

JAQUELINE MUNIZ GERBER

**APLICAÇÕES ANUAIS DE SUPERFOSFATO TRIPLO EM POMAR DE MACIEIRA
E SEUS EFEITOS NA QUALIDADE DOS FRUTOS E NAS FORMAS DE FÓSFORO
DO SOLO**

Tese apresentada ao Curso de Pós-graduação em
Ciência do Solo, na Universidade do Estado de
Santa Catarina, como requisito parcial para
obtenção do grau de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Ph.D. Paulo Roberto Ernani

**Lages, SC.
2020**

Gerber, Jaqueline Muniz

Aplicações anuais de superfosfato triplo em pomar de macieira e seus efeitos na qualidade dos frutos e nas formas de fósforo do solo / Jaqueline Muniz Gerber. - Lages, 2020.

79 p. : il. ; 21 cm

Orientador: Paulo Roberto Ernani

Inclui bibliografia

Tese (doutorado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2020.

1. Adubação fosfatada. 2. Qualidade de frutos de maçã. 3. Fracionamento químico de fósforo. 4. Balanço de nutrientes. 5. *Malus x doméstica* Borkh. I. Gerber, Jaqueline Muniz. II. Ernani, Paulo Roberto. III. Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Aplicações anuais de superfosfato triplo em um pomar de macieira e seus efeitos na qualidade dos frutos e no fósforo do solo

Ficha catalográfica elaborada pelo aluno.

JAQUELINE MUNIZ GERBER

**APLICAÇÕES ANUAIS DE SUPERFOSFATO TRIPLO EM POMAR DE MACIEIRA
E SEUS EFEITOS NA QUALIDADE DOS FRUTOS E NAS FORMAS DE FÓSFORO
DO SOLO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, no Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciência do Solo.

Banca examinadora:

Orientador: _____

Prof. Ph.D. Paulo Roberto Ernani
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro: _____

Dra. Jéssica Fernandes Kaseker

Membro: _____

Dra. Alessandra Aparecida de Sá Nunes

Membro: _____

Dra. Marlise Nara Ciotta
EPAGRI – Lages-SC

Membro: _____

Prof. Dr. Cristiano André Steffens
Universidade do Estado de Santa Catarina

Lages, SC, 19 de fevereiro de 2020.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, acreditando nos meus sonhos junto comigo e que trabalhou muito para que eu pudesse realizá-los. A meus pais, Leni e Carlos, ao meu irmão Vinicius e à minha avó Alda, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre ao meu lado me protegendo, me concedendo sabedoria nas escolhas dos melhores caminhos, coragem para acreditar e força para não desistir.

Aos meus pais, Leni e Carlos, meus avós e meu irmão Vinicius, pelo amor, apoio e incentivo em todos os momentos dessa caminhada.

À UDESC, pela oportunidade de cursar o Doutorado e pela concessão da bolsa.

Ao orientador e professor Paulo Roberto Ernani, pela dedicação, paciência, ensinamento e incentivo durante a realização do curso.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), por disponibilizar a área experimental assim como à ajuda de seus funcionários, em especial ao técnico Miguel Angelo de Rocco e à pesquisadora Marlise Nara Ciotta, pela paciência e ajuda durante a realização do trabalho.

Aos colegas do laboratório de Fertilidade do Solo, que de uma forma ou de outra, auxiliaram no desenvolvimento do trabalho, pela convivência, paciência e risadas compartilhadas.

Aos amigos e familiares, muitas vezes deixados um pouco de lado devido à correria do dia a dia, mas que nunca foram esquecidos.

A todos aqueles que contribuíram de uma forma ou outra para a realização desse trabalho.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

A Serra Catarinense apresenta condições climáticas favoráveis para a produção de maçãs, entretanto muitos de seus solos são rasos, pedregosos, altamente intemperizados e têm baixos teores de fósforo disponível. Diante disso, é recomendado que seja aplicado fósforo ao solo no momento da implantação do pomar, e raramente esse nutriente é aplicado a partir do início do estágio produtivo. Na macieira, assim como em outras frutíferas, a nutrição das plantas é um dos atributos que determina a qualidade dos frutos produzidos. Alguns trabalhos têm mostrado que aumentos nos teores de fósforo nos frutos de maçã estão associados à preservação da qualidade pós-colheita. Assim, este trabalho objetivou avaliar o efeito de aplicações anuais sucessivas de fósforo na qualidade de frutos no momento da colheita e após seis meses de armazenamento, bem como a distribuição e as formas no perfil do solo. Para isso, foram realizados dois estudos, conduzidos na mesma área, no município de São Joaquim. Foram aplicadas doses anuais de P_2O_5 (0, 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹ ano⁻¹) sobre a superfície do solo, na forma de superfosfato triplo. No estudo 1, foram coletados frutos entre as estações de crescimento de 2012/13 e 2018/19. As avaliações realizadas nos parâmetros relacionados com a qualidade dos frutos (índice iodo-amido, sólidos solúveis, acidez titulável, firmeza de polpa e coloração) foram feitas no momento da colheita e após armazenamento. Foram também avaliados os teores minerais nos frutos e nos tecidos vegetais. Em 2017, foram coletadas amostras de solo estratificadas, as quais foram usadas para a realização do estudo 2. No estudo 2, foi realizado o fracionamento de fósforo no solo (Hedley), para determinar as frações de fósforo e seu balanço no solo. Os parâmetros de qualidade de frutos avaliados no estudo 1, apesar de pouco afetados pela adubação, mostraram que os frutos produzidos apresentam qualidade adequada para o mercado consumidor, tanto no momento da colheita quanto seis meses após o armazenamento. Além disso, em três das quatro safras avaliadas, o índice de iodo-amido aumentou com o aumento da dose aplicada de P_2O_5 . Todas as frações de fósforo determinadas pelo fracionamento de Hedley aumentaram com as aplicações anuais de fósforo, sendo as frações inorgânicas maiores do que as frações orgânicas. O balanço de fósforo no solo apresentou valores positivos com as aplicações de P_2O_5 , evidenciando que as plantas estão utilizando menos nutriente do que o aplicado, aumentando os reservatórios de fósforo no solo. Com isso, em pomares de macieira que receberam correção na implantação com fósforo e que apresentam teores de matéria orgânica média a alta, a aplicação anual de fósforo aumenta seus teores no solo e não afeta solo a qualidade dos frutos produzidos na região de São Joaquim.

Palavras-chave: Adubação fosfatada. Qualidade de frutos de maçã. Fracionamento químico de fósforo. Balanço de nutriente. *Malus x domestica* Borkh.

ABSTRACT

The Santa Catarina state has favorable weather conditions for apple production, however most soils in the region are shallow and stony, with low phosphorus content. Therefore, it is recommended to apply P at the time the orchard is implanted, and thereafter in maintenance when necessary. In apple trees, plant nutrition affects the quality of the fruits. Some studies have shown that increases in the phosphorus content of apple fruits are associated with the preservation of post-harvest quality. Thus, this study aimed to evaluate the effects of annual phosphorus applications the soil surface on fruit quality at harvest and six months after cold storage, in addition to the distribution of P forms in the soil profile. Two studies were carried out in the same experimental area, at municipality of São Joaquim. Treatments consisted of successive annual P applications at rates of 0, 40, 80, 120 and 160 kg ha⁻¹ year⁻¹ of P₂O₅, as triple superphosphate, on the soil surface, with no incorporation. In the study 1, fruits were collected between the 2012/13 and 2018/19 growing seasons for quantification of fruit attributes related to quality (starch index, soluble solids, titratable acidity, flesh firmness and skin color) at the time of harvest and after storage, in addition to mineral contents in both, fruits and leaves. In 2017, stratified soil samples were collected and used to perform the Hedley's P fractionation and the P balance in the soil. Long-term annual addition of P to the soil had a small impact on attributes related to fruit quality, both at harvest and six months after storage. In addition, in three of the four seasons, the starch index increased with the application of P₂O₅, showing an increase on fruit ripening. All the phosphorus fractions determined by Hedley's fractionation increased with annual phosphorus applications, with inorganic fractions being higher than organic fractions. The soil phosphorus balance showed positive values following P applications, showing that plants are using less P than the amount applied, increasing the phosphorus reservoirs in the soil. As a result, in apple orchards containing high organic matter contents and that have received adequate amounts of P at planting time, successive annual application of phosphorus increases its contents in the soil but does not affect fruit quality in the region of São Joaquim.

Keywords: Phosphate fertilizer. Apple quality fruit. phosphorus fractionation. Phosphorus balance *Malus x domestica* Borkh.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Índices iodo-amido (variando de 1-5) em frutos de macieira 'Fuji Suprema' quantificados no momento da colheita, em várias safras, em função da adição anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo. 35
- Figura 2 - Valores de pH em água nas camadas do solo até 40 cm de profundidade, na safra 2016/2017 em função da adição anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo. 43
- Figura 3 - Teores de fósforo ($mg\ kg^{-1}$) nas camadas de solo até 40 cm de profundidade, na safra 2016/2017, em função da aplicação anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo. 44
- Figura 4 - Teores de cálcio ($cmol_c\ dm^{-3}$) nas camadas do solo até 40 cm de profundidade, na safra 2016/2017, em função da aplicação anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo. 45
- Figura 5 - Teores de magnésio ($cmol_c\ dm^{-3}$) e potássio ($mg\ kg^{-1}$) nas camadas do solo até 40 cm de profundidade, na safra 2016/2017, em função da aplicação anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo. 46
- Figura 6 - Teores de matéria orgânica ($g\ kg^{-1}$) nas camadas do solo até 40 cm de profundidade, na safra 2016/2017, em função da aplicação anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo. 47
- Figura 7 - Esquema simplificado do fracionamento de HEDLEY, STEWART e CHAUHAN (1982), com as modificações propostas por CONDRON et al. (1985) e GATIBONI (2003). 58
- Figura 8 - Teores de fósforo inorgânico extraído por resina trocadora de ânions (P_{iRTA}), fósforo inorgânico e orgânico no solo extraídos por $NaHCO_3$ (P_{ibic} e P_{obic}) até 40 cm de profundidade após seis anos de aplicações anuais sucessivas de doses de P_2O_5 ao solo..... 60
- Figura 9 - Teores de fósforo inorgânico e orgânico do solo extraídos por $NaOH\ 0,1\ mol\ l^{-1}$ (P_{ihid} e P_{ohid}) e fósforo inorgânico e orgânico extraídos por $NaOH\ 0,5\ mol\ l^{-1}$ (P_{ihid05} e P_{ohid05}), até 40 cm de profundidade, após seis anos de aplicações anuais sucessivas de doses de P_2O_5 ao solo. 63
- Figura 10 - Teores de fósforo inorgânico do solo extraído por HCl (P_{iHCl}), fósforo inorgânico e orgânico extraídos por digestão com $H_2SO_4 + H_2O_2$ ($P_{residual}$), até 40 cm de profundidade, após seis anos de aplicações anuais sucessivas de doses de P_2O_5 ao solo..... 64

Figura 11- Balanço de fósforo no solo ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) após seis anos de aplicações anuais sucessivas de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo..... 67

Figura 12 - Teores de fósforo no solo (mg dm^{-3}) na camada 0-10 cm, extraídos com solução Mehlich-1, após seis anos de aplicações anuais sucessivas de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo. 68

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Atributos relacionados com a qualidade de frutos de maçã 'Fuji Suprema', quantificados no momento da colheita, em várias safras, em função da adição anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo.36
- Tabela 2- Cor da epiderme do lado mais vermelho de frutos de maçã 'Fuji Suprema', quantificados no momento da colheita, em várias safras, em função da adição anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo.37
- Tabela 3 - Atributos relacionados com a qualidade de frutos de maçã 'Fuji Suprema', quantificados após seis meses de armazenamento em atmosfera controlada, em várias safras, em função da adição anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo.38
- Tabela 4- Teores minerais na polpa fresca de frutos de maçã 'Fuji Suprema', em várias safras, em função da adição anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo.40
- Tabela 5 - Relações minerais na polpa fresca de frutos de maçã 'Fuji Suprema', em várias safras, em função da adição anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo.42
- Tabela 6 - Teores de nutrientes nas folhas de maçã 'Fuji Suprema' na safra 2018/2019 em função da adição anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo.43
- Tabela 7 - Teores de fósforo lábil ($mg\ kg^{-1}$) do solo, obtidos através do somatório das frações $Pi_{RTA} + Pi_{bic} + Po_{bic}$, até 40 cm de profundidade, após seis anos de aplicações anuais sucessivas de doses de P_2O_5 ao solo.61
- Tabela 8 - Teores de fósforo inorgânico total do solo (Pi_{total}), P orgânico total (Po_{total}) e fósforo total do solo (P_{total}), até 40,0 cm de profundidade, após seis anos de aplicações anuais sucessivas de doses de P_2O_5 ao solo.65

