUZYAKOV, 2017). No entanto, manejos conservacionistas do solo, como o sistema plantio direto (SPD), podem aumentar os teores de P disponível, seja pelo não revolvimento do solo que reduz o contato dos íons fosfatos com as partículas do solo, diminuindo a adsorção de P (PAULETTI et al., 2009), seja pela produção de ácidos orgânicos que competem pelos sítios de adsorção (PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

Em SPD, a antecipação da adubação fosfatada para as culturas de milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* (L.) Merrill) no momento da semeadura da cultura de outono-inverno, é uma estratégia interessante como adubação de sistemas, que tem se mostrado viável (FRANCISCO, CÂMARA; SEGATELLI, 2007; GALETTO et al., 2014; GUERA; DA FONSECA; HARKATIN, 2020; ZANELLA et al., 2020). Além de promover maior flexibilidade de uso de máquinas e mão de obra e otimizar o processo da semeadura da safra de verão (MATOS et al., 2006), a antecipação da adubação não beneficia apenas a cultura de verão, mas também a cultura antecessora, promovendo formação de palhada para o SPD, favorecendo a conservação do solo, a manutenção da umidade e a ciclagem de nutrientes (ALTMANN, 2012).

A aplicação de fertilizante fosfatado no sulco de semeadura e a manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo, em SPD, geram um gradiente de concentração de P, tanto vertical, quanto horizontal (SCHLINDWEIN; ANGHINONI, 2000; PAULETTI et al., 2009), afetando as diferentes frações de P do solo. As formas de P orgânico (Po) e P inorgânico

(Pi) lábeis e não lábeis são aumentadas na superfície do solo cultivado em SPD (RODRIGUES et al., 2016). Ainda, a aplicação de fertilizantes fosfatados, a longo prazo, em SPD, leva ao acúmulo de P nas camadas superficiais do solo, principalmente na forma de Po lábil (OLIVEIRA et al., 2020), sendo que em condições de baixa disponibilidade de P no solo, as frações de Po são as responsáveis por suprir o P lábil do solo (GATIBONI et al., 2007).

O estudo das diferentes frações de P do solo é importante para melhor compreensão da dinâmica deste nutriente no solo e, conseqüentemente, auxiliar no desenvolvimento da melhor estratégia de manejo do solo e da adubação fosfatada para as culturas, visando a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola. Uma das metodologias bastante utilizadas para determinar as diferentes frações de P do solo é a proposta por Hedley et al. (1982), que usa, sequencialmente, extratores de menor à maior força de extração, os quais removem Pi e Po das formas mais disponíveis às mais estáveis (GATIBONI et al., 2007). No entanto, são escassos os trabalhos que avaliam a frações de P no solo submetido à antecipação de P solúvel. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos, a médio prazo, da antecipação da adubação fosfatada, por ocasião da semeadura da cultura de outono-inverno, sobre as diferentes frações de P no solo, em SPD.

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em setembro de 2012 na Estância Vendramin (latitude: 24°57'09"; longitude: 50°23'44"; altitude média: 786 m), município de Tibagi (PR). O clima predominante na região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfb - clima temperado, caracterizado por apresentar temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C (mesotérmico), com verões frescos, temperatura média no mês mais quente acima de 22°C e sem estação seca definida.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho Distrófico, manejado no Sistema Plantio Direto há mais de 10 anos. Por ocasião da instalação do experimento (setembro de 2012), o solo possuía os seguintes atributos na camada de 0-10 cm: pH (CaCl₂) 5,38; concentrações trocáveis de cálcio (Ca⁺²), magnésio (Mg⁺²) e potássio (K⁺) de 33,35; 26,35 e 2,11 mmol_c dm⁻³, respectivamente; acidez total (H+Al⁺³) de 36,75 mmol_c dm⁻³; saturação por bases (V) de 63%; concentrações de fósforo (P-resina) de 15,60 mg dm⁻³ e carbono orgânico total (COT) de 18,48 g dm⁻³ e 294,1; 80,4 e 625,6 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente.

O delineamento experimental adotado foi em blocos completos casualizados com seis repetições e cinco tratamentos: antecipação de 100%, 75%, 50%, 25% e 0% do P₂O₅, aplicado

por ocasião da semeadura da cultura de outono-inverno. A dose de 100% correspondeu 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, aplicado na forma de superfosfato simples (180 g kg⁻¹ de P₂O₅). Cada parcela possuía área total de 2730 m² (66,67 x 40,95 m).

A sucessão de culturas durante o período experimental foi: milho (safra 2012/2013), trigo (safra 2013), soja (safra 2013/2014), aveia preta (safra 2014), milho (safra 2014/2015), feijão (safrinha 2015), aveia preta (safra 2015), milho (safra 2015/2016), trigo (safra 2016), soja (safra 2016/2017). A adubação das culturas, com exceção da adubação fosfatada, foi realizada de acordo com demanda de cada cultura e o status dos nutrientes no solo. Ainda, não foi realizada correção da acidez do solo durante o período experimental. Maiores detalhes podem ser encontrados no Artigo 1.

Aos 57 meses após o início do experimento (maio/2017), foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, sendo que 12 pontos por parcela foram coletados para constituir uma amostra composta. Três pontos foram coletados na linha de semeadura e nove pontos foram coletados nas entrelinhas de semeadura. Essas amostras compostas foram levadas ao laboratório, secas em estufa a 40°C com circulação forçada de ar, moídas e peneiradas em peneira de malha de 2,0 mm.

Em seguida, foi realizado o fracionamento químico do P de acordo com a metodologia de Hedley; Stewart e Chauhan (1982) com as modificações propostas por Condron; Goh e Newman (1985). Para isso, foi pesado 0,500 g de cada amostra de solo e, em seguida, foram adicionados, de forma sequencial, os extratores: (i) resina trocadora de ânions (RTA), o qual extrai os teores de Pi lábil (Pi_{RTA}); (ii) bicarbonato de sódio (NaHCO₃) 0,5 mol L⁻¹, o qual extrai os teores de Pi e Po lábeis (Pi_{bic} e Po_{bic}); (iii) hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol L⁻¹, o qual extrai os teores de Pi e Po moderadamente lábeis (Pi_{hid} e Po_{hid}), ligados aos íons Fe e Al presentes na mineralogia do solo; (iv) ácido clorídrico (HCl) 1,0 mol L⁻¹, o qual extrai os teores de Pi não lábeis (Pi_{HCl}), ligados aos íons Ca²⁺, presentes na mineralogia do solo; (v) NaOH 0,5 mol L⁻¹, o qual extrai os teores de Pi e Po não lábeis (Pi_{hid0,5} e Po_{hid0,5}).

O solo remanescente foi seco em estufa e submetido à digestão com ácido sulfúrico (H₂SO₄) + peróxido de hidrogênio (H₂O₂) + cloreto de magnésio (MgCl₂) saturado (BROOKES; POWSON, 1981), para a determinação dos teores de P residual, ou seja, o Pi e Po recalcitrantes, oclusos dentro de compostos minerais e orgânicos. O Pi dos extratos alcalinos de NaHCO₃ e NaOH foi analisado pelo método de Dick e Tabatabai (1977). Nos extratos alcalinos foi determinado o P total por digestão com persulfato de amônio + ácido sulfúrico em autoclave (USEPA, 1971), sendo o Po obtido pela diferença entre P total e Pi. O P dos extratos

ácidos foi determinado segundo a metodologia de Murphy e Riley (1962). Ainda, determinou-se os teores de COT pelo método colorimétrico, proposto por Nelson e Sommers (1996).

A fração de P lábil do solo foi estimada pela soma dos teores de Pi_{RTA} , Pi_{bic} e Po_{bic} . Já a fração de P moderadamente lábil do solo foi estimada pela soma dos teores de Pi_{hid} e Po_{hid} ; e a fração de P não lábil, pela soma de $Pi_{hid0,5}$, $Po_{hid0,5}$, Pi_{HCl} e P residual. O P total do solo foi determinado pela soma de todas as formas de P extraídas pelo fracionamento de Hedley; Stewart e Chauhan (1982); já o Pi total foi determinado pela soma de todas as formas de Pi extraídas pelo fracionamento; e o Po total foi determinado pela soma de todas as formas de Po extraídas pela análise do fracionamento. Ainda, calculou-se a relação COT:Po total.