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	19
1.1 A CULTURA DA MACIEIRA	19
1.2 FÓSFORO NO SOLO	20
1.3 FÓSFORO NA PLANTA	21
1.4 FÓSFORO NA MACIEIRA	22
3. HIPÓTESES	23
4. OBJETIVOS	25
5 CAPÍTULO I – APLICAÇÕES ANUAIS DE SUPERFOSFATO TRIPLO AO SOLO AFETARAM POUCO A QUALIDADE DE FRUTOS DE MAÇÃ ‘FUJI SUPREMA’ PRODUZIDOS EM SÃO JOAQUIM-SC	27
5.1 INTRODUÇÃO	29
5.2 MATERIAL E MÉTODOS	31
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
6.4 CONCLUSÕES	48
7 CAPÍTULO II – FORMAS DE FÓSFORO NO SOLO DE UM POMAR DE MAÇÃ ‘FUJI SUPREMA’ APÓS SEIS ANOS DE APLICAÇÕES ANUAIS DE SUPERFOSFATO TRIPLO EM SUPERFÍCIE	51
7.1 INTRODUÇÃO	53
7.2 MATERIAL E MÉTODOS	56
7.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
7.4 CONCLUSÕES	68
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
REFERÊNCIAS	72

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1 A CULTURA DA MACIEIRA

A cultura da maçã (*Malus domestica* Borkh) está presente em todos os continentes, e na economia brasileira apresenta um papel importante, principalmente nos Estados do Sul. A macieira pertence à família Rosaceae, subfamília Maloidae (Pomoidae), gênero *Malus* (PETRI; LEITE, 2008). A produção de maçãs em escala comercial no Brasil ocorreu a partir da década de 1970. A lei Federal nº 5.106, conhecida como lei dos incentivos fiscais, foi o grande impulso para o início do desenvolvimento dessa cultura, pois permitia abater 50% do imposto de renda devido no exercício para aplicação em reflorestamento, podendo ser feita em árvores frutíferas. A partir disso, a macieira começou a ser plantada, principalmente nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (PETRI et al., 2011). A evolução dos plantios foi rápida, a partir de 1988, e o Brasil passou a exportar maçãs, atingindo a autossuficiência em 1998, quando as exportações ultrapassaram as importações (PETRI; LEITE, 2008).

Hoje o Brasil é o 13º maior produtor de maçã, com aproximadamente 1.060 mil toneladas, tendo a região Sul como a principal produtora, responsável por 99,2% da produção nacional, concentrando-se basicamente nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (IBGE, 2017). Em Santa Catarina, a produção de maçã está concentrada em duas regiões: na Mesorregião Oeste Catarinense, onde a produção é concentrada em grandes empresas produtoras, sediadas principalmente em Fraiburgo, e na Mesorregião Serrana, onde predominam pequenos produtores com área média 4,5 hectares, concentrados principalmente nos municípios de São Joaquim, de Bom Jardim da Serra e Urupema. No Rio Grande do Sul, a produção de maçãs está concentrada na Mesorregião Nordeste, mais precisamente no município de Vacarias, onde se situam grandes empresas produtoras, com áreas médias de produção de 20 hectares.

O que faz dessas regiões grandes produtoras é o clima propício para a cultura da macieira, já que a mesma é bastante exigente em baixas temperaturas. Essa exigência ocorre pela planta ser perene, de folhas caducas, que entra em estado de dormência no inverno. Para sair da dormência e iniciar a brotação na primavera, as plantas precisam, no inverno, de certa quantidade de horas de frio abaixo de 7,2°C (PETRI; LEITE, 2008). A região da Serra Catarinense possui as condições climáticas mais favoráveis à produção de maçãs do Brasil. Apesar disso, as condições de clima e solo são diferentes entre as principais regiões de

produção. Na região de São Joaquim, os solos são rasos e pedregosos enquanto nas regiões de Fraiburgo e Vacaria os solos são profundos. Isso indica que além do clima favorável, avanços nas pesquisas com nutrição da macieira vêm sendo realizados, mostrando que devem ser adotados procedimentos diferentes para a adubação de cada região produtora.

1.2 FÓSFORO NO SOLO

O fósforo é um dos dezessete elementos essenciais para o desenvolvimento das plantas, participando de componentes metabólicos relacionados com a energia e com compostos estruturais das células. Por possuir um alto grau de interação com o solo, e pela sua deficiência na maioria dos solos brasileiros, faz desse elemento um dos mais críticos para a produção agrícola.

O teor total de fósforo no solo está entre 0,2 e 5,0 g kg⁻¹, mas apenas uma pequena fração está na forma disponível para as plantas (ARAÚJO; MACHADO, 2006). Os minerais primários fosfatados comuns em rochas são as apatitas, da qual, com a intemperização, ocorre a liberação de fósforo. Sua dinâmica no solo está associada a fatores ambientais que controlam a atividade de microrganismos, os quais imobilizam e/ou liberam os íons ortofosfatos, e às propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

Para melhor entendimento da dinâmica do fósforo no solo, podemos dividi-lo em dois grandes grupos, fósforo inorgânico (Pi) e fósforo orgânico (Po). O Pi compreende os íons fosfato na solução do solo, o fósforo estrutural dos minerais fosfatados e todas as formas de fosfato precipitadas com compostos inorgânicos ou adsorvidas a eles (GATIBONI et al., 2013). As concentrações de fósforo na solução do solo são, usualmente, muito baixas, variando entre 0,1 e 10 µmol L⁻¹ (ARAÚJO; MACHADO, 2006). Além de presente na solução do solo, o Pi também está adsorvido na fração coloidal mineral do solo, ligado a ferro, alumínio e cálcio, dentre outros, adsorvidos nas bordas das argilas silicatadas, e principalmente adsorvidos a oxihidróxidos de ferro e alumínio (GATIBONI et al., 2013).

A disponibilidade das formas iônicas de fosfato para as plantas sé muito afetada pelo pH. O ânion monovalente H₂PO₄⁻ tem sua disponibilidade aumentada em valores de pH abaixo de 7, enquanto o divalente HPO₄²⁻ tem sua disponibilidade aumentada em valores de pH acima de 7. Em situações de pH muito alcalino, quase todo o fósforo se encontra sob a forma de PO₄³⁻, a qual não é absorvida pelas plantas (DECHEN; NACHTIGALL, 2007).

O Po é a fração de fósforo que faz parte de estruturas de compostos orgânicos do solo, como o fósforo da biomassa microbiana e o fósforo adsorvido na matéria orgânica do solo. A

sua liberação para a solução do solo é controlada pela taxa de mineralização da matéria orgânica e depende da atividade microbiana. Os teores de Po podem representar de 20 a 80% do fósforo total do solo (ARAÚJO; MACHADO, 2006).

Nos solos altamente intemperizados, como os que ocorrem naturalmente no sul do Brasil, predominam as formas inorgânicas ligadas à fração mineral com alta energia e as formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente. De acordo com o maior ou menor grau de estabilidade desses compostos, são enquadrados como fosfatos lábeis e não-lábeis, sendo a fração lábil a responsável por rapidamente repor o fósforo na solução do solo (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

Por possuir ligações fortes com as partículas do solo, o fósforo é transportado juntamente com as partículas do solo, através da erosão e do escoamento superficial. Além disso, por possuir baixa mobilidade no solo, áreas que receberam adições de fósforo cujas exportações pelas culturas são baixas, tendem a ter camadas do solo com altas concentrações de fósforo. Com isso o fósforo pode ser transferido para os sistemas aquáticos, pois devido ao seu enriquecimento, o material erodido é rico nesse nutriente (GATIBONI et al., 2014). Quando esse fósforo proveniente de erosão e/ou escoamento superficial chega até as águas ocorre o aumento na disponibilidade desse nutriente nos sistemas aquáticos, causando rápido crescimento de algas, causando a chamada eutrofização das águas. Dessa maneira, as atividades agrícolas podem causar impactos ambientais e, por isso, muitos países vem limitado o uso de fertilizantes fosfatados no solo, baseando suas recomendações na quantidade e fósforo que potencialmente pode ser liberada para os sistemas.

1.3 FÓSFORO NA PLANTA

Embora o fósforo seja classificado como um macronutriente, os teores nas plantas são mais baixos que os de nitrogênio e potássio. As plantas absorvem fósforo preferencialmente na forma de H_2PO_4^- e em menores proporções na forma de HPO_4^{2-} . Após absorvido, o fósforo é quase imediatamente incorporado em compostos orgânicos nas plantas.

O fósforo participa de grande número de compostos nas plantas, essenciais em diversos processos metabólicos. Possui papel importante na fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia, divisão e crescimento celular, dentre outros processos vegetais (DECHEN; NACHTIGALL, 2007). Está presente também nos processos de transferência de energia como parte do trifosfato de adenosina (ATP), como componente de muitas proteínas, coenzimas, ácido nucleico e substratos metabólicos. Além disso, o fósforo armazenado no

vacúolo é liberado no citoplasma e atua como regulador de diversas vias sintéticas (DECHEN; NACHTIGALL, 2007; RAIJ, 2011; KEREBAY, 2008).

Por ser um nutriente móvel na planta, os sintomas de deficiência de fósforo surgem primeiramente nas folhas velhas. Esses sintomas visuais de deficiência incluem redução na expansão, na área e no número de folhas, coloração verde mais escura porque a expansão da folha fica mais retardada do que a formação da clorofila e do cloroplasto, drástica redução na relação parte aérea/raízes, senescência precoce das folhas, retardamento na formação dos órgãos reprodutivos e no início da floração, diminuição no número de flores e de sementes (KEREBAY, 2008).

São raros os sintomas de excesso de fósforo. Contudo, plantas sensíveis podem manifestar sintomas em condições cuja concentração nas folhas seja superior ou igual a 3 g kg^{-1} . Nestas condições, pode ocorrer manchas vermelho-escuras nas folhas mais velhas (DECHEN; NACHTIGALL, 2007).

1.4 FÓSFORO NA MACIEIRA

A planta adulta de macieira se desenvolve relativamente bem em solos com baixa disponibilidade de fósforo, onde espécies vegetais anuais apresentariam problemas de desenvolvimento (BASSO et al., 1986). Esse fato se dá pela baixa exportação de fósforo através dos frutos. Recomenda-se, em geral, teores de fósforo nos frutos acima de 100 mg kg^{-1} ; quando inferior a isso, os frutos podem apresentar maiores riscos de comprometimento da qualidade pós-colheita (AMARANTE et al., 2012). Assim, supondo uma produtividade média de 50 toneladas $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, a taxa média de exportação seria de $5 \text{ kg de P ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Apesar disso, sabe-se que a os aumentos nos teores de fósforo nos frutos estão associados à preservação da qualidade pós-colheita (NEILSEN et al., 2008; AMARANTE et al., 2012).

Alguns trabalhos mostram que adubações foliares com fósforo têm aumentado a concentração desse nutriente nos frutos, reduzindo a suscetibilidade a danos causados pela baixa temperatura (JOHNSON; YOGORATNAM, 1978) e a perda de firmeza de polpa das maçãs (WEBSTER; LIDSTER, 1986). NEILSEN et al. (2008) observaram que quando os teores de fósforo em maçãs foram menores do que 100 mg kg^{-1} , houve menor potencial de armazenamento pós-colheita e maior ocorrência de pingo-de-mel nas cultivares Fuji e Silken. Aplicações de fósforo via fertirrigação em solos do Canadá resultaram em um aumento médio de 20 % no rendimento de cultivares de macieira como Fuji, Gala, Ambrosia, Silken e Cameo (NEILSEN et al., 2008).

3. HIPÓTESES

1. Mesmo a macieira sendo uma cultura de baixa exigência em fósforo, a aplicação desse nutriente em solos com baixa disponibilidade melhora os atributos físicos e químicos relacionados com a qualidade de maçãs, incluindo firmeza de polpa, acidez titulável, sólidos solúveis e coloração da epiderme, com reflexos na melhoria da preservação da qualidade pós-colheita;
2. Quando adicionado na superfície do solo, anualmente, o superfosfato triplo eleva os teores de fósforo no solo, aumentando a disponibilidade desse nutriente para as plantas e facilitando o seu deslocamento em profundidade e para próximo das raízes das plantas onde irá ser absorvido, melhorando a nutrição das plantas e, por consequência, a qualidade dos frutos produzidos. Além disso, o balanço de fósforo pode ser positivo devido a baixa exportação pela macieira, aumentando os teores a níveis críticos podendo ser causadores de poluição ambiental.

4. OBJETIVOS

1. Avaliar o efeito da aplicação anual de fósforo na composição mineral, na qualidade e na capacidade de armazenamento de frutos de maçãs ‘Fuji Suprema’ produzidas na região de São Joaquim - SC.
2. Determinar as condições nutricionais das plantas de macieira através de análises foliares e minerais de frutos, bem como verificar o aumento na disponibilidade de fósforo e cálcio, e alterações nos teores de magnésio e potássio, pH em água e matéria orgânica do solo.
3. Avaliar o efeito da aplicação anual de fósforo, na forma de superfosfato triplo, na disponibilidade, na distribuição no perfil e nas formas de fósforo no solo. Quantificar o balanço de fósforo no solo em função da taxa de exportação anual de fósforo pelos frutos, e ainda determinar o Limite Crítico Ambiental de Fósforo (LCA-P), em um solo cultivado com macieira no município de São Joaquim, SC.

5 CAPÍTULO I – APLICAÇÕES ANUAIS DE SUPERFOSFATO TRIPLO AO SOLO AFETARAM POUCO A QUALIDADE DE FRUTOS DE MAÇÃ ‘FUJI SUPREMA’ PRODUZIDOS EM SÃO JOAQUIM-SC

RESUMO

A adubação com fósforo em pomares de macieira tem recebido menos atenção que a adubação com nitrogênio e potássio. No Brasil, existem poucas informações sobre a resposta da cultura à aplicação de fósforo ao solo para as condições de solo e regiões onde a macieira é cultivada. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de fósforo nos parâmetros de qualidade no momento da colheita e após armazenamento, e a composição mineral de frutos de maçã 'Fuji'. O experimento foi instalado em 2010 e conduzido em um pomar comercial no município de São Joaquim, SC, entre as estações de crescimento de 2012/13 e 2018/19. Usou-se a cultivar 'Fuji Suprema' sobre o porta-enxerto Marubakaido/M9, num sistema de alta densidade de plantio, em um Cambissolo Húmico. Foi utilizado o delineamento experimental de blocos ao acaso, com cinco repetições. As unidades experimentais foram compostas por sete plantas, espaçadas em 4,2 x 1,2 m, porém, apenas as cinco plantas centrais foram avaliadas. Os tratamentos consistiram de doses de P₂O₅ (0, 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹), aplicados anualmente a partir do ano de 2011, na forma de superfosfato triplo, após a colheita dos frutos, sobre a superfície do solo e sem incorporação, centralizada junto à linha de plantio. Amostras de frutos foram avaliadas logo após a colheita e após seis meses de armazenamento em câmaras frigoríficas com atmosfera controlada. Os parâmetros avaliados, relacionados com a qualidade de frutos, tanto na colheita quanto após seis meses de armazenamento, foram: sólidos solúveis, acidez titulável, firmeza de polpa e cor do fundo da epiderme. Uma vez por ano foi avaliado o teor de cálcio, magnésio, potássio, nitrogênio e fósforo nos frutos. Os atributos físico-químicos dos frutos, como acidez titulável, sólidos solúveis, e firmeza de polpa, na colheita e após seis meses de armazenamento, foram pouco afetados pela aplicação de fósforo ao solo. Os teores de cálcio, magnésio, potássio, nitrogênio e fósforo nos frutos, apresentaram valores adequados para garantir a qualidade dos frutos. Os teores de fósforo no solo aumentaram com a adição de P₂O₅, sendo a camada de 0-10 cm a que apresentou os maiores aumentos. Os dados obtidos indicam que os atributos relacionados com a qualidade dos frutos da cultivar Fuji Suprema' não são afetados pela adição de fósforo em solos que foram corrigidos na implantação do pomar e que apresentem altos teores de matéria orgânica.

Palavras-chaves: *Malus x domestica* Borkh. Qualidade de frutos. Adubação fosfatada.

ABSTRACT

Phosphorus fertilization in apple orchards has received less attention than nitrogen and potassium fertilization. In Brazil, there is no information about apple response to phosphorus addition to the soil conditions on regions where apple orchards are grown. Thus, this study aimed to evaluate the effects of annual phosphorus applications the soil surface on fruit quality, at harvest and at six months after cold storage, as well as on mineral contents of 'Fuji' apple fruits. The experiment was installed in 2010 and conducted in a commercial orchard at municipality of São Joaquim, SC, between the 2012/13 and 2018/19 growing seasons. It was used the cultivar 'Fuji Suprema', grafted over Marubakaido/M9 rootstock, in a high tree density system, planted on an Haplumbrept. Treatments were arranged in a complete randomized block design, with five replications. Each experimental unit had seven trees, spaced 4.2 x 1.2 m, but only the five central trees were used for evaluations. Treatments consisted of P₂O₅ rates (0, 40, 80, 120 and 160 kg ha⁻¹ year⁻¹), applied annually from 2011, in the form of triple superphosphate, after harvesting, on the soil surface, without incorporation, centralized along the planting line. Fruit samples were evaluated immediately after harvest and after six months after cold storage with controlled atmosphere. The parameters related to fruit quality assessed at both times were: soluble solid, titratable acidity, flesh firmness and skin color. Once a year it was determined the fruit mineral composition, including the contents of calcium, magnesium, potassium, nitrogen and phosphorus. Fruit attributes, as titratable acidity, soluble soil, and flash firmness, at harvest and after six months of storage, were little affected by the applications of phosphorus to the soil. The contents de calcium, magnesium, potassium, nitrogen and phosphorus in the fruits were in the adequate values to the quality of the fruits. The phosphorus in the soil increased with the addition de P₂O₅, with the 0-10 cm layer showing the highest increases. The data obtained indicate that the attributes related to the quality of the fruits of the cultivar Fuji Suprema is not affected by addition of phosphorus to soil that have been fertilized with phosphorus in the implantation of the orchard and that have high levels of organic matter.

Keywords: *Malus x domestica* Borkh. Apple quality fruit. Phosphate fertilizer

5.1 INTRODUÇÃO

A cultura da macieira está presente em todos os continentes, e na economia brasileira apresenta um papel importante, principalmente nos Estados do Sul. O Brasil é 13º maior produtor de maçã (*Malus domestica* Borkh), com produção de aproximadamente 1,06 milhões de toneladas do fruto, tendo como principais produtores os Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, responsáveis por 99,2% da produção nacional (IBGE, 2017). Entretanto, somente o grande volume de produção não é garantia de mercado, já que esse exige um determinado padrão de qualidade dos frutos, que leva em consideração a apresentação visual, o sabor, e a capacidade de conservação, dentre outros.

Na macieira, assim como em várias frutíferas, os atributos que determinam a qualidade geral dos frutos são afetados pelas condições climáticas e por diversas práticas agrícolas, que incluem o tipo de poda, a intensidade do raleio dos frutos, o porta-enxerto e principalmente a nutrição das plantas.

No que diz respeito à nutrição dos pomares, independente da zona mundial de produção, a adubação com fósforo em pomares de macieira tem recebido menos atenção que a adubação com nitrogênio e potássio (NEILSEN et al., 2008). Isto se deve, em parte, à menor demanda da cultura por fósforo quando comparada com a de nitrogênio e potássio, já que a macieira se desenvolve relativamente bem em solos com baixa disponibilidade de fósforo, onde culturas anuais apresentariam problemas de desenvolvimento (BASSO et al., 1986). A baixa incidência de problemas nutricionais com fósforo para a cultura da macieira é atribuída à exigência moderada da cultura, já que exportam pouco fósforo em seus frutos, à sua adaptação a solos que apresentam uma baixa disponibilidade do nutriente em função da alta capacidade de absorção pelo sistema radicular, provavelmente favorecido pela associação com fungos micorrízicos (NAVA, 2002).

Nos solos brasileiros os teores de fósforo geralmente são muito baixos, havendo a necessidade de adicioná-lo para bom desempenho das culturas. A disponibilidade de fósforo no solo é bastante dependente de reações físico-químicas como pH, capacidade de adsorção e fixação no solo, e a atividade dos microrganismos immobilizando e/ou liberando íons ortofosfato (BASSO et al., 1986; SANTOS et al., 2008). A interação do fósforo com constituintes do solo, como o alumínio, ferro e cálcio, sua ocorrência em formas orgânicas e sua lenta taxa de difusão na solução do solo tornam o fósforo o nutriente menos prontamente disponível às plantas. Além disso, os microrganismos do solo também afetam diretamente a absorção de fósforo, através de

mecanismos que afetam a estrutura, a química, a bioquímica e a fisiologia do ambiente radicular (FERNANDES, 2006).

Na região serrana de Santa Catarina, ocorrem condições climáticas favoráveis à produção de maçãs do Brasil. No entanto, muitos dos solos dessa região são rasos, pedregosos (SOUZA et al., 2013), altamente intemperizados, e possuem baixa disponibilidade de fósforo devido à sua adsorção por óxidos e oxihidróxidos, principalmente de ferro e alumínio, pois esses grupos funcionais têm hidroxilas (OH^-), que são trocadas pelo fosfato. Por outro lado, o alto teor de matéria orgânica presente nesses solos pode liberar quantidades significativas de fósforo para as plantas.

Diante disso, no Brasil é recomendada a adubação de correção com fósforo na implantação dos pomares e, posteriormente, a adubação de manutenção quando necessário (CQFS-RS/SC, 2016). A adubação de pré-plantio é recomendada por ocasião do preparo do solo para a implantação do pomar, a qual tem como objetivo elevar os teores de potássio e fósforo para níveis adequados, para um bom estabelecimento da cultura (CQFS-RS/SC, 2016). Após a implantação do pomar, recomenda-se aplicar até 70% do total da adubação com nitrogênio e potássio e também o fósforo (quando necessário) em março, período em que as plantas ainda conseguem absorver e armazenar os nutrientes, e o restante em setembro, no início da brotação e de um novo incremento na atividade do sistema radicular (SUZUKI; BASSO, 1997).

Apesar da boa adaptação da macieira à baixa disponibilidade de fósforo, ele é considerado um nutriente muito importante no metabolismo vegetal, já que faz parte de inúmeros compostos orgânicos como nucleotídeos, fosfoproteínas, lecitina e fitina. Participa ainda, em várias reações bioquímicas como respiração, metabolismo graxo e transformação de energia, e é um dos constituintes da maioria das enzimas (EPAGRI, 2002).

Embora sejam poucos os trabalhos em que se obteve alguma resposta da macieira à adubação fosfatada. Porém, sabe-se que alguns atributos físicos e químicos de qualidade de maçãs, como a firmeza de polpa, acidez titulável, sólidos solúveis e coloração da epiderme estão bastante relacionados ao estado nutricional do pomar (ANTONIOLLI et al., 2011). Além disso, aumentos nos teores de fósforo nos frutos estão associados à preservação da qualidade pós-colheita (NEILSEN et al., 2008; AMARANTE et al., 2012). NEILSEN et al. (2008) observaram que frutos das cultivares Fuji e Silken com teores de fósforo menores do que 100 mg kg^{-1} apresentaram baixo potencial de armazenamento pós-colheita e alta ocorrência de pingo-de-mel. Este distúrbio é comum em maçãs 'Fuji' e se caracteriza através de presença de áreas translúcidas na polpa, em razão da inundação dos espaços intracelulares com suco rico

em sorbitol (CORRÊA et al., 2010; BOWEN; WALKINS, 1997). Em geral, maçãs com teores de fósforo inferiores a 100mg kg^{-1} apresentam maiores riscos de comprometimento da qualidade pós-colheita (AMARANTE et al., 2012). Assim, teores de fósforo baixos na planta, podem levar a ocorrência de problemas de produção, distúrbios ou até mesmo alterações na textura do fruto.

Alguns trabalhos mostram que adubações foliares com fósforo têm aumentado a concentração desse nutriente nos frutos, reduzindo a suscetibilidade a danos causados pela baixa temperatura (JOHNSON; YOGORATNAM, 1978) e à perda de firmeza de polpa das maçãs (WEBSTER; LIDSTER, 1986).

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da adubação fosfatada na qualidade dos frutos de maçã ‘Fuji Suprema’, produzidos na região de São Joaquim – SC, avaliados no momento da colheita e após seis meses de armazenamento, na composição mineral dos frutos e nos teores foliares. Determinar as possíveis alterações nos parâmetros de solo, como fósforo, cálcio, magnésio e potássio disponível, pH em água e teores de matéria orgânica avaliadas após seis anos de aplicações anuais de superfosfato triplo em superfície.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento teve início em 2010 e foi conduzido em um pomar comercial plantado no ano de 2004, no município de São Joaquim, SC, ($28^{\circ}17'25''$ S, $49^{\circ}56'56''$ W), com altitude de 1200 m, durante sete safras, entre as estações de crescimento de 2012/13 e 2018/19. Foi utilizada a cultivar ‘Fuji Suprema’ sobre o porta-enxerto Marubakaido/M9, num sistema de alta densidade de plantio (aproximadamente 1.984 plantas/ha), em um Cambissolo Húmico.