Todos os atributos avaliados foram submetidos à análise estatística univariada de acordo com o modelo de experimento em blocos completos casualizados, com cinco tratamentos e seis repetições. No caso de F significativo ($P < 0,05$), foi aplicado o teste de Scott-Knott ($\alpha = 0,05$) para os teores de P extraídos pelo fracionamento sequencial. Para o restante dos atributos avaliados, no caso de F significativo ($P < 0,05$), foi aplicado o teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.3.1 Formas de P Extraídas pelo Fracionamento Sequencial

Na camada de 0-5 cm do solo, a antecipação da adubação fosfatada tendeu a aumentar os teores de Po_{bic} (Tabela 6.1). Durante o processo de semeadura da cultura de outono-inverno, a adubação fosfatada é realizada em sulco a 5 cm de profundidade do solo, indicando que o fertilizante fosfatado solúvel, quando aplicado de modo antecipado, tende a permanecer na forma orgânica da fração de P lábil do solo, sendo uma importante fonte para a fração de Pi do solo (CONDRON e NEWMAN, 2011; JIMÉNEZ; HEALY; DALY, 2019). Ainda, a antecipação de 100% da adubação fosfatada aumentou a fração de Pi_{HCl} na camada de 0-5 cm do solo (Tabela 6.1). Como o fertilizante fosfatado utilizado foi o superfosfato simples, o qual possui Ca em sua constituição, o Pi presente no solo pode ter tido mais tempo de reação com o Ca fornecido pelo fertilizante, aumentando, dessa forma, os teores de Pi não lábil, ligado ao Ca, extraído por HCl (HEDLEY; MCLAUGHLIN, 2005).

Tabela 6.1 – Teores de fósforo inorgânico (Pi) e orgânico (Po) extraídos sequencialmente por resina trocadora de ânions (RTA), bicarbonato de sódio (NaHCO₃) 0,5 mol L⁻¹ (bic), hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol L⁻¹ (hid), NaOH 0,5 mol L⁻¹ (hid0,5), ácido clorídrico (HCl) 1 mol L⁻¹ e P residual no solo estimado por digestão ácida em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico, submetido, a médio prazo, à antecipação da adubação fosfatada (fonte solúvel) para a cultura de primavera-verão.

Tratamentos ⁽¹⁾	Pi _{RTA}	Pi _{bic}	Po _{bic}	Pi _{hid}	Po _{hid}	Pi _{hid0,5}	Po _{hid0,5}	Pi _{HCl}	P residual
mg kg ⁻¹									
Camada 0-5 cm									
T1	6,82 C ⁽²⁾	37,07 A	60,28 A	15,23 A	226,57 C	64,57 A	193,26 A	15,35 A	430,48 A
T2	14,61 A	34,72 A	31,04 B	10,93 B	302,71 B	54,39 A	164,46 A	9,88 B	505,02 A
T3	7,38 C	38,72 A	65,40 A	13,08 A	238,87 C	73,58 A	166,17 A	11,16 B	410,02 A
T4	11,73 B	34,88 A	49,51 A	15,08 A	357,92 A	63,57 A	181,45 A	10,72 B	484,74 A
T5	10,97 B	35,71 A	22,44 B	13,74 A	283,94 B	66,91 A	152,81 A	9,24 B	483,75 A
CV ⁽³⁾ (%)	21,00	8,99	32,84	14,83	18,14	13,54	14,88	20,80	16,67
Camada 5-10 cm									
T1	5,27 A	4,83 A	97,72 A	30,14 A	265,24 A	44,24 A	74,80 C	3,70 A	505,16 A
T2	4,19 A	3,57 A	58,56 C	26,80 A	294,49 A	44,26 A	66,72 C	3,72 A	579,76 A
T3	4,54 A	4,47 A	81,56 B	28,27 A	261,13 A	42,73 A	106,90 B	3,11 A	436,45 B
T4	5,16 A	3,95 A	115,26 A	30,64 A	298,77 A	44,03 A	126,20 B	3,26 A	429,05 B
T5	3,95 A	4,04 A	113,51 A	29,24 A	276,41 A	45,13 A	181,08 A	3,70 A	486,37 A
CV (%)	25,57	19,09	17,77	11,33	12,33	7,32	22,09	27,93	13,52
Camada 10-20 cm									
T1	4,54 B	0,98 C	83,87 A	21,15 B	293,45 A	44,44 A	194,56 B	3,51 A	477,98 B
T2	4,96 B	1,28 C	68,95 A	17,00 B	229,87 A	39,65 B	114,86 C	4,50 A	511,35 B
T3	9,49 A	1,54 C	71,63 A	19,98 B	324,57 A	39,80 B	273,76 A	3,40 A	620,23 A
T4	5,43 B	2,43 B	82,28 A	24,26 A	295,63 A	40,17 B	204,71 B	4,40 A	439,34 B
T5	3,81 B	3,50 A	84,36 A	24,54 A	261,65 A	40,29 B	172,09 B	2,85 A	475,36 B
CV (%)	24,67	21,31	22,73	15,40	19,91	6,80	17,67	37,53	17,53

⁽¹⁾ Antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada.

⁽²⁾ Letras maiúsculas iguais coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

⁽³⁾ CV: coeficiente de variação.

Continuação Tabela 6.1 – Teores de fósforo inorgânico (Pi) e orgânico (Po) extraídos sequencialmente por resina trocadora de ânions (RTA), bicarbonato de sódio (NaHCO_3) 0,5 mol L⁻¹ (bic), hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol L⁻¹ (hid), NaOH 0,5 mol L⁻¹ (hid0,5), ácido clorídrico (HCl) 1 mol L⁻¹ e P residual no solo estimado por digestão ácida em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico, submetido, a médio prazo, à antecipação da adubação fosfatada (fonte solúvel) para a cultura de primavera-verão.

Camada 20-40 cm									
T1	11,99 A	18,40 B	35,17 A	4,24 C	180,08 B	52,67 A	34,08 B	3,60 A	365,50 A
T2	11,92 A	23,07 A	47,01 A	10,69 A	192,60 B	63,50 A	54,81 A	3,76 A	380,26 A
T3	13,26 A	9,42 D	34,55 A	4,14 C	223,61 B	53,97 A	55,83 A	2,66 A	451,36 A
T4	5,57 B	12,02 C	32,03 A	4,43 C	209,54 B	61,31 A	24,18 B	2,92 A	402,46 A
T5	5,46 B	15,72 C	23,69 A	6,43 B	299,61 A	53,93 A	44,73 A	3,14 A	426,11 A
CV (%)	26,04	22,73	39,32	22,32	15,05	16,51	30,91	29,54	16,16

⁽¹⁾ Antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada.

⁽²⁾ Letras maiúsculas iguais coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

⁽³⁾ CV: coeficiente de variação.

Os maiores teores médios de Pi_{RTA} e Pi_{bic} foram obtidos na camada de 0-5 cm (Tabela 6.1). Como os teores de matéria orgânica do solo (MOS) tendem a ser mais elevados nessa camada, as substâncias húmicas e ácidos orgânicos de baixa massa molecular, liberados no processo de decomposição, podem ter auxiliado na diminuição dos sítios de adsorção e da energia de ligação fosfato-solo, aumentando os teores de Pi lábil (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001; PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

A aplicação total da adubação fosfatada no verão e as menores doses de P aplicadas de forma antecipadas tenderam a aumentar os teores de P na camada de 5-10 cm do solo, principalmente nas frações de Po_{bic} e $Po_{hid0,5}$ (Tabela 6.1). Isso se deve à aplicação de P na linha de semeadura na safra de primavera-verão, onde a aplicação do fertilizante fosfatado ocorre em sulco, a uma profundidade de aproximadamente 7 a 10 cm do solo, indicando que a cultura de primavera-verão absorveu e metabolizou o Pi fornecido pelo fertilizante mineral, transformando-o em formas orgânicas de diferentes labilidades, sendo uma importante fonte para a fração de Pi do solo (CONDRON e NEWMAN, 2011; JIMÉNEZ; HEALY; DALY, 2019).

Na camada de 10-20 cm do solo, a aplicação total da adubação fosfatada na semeadura de primavera-verão e a menor dose do fertilizante fosfatado aplicada de forma antecipada tenderam a aumentar os teores de Pi_{bic} e Pi_{hid} (Tabela 6.1). No entanto, quando a aplicação de P foi realizada de forma antecipada, o Pi teve sua labilidade diminuída nessa camada de solo, aumentando-se os teores de $Pi_{hid0,5}$ (Tabela 6.1). Devido a menor atividade biológica em camadas mais profundas do solo, a tendência do Pi do solo, ao longo do tempo, é ser adsorvido aos coloides do solo, formando compostos de $P-Fe$ e $P-Al$, com menor labilidade, conforme constatado por Koch et al. (2018).

A antecipação da adubação fosfatada aumentou os teores de Pi lábil no solo, na camada de 20-40 cm, onde a antecipação de até 50% da dose de P resultaram nos maiores teores de Pi_{RTA} (Tabela 6.1) e a antecipação de até 75% da adubação fosfatada resultaram nos maiores teores de Pi_{bic} (Tabela 6.1). Em contrapartida, a aplicação total da adubação fosfatada na cultura de primavera-verão tendeu a aumentar os teores de Po moderadamente lábil (Po_{hid}) na camada de 20-40 cm do solo (Tabela 6.1). Em média, os maiores teores de Po_{hid} foram observados até 20 cm de profundidade do solo. Já na camada de 20-40 cm houve redução de 21,5% nos teores dessa forma de P , em comparação com a camada superficial do solo. Devido ao menor teor de MOS nas camadas mais profundas do solo, o P em profundidade tende a predominar na forma inorgânica, com maior estabilidade (KOCH et al., 2018).