Antes da implantação do pomar, foram realizadas análises químico-físicas do solo, as quais revelaram os seguintes resultados: pH em água = 6,4; $4,3\text{ mg dm}^{-3}$ de P; 95 mg dm^{-3} de K; $11,5\text{ cmol}_c\text{ dm}^{-3}$ de Ca; $4,3\text{ cmol}_c\text{ dm}^{-3}$ de Mg; 48 g dm^{-3} de matéria orgânica e 470 g dm^{-3} de argila.

Os tratamentos consistiram de doses de fósforo (0, 40, 80, 120 e 160 kg ha^{-1} de P_2O_5), aplicadas anualmente, a partir de 2011, na forma de superfosfato triplo, após a colheita dos frutos, sobre a superfície do solo, sem incorporação, numa faixa de 2,2 m de largura centralizada junto à linha de plantio.

Utilizou-se o delineamento experimental de blocos ao acaso, com cinco repetições. As unidades experimentais foram compostas por sete plantas, espaçadas em $4,2 \times 1,2$ m, porém, apenas as cinco plantas centrais foram utilizadas nas avaliações. Todas as áreas experimentais

receberam o mesmo manejo recomendado para pomares comerciais (EPAGRI, 2002), exceto em relação à adubação fosfatada.

Os frutos foram colhidos na data de colheita comercial utilizada pelo produtor. Foram coletadas três amostras de 20 frutos cada. Uma amostra foi avaliada logo após a colheita; outra foi armazenada durante seis meses em câmaras frigoríficas com atmosfera controlada (1,2 kPa de O₂ + 0,5 kPa de CO₂; -0,5 ± 0,1 °C/ umidade relativa de 97%), e avaliadas sete dias após a saída do armazenamento. Os atributos relacionados com a qualidade de frutos, avaliados tanto na colheita quanto após seis meses de armazenamento, foram: índice iodo-amido (somente no momento na colheita), sólidos solúveis, acidez titulável, firmeza de polpa e a coloração vermelha dos frutos. A terceira amostra foi utilizada para avaliação da composição química dos frutos.

O índice de iodo-amido foi determinado usando a escala elaborada por Werner (1989), com os valores variando de 1 a 5. O valor 1 na escala corresponde a frutos totalmente verdes, onde não ocorreu a degradação do amido, e o valor 5 corresponde a frutos com maturação avançada, sem presença de amido.

O teor de sólidos solúveis, expresso em °Brix, foi determinado usando refratômetro digital, numa amostra de suco. O suco foi extraído de fatias transversais retiradas da região equatorial dos frutos, usando uma centrífuga de sucos. A acidez titulável, expressa em % de ácido málico, foi quantificada diluindo o suco com água destilada na proporção de 1:9 e titulando-o com solução NaOH 0,1N até ponto final de pH 8,1 usando titulador automático para medir o pH.

A firmeza de polpa, expressa em Newton (N), foi determinada em dois lados opostos de cada fruto, após a remoção de uma fina camada da epiderme, utilizando um penetrômetro automático, equipado com uma ponteira de 11 milímetros de diâmetro.

A cor da epiderme ângulo 'hue' (h°) e 'lightness' (L) foi determinada com o auxílio de um colorímetro Minolta CR 400, com as leituras sendo realizadas em dois lados opostos dos frutos, nas regiões com maior e menor intensidade da cor vermelhas. O h° expressa a intensidade da cor vermelha e define a coloração básica, sendo que 0° = vermelho, 90° = amarelo e 180° = verde, ou seja, quanto maior o valor de h° menor a intensidade de cor vermelha da epiderme. O valor de 'L' expressa o brilho da coloração, variando de 0° = preto a 100° = branco.

A composição mineral dos frutos foi avaliada uma vez por ano, logo após a colheita dos frutos. Para essas análises foram retiradas duas fatias longitudinais de 1 cm da espessura externa de cada fruto (casca + polpa), sem a presença da parte central do carpelo. Essas fatias foram

trituras com o auxílio de um processador. A partir dessa massa, foram realizadas as avaliações dos teores (mg kg^{-1} de massa fresca) de cálcio, magnésio, potássio, nitrogênio e fósforo.

Para as determinações de cálcio, magnésio e potássio, foram pesadas 5 g de tecido em um cadinho de porcelana, posteriormente incinerado em mufla por 5 horas, na temperatura de 630°C . Após esse período, 15 mL de solução de HCl $1,8 \text{ mol L}^{-1}$ foram adicionados às cinzas. Nesse extrato, determinaram-se as concentrações de cálcio e magnésio, por espectrometria de absorção atômica, e potássio, por fotometria de chama.

Para as determinações de nitrogênio e fósforo, foram digeridas aproximadamente 2 g de tecido previamente triturado. As amostras receberam 3 mL de H_2O_2 + 2 mL de H_2SO_4 e foram digeridas em bloco digestor, a 300°C , por 3 horas. O fósforo foi determinado nesse extrato, por espectrometria ultravioleta (UV); o nitrogênio foi determinado pelo método de arraste de vapores, em aparelho semi-micro-Kjeldahl.

Além dos frutos, na estação de crescimento de 2018/2019, foram coletadas amostras de folhas para análise de tecido vegetal. As folhas foram coletadas entre o período de 15 de janeiro a 15 de fevereiro, segundo orientação do manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016). Cada amostra foi composta de 40 folhas inteiras e com pecíolo, coletadas no terço médio dos ramos localizados em altura média e em lados opostos da planta. As folhas foram secas em estufa com ar forçado, a 65°C , até atingir peso constante, e posteriormente foram moídas. Nelas, foram realizadas as determinações de cálcio, magnésio, potássio, nitrogênio e fósforo, seguindo as metodologias descritas por TEDESCO et. al. (1995). Para as determinações foram digeridas aproximadamente 0,200 g de tecido previamente triturado. Elas foram digeridas em bloco digestor, a 300°C , por aproximadamente 3 horas, tendo recebido previamente 2 mL de H_2O_2 + 2 mL de H_2SO_4 + 0,7 g da mistura de digestão (Na_2SO_4 + $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ + Se). Nesse extrato, determinaram-se as concentrações de cálcio e magnésio, por espectrometria de absorção atômica, potássio através de fotometria de chama, nitrogênio pelo método de arraste de vapores, em aparelho semi-micro-Kjeldahl, e fósforo por espectrometria ultravioleta (UV).

Após a colheita da safra 2016/17, em agosto, foi realizada a coleta de amostras de solo para a avaliação de alguns parâmetros químicos. As amostras foram coletadas de forma estratificada, nas camadas de 0 - 2,5 cm; 2,6 - 5,0 cm; 5,1 - 10,0 cm; 10 - 20 cm; 20 - 40 cm de profundidade. Nelas, foram avaliados: pH em água, cálcio, magnésio, potássio e fósforo, utilizando as metodologias descritas por TEDESCO et. al. (1995), e matéria orgânica (MO) utilizando a metodologia descrita por SILVA (2009).

O pH em água foi determinado utilizando uma proporção 1:1 (solo e água destilada), cuja amostra foi agitada e deixada em repouso por 30 minutos, agitada novamente e determinado o pH.

As extrações de fósforo e potássio foram realizadas utilizando extrator Mehlich-1, na proporção solo/extrator de 1:10. As amostras foram agitadas por 5 minutos em agitador horizontal, e posteriormente deixadas em repouso por 16 horas, para decantação, onde então foi retirado o sobrenadante. Nesses extratos, determinaram-se as concentrações de fósforo, por espectrometria ultravioleta (UV), e potássio, por fotometria de chama.

As extrações de cálcio e magnésio foram realizadas com solução de KCl 1,0 mol L⁻¹, na proporção solo/extrator de 1:20. As amostras foram agitadas por 30 minutos em agitador horizontal e posteriormente deixadas em repouso por 16 horas, para decantação, onde então foi retirado o sobrenadante. Nesses extratos, determinou-se as concentrações de cálcio e magnésio por espectrometria de absorção atômica.

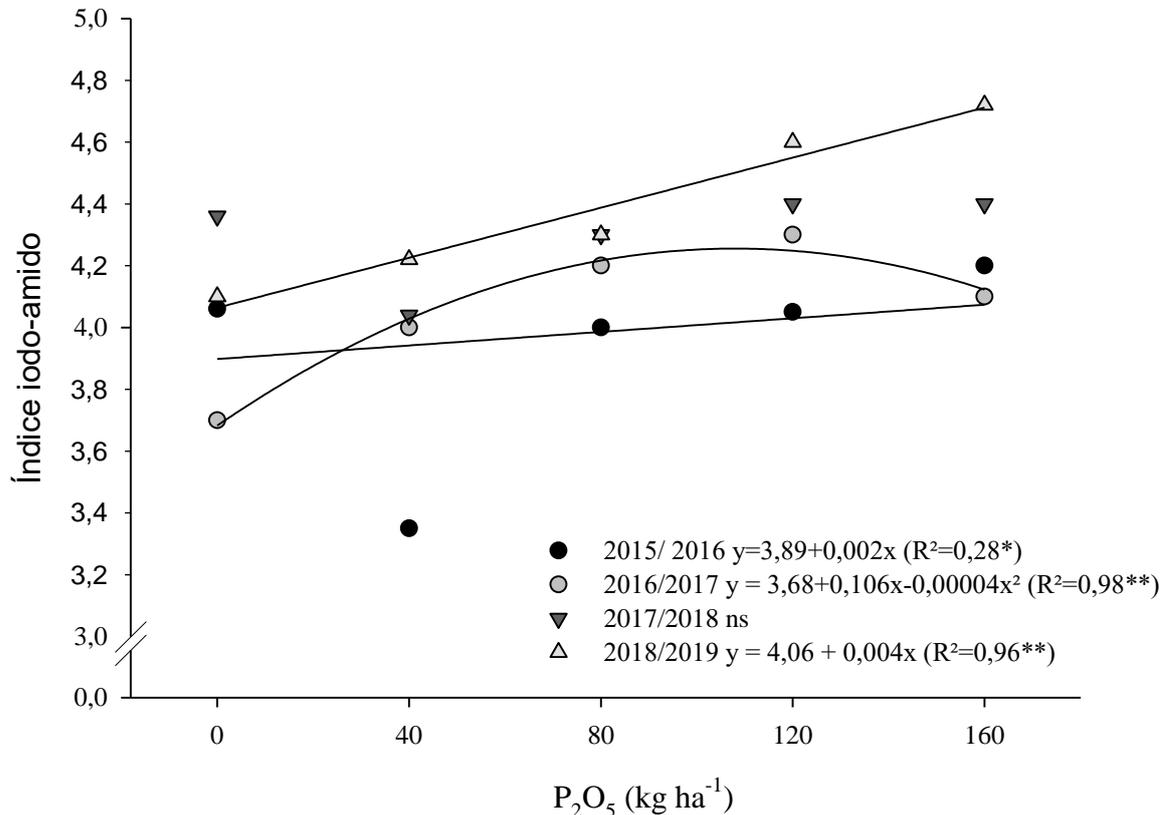
Os teores de matéria orgânica foram determinados utilizando 0,5 g de solo sobre as quais foram adicionados 10 mL de uma solução de bicromato de potássio 0,2 mol L⁻¹, posteriormente aquecidas em placa elétrica, até fervura branda, durante 5 minutos. Após, foram adicionados 80 ml de água destilada e 1 mL de ácido ortofosfórico, além de 3 gotas do indicador difenilamina a 10 g L⁻¹. Essa mistura foi titulada com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,05 mol L⁻¹, até a mudança de cor do azul para verde.

Utilizando o programa Sisvar, os dados das variáveis da qualidade de frutos, atributos minerais dos frutos, teores foliares e de solo, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e análise de regressão ($p \leq 0,05$) em função das doses de P.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O índice iodo-amido quantifica a evolução da maturação dos frutos através da degradação do amido. A aplicação de P₂O₅ ao solo proporcionou frutos com maior índice de iodo-amido nas safras 2015/16, 2016/17 e 2018/19, sendo respectivamente 3,5%, 10,8% e 15,1%, maior no tratamento que recebeu 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em relação aos frutos que não receberam adubação fosfatada (0 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Somente na safra 2017/2018 esse índice não foi afetado pela aplicação de P₂O₅ ao solo (Figura 1). Apesar desse aumento no índice de iodo-amido, os frutos que não receberam adubação com fósforo também apresentaram ponto de maturação adequada para a colheita. Segundo GIRARDI; SANCHUER e BENDER. (2002), valores do índice iodo-amido acima de 2,5 são os ideais para a colheita dos frutos.

Figura 1 - Índices iodo-amido (variando de 1-5) em frutos de macieira 'Fuji Suprema' quantificados no momento da colheita, em várias safras, em função da adição anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo.



ns: não significativo ($p<0,05$); *: significativo a ($p<0,05$); **: significativo a ($p<0,01$).
Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Na avaliação realizada na colheita, os teores de sólidos solúveis diminuíram com o aumento da adubação fosfatada somente na safra 2015/16 (Tabela 1), passando de 11,7 °Brix, quando não houve adubação, para 11,1 °Brix na maior dose aplicada (160 kg ha^{-1} de P_2O_5). Apesar da redução de 5,4 % no teor de SS, as médias encontradas estão de acordo com o recomendado para frutos com bom padrão de qualidade, ficando entre 10 a 12 °Brix (GIRARDI; SANCHUER; BENDER, 2002; TREPTOW et al., 1995).

Do mesmo modo, os teores de acidez titulável foram afetados pela adição de fósforo somente na safra 2017/18 (Tabela 1). Apesar de pequeno aumento, a acidez titulável, apresentou valores médios de 0,38 % de ácido málico, ficando dentro da faixa adequada para maçãs 'Fuji', por ocasião da colheita, os quais variam entre 0,2 a 0,4 % de ácido málico (GIRARDI; SANCHUER; BENDER, 2002; TREPTOW; et al., 1995).

Os teores de firmeza de polpa aumentaram com o aumento da adubação fosfatada apenas na safra 2012/13, não tendo havido influência dos tratamentos nas demais safras avaliadas (Tabela 1). Os valores médios encontrados foram de 78 N, e estão dentro dos padrões de qualidade referidos por GIRARDI; SANCHUER e BENDER (2002), os quais consideram valores de firmeza de polpa entre 70 e 80 N como ideais para a cultivar Fuji no momento da colheita. NEILSEN et al. (2008), utilizando fertirrigação com a adição de fósforo nas cultivares Ambrosia, Cameo, Fuji, Gala e Silken, não verificaram nenhum efeito nos valores de sólidos solúveis, acidez titulável e firmeza de polpa das maçãs.

Tabela 1 - Atributos relacionados com a qualidade de frutos de maçã 'Fuji Suprema', quantificados no momento da colheita, em várias safras, em função da adição anual sucessiva de doses de P₂O₅ sobre a superfície do solo.

Dose de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	2012/13	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
Sólidos solúveis (°Brix)						
0	11,5 ^{ns}	11,4 ^{ns}	11,7 ⁽¹⁾	11,1 ^{ns}	12,2 ^{ns}	11,6 ^{ns}
40	11,8	11,8	11,6	11,4	12,2	11,8
80	11,4	11,6	11,3	11,4	12,0	12,0
120	10,5	11,3	11,6	10,9	12,2	11,9
160	10,4	11,4	11,1	11,2	12,3	11,5
CV (%)	12,9	4,1	2,9	3,9	2,9	5,9
Acidez titulável (% ácido málico)						
0	0,36 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,37 ⁽²⁾	0,42 ^{ns}
40	0,36	0,37	0,49	0,35	0,34	0,41
80	0,38	0,34	0,41	0,33	0,34	0,44
120	0,27	0,35	0,45	0,34	0,36	0,41
160	0,37	0,36	0,43	0,33	0,38	0,40
CV (%)	23,2	8,9	11,3	7,6	8,2	7,2
Firmeza de polpa (Newton)						
0	76,3 ⁽³⁾	70,7 ^{ns}	84,5 ^{ns}	72,8 ^{ns}	85,1 ^{ns}	72,8 ^{ns}
40	79,0	69,7	82,9	72,9	86,3	74,4
80	78,2	71,4	83,4	74,9	84,2	74,4
120	78,7	70,9	85,4	71,4	84,3	71,8
160	80,2	71,1	85,2	75,5	82,8	74,4
CV (%)	3,0	2,0	3,8	2,0	4,1	2,2

⁽¹⁾ $y = 11,68 - 0,003x$ ($R^2 = 0,59^*$); ⁽²⁾ $y = 0,364 - 0,0006x + 0,000005x^2$ ($R^2 = 0,94^*$);

⁽³⁾ $y = 76,98 + 0,018x$ ($R^2 = 0,69^*$);

ns: não significativo ($p < 0,05$); *: significativo a ($p < 0,05$); **: significativo a ($p < 0,01$).

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Os parâmetros de coloração foram afetados pela adição de fósforo somente nas safras 2014/15 e 2018/19, onde os valores de L aumentaram, assim como os teores de h° (Tabela 2),

mostrando uma redução da intensidade da cor vermelha em função da aplicação de P₂O₅ ao solo. NEILSEN et al. (2008) não observaram efeitos da fertirrigação com a adição de P na porcentagem de cor vermelha dos frutos de maçãs. Por outro lado, trabalhos como o de LI, GEMMA e IWAHORI (2002) e WOJCIK e WOJCIK (2007) mostram uma melhora na coloração dos frutos de maçã em tratamentos que receberam pulverização com fósforo.

Tabela 2- Cor da epiderme do lado mais vermelho de frutos de maçã ‘Fuji Suprema’, quantificados no momento da colheita, em várias safras, em função da adição anual sucessiva de doses de P₂O₅ sobre a superfície do solo.

Dose de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	2012/13	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
Lightness (L) ⁽¹⁾						
0	40,2 ^{ns}	37,6 ⁽³⁾	37,7 ^{ns}	42,1 ^{ns}	41,0 ^{ns}	40,1 ⁽⁴⁾
40	39,9	37,4	37,1	41,2	39,9	40,3
80	39,1	38,6	37,4	42,7	41,3	41,3
120	38,8	37,9	38,3	41,9	41,0	41,6
160	40,0	39,8	36,9	42,1	40,3	42,2
CV (%)	4,4	3,6	3,2	3,1	2,5	3,7
Hue (h°) ⁽²⁾						
0	26,9 ^{ns}	28,8 ⁽⁵⁾	29,3 ^{ns}	35,6 ^{ns}	33,9 ^{ns}	31,7 ⁽⁶⁾
40	25,6	29,3	28,1	33,9	32,9	33,0
80	28,8	31,3	29,0	36,9	34,9	35,8
120	27,6	30,3	26,0	36,4	34,6	36,8
160	28,5	32,4	28,5	35,7	33,2	36,6
CV (%)	7,1	5,2	21,4	7,2	5,8	9,6

⁽¹⁾ ‘Lightness’ (L), expressa o brilho da coloração.

⁽²⁾ ‘Hue’ (h°), expressa a intensidade da cor vermelha e define a coloração básica.

⁽³⁾ $y = 37,31 + 0,012x$ ($R^2 = 0,65^*$); ⁽⁴⁾ $y = 39,98 + 0,014x$ ($R^2 = 0,96^*$); ⁽⁵⁾ $y = 28,79 + 0,020x$ ($R^2 = 0,77^{**}$); ⁽⁶⁾ $y = 32,06 + 0,034x$ ($R^2 = 0,87^{**}$).

ns: não significativo ($p < 0,05$); *: significativo a ($p < 0,05$); **: significativo a ($p < 0,01$).

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Após seis meses de armazenamento em atmosfera controlada, os teores de sólidos solúveis e de firmeza de polpa não foram afetados pela aplicação de P₂O₅, em nenhuma das seis safras avaliadas (Tabela 3). A acidez titulável, quantificada após o período de armazenamento em câmaras frias aumentou em função da aplicação de P₂O₅ somente na safra 2012/13 (Tabela 3), sendo cerca de 30 % maior quando recebeu 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em comparação com o tratamento sem fósforo. Os valores médios de acidez titulável, sólidos solúveis e firmeza de polpa estão dentro da faixa tida como adequada para um fruto de boa qualidade, como mostrado anteriormente. WEBSTER e LIDSTER (1986) trabalhando com maçãs ‘McIntosh’ observaram, em todos os tratamentos com pulverização de fosfatos, efeitos benéficos para a qualidade de

armazenamento dos frutos, incluindo aumento da firmeza de polpa e tolerância a baixas temperaturas durante o armazenamento.

Tabela 3 - Atributos relacionados com a qualidade de frutos de maçã ‘Fuji Suprema’, quantificadas após seis meses de armazenamento em atmosfera controlada, em várias safras, em função da adição anual sucessiva de doses de P₂O₅ sobre a superfície do solo.

Dose de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	2012/13	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
Sólidos solúveis (°Brix)						
0	13,7 ^{ns}	11,3 ^{ns}	12,2 ^{ns}	11,8 ^{ns}	12,8 ^{ns}	12,0 ^{ns}
40	13,7	12,0	11,4	11,7	12,3	11,8
80	13,8	11,8	11,8	12,0	12,3	12,3
120	13,6	11,7	12,2	11,7	12,5	11,8
160	13,7	11,7	11,9	12,0	12,3	11,6
CV (%)	2,8	4,1	4,1	4,1	4,7	4,4
Acidez titulável (% ácido málico)						
0	0,30 ⁽¹⁾	0,20 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,20 ^{ns}
40	0,31	0,21	0,14	0,21	0,30	0,21
80	0,34	0,22	0,16	0,24	0,30	0,24
120	0,32	0,21	0,18	0,22	0,32	0,21
160	0,39	0,23	0,15	0,24	0,30	0,23
CV (%)	17,4	10,1	22,0	6,7	10,9	8,5
Firmeza de polpa (Newton)						
0	76,2 ^{ns}	65,7 ^{ns}	81,3 ^{ns}	73,3 ^{ns}	80,0 ^{ns}	58,1 ^{ns}
40	76,1	65,5	80,2	72,2	79,3	57,7
80	77,3	66,4	78,7	71,5	81,0	60,1
120	76,0	65,6	80,4	70,6	80,3	58,2
160	76,6	67,5	77,9	71,3	82,6	59,8
CV (%)	2,5	2,1	3,8	3,2	3,2	5,9

⁽¹⁾ $y = 0,29 + 0,0005x$ ($R^2 = 0,71^*$); ⁽²⁾ $y = 69,63 - 0,043x + 0,0002x^2$ ($R^2 = 0,98^*$).

ns: não significativo ($p < 0,05$); *: significativo a ($p < 0,05$); **: significativo a ($p < 0,01$).

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Nos frutos, os nutrientes desempenham papéis importantes relacionados com a qualidade, com a conservação e com a ocorrência de distúrbios fisiológicos, a exemplo de “bitter pit”, depressão lenticelar e degenerescência de polpa (AMARANTE et al., 2012; BRACKMANN et al., 2010; MIQUELOTO et al., 2011).

No presente estudo, os teores de fósforo nos frutos aumentaram com a adição de P₂O₅ ao solo somente na safra 2012/13, em cerca de 28,5%; já nas safras 2014/15 e 2018/19 eles reduziram em 10,5 % e 26,4% respectivamente (tabela 4). Baixos teores de fósforo nos frutos podem causar distúrbios fisiológicos pós-colheita e prejudicar a qualidade de frutos sob

armazenamento em baixas temperaturas. Frutos das cultivares Fuji e Silken, Cox's Orange Pippin, Bramley's Seedling e McIntosh, com teores de fósforo menores que 100 mg kg^{-1} , 110 mg kg^{-1} e 90 mg kg^{-1} , respectivamente, apresentaram menor potencial de armazenamento pós-colheita em função da maior ocorrência de pingo-de-mel e de degenerescência ocasionada por baixa temperatura (NEILSEN et al., 2008; JOHNSON, 1980; WEBSTER e LIDSTER, 1986). Assim, considera-se como teor crítico o valor de 100 mg kg^{-1} de fósforo nos frutos; abaixo do qual há risco de baixa preservação da qualidade pós-colheita. Mesmo nas safras onde houve reduções nos teores de fósforo nos frutos, esses teores ficaram dentro do limite crítico para evitar a presença de distúrbios fisiológicos pós-armazenamento nos frutos.

Os teores de cálcio na polpa dos frutos reduziram somente na safra 2018/19, passando de $71,0 \text{ mg kg}^{-1}$ (sem aplicação de P_2O_5) para $55,3 \text{ mg kg}^{-1}$ (dose 160 kg ha^{-1} de P_2O_5). O cálcio, quando em deficiência, é o nutriente mineral que mais implica na qualidade de frutos, causando distúrbios fisiológicos de armazenamento, como "bitter pit" (NEILSEN; NEILSEN, 2009). O cálcio apresenta-se associado com as membranas celulares, conferindo rigidez aos tecidos e preservando as características de permeabilidade seletiva do sistema de membranas. Sua deficiência afeta negativamente a permeabilidade seletiva da membrana celular, conduzindo a danos na célula, causando sua desintegração e a morte celular (AMARANTE et al., 2006; BRACKMANN et al., 2010). NEILSEN e NEILSEN (2009) recomendam teor de cálcio nos frutos acima de 40 mg kg^{-1} para evitar a ocorrência de "bitter pit". Diante disto, os teores de cálcio observados em todas as safras avaliadas ficaram acima do valor crítico, mesmo quando houve redução em função da adubação fosfatada.