A antecipação da adubação fosfatada afetou os teores de P residual apenas nas camadas de 5-10 cm e 10-20 cm, onde a antecipação de 75% e de 50% resultaram em maiores teores dessa forma de P, nas respectivas camadas de solo (Tabela 6.1). Pode-se observar que os teores de P residual na camada de 20-40 cm do solo foram, em média, menores que nas camadas superficiais do solo, independente dos tratamentos (Tabela 6.1). Isso pode indicar que o P pode ter sido parcialmente mineralizado e, portanto, mobilizado para outras frações (JIMÉNEZ; HEALY; DALY, 2019), como o Pi_{HCl} e Pi_{RTA} , as quais apresentaram valores médios superiores na camada de 20-40 cm do que na camada de 10-20 cm (Tabela 6.1). Apesar de ser considerado a fração mais recalcitrante e, portanto, o menos disponível de todas as frações (TURNER et al., 2005), o P residual pode atuar como fonte de P para culturas agrícolas e florestais com pouco ou nenhum fornecimento de P (VELÁSQUEZ et al., 2016; CONDRON; NEWMAN, 2011). Ainda, o P residual pode ser considerado como “P legado”, ou seja, o P acumulado ao longo do tempo, devido a entradas sucessivas e potencialmente excessivas de P (LIU et al., 2015), que pode servir como fonte de P a longo prazo para as águas superficiais, afetando a sua qualidade (PENN et al., 2014).

6.3.2 P Total e Labilidade do P

O P lábil do solo foi afetado pelos tratamentos na camada de 0-5 cm, 5-10 cm e 20-40 cm (Figura 6.1A). A antecipação de 50% da dose do fertilizante fosfatado (T3) foi 38% superior ao P lábil do solo em comparação com a aplicação da adubação fosfatada na semeadura de primavera-verão (T5), na camada de 0-5 cm. Já na camada de 5-10 cm, a antecipação de 25% (T4) e a aplicação total do P no verão resultaram nas maiores frações de P lábil do solo (Figura 6.1A). Na camada de 20-40 cm, esses tratamentos (T4 e T5) apresentaram nas menores frações de P lábil, em comparação com o com a antecipação de 75% da adubação fosfatada (T2) (Figura 6.1A). As diferenças entre as profundidades de aplicação do fertilizante fosfatado durante os processos de semeadura (camada de 0-5 cm durante a safra de outono-inverno e camada de 5-10 cm durante a safra de primavera-verão) podem ter influenciado os teores de P lábil no solo. Na camada de 0-5 cm houve a tendência de apresentar maiores teores de P lábil com a antecipação da adubação fosfatada, enquanto que na camada de 5-10 cm, verifica-se o oposto, com uma tendência de maiores teores de P lábil quando o P foi aplicado na cultura de primavera-verão. Ainda, pode-se observar que em todas as camadas de solo, independente dos tratamentos, a fração de P lábil teve a menor contribuição no P total do solo (Figura 6.2), demonstrando que essa fração de P tem sua labilidade facilmente alterada ao longo do tempo.

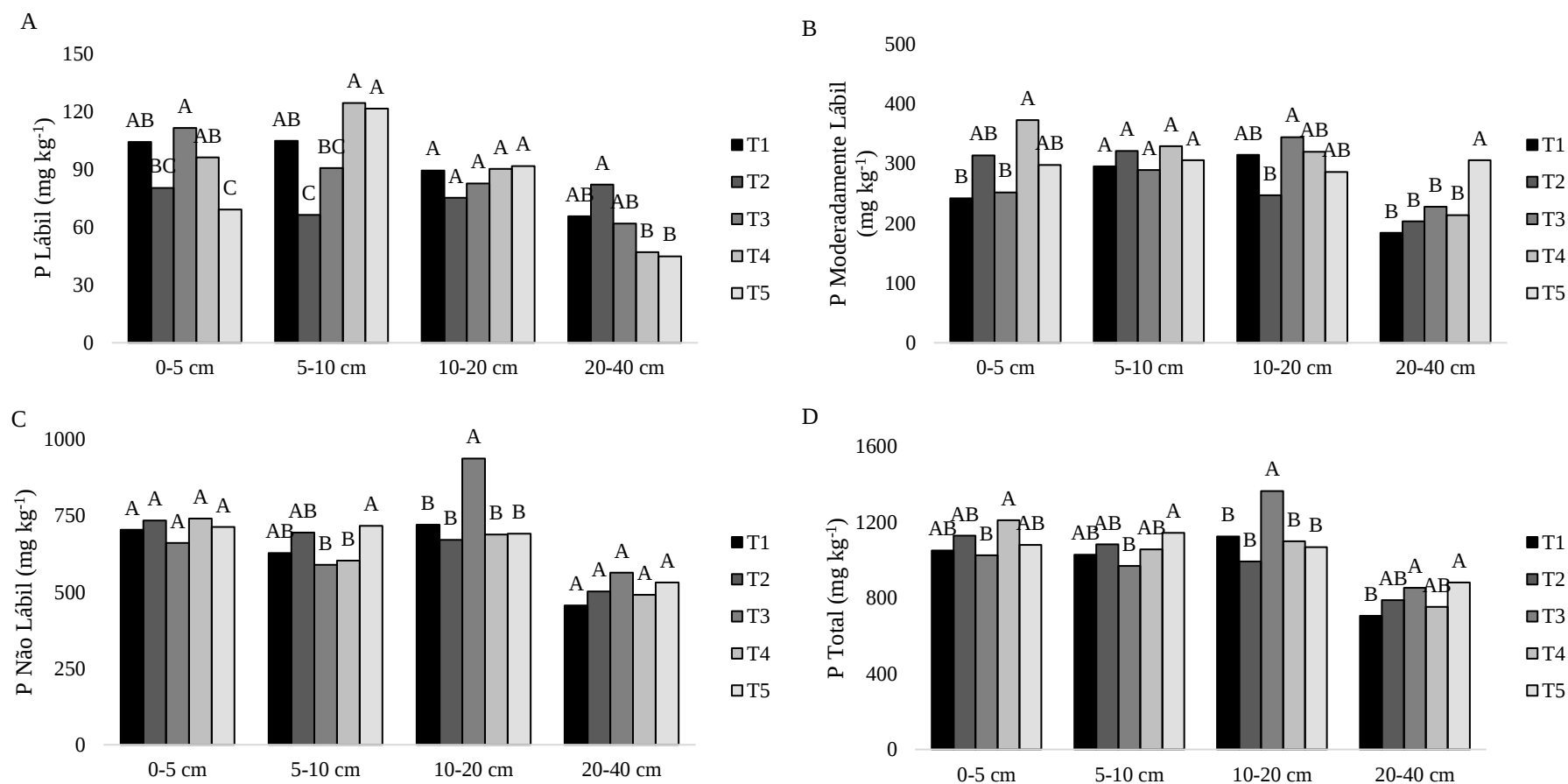


Figura 6.1 – Teores (em mg kg⁻¹) de fósforo (P) lábil (A), P moderadamente lábil (B), P não lábil (C) e P total (D) de um Latossolo Vermelho Distrófico, submetido, a médio prazo, à antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada (fonte solúvel) para a cultura de primavera-verão. Letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

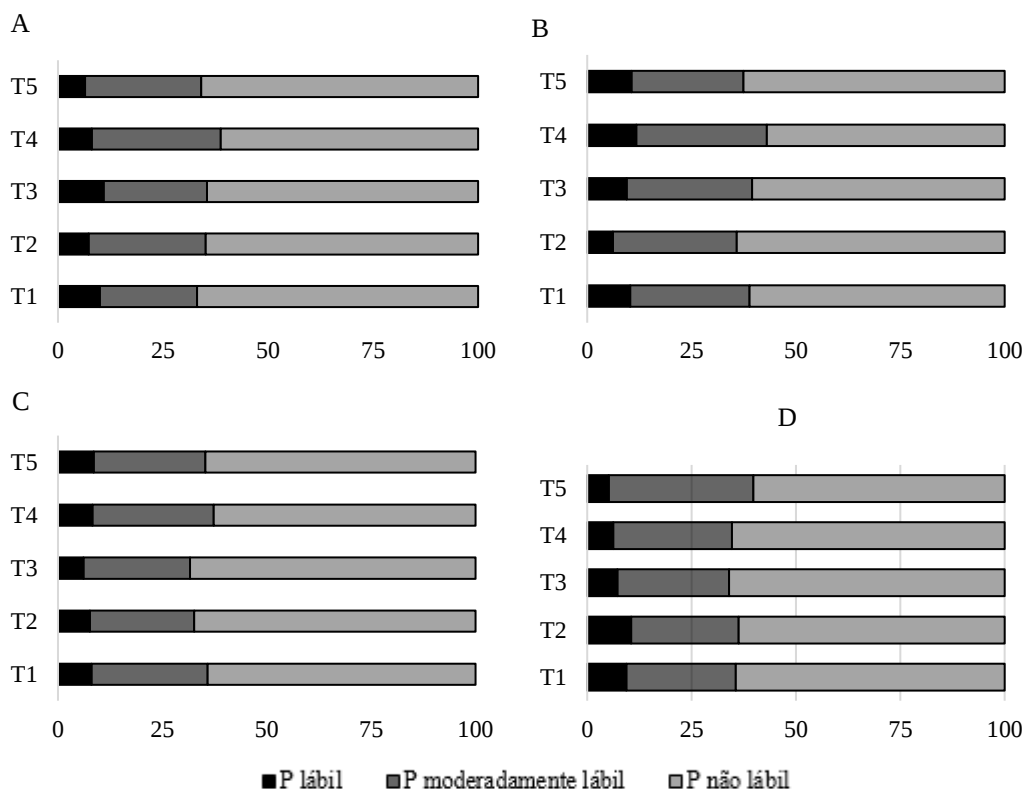


Figura 6.2 – Porcentagem das frações fósforo (P) lábil, P moderadamente lábil e P não lábil em relação ao P total do solo, nas camadas de 0-5 cm (A), 5-10 cm (B), 10-20 cm (C) e 20-40 cm (D) de um Latossolo Vermelho Distrófico, submetido, a médio prazo, à antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada (fonte solúvel) para a cultura de primavera-verão.