O magnésio assim como o potássio, quando em altas concentrações nos frutos podem levar à ocorrência de "bitter pit" (FREITAS et al., 2010). No presente trabalho, os teores de magnésio e de potássio diminuíram somente nas safras 2017/18 e 2018/19. O valor de magnésio nos frutos indicado para evitar a ocorrência de distúrbios fisiológicos após o armazenamento, deve ser menor que 40 mg kg^{-1} (TERBLANCE et al., 1981). O potássio é muitas vezes considerado como prejudicial para a qualidade do fruto através da interferência na absorção de cálcio (NEILSEN; NEILSEN, 2009). Segundo TERBLANCHE et al. (1981), frutos de maçã com teores de potássio maior do que 950 mg kg^{-1} apresentam alto risco de ocorrência de "bitter pit". Mesmo nas safras onde houve influência da adubação fosfatada, os teores de magnésio ficaram acima do valor crítico, e os teores de potássio ficaram dentro dos valores considerados críticos para evitar a incidência de distúrbios fisiológicos durante o armazenamento.

Tabela 4- Teores minerais na polpa fresca de frutos de maçã 'Fuji Suprema', em várias safras, em função da adição anual sucessiva de doses de P₂O₅ sobre a superfície do solo.

Dose de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	2012/13	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
Cálcio (mg kg⁻¹)						
0	106,1 ^{ns}	73,6 ^{ns}	72,1 ^{ns}	52,5 ^{ns}	48,3 ^{ns}	71,0 ⁽¹⁾
40	88,4	77,3	71,4	56,1	53,1	70,4
80	106,1	84,4	73,4	65,2	57,7	66,2
120	104,1	84,7	73,4	60,2	48,3	64,0
160	88,5	89,1	70,8	55,0	54,3	55,3
CV (%)	26,08	23,4	15,9	21,8	15,0	11,8
Magnésio (mg kg⁻¹)						
0	68,0 ^{ns}	57,3 ^{ns}	58,4 ^{ns}	57,3 ^{ns}	71,8 ⁽²⁾	48,2 ⁽³⁾
40	66,5	60,0	63,2	58,8	72,4	47,1
80	70,0	61,0	64,8	56,1	45,3	43,8
120	69,4	59,8	58,9	67,9	42,2	41,4
160	62,9	60,8	67,0	58,3	43,4	41,2
CV (%)	12,67	6,6	9,69	8,69	12,96	11,8
Potássio (mg kg⁻¹)						
0	913,2 ^{ns}	883,5 ^{ns}	862,3 ^{ns}	837,8 ^{ns}	824,0 ⁽⁴⁾	717,0 ⁽⁵⁾
40	920,3	944,9	1014,9	904,2	578,3	826,6
80	953,1	1097,7	819,5	863,2	781,0	899,7
120	854,9	914,4	901,0	810,2	669,6	759,5
160	860,5	952,4	745,2	828,3	897,1	658,1
CV (%)	12,84	17,16	27,98	27,92	20,92	23,74
Nitrogênio (mg kg⁻¹)						
0	381,2 ^{ns}	493,8 ⁽⁶⁾	416,5 ⁽⁷⁾	320,3 ^{ns}	448,8 ^{ns}	517,9 ^{ns}
40	474,7	412,3	508,5	262,9	338,3	347,3
80	377,4	365,2	616,4	268,2	298,8	634,6
120	379,7	390,8	424,4	302,2	336,8	609,4
160	458,9	373,8	452,9	164,0	354,8	517,5
CV (%)	15,57	19,12	19,19	39,73	45,56	44,33
Fósforo (mg kg⁻¹)						
0	121,3 ⁽⁸⁾	118,5 ^{ns}	159,9 ^{ns}	153,2 ^{ns}	160,4 ^{ns}	135,7 ⁽¹⁰⁾
40	126,8	120,8	155,3	182,6	134,6	128,6
80	148,6	121,5	124,2	150,8	163,1	125,5
120	136,9	119,8	124,8	177,1	157,5	117,2
160	155,9	130,9	130,3	143,9	151,8	99,9
CV (%)	13,56	14,15	25,41	26,06	21,75	11,88

⁽¹⁾ $y = 72,90 - 0,094x$ ($R^2 = 0,88^*$); ⁽²⁾ $y = 76,00 - 0,396x + 0,001x^2$ ($R^2 = 0,82^*$); ⁽³⁾ $y = 48,27 - 0,049x$ ($R^2 = 0,93^*$); ⁽⁴⁾ $y = 792,86 - 3,92x + 0,028x^2$ ($R^2 = 0,53^*$); ⁽⁵⁾ $y = 718,42 + 4,07x - 0,028x^2$ ($R^2 = 0,90^*$); ⁽⁶⁾ $y = 459,49 - 0,654x$ ($R^2 = 0,64^*$); ⁽⁷⁾ $y = 424,98 + 3,02x - 0,019x^2$ ($R^2 = 0,48^*$); ⁽⁸⁾ $y = 122,03 + 0,198x$ ($R^2 = 0,75^{**}$); ⁽⁹⁾ $y = 144,26 - 0,583x + 0,003x^2$ ($R^2 = 0,91^*$); ⁽¹⁰⁾ $y = 138,43 - 0,207x$ ($R^2 = 0,89^{**}$). ns: não significativo ($p < 0,05$); *: significativo a ($p < 0,05$); **: significativo a ($p < 0,01$). Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Os teores de nitrogênio foram afetados nas safras 2014/15 e 2015/16 pela adubação fosfatada (tabela 4), sofrendo diminuição na primeira safra de 381 mg kg⁻¹, no tratamento sem

adubação, para 459 mg kg^{-1} no tratamento com a aplicação de $160 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P_2O_5 , e aumento na segunda safra em função da aplicação de P_2O_5 ao solo. Os valores médios de nitrogênio nos frutos foram de 400 mg kg^{-1} , abaixo, portanto, do valor máximo crítico recomendado, que é de 500 mg kg^{-1} (DRIS et al., 1998).

Frutos com teores muito altos de nitrogênio também apresentam baixo potencial de conservação durante o armazenamento refrigerado e maior risco de ocorrência de podridões e distúrbios fisiológicos (NEILSEN; NEILSEN, 2009).

AMARANTE et al. (2012) coletaram amostras de frutos anualmente, durante o período de 1991 a 2007, nos municípios de Fraiburgo, Vacaria e São Joaquim, e observaram que as maçãs produzidas no Sul do Brasil apresentam teores de cálcio e fósforo ligeiramente acima do mínimo necessário e um adequado equilíbrio entre os nutrientes cálcio, potássio, magnésio e nitrogênio. As relações entre os minerais na polpa são parâmetros importantes para prever distúrbios fisiológicos e adequada conservação da qualidade dos frutos durante a armazenagem pós-colheita. A adubação anual com fósforo diminuiu os valores da relação N/Ca nas safras 2014/15 e 2015/16. As demais relações, K/Ca e (K+Mg)/Ca, não foram afetadas pela adubação fosfatada em nenhuma das seis safras avaliadas (tabela 5). AMARANTE et al. (2011) relatam que frutos de maçã ‘Fuji’ com valores das relações inferiores a 7,8 para N/Ca, 37 para K/Ca e 40 para (K+Mg)/Ca tiveram baixa incidência de “bitter pit”, um dos mais importantes distúrbios fisiológicos relacionados ao baixo teor de cálcio. No presente trabalho, essas relações apresentaram-se, em média, inferiores aos valores críticos citados.

Nas folhas, ocorre a maioria dos processos fisiológicos. Em geral, elas são analisadas e seu conteúdo, juntamente com os teores de nutrientes no solo, fornecem subsídios importantes para a avaliação da disponibilidade de nutrientes no pomar (CQFS-RS/SC, 2016). Os teores foliares de cálcio, magnésio, potássio, nitrogênio e fósforo, avaliados na safra 2018/2019, não foram afetados pela aplicação de P_2O_5 ao solo (tabela 6). Segundo os limites recomendados pelo manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016), os teores médios de fósforo, potássio e nitrogênio nas folhas encontram-se acima dos níveis insuficiência para a cultura da macieira, os quais são de $1,0 \text{ g kg}^{-1}$ para fósforo, $8,0 \text{ g kg}^{-1}$ para potássio e $17,0 \text{ g kg}^{-1}$ para nitrogênio. Já os teores de cálcio e magnésio são inferiores aos níveis insuficiência recomendados, os quais são de $8,0 \text{ g kg}^{-1}$ para cálcio e de $2,0 \text{ g kg}^{-1}$ para magnésio.

Tabela 5 - Relações minerais na polpa fresca de frutos de maçã ‘Fuji Suprema’, em várias safras, em função da adição anual sucessiva de doses de P₂O₅ sobre a superfície do solo.

Dose de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	2012/13	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
N/Ca (mg kg ⁻¹)						
0	3,84 ^{ns}	6,93 ⁽¹⁾	6,34 ⁽²⁾	6,23 ^{ns}	9,20 ^{ns}	7,32 ^{ns}
40	7,46	5,49	7,29	4,67	6,37	5,00
80	3,66	4,51	8,58	4,15	5,26	10,11
120	3,89	4,88	6,03	5,59	6,98	9,81
160	5,26	4,40	6,43	3,11	6,56	9,39
CV (%)	59,22	22,48	16,82	49,53	43,12	47,62
K/Ca (mg kg ⁻¹)						
0	8,73 ^{ns}	12,33 ^{ns}	11,47 ^{ns}	16,26 ^{ns}	17,15 ^{ns}	10,06 ^{ns}
40	15,06	12,32	14,17	16,32	11,60	11,95
80	9,49	14,04	11,32	12,42	13,85	13,41
120	8,65	11,57	13,74	14,54	14,95	11,97
160	9,82	11,06	10,67	14,83	16,14	11,83
CV (%)	60,09	25,59	33,29	29,33	27,13	22,42
(K+Mg)/Ca (mg kg ⁻¹)						
0	9,40 ^{ns}	13,13 ^{ns}	12,28 ^{ns}	17,38 ^{ns}	18,65 ^{ns}	10,74 ^{ns}
40	16,09	13,12	15,06	17,37	13,03	12,62
80	10,16	14,81	12,21	13,07	14,68	14,08
120	9,32	12,32	14,58	15,72	15,92	12,62
160	10,54	11,78	11,62	15,88	16,88	12,58
CV (%)	59,52	24,94	31,43	27,28	25,99	21,14

⁽¹⁾ $y = 6,38 - 0,014x$ ($R^2 = 0,75^{**}$); ⁽²⁾ $y = 6,44 + 0,033x - 0,0002x^2$ ($R^2 = 0,44^*$).

ns: não significativo ($p < 0,05$); *: significativo a ($p < 0,05$); **: significativo a ($p < 0,01$).

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Apesar dos teores foliares de cálcio e magnésio na safra de 2018/19 apresentarem-se abaixo do nível crítico recomendado, os mesmos nutrientes nos frutos estavam em concentrações adequadas para evitar a presença dos distúrbios fisiológicos, bem como para manter as características físico-químicas adequadas para um fruto de qualidade como observado anteriormente. Isso indica que apesar desses baixos teores, a produção não foi afetada por esses nutrientes. Os teores de cálcio no fruto podem ter sido supridos através da aplicação de cálcio via pulverização dos frutos, prática essa comum e rotineira na cultura da macieira.

Tabela 6 - Teores de nutrientes nas folhas de maçã ‘Fuji Suprema’ na safra 2018/2019 em função da adição anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo.

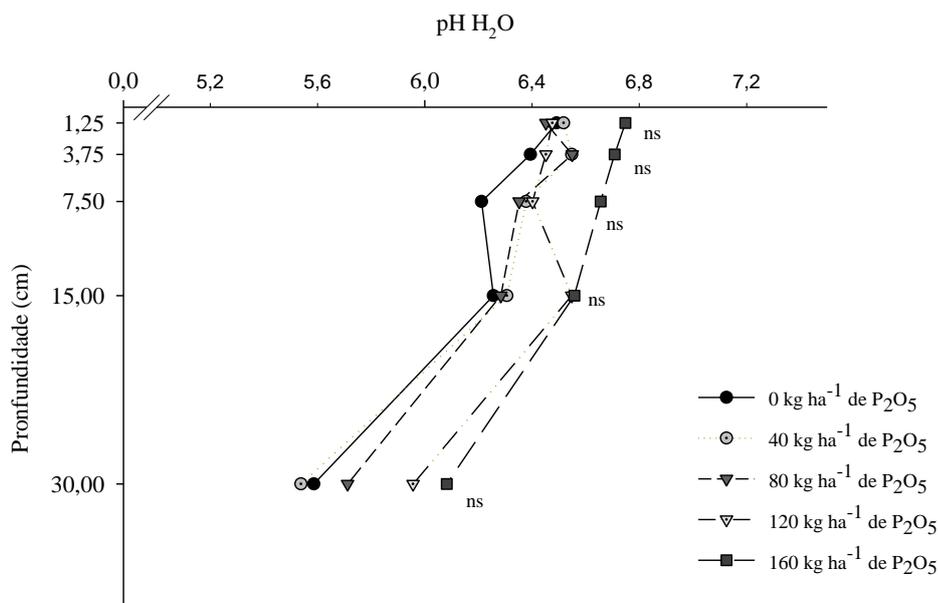
Dose de P_2O_5 ($kg\ ha^{-1}$)	Cálcio	Magnésio	Potássio	Nitrogênio	Fósforo
	$g\ kg^{-1}$				
0	3,9 ^{ns}	2,0 ^{ns}	11,6 ^{ns}	18,0 ^{ns}	1,9 ^{ns}
40	3,7	1,8	11,5	19,1	2,1
80	3,6	1,9	16,9	18,3	2,3
120	3,6	1,9	10,8	19,1	2,3
160	3,4	1,8	10,6	17,3	2,1
CV (%)	9,12	11,03	31,42	8,47	17,92

ns: não significativo ($p < 0,05$); *: significativo a ($p < 0,05$); **: significativo a ($p < 0,01$).

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Após sete anos de adição de P_2O_5 ao solo, os valores de pH em água não foram afetados, em nenhuma das profundidades avaliadas (figura 2). Isso é esperado, já que os valores de pH foram corrigidos no momento da implantação do pomar, elevando os níveis para 6,0, conforme recomendado no manual de adubação e calagem CQFS/RS-SC (2004). Trabalhos publicados mostram que o efeito residual da aplicação de calcário permanece por longos períodos (CIOTTA et al., 2004; ALMEIDA et al., 2005), como observado no presente estudo.

Figura 2 - Valores de pH em água nas camadas do solo até 40 cm de profundidade, na safra 2016/2017 em função da adição anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo.

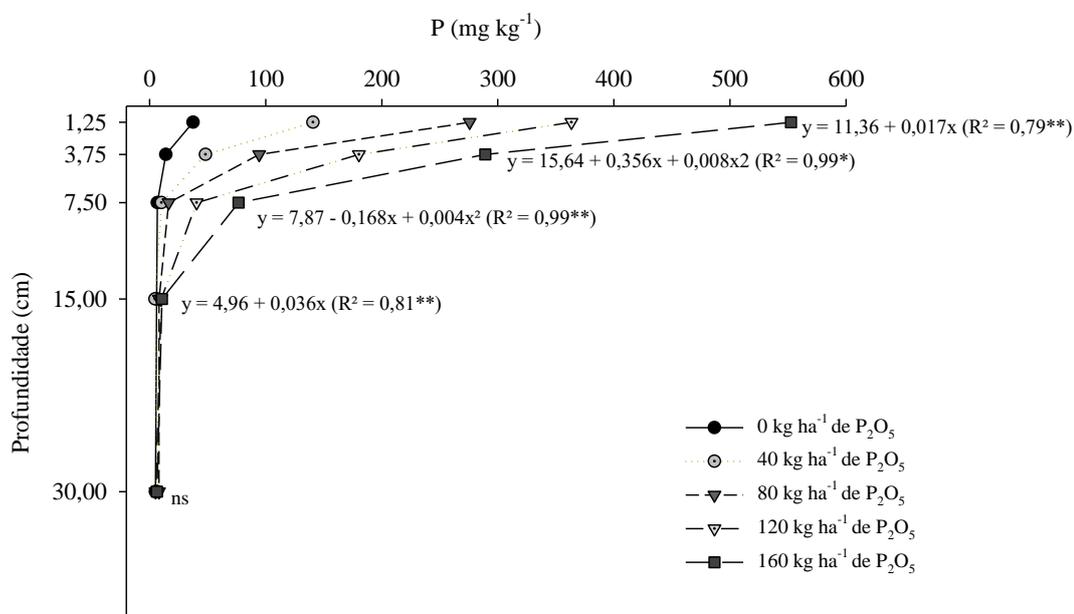


ns: não significativo ($p < 0,05$); *: significativo a ($p < 0,05$); **: significativo a ($p < 0,01$).

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Os teores de P disponível no solo, independente da dose aplicada, são considerados altos de acordo com o manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016) e foram significativamente afetados pela adição de P_2O_5 ao solo. Os valores aumentaram 14,7, 20,8, 11,4 e 1,75 vezes nas camadas 0-2,5 cm, 2,5-5,0 cm, 5-10 cm e 10-20 cm de profundidade respectivamente, no tratamento que recebeu 160 kg ha^{-1} de P_2O_5 em relação ao que não receberam adubação fosfatada (0 kg ha^{-1} de P_2O_5). Já na camada de 20-40 cm, não houve aumento dos teores de fósforo pela adição superficial de P_2O_5 ao solo (Figura 3).

Figura 3 - Teores de fósforo (mg kg^{-1}) nas camadas de solo até 40 cm de profundidade, na safra 2016/2017, em função da aplicação anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo.



ns: não significativo ($p < 0,05$); *: significativo a ($p < 0,05$); **: significativo a ($p < 0,01$).

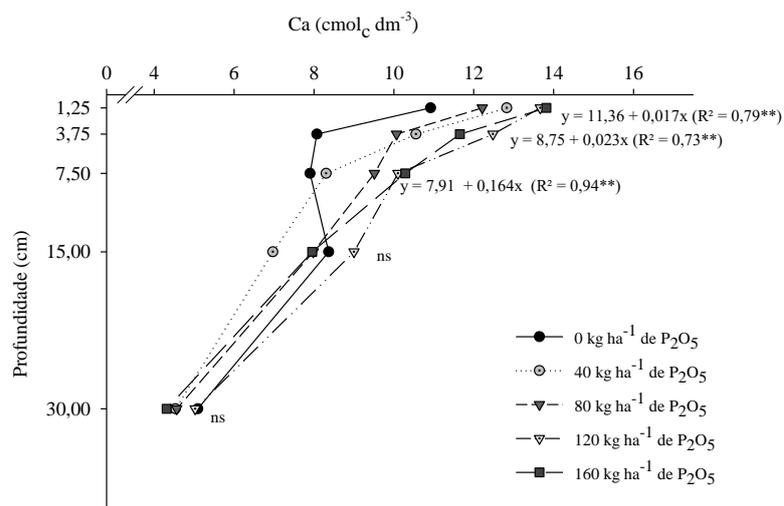
Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Observa-se que apesar do aumento dos teores de fósforo decorrentes da adubação fosfatada, a proporção desse aumento decresce com a profundidade do solo, até não ser significativa, como na camada mais profunda (20-40cm). Fato esse que foi causado pelas aplicações anuais na superfície do solo ao longo dos anos, sem realizar a incorporação do fertilizante, para evitar danos mecânicos nas raízes das plantas, e pela baixa mobilidade de fósforo no solo. Além disso, o acúmulo de fósforo na superfície do solo pode ser atribuído à sua alta energia de ligação à superfície da fração mineral do solo. Ao longo dos anos, aplicações

continuas de fósforo na superfície do solo podem causar ocupação dos locais de adsorção, levando a uma diminuição da sua energia e adsorção, o que pode aumentar a dessorção e, conseqüentemente, a migração no perfil de solos de pomares (BRUNETTO et al., 2015). Esses aumentos dos teores de fósforo na camada de 0-20 cm também foram observados por NAVROSKI et al. (2019) e BRUNETTO et al. (2015), que estudaram a aplicação superficial de fósforo em pomares de pessegueiro e pereiras, respectivamente.

Os teores de cálcio no solo, também aumentaram significativamente nas primeiras camadas do solo, e esses aumentos foram de 26%, 44% e 30% respectivamente nas camadas 0-2,5 cm, 2,5-5,0 cm e 5-10 cm (figura 4), quando comparado com o tratamento que recebeu 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅ ao que não receberam adubação fosfatada (0 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Nas demais camadas, não houve aumento significativos nos teores de cálcio do solo. Esse aumento de cálcio nas camadas superficiais ocorreu devido ao fato de que a fonte fosfatada utilizada, superfosfato triplo (Ca(H₂PO₄)₂.H₂O), apresenta cerca de 10 % de cálcio em sua composição. OLIVEIRA et al. (2014), quando avaliaram as alterações químicas na região adjacentes de grânulos de superfosfato triplo, observaram resultados semelhantes, onde o cálcio adicionado pelo fertilizante se movimentou até mais que 10 cm do local de aplicação.

Figura 4 - Teores de cálcio (cmol_c dm⁻³) nas camadas do solo até 40 cm de profundidade, na safra 2016/2017, em função da aplicação anual sucessiva de doses de P₂O₅ sobre a superfície do solo.

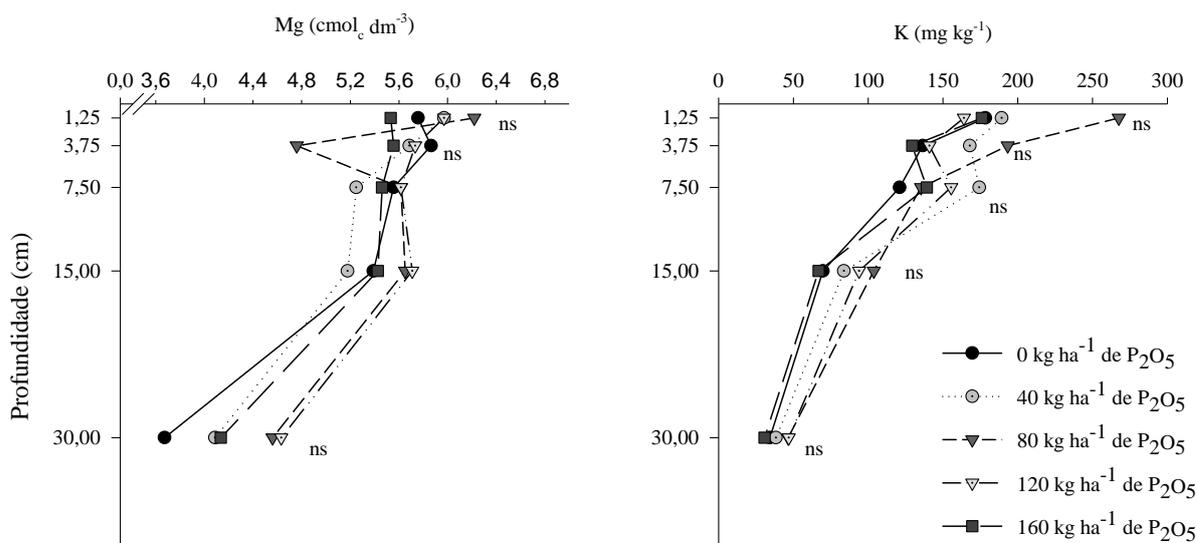


ns: não significativo ($p < 0,05$); *: significativo a ($p < 0,05$); **: significativo a ($p < 0,01$).
Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Os demais nutrientes avaliados no solo, magnésio e potássio, não sofreram influência da adição de P₂O₅ ao solo (figura 5). Os valores desses nutrientes podem ser considerados

médios, de acordo com o recomendado para a cultura da macieira (CQFS-RS/SC, 2016). Além disso, no momento da implantação do pomar ocorreu a correção do solo, e por consequência os teores desses nutrientes foram elevados.

Figura 5 - Teores de magnésio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e potássio (mg kg^{-1}) nas camadas do solo até 40 cm de profundidade, na safra 2016/2017, em função da aplicação anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo.