Na camada de 0-5 cm do solo, a antecipação de 25% da dose do fertilizante fosfatado (T4) resultou nas maiores frações de P moderadamente lábil, em comparação com a antecipação de 100% e 50% da adubação fosfatada (Figura 6.1B). A antecipação da adubação fosfatada não afetou a fração de P moderadamente lábil na camada de 5-10 cm do solo (Tabela 6.1, Figura 6.1B), apresentando pouca variação entre os tratamentos, representando 26,83% (T5) a 31,26% (T4) do P total do solo (Figura 6.2B). Na camada de 10-20 cm, a fração de P_i moderadamente lábil foi alterada pela antecipação da adubação fosfatada, onde a antecipação de 25% da adubação fosfatada (T2) apresentou um teor 28% inferior ao tratamento com maior teor (T3) dessa fração de P do solo (Figura 6.1B). Apesar dessa diferença, pode-se observar pouca variação entre os tratamentos para a fração de P moderadamente lábil em relação ao P total (Figura 6.2C), uma vez que a antecipação de 25% do fertilizante fosfatado (T2), além de apresentar os menores teores da fração de P moderadamente lábil, também apresentou menores teores de P total nessa camada de solo, em comparação com a antecipação de 50% da adubação (T3) (Figura 6.1A). Já na camada de 20-40 cm, a não antecipação da adubação fosfatada (T5) apresentou a maior fração de P moderadamente lábil em comparação com os demais

tratamentos (Figura 6.1B), representando 34,70% do P total, nessa camada de solo (Figura 6.2D).

Como o P não lábil e o P residual não foram afetados pelos tratamentos na camada de 0-5 cm (Tabela 6.1), também não houve alteração na fração de P não lábil em função do manejo da adubação nessa camada de solo (Figura 6.1C). Essa fração de menor labilidade de P representou, em média, 64,70% do P total na camada superficial do solo (Figura 6.2A). Na camada de 5-10 cm, a não antecipação do fertilizante fosfatado (T5) apresentou os maiores teores de Po não lábil (Tabela 6.1), fazendo com que a fração de P não lábil do solo fosse superior nesses tratamentos, em comparação com a antecipação de 100% e 50% da adubação fosfatada (Figura 6.1C). No entanto, como a antecipação de 25% da adubação fosfatada (T4) resultou nos maiores teores de P residual na camada de 5-10 cm (Tabela 6.1), este tratamento apresentou a maior porcentagem da fração de P não lábil (64,17%) em relação ao P total nessa camada do solo (Figura 6.2B). Na camada de 10-20 cm, os maiores teores de Po não lábil e P residual para a antecipação de 50% da adubação (T3) (Tabela 6.1) resultaram na maior fração de P não lábil, nessa camada de solo (Figura 6.1C), representando 68,40% do P total (Figura 6.2C). Já na camada de 20-40 cm, como o Pi não lábil e o P residual não foram afetados pelos tratamentos (Tabela 6.1), a fração de P não lábil do solo também não variou com a antecipação da adubação fosfatada (Figura 6.1C), representando de 63,70% (T2) a 66% (T3) o P total do solo (Figura 6.2D).

A antecipação de 50% da dose do fertilizante fosfatado (T3) apresentou os menores teores de P total nos primeiros 10 cm de profundidade do solo (Figura 6.1D). Já na camada de 10-20 cm do solo, a antecipação de 50% da adubação fosfatada apresentou os maiores teores de P total (Figura 6.1D), devido, principalmente, aos maiores teores de P_{iRTA} , $P_{ohid0,5}$ e P residual encontrados nesse tratamento (Tabela 6.1). Já na camada de 20-40 cm do solo, os a antecipação de 50% e 0% da adubação fosfatada apresentaram teores de P total estatisticamente superiores à antecipação de 100% do P (Figura 6.1D).

O teor médio ponderado (levando em consideração a espessura das camadas de solo avaliadas) de P total ao longo do perfil do solo foi de 750 mg kg^{-1} . Latossolos naturais, sem fertilização e cultivo possuem, em média, 193 mg kg^{-1} de P total (YANG; POST, 2011). Dessa forma, pode-se dizer que aproximadamente 75% do P total do solo estudado foi proveniente da ação antropogênica, corroborando com Ringeval et al. (2014), os quais encontraram que na França, cerca de 82% do P total do solo é de originário da ação humana.

Pode-se observar ainda, que os teores de P total tiveram pouca variação até os 20 cm de profundidade do solo. Já na camada de 20-40 cm, houve uma redução de 27% em

comparação com o P total médio nas camadas superiores do solo. Isso mostra a baixa mobilidade de P ao longo do perfil do solo, com tendência do P ser adsorvido aos coloides do solo, com diferentes forças de adsorção, afetando sua labilidade. Tem-se observado teores de P mais uniformes até os 15 cm de profundidade do solo em áreas agrícolas cultivadas a mais de 17 anos em SPD (OLIVEIRA et al., 2020).

De maneira geral, pode-se observar que o Po e P residual foram as frações predominantes em todas as camadas do solo, independente dos tratamentos (Tabela 6.1), com valores variando de 35,29% a 53,05% e de 39,81% a 53,57% do P total do solo, respectivamente, enquanto que o P lábil foi a menor fração de P do solo (Figura 6.1B), não excedendo 11,8% do P total em todas as camadas de solo, para todos os tratamentos (Figura 6.2). Jiménez; Healy e Daly et al. (2019) encontrou resultados similares para os valores de Po (24,20% a 50,40%) e P residual (25,40% a 55,30%), no entanto, o P lábil não excedeu a 5,50% em solo deficientes em P e com diferentes teores de MOS. Segundo esses autores, o Po e o P residual são potenciais fornecedores de P para as frações de P mais lábeis. Rodrigues et al. (2021) também observaram que o cultivo de Latossolos por longos períodos de tempo, em SPD, aumentaram o P total do solo, porém apenas uma pequena porção permaneceu nas frações lábeis (11-16%), com um ligeiro aumento nas concentrações de P não lábil (<5%) e P orgânico (10-20%).

Todas as frações de P do solo apresentaram maiores valores médios até 20 cm de profundidade do solo (Figura 6.1). Já na camada de 20-40 cm do solo, houve redução de 40% para o P lábil; 26% para o P moderadamente lábil e 31% para o P não lábil, em comparação com os maiores valores médio de cada fração de P. Isso demonstra a baixa mobilidade do P ao longo do perfil do solo, que, quando adicionada nas camadas superficiais, tende a ser prontamente adsorvido aos coloides (JIMÉNEZ; HEALY; DALY, 2019; OLIVEIRA et al., 2020), resultando em menores teores do P total no subsolo (Figura 6.1D) e, conseqüentemente nos menores valores das frações de P do solo. Ainda, a fração de P que mais sofre redução com a profundidade do solo foi a fração de P lábil, demonstrando que o P disponível, se não absorvido pelas plantas ou utilizado pela microbiota do solo, tende a se ligar aos coloides, diminuindo a sua labilidade (JIMÉNEZ; HEALY; DALY, 2019).

6.3.3 Distribuição de Pi e Po Total e Relação COT:Po Total ao Longo do Perfil do Solo

Maiores teores de Pi total do solo foram observadas na camada de 0-5 cm (Figura 6.3A), uma vez que a aplicação de P se dá nas primeiras camadas do solo, além da própria

concentração em função da liberação de P dos resíduos culturais (TIECHER et al., 2012). O Pi total do solo apresenta um comportamento de distribuição semelhante, com maiores teores na camada de 0-5 cm, decrescendo com o aumento da profundidade, para todos os tratamentos, com exceção para a antecipação de 75% da adubação fosfatada (T2), principalmente na camada de 20-40 cm (Figura 6.3A). Essa diferença deve-se aos maiores teores de Pi lábil e Pi moderadamente lábil encontrados nessa camada de solo para esse tratamento (Tabela 6.1). O Pi total do solo é constituído principalmente de Pi ligado ao Fe e Al (Pi_{hid} e $Pi_{hid0,5}$) (Tabela 6.1). Em solos altamente intemperizados, como Latossolos, os quais possuem abundância de óxidos de Fe e Al, a maior parte do P está ligado a estes minerais, predominando na fração de Pi do solo (YANG; POST, 2011).