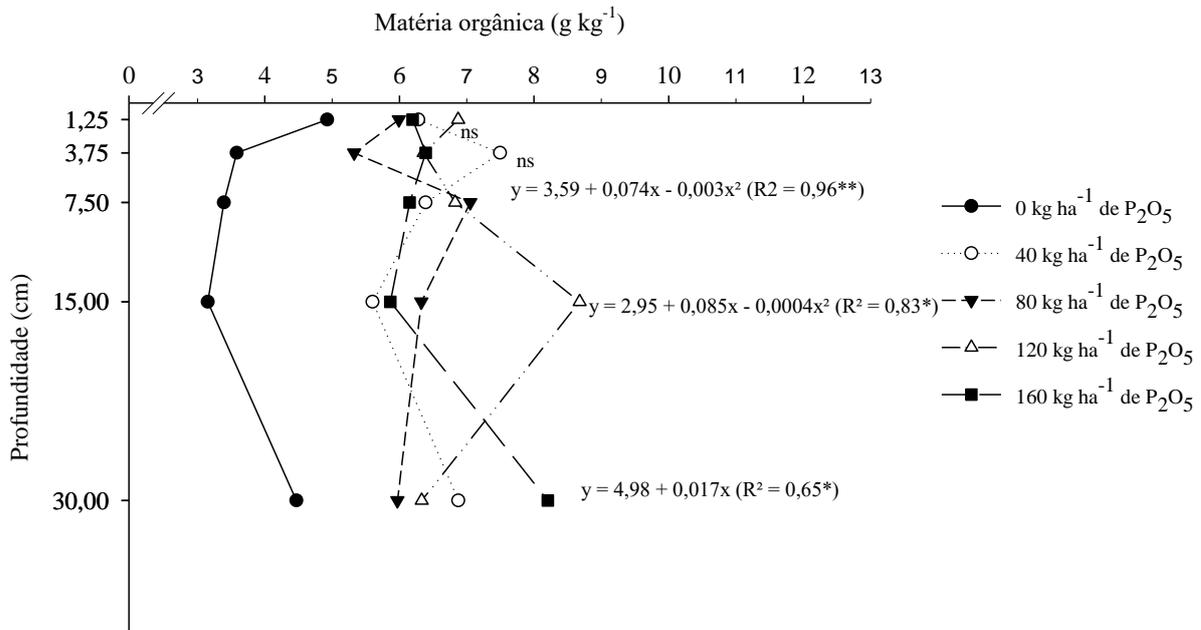
ns: não significativo ($p < 0,05$); *: significativo a ($p < 0,05$); **: significativo a ($p < 0,01$).

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Os teores de matéria orgânica aumentaram nas camadas mais profundas, 5,0 -10,0 cm, 10,0-20,0 cm e 20,0-40,0 cm, porém não foram afetadas nas camadas mais superficiais pela aplicação de fósforo (figura 6). Isso pode ter ocorrido em função do aumento do crescimento de plantas de cobertura e espontâneas, que desenvolvem raízes profundas, contribuindo para a composição da matéria orgânica do solo após sua morte e decomposição. Apesar desse aumento significativo em profundidade, o teor de matéria orgânica presente no solo deste trabalho é considerado médio a alto, segundo o manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016). Esses teores altos de matéria orgânica podem contribuir significativamente para a nutrição dos pomares, já que a matéria orgânica tem efeito direto e indireto na fertilidade do solo. É fonte de nutrientes para as plantas principalmente fósforo, nitrogênio e enxofre, quando mineralizados pelos microrganismos (SILVA; MENDONÇA, 2007), principalmente quando se trata de fósforo.

Diante do exposto, o pomar em geral, apresenta-se em condições nutricionais adequadas para gerar boas produtividades e frutos de boa qualidade para a comercialização imediata ou para armazenagem, como os dados do presente trabalho mostram.

Figura 6 - Teores de matéria orgânica (g kg^{-1}) nas camadas do solo até 40 cm de profundidade, na safra 2016/2017, em função da aplicação anual sucessiva de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo.



ns: não significativo ($p < 0,05$); *: significativo a ($p < 0,05$); **: significativo a ($p < 0,01$).

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Mesmo com as altas concentrações de fósforo no solo, proporcionados pela adição anual desse nutriente, a falta de resposta da macieira, em termos de qualidade, pode estar ligada a fatores como a característica perene da planta. Essa característica proporciona maior período de absorção de nutrientes no solo, permitindo um acúmulo de fósforo em seus tecidos, o qual será, quando necessário, translocado para as partes com maior atividade metabólica. Além disso, a associação das raízes com fungos micorrízicos, assim como os altos teores de matéria orgânica presente nos solos da região, também podem ter contribuído para essa baixa resposta da macieira ao fósforo aplicado.

A associação das raízes com fungos micorrízicos aumenta a absorção de fósforo pelas plantas (GASTOL et al., 2016), já que o sistema radicular explora melhor o solo, chegando a regiões anteriormente inexploradas. Entretanto, os altos teores de matéria orgânica do solo, afetados pela atividade biológica, a qual efetua a ciclagem do fósforo pela mineralização das

frações orgânicas (COSTA; LOVATO, 2004) liberam quantidades de fósforo significantes para a absorção das plantas já que a matéria orgânica possui aproximadamente 0,5% de fósforo (ERNANI, 2008).

Além dos fatores já citados, a pequena exigência de fósforo da espécie pode estar contribuindo para a baixa resposta da planta à adição fósforo ao solo por longos períodos. A maior parte do fósforo exportado pela planta é o fósforo presente nos frutos. A média de fósforo nos frutos foi de 140 mg kg⁻¹. Supondo uma produtividade média de 50 toneladas ha⁻¹ de maçãs, seriam exportados pela planta em torno de 7 kg ha⁻¹ de fósforo. Considerando que o solo utilizado apresenta em média 6 % de matéria orgânica (figura 6) e uma taxa de decomposição média de 3% ao ano, seriam mineralizados, a cada ano, cerca de 18 kg ha⁻¹ de fósforo na camada de 0-20 cm, quantidade superior à necessidade dos frutos. Isso mostra que não há necessidade de aplicação de fósforo em pomares de maçã adultos, onde as árvores estejam desenvolvidas, e que tenham altos teores de matéria orgânica, já que a mesma supre as necessidades da cultura, o que foi evidenciado pela falta de resposta da macieira à aplicação do fósforo ao solo.

6.4 CONCLUSÕES

1. A qualidade dos frutos de macieira 'Fuji Suprema' foi levemente afetada pelas adições anuais de longo prazo de fósforo ao solo. Além disso, os valores dos atributos relacionados à qualidade e conservação dos frutos permaneceram na faixa adequada. A falta de resposta da macieira à aplicação de fósforo ao solo, evidencia que não há necessidade de realizar aplicações de fósforo em pomares de maçã adultos, onde as árvores estejam desenvolvidas, que receberam correções com fósforo na implantação dos pomares e que apresentem altos teores de matéria orgânica, já que a mesma supre as necessidades da cultura.
2. Os teores de fósforo, assim como os demais nutrientes nos frutos, se encontraram dentro dos padrões considerados normais para evitar a ocorrência de distúrbios fisiológicos e para uma adequada conservação da qualidade dos mesmos durante a armazenagem pós-colheita.
3. A adição de P₂O₅ sobre a superfície do solo por períodos prolongados aumentou o teor de fósforo no solo na camada arável (até 20 cm de profundidade), mas não afetou a concentração desse nutriente nas folhas, mostrando um adequado suprimento de fósforo mesmo no tratamento sem a adição desse nutriente.

4. Os teores de cálcio aumentaram nas camadas superficiais (até 10 cm de profundidade) em função da adição prolongada de superfosfato triplo na superfície do solo. Porém, nas folhas os teores de cálcio estão pouco abaixo do limite crítico recomendado para a cultura. Apesar disso, a qualidade dos frutos não foi afetada, apresentando teores de cálcio ideais nos frutos e isso ocorreu possivelmente devido à aplicação de cálcio foliar realizada.

7 CAPÍTULO II – FORMAS DE FÓSFORO NO SOLO DE UM POMAR DE MAÇÃ ‘FUJI SUPREMA’ APÓS SEIS ANOS DE APLICAÇÕES ANUAIS DE SUPERFOSFATO TRIPLO EM SUPERFÍCIE

RESUMO

A Serra Catarinense apresenta condições climáticas favoráveis para a produção de maçãs, entretanto muitos de seus solos rasos, pedregosos, altamente intemperados e possuem baixos teores de fósforo. A disponibilidade de fósforo no solo é bastante dependente de reações físico-químicas como pH, capacidade de adsorção e fixação no solo, assim como da atividade dos microrganismos. A interação do fósforo com constituintes do solo, como alumínio, ferro e cálcio, sua ocorrência em formas orgânicas, e sua lenta taxa de difusão na solução do solo tornam o fósforo o nutriente menos prontamente disponível às plantas. O objetivo desse trabalho foi quantificar o efeito de aplicações anuais sucessivas de adubos fosfatados no acúmulo, na distribuição no perfil e nas formas de fósforo no solo, cultivado com macieira, no município de São Joaquim. O experimento foi conduzido em um pomar comercial, no município de São Joaquim-SC plantado num Cambissolo Húmico, com a cultivar ‘Fuji Suprema’. Os tratamentos consistiram de doses de fósforo (0, 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅) aplicadas anualmente, na forma de superfosfato triplo, sobre a superfície, sem incorporação, a partir de 2011. Em 2017, após seis anos de aplicações de superfosfato triplo, foram coletadas amostras de solo estratificadas até 40 cm de profundidade. Nessas amostras, foi realizado o fracionamento químico de fósforo, proposto por Hedley, e o balanço do fósforo no solo. As aplicações sucessivas de superfosfato triplo aumentaram as concentrações de fósforo em todas as formas avaliadas pelo método de fracionamento de Hedley. Esses aumentos foram mais pronunciados nas camadas superficiais do solo, até 20 cm. Dessas frações, o fósforo inorgânico apresentou-se maior que a de fósforo orgânico. O balanço de fósforo no solo foi positivo para todos os tratamentos que receberam a aplicação de P₂O₅ ao solo, justificando os aumentos dos teores de fósforo em todas as camadas e frações do solo.

Palavras-chave: Fracionamento de Hedley. Balanço de fósforo no solo. Limite crítico de fósforo.

ABSTRACT

The Santa Catarina state has adequate weather conditions for apple production, however most soils in the region are shallow and stony, with low phosphorus content. The availability of phosphorus in the soil is highly dependent on physic-chemical reactions such as pH, adsorption capacity and fixation in the soil, as well as on the activity of microorganisms. The interaction of phosphorus with soil constituents, such as aluminum, iron and calcium, its occurrence in organic forms, and its slow rate of diffusion in the soil solution make phosphorus the least readily available nutrient to plants. The objective this study was to quantify the effect successive applications of phosphate fertilizer to the soil surface on distribution of P on the profile and forms of phosphorus in the soil, cultivated with apple trees, in the municipality of São Joaquim. The experiment was conducted in a commercial orchard, in the municipality of São Joaquim-SC, planted on an Haplumbrept, with the cultivar 'Fuji Suprema'. Treatments consisted of phosphorus rates (0, 40, 80, 120 and 160 kg ha⁻¹ of P₂O₅) applied annually, in the form of triple superphosphate, on the surface, without incorporation, from 2011. In 2017, after six years of triple superphosphate applications, stratified soil samples were collected up to 40 cm deep. In these samples, the chemical fractionation of phosphorus, proposed by Hedley, and the phosphorus balance in the soil were carried out. Successive triple superphosphate applications increased phosphorus concentrations in all forms evaluated by the Hedley fractionation method. These increases were more pronounced in the superficial layers of the soil, up to 20 cm. On these fractions, inorganic phosphorus was higher than organic phosphorus. The phosphorus balance in the soil was positive for all treatments that received the application of P₂O₅ to the soil, justifying the increase in phosphorus contents in all soil layers and fractions.

Keywords: Hedley fractionation. Phosphorus balance in the soil. Critical phosphorus limit.

7.1 INTRODUÇÃO

A maçã é a terceiro fruto in natura mais consumida no Brasil, integrando o mesmo mercado que a laranja e a banana. As altas produtividades, o preço popular, aliados ao sabor e qualidade, garantem esta posição na escolha do paladar dos brasileiros. O Brasil é o 13º maior produtor de maçã do mundo, com uma produção de aproximadamente 1,06 milhões de toneladas (IBGE, 2017). A região sul é a maior produtora do fruto, responsável por 99,2% da produção nacional, especialmente os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

A serra Catarinense apresenta boas condições climáticas para a produção do fruto. Entretanto, os solos dessas regiões são rasos, pedregosos, com pH baixo, altos teores de alumínio e baixa disponibilidade de fósforo. Por outro lado, apresentam médios a altos teores de matéria orgânica, a qual é fonte de nutrientes após a mineralização (NAVA et al., 2002).

Os processos geoquímicos e biológicos regulam a disponibilidade de fósforo no solo (CROOS; SCHESINGER, 1995). Com isso, a disponibilidade de fósforo depende de reações físico-químicas como pH, capacidade de adsorção e fixação no solo, assim como da atividade dos microrganismos (BASSO et al., 1986; SANTOS et al., 2008). A interação do fósforo com constituintes do solo, como alumínio, ferro e cálcio, e sua ocorrência em formas orgânicas e tornam o fósforo o nutriente menos prontamente disponível às plantas.

Diante disso, no Brasil é recomendada e realizada a adubação de correção com fósforo na implantação dos pomares e, posteriormente, em manutenção, quando necessário (CQFS-RS/SC, 2016). A adubação de pré-plantio é recomendada por ocasião do preparo do solo para a implantação do pomar, a qual tem como objetivo elevar os teores de potássio e fósforo para níveis adequados, para um bom estabelecimento da cultura (CQFS-RS/SC, 