Em relação ao Po total, pode-se observar que seus teores distribuem-se de maneira mais irregular no perfil do solo, de acordo com os tratamentos (Figura 6.3B). Na camada de 0-5 cm do solo, sobressai-se o Po total para a antecipação de 25% da adubação fosfatada (T4), o qual apresenta pouca variação até os primeiros 20 cm de profundidade do solo e, depois dos 20 cm, cai drasticamente, assim como o Pi total para todos os tratamentos (Figura 6.3A). Na camada de 5-10 cm a aplicação total do P no verão ou apenas antecipar 25% do P no inverno se diferiram dos demais tratamentos (Figura 6.3B). Isso reforça a hipótese que a aplicação de P no verão aumenta os teores de P orgânico na camada de 5-10 cm. Ainda, a adoção de sistemas de manejo conservacionistas do solo, uso de culturas de cobertura, rotações de culturas estratégicas e uso de fertilizantes orgânicos podem aumentar o P orgânico em 3-180% e o P da biomassa microbiana em 30-240% (DODD; SHARPLEY, 2015). A adoção de estratégias que aumentem a disponibilidade de Po às plantas pode reduzir a dependência de insumos externos de P, promovendo maior eficiência de uso de P.

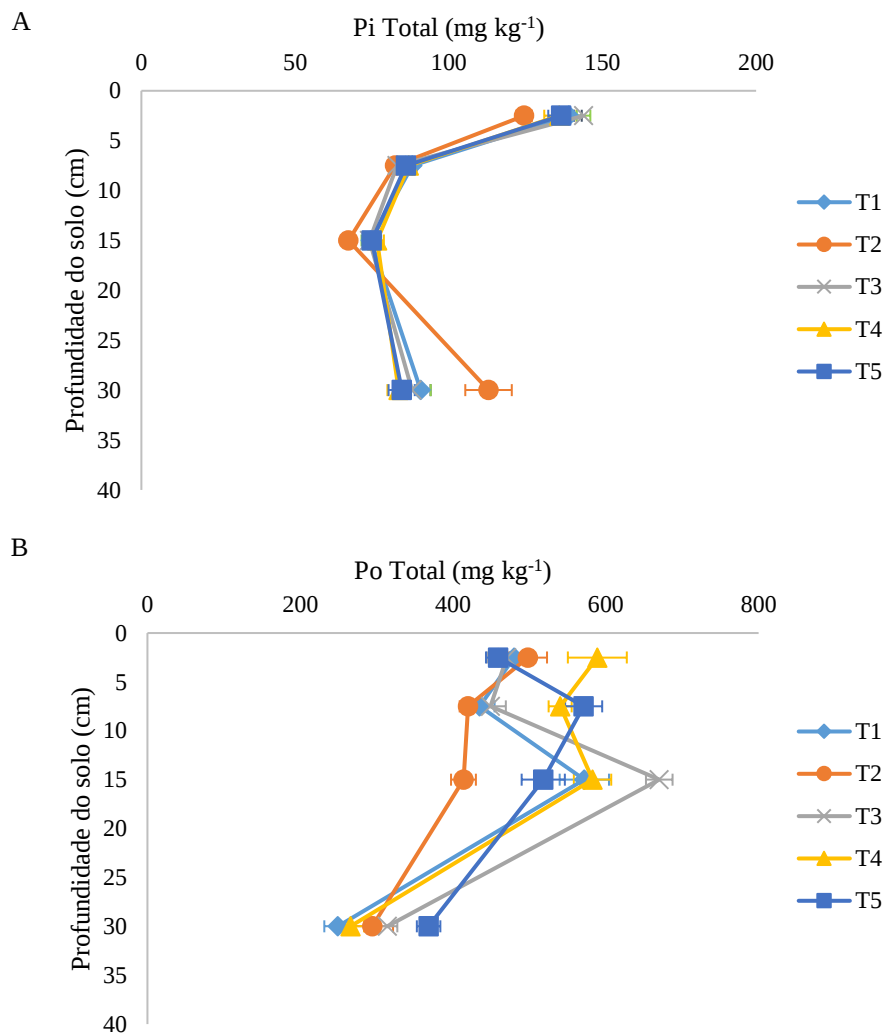


Figura 6.3 – Teores totais (em mg kg⁻¹) de fósforo inorgânico – Pi (A) e fósforo orgânico – Po (B) ao longo do perfil do solo (Latossolo Vermelho distrófico), submetido, a médio prazo, à antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada (fonte solúvel) para a cultura de primavera-verão. Barras laterais correspondem ao erro padrão da média (n=6).

Houve grande variação na relação COT:Po total entre as camadas de solo (Figura 6.4), com valores de $31,72 \pm 1,20$ (T3 na camada de 10-20 cm) a $91,72 \pm 6,51$ (T1 na camada de 20-40 cm). Essa relação de COT:Po pode ser usada para dar ideia da disponibilidade de P do solo (MARANGUIT; GUILLAME; KUZUYAKOV., 2017), onde o fornecimento adequado de P disponível para as plantas evita a mineralização de Po pelas fosfatases, resultando no acúmulo de Po e reduzindo a relação COT:Po (DIETER; ELSNBEER; TURNER, 2010; MARANGUIT; GUILLAME; KUZUYAKOV, 2017). No entanto, se o P disponível for insuficiente para o adequado desenvolvimento das plantas, estas começam a liberar enzimas fosfatases na rizosfera (MARSCHNER, 2012), aumentando a mineralização de Po em comparação com a mineralização de COT, resultando no aumento da relação COT:Po

(DIETER; ELSENBEER; TURNER, 2010, MARANGUIT; GUILLAME; KUZYAKOV, 2017).

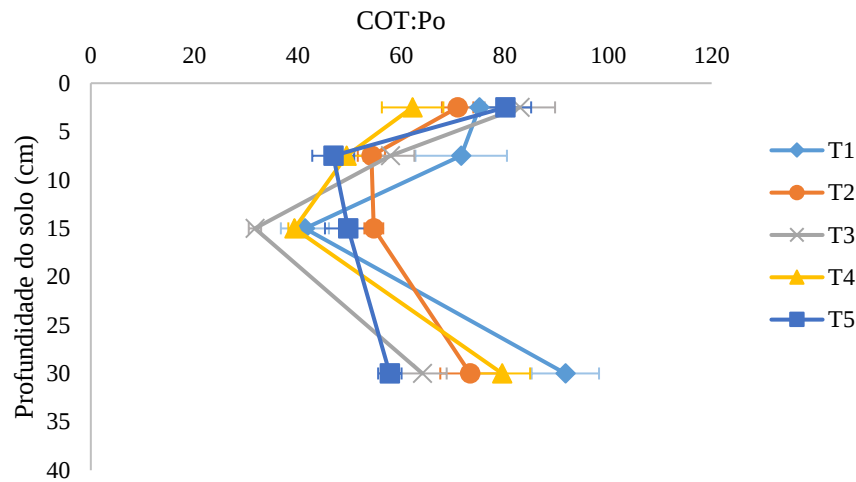


Figura 6.4 – Relação carbono:fósforo orgânico total (COT:Po) ao longo do perfil do solo (Latossolo Vermelho distrófico), submetido, a médio prazo, à antecipação de 100% (T1), 75% (T2), 50% (T3), 25% (T4) e 0% (T5) da adubação fosfatada (fonte solúvel) para a cultura de primavera-verão. Barras laterais correspondem ao erro padrão da média (n=6).

Maiores valores de COT:Po foram encontrados na camada de 0-5 cm, com redução entre os 5 a 20 cm de profundidade do solo, com tendência a aumentar os valores abaixo de 20 cm (Figura 6.4). Esses maiores valores da relação COT:Po na camada superficial do solo pode ser devido ao alto aporte de C durante o período experimental, através da rotação de culturas nos sistema plantio direto, com gramíneas sendo cultivadas na safra de outono-inverno (trigo e aveia preta) e de primavera-verão (milho). Ainda, essa maior concentração de C estimula a atividade microbiana do solo, a qual também utiliza o P para seu metabolismo, podendo usar como fonte de energia, o Po dos resíduos vegetais.

Pode-se observar que para todos os tratamentos e em todas as camadas de solo, os valores da relação COT:Po ficaram abaixo de 100. Segundo Dieter; Elsenbeer e Turner (2010), se o solo tiver um alto conteúdo de P disponível, a relação COT:Po é <100, enquanto a relação em solos com P disponível insuficiente é >200.

6.4 CONCLUSÕES

Independente da antecipação da adubação fosfatada, o fósforo orgânico e o fósforo residual foram os principais componentes do fósforo total do solo, em maior quantidade na

fração de fósforo moderadamente lábil e não lábil. A antecipação da adubação fosfatada aumentou o fósforo orgânico lábil, fósforo lábil total e fósforo inorgânico não lábil ligado ao cálcio na camada de 0-5 cm, enquanto a adubação fosfatada na cultura de primavera-verão ou a antecipação de apenas 25% da adubação fosfatada no inverno elevou os teores de P lábil, principalmente o fósforo orgânico, além do fósforo orgânico não lábil na camada de 5-10 cm. A relação carbono orgânico total:fósforo orgânico variou ao longo do perfil do solo, com maiores valores obtidos na camada de 0-5 cm (devido ao maior teor de COT nessa camada) e abaixo dos 20 cm de profundidade do solo (devido à baixa mobilidade de P no solo). No entanto, todos os valores de carbono orgânico total:fósforo orgânico ficaram abaixo de 100, podendo ser considerado um solo com alto conteúdo de P disponível.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A antecipação da adubação fosfatada é uma boa estratégia como adubação de sistemas, pois beneficia a produção de fitomassa da cultura de cobertura do solo, bem como não interfere no rendimento de grãos do trigo, durante a safra de outono-inverno. Essa prática, apesar de promover alterações na nutrição (porém com concentrações adequadas de nutrientes) das culturas de milho e soja, não prejudica o rendimento de grãos.

Com relação à fertilidade do solo, a antecipação da adubação fosfatada altera os atributos químicos do solo, sendo essa alteração também dependente das espécies de plantas utilizadas na sucessão de culturas. Ainda, os altos teores de matéria orgânica do solo, principalmente nas camadas superficiais, auxiliam na manutenção dos atributos de fertilidade, bem como na maior disponibilidade de fósforo (P) no solo.

Apesar da maior parte do P total do solo encontrar-se nas frações moderadamente lábil e não lábil, a antecipação da adubação fosfatada, associada ao sistema plantio direto e ao cultivo de plantas com boa capacidade de reciclagem, aumentou, na camada de 0-5 cm, as formas lábeis de P, principalmente orgânicas, e formas não lábeis ligadas ao cálcio. No entanto, a aplicação de P no verão ou a antecipação de apenas 25% da dose no inverno eleva, na camada de 5-10 cm, as formas lábeis de P, principalmente as orgânicas, além das formas orgânicas não lábeis.

Em trabalhos futuros, seria interessante a avaliação completa do rendimento operacional do processo de semeadura das culturas de primavera-verão, após a antecipação da adubação fosfatada, utilizando-se parcelas de maior área e distintos maquinários agrícolas.

REFERÊNCIAS

- ALTMANN, N. Adubação de sistemas integrados de produção em plantio direto: resultados práticos no Cerrado. IPNI, **Informações Agronômicas**, n.140, p.1-8, 2012.
- AMADO, T. J. C. Manejo da fertilidade do solo e desenvolvimento agropecuário sustentável. In: DA FONSECA, A. F.; CAIRES, E. F.; BARTH, G. **Fertilidade do solo e nutrição de plantas no sistema plantio direto**. Ponta Grossa: Associação dos Engenheiros Agrônomos dos Campos Gerais, 2011.
- ANDRADE, F.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.1003-1011, 2003.
- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, p.921–950, 2001.
- BARROW, N. J. Soil phosphate chemistry and the P-sparing effect of previous phosphate applications. **Plant Soil**, v.397, 401–409, 2015.
- BOHAC, E. A. F.; CÂMARA, D. S. G. M.; SEGATELLI, C. R. Estado nutricional e produção do capim-pé-de galinha e da soja cultivada em sucessão em sistema antecipado de adubação. **Bragantia**, v.66, p.259-266, 2007.
- BORDIN, I.; NEVES, C. S. V. J.; MEDINA, C. C.; SANTOS, J. C. F.; TORRES, E.; URQUIGA, S. Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho em plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.1785-1792, 2008.
- BORKERT, C. M.; GAUDÊNCIO, C. A.; PEREIRA, J. E.; PEREIRA, L. R.; OLIVEIRA JUNIOR, A. Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.38, p. 143-153, 2003.
- BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.32, p.671-674, 1981.
- BUCHER, C. A.; BUCHER, C. P. C.; ARAUJO, A. P.; SPERANDIO, M. V. L. XI Fósforo. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. **Nutrição mineral de plantas**. 2 ed. Viçosa, MG:SBSC, 2018.
- BÜNEMANN, E. K.; STEINEBRUNNER, F.; SMITHSON, P. C.; FROSSARD, E.; OBERSON, A. Phosphorus dynamics in a highly weathered soil as revealed by isotopic labeling techniques. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.1645–1655, 2004.
- CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use Management**, v.27, p.45-53, 2011.

CAIRES, E. F.; SCHARR, D. A.; JORIS, H. A. W.; HALISKI, A.; BINI, A. R. Phosphate fertilization strategies for soybean production after conversion of a degraded pastureland to a no-till cropping system. **Geoderma**, v.308, p.120–129, 2017.

CAKMAK, D.; SALJNKOV, E.; MRVIC, V.; JAKOVLJEVIC, M.; MARJANOVIK, Z.; SIKIRIC, B.; MAKSIMOVIC, S. Soil properties and trace elements contents following 40 years of phosphate fertilization. **Journal of Environmental Quality**, v.39, 2010.

CALEGARI, A.; TIECHER, T.; HARGROVE, W. L.; RALISCH, R.; TESSIER, D.; TOURDONNET, S.; GUIMARÃES, M. F.; SANTOS, D. R. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, v.133, p.32–39, 2013.

CARDOSO, E. G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J. L.; TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; GUIMARÃES, M. F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.41, p.493-501, 2006.

CARVALHO, A. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; ALMONDES, Z. A. P.; FIGUEIREDO, C. C. Forms of phosphorus in an oxisol under different soil tillage systems and cover plants in rotation with maize. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.972-979, 2014.

CASARIN, V.; STIPP, S. R. Quatro medidas corretas que levam ao uso eficiente dos fertilizantes. **Informações agronômicas**, n.142, p.14-20, 2013.

CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; TU, S.; SNYDER, C. S. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.89, p.229–255, 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 7 Safra 2019/20 - Décimo segundo levantamento, Brasília: Conab, 2020. 68p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 9, Safra 2015/16 - Nono levantamento, Brasília: Conab, 2016. 174p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, quarto levantamento, dezembro/2015. Brasília: Conab, 2015. 154p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 4 Safra 2016/17 - Décimo primeiro levantamento, Brasília: Conab, 2017. 164p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos**, nono levantamento, junho 2013. Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: Conab, 2013. 31p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos**, v. 1 - Safra 2013/14, n. 11 - Décimo Primeiro Levantamento. – Brasília: Conab, 2014. 87p.

CONDON, L.M.; NEWMAN, S. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. **Journal of Soils and Sediments**, v.11, p.830–840, 2011.

CONDRON, L. M.; TURNER, B. L.; CADE-MENUN, B. J. Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. In: SIMS, J. T.; SHARPLEY, A. N. **Phosphorus: Agriculture and the Environment**. Madison, WI: Agronomy Society of America, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2005.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ^{31}P nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, v.36, p.99-207, 1985.

CORDELL D.; NESET, T. S. Phosphorus vulnerability: a qualitative framework for assessing the vulnerability of national and regional food systems to the multi-dimensional stressors of phosphorus scarcity. **Global Environmental Change**, v.24, p.108-22, 2014.

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

CORDELL, D.; WHITE, S. Life's bottleneck: sustaining the world's phosphorus for a food secure future. **Annual Review of Environment and Resources**, v.39, p.161-188, 2014.

CRUSCIOL, C. A. C.; MORO, E.; LIMA, E. V.; ANDREOTTI, M. Taxas de decomposição e de liberação de macronutrientes da palhada de aveia preta em plantio direto. **Bragantia**, v.67, p.481-489, 2008.

DE NOBILI, M.; DIAZ-RAVINA, M.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. Adenosine 5'-triphosphate measurements in soils containing recently added glucose. **Soil Biology and Biochemistry**, v.28, p.1099-1104, 1996.

DELGADO, A.; QUEMADA, M.; VILLALOBOS, F. J.; MATEOS, L. Fertilization with phosphorus, potassium and other nutrients. In: VILLALOBOS, F. J.; FERERES, E. **Principles of agronomy for sustainable agriculture**. Springer Internacional Publishing AG, 2016.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, v.6, p.82-85, 1977.

DIETER, D.; ELSENBEER, H.; TURNER, B. Phosphorus fractionation in lowland tropical rainforest soils in Central Panama. **Catena**, v.82, p.118-125, 2010.

DODD, R. J.; SHARPLEY, A. N. Recognizing the role of soil organic phosphorus in soil fertility and water quality. **Resources, Conservation and Recycling**, v.105, p.282-293, 2015.

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

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. New York: Marcel Dekker, 1997.

FAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. S. Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. **Advances in Agronomy**, v.128, 2014.

FAN, J.; MCCONKEY, B.; WANG, H.; JANZEN, H. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. **Field Crops Research**, v.189, p.68–74, 2016.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Special Report, 80. Ames: Iowa State University, 1977.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil & Tillage Research**, v.155, p.62–68, 2016.

FOLLAIN, S.; SCHVARTZ, C.; DENOROY, P.; VILLETTE, C.; SABY, N. P. A.; ARROUAYS, D.; LEMERCIER, B.; WALTER, C. A method for assessing available phosphorus content in arable topsoils over large spatial scales. **Agronomy for Sustainable Development**, v.29, p.371-379, 2009.

FRANCHINI J. C.; MALAVOLTA, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Alterações químicas em solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.533-542, 1999.

FRANCISCO, E. A. B.; CÂMARA, D. S. G. M.; SEGATELLI, C. R. Estado nutricional e produção do capim-pé-de-galinha e da soja cultivada em sucessão em sistema antecipado de adubação. **Bragantia**, v. 66, p. 259-266, 2007.

GALETTO, S. L.; DA FONSECA, A. F.; HARTAKIN, S.; REIFUR, H. I.; CARVALHO, I. Q. Grain crops and forage yield resulting from the use of phosphates in integrated production system. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, p. 931-945, 2014.

GALVANI, R.; HOTTA, L. F. K.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus sources and fractions in an Oxisol under no-tilled soybean. **Scientia Agricola**, v.65, p.415-421, July/August 2008.

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

GUAN, D.; AL-KAISI, M. M.; ZHANG, Y.; DUAN, L.; TAN, W.; ZHANG, M.; LI, Z. Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize. **Field Crops Research**, v.157, p.89-97, 2014.

GUERA, K. C. S.; DA FONSECA, A. F.; HARKATIN, S. Phosphorus use in soybean in integrated production system under anticipation of phosphate fertilization. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, e20196881, 2020.

GUPPY, C. N.; MENZIES, N. W.; MOODY, P. W.; BLAMEY, F. P. C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. **Australian Journal of Soil Research**, v.43, p.189-202, 2005.

HEDLEY, M.; MCLAUGHLIN, M. **Reactions of phosphate fertilizers and by-products in soils**. Madison, WI: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2005.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, v.46, p.970–976, 1982.

HUANG, L. M.; JIA, X. X.; ZHANG, G.L.; SHAO, M. A. Soil organic phosphorus transformation during ecosystem development: A review. **Plant Soil**, 2017.

JIMÉNEZ, J. L. G.; HEALY, M. G.; DALY, K. Effects of fertilizer on phosphorus pools in soils with contrasting organic matter content: A fractionation and path analysis study. **Geoderma**, v.338, p.128–135, 2019.

KOCH, M.; KRUSE, J.; EICHLER-LÖBERMANN, B.; ZIMMER, D.; WILLBOLD, S.; LEINWEBBER, P.; SIEBERS, N. Phosphorus stocks and speciation in soil profiles of a long-term fertilizer experiment: Evidence from sequential fractionation, P K-edge XANES, and ^{31}P NMR spectroscopy. **Geoderma**, v.316, p.115–126, 2018.

LAL, R. Enhancing crop yields in the developing countries through restorations of the soil organic carbon pool in agricultural lands. **Land Degradation & Development**, v.17, p.197–209, 2006.

LAMBERS, H.; SHANE, M. W.; CRAMER, M. D.; PEARSE, S. J.; VENEKLAAS, E.J. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: Matching morphological and physiological traits. **Annals of Botany**, v.98, p.693–713, 2006.

LANA, R. M. Q.; VILELA FILHO, C. E.; ZANÃO JÚNIOR, L. A. Adubação superficial com fósforo e potássio para a soja em diferentes épocas em pré-semeadura na instalação do plantio direto. **Scientia Agricola**, v.4, p.53-60, 2003.

LI, H.; SHEN, J.; ZHANG, F.; MARSCHNER, P.; CAWTHRAY, G.; RENGEL, Z. Phosphorus uptake and rhizosphere properties of intercropped and monocropped maize, faba bean, and white lupin in acidic soil. **Biology and Fertility of Soils**, v.46, p.79–91, 2010.

LINDSAY, W. L. **Chemical Equilibria in Soils**. New York: John Wiley & Sons, 1979.

LIU, J.; HU, Y.; YANG, J.; ABDI, D.; CADE-MENUN, B. J. Investigation of soil legacy phosphorus transformation in long-term agricultural fields using sequential fractionation, P K-edge Xanes and solution P NMR spectroscopy. **Environmental Science & Technology**, v.49, p.168–176, 2015.

LUKOWIAK, R.; GRZEBISZ, W.; SASSENATH, G. F. New insights into phosphorus management in agriculture – A crop rotation approach. **Science of the Total Environment**, v.542, p.1062-1077, 2016.

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

MARANGUIT, D.; GUILLAME, T.; KUZYAKOV, Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. **Catena**, v.149, p.385–393, 2017.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. San Diego: Academic Press. 1995.

MARSCHNER, P. Rhizosphere Biology. In: MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**, Amsterdam, Netherlands: Elsevier/Academic Press, 2012.

MARTINAZZO, R. SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.563-570, 2007.

MATOS, M.A.; SALVI, J.V.; MILAN, M. Pontualidade na operação de semeadura e a antecipação da adubação e suas influências na receita líquida da cultura da soja. **Engenharia Agrícola**, v.26, p.493-501, 2006.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v.27, p.31-36, 1962.

NASH, D. M.; HAYGARTH, P. M.; TURNER, B. J.; CONDROND, L. M.; MCDOWELL, R. W.; RICHARDSON, A. E.; WATKINS, M.; HEAVEN, M. W. Using organic phosphorus to sustain pasture productivity: A perspective. **Geoderma**, v.221-222, p.11-19, 2014.

NEGASSA, W.; LEINWEBER, P. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.172, p.305-325, 2009.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. p. 961-1010. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods**. Madison, WI: Soil Science of America and American Society of Agronomy, 1996.

NEUMANN, G.; RÖMHELD, V. Rhizosphere chemistry in relation to plant nutrition. In: MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**, Amsterdam, Netherlands: Elsevier/Academic Press, 2012.

NICOLODI, M.; GIANELLO, C.; ANGHINONI, I. Repensando o conceito de fertilidade do solo no Sistema Plantio Direto. **Revista Plantio Direto**, v.101, 2007.

NOACK, S. R.; MCLAUGHLIN, M. J.; SMERNIK, R. J.; MCBEATH, T. M.; ARMSTRONG, R. D. Crop residue phosphorus: speciation and potential bio-availability. **Plant and Soil**, v.359, p.375-385, 2012.

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

OLIBONE, D.; ROSOLEM, C. A. Phosphate fertilization and phosphorus forms in an Oxisol under no-till. **Scientia Agrícola**, v.67, p.465-471, 2010.

OLIVEIRA JÚNIOR, A.; PROCHNOW, L. I.; KLEPKER, D. Eficiência agrônômica de fosfato natural reativo na cultura da soja. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.43, p.623-631, 2008.

OLIVEIRA, L. E. Z.; NUNES, R. S.; SOUSA, D. M. G.; BUSATO, J. G.; FIGUEIREDO, C. C. Response of maize to different soil residual phosphorus conditions. **Agronomy Journal**, v.111, p.3291-3300, 2019.

OLIVEIRA, L. E. Z.; NUNES, R. S.; SOUZA, D. M. G.; FIGUEIREDO, C. C. Dynamics of residual phosphorus forms under different tillage systems in a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, v.367, 114254, 2020.

PANG, J.; RYAN, M. H.; LAMBERS, H.; SIDDIQUE, K. H. M. Phosphorus acquisition and utilization in crop legumes under global change. **Current Opinion in Plant Biology**, v.45, p.1-7, 2018.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V.; SERRAT, B. M.; FAVARETTO, N.; ANJOS, A. Atributos químicos de um Latossolo Bruno sob sistema plantio direto em função da estratégia de adubação e do método de amostragem de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.581-590, 2009.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná, 1992.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium, and aluminum following lime or gypsum applications to a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.33-38, 1984.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Toxicity of aluminum to coffee in Ultisols and Oxisols amended with CaCO_3 , MgCO_3 , and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. **Soil Science Society of American Journal**, v.46, 1982.

PAVINATO, P. S.; CERETTA, C. A. Fósforo e potássio na sucessão trigo/milho: épocas e formas de aplicação. **Ciência Rural**, v.34, p.1779-1784, 2004.

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

PAVINATO, P. S.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; SARTOR, L. R.; WITHERS, P. J. A. Effects of cover crops and phosphorus sources on maize yield, phosphorus uptake, and phosphorus use efficiency. **Agronomy Journal**, v.109, p.1039–1047, 2017.

PENN, C.; MCGRATH, J.; BOWEN, J.; WILSON, S. Phosphorus removal structures: A management option for legacy phosphorus. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.69, p.51A–56A, 2014.

QIN R. J.; STAMP, P.; RICHNER, W. Impact of tillage on maize rooting in a Cambisol and Luvisol in Switzerland. **Soil and Tillage Research**, v.85, p.50-61, 2006.

RAIJ, B. VAN; QUAGGIO, J. A.; SILVA, N. M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.17, p.547-566, 1986.

REBONATTI, M. D.; FABRICE, C. E.; SANTOS, J. M. F.; HEINRICHS, R.; SOARES FILHO, C. V.; MOREIRA, A. Chemical attributes of soil and forage yield of pasture recovered

with phosphate fertilization and soil management. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.47, p.2069–2076 2016.

RESTELATTO, R.; PAVINATO, P. S.; SARTOR, L. R.; PAIXÃO, S. J. Production and nutritional value of sorghum and black oat forages under nitrogen fertilization. **Grass and Forage Science**, v.69, p.693–704, 2013.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.151-160, 2001.

RICHARDSON, A. E.; BAREA, J. M.; MCNEIL, A. M.; PRIGENT-COMBARET, C. Acquisition of phosphorous and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion bt microorganism. **Plant Soil**, v.321, p.305-339, 2009.

RINGEVAL, B.; NOWAK, B.; NESME, T.; DELMAS, M.; PELLERIN, S. Contribution of anthropogenic phosphorus to agricultural soil fertility and food production. **Global Biogeochemical Cycles**, v.28, p.743–756, 2014.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J. **How a Corn Plant Develops**. Special Report No. 48, Iowa: State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, 1982.

ROBERTS, T. L.; JOHNSTON, A. E. Phosphorus use efficiency and management in agriculture. **Resources, Conservation and Recycling**, v.105, p.275-281, 2015.

RODRIGUES, M.; PAVINATO, P. S.; WITHERS, P. J. A.; TELES, A. P. B.; HERRERA, W. F. B. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical Oxisols of the Brazilian savanna. **Science of The Total Environment**, v.542, p.1050–1061, 2016.

RODRIGUES, M.; WITHERS, P. J. A.; SOLTANGHEISI, A.; VARGAS, V.; HOLZSCHUH, M.; PAVINATO, P. S. Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. **Soil & Tillage Research**, v.205 104770, 2021.

ROSE, T.J.; HARDIPUTRA, B.; RENGEL, Z. Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics. **Plant Soil**, v.326, p.159-170, 2010.

ROWE, H.; WITHERS, P. J. A.; BAAS, P.; CHAN, N. I.; DOODY, D.; HOLIMAN, J.; JACOBS, B.; LI, H.; MACDONALD, G. K.; MCDOWELL, R.; SHARPLEY, A. N.; SHEN, J.; TAHERI, W.; WALLENSTEIN, M.; WEINTRAUB, M. N. Integrating legacy soil phosphorus into sustainable nutrient management strategies for future food, bioenergy and water security. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.104, p.393–412, 2015.

SÁ, J. C. M. Adubação fosfatada no sistema plantio direto. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R.S. **Fósforo na agricultura brasileira**. Anais do Simpósio sobre Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba: POTAFOS, 2004. 726p.

SÁ, J. C. M. **Manejo da fertilidade do solo no plantio direto**. Castro: Fundação ABC, 1993. 96p.

SAS System. **SAS Institute Inc.** SAS OnlineDoc® 9.1.2. Cary, NC: SAS Institute, 2004.

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem do solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.85-91, 2000.

SCHRÖDER, J. J.; SMIT, A. L.; CORDELL, D.; ROSEMARIN, A. Improved phosphorus use efficiency in agriculture: A key requirement for its sustainable use. **Chemosphere**, v.84, p.822–831, 2011.

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; CHEN, X.; ZHANG, W.; ZHANG, F. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant Physiology**, v.156, p.997-1005, 2011.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLEB, S. M.; SÁ, J. C. M.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. **Science**, v.22, p.755–775, 2002.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Núcleo Estadual Paraná. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2017. 482 p.

SOLTANGHEISI, A.; RODRIGUES, M.; COELHO, M. J.; GASPERINI, A. M.; SARTOR, L. R.; PAVINATO, P. S. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. **Soil and Tillage Research**, v.179, p.20–28, 2018.

SOUZA, G. P.; FIGUEIREDO, C. C.; SOUZA, D. M. G. Soil organic matter as affected by management systems, phosphate fertilization, and cover crops. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.51, p.1668-1676, 2016.

SPRENT, J. I. Nitrogen fixation and growth of non-crop legume species in diverse environments. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v.2, p.149-162, 1999.

STEVENSON, F. J.; COLE, M. A. **Cycles of Soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TANG, C.; FANG, R. Y.; RAPHAEL, C. Factors affecting soil acidification under legumes: II. Effect of phosphorus supply. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.49, p.657–664, 1998.

TELES, A. P. B.; RODRIGUES, M.; BEJARANO HERRERA, W. F.; SOLTANGHEISI, A.; SARTOR, L. R.; WITHERS, P. J. A.; PAVINATO, P. S. Do cover crops change the lability of phosphorus in a clayey subtropical soil under different phosphate fertilizers? **Soil Use and Management**, p.1-11, 2017.

TIECHER, T.; CALEGARI, A.; CANER, L.; RHEINHEIMER, D.S. Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol. **Geoderma**, v.308, p.78–85, 2017.

TIECHER, T.; SANTOS, D. R.; KAMINSKI, J.; CALEGARI, A. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.271-281, 2012.

TIPPING, E.; BENHAM, S.; BOYLE, J. F.; CROW, P.; DAVIES, J.; FISCHER, U.; GUYATT, H.; HELLIWELL, R.; JACKSON-BLAKE, L.; LAWLOR, A. J.; MONTEITH, D. T.; ROWE, E. C.; TOBERMANAC, H. Atmospheric deposition of phosphorus to land and freshwater. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v.16, p.1608–1617, 2014.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers**. New York, Macmillan Publishing Company, 1985. 754p.

TSUKAHARA, R. Y.; OLIVEIRA, A. N.; OLIVEIRA JUNIOR, J. I. de; FISCHER, P. **Sistema de Monitoramento Agrometeorológico do Grupo ABC**: Análise Climática da Safra 2012/2013, 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 e 2016/2017. 2017. Disponível em: <http://sma.fundacaoabc.org>. Acesso em: 21 de setembro de 2020.

TURNER, B. L.; MAHIEU, N.; CONDRON, L. M.; CHEN, C. R. Quantification and bioavailability of scyllo-inositol hexakisphosphate in pasture soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v.37, p.2155–2158, 2005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Methods of chemical analysis for water and wastes**. Cincinnati, 1971. 312p.

VELÁSQUEZ, G.; NGO, P. T.; RUMPEL, C.; CALABI-FLOODY, M.; REDEL, Y.; TURNER, B. L.; CONDRON, L. M.; MORA, M. D. L. L. Chemical nature of residual phosphorus in Andisols. **Geoderma**, v.271, p.27–31, 2016.

WEIHRAUCH, C.; OPP, C. Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: The story so far. **Geoderma**, v.325, p.183–194, 2018.

WU, J.; HUANG, M.; XIAO, H.; SU, Y.; TONG, C.; HUANG, D. Dynamics in microbial immobilization and transformations of phosphorus in highly weathered subtropical soil following organic amendments. **Plant and Soil**, v.290, p.333–342, 2007.

XU, Z.; QU, M.; LIU, S.; DUAN, Y.; WANG, X.; BROWN, L. K.; GEORGE, T. S.; ZHANG, L.; FENG, G. Carbon addition reduces labile soil phosphorus by increasing microbial biomass phosphorus in intensive agricultural systems. **Soil Use Management**, v.00, p1–11, 2020.

YANG, X.; POST, W. M. Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: A synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. **Biogeosciences**, v.8, p.2907–2916, 2011.

ZADOKS, I. C.; CHANG, T. T.; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, v.14, p.415-21, 1974.

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de Latossolo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.37, p.110-117, 2007.

ZANÃO JR, L. A.; ARF, O.; REIS JR, R. A.; PEREIRA, N. Phosphorus fertilization with enhanced efficiency in soybean and corn crops. **Australian Journal of Crop Science**, v.14, p.78-84, 2020.

ZANELLA, R.; ZDZIARSKI, A. D.; MEIRA, D.; BOZI, A. H.; LIPPSTEIN, E. R.; COLONELLI, L. L.; FERNANDES, R. A. T.; FERNANDES, V. K.; BENIN, G.; CASSOL, L. C. System fertilization: a viable practice for black oat-soybean crop. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.63, e20190063, 2020.

ZIADI, N.; WHALEN, J. K.; MESSIGA, A. J.; MOREL, C. Assessment and modeling of soil available phosphorus in sustainable cropping systems. **Advances in Agronomy**, v.122, p.85-126, 2013.

ZOCA, S. M.; PENN, C. An important tool with no instruction manual: a review of gypsum use in agriculture. **Advances in Agronomy**, v.144, p.1-44, 2017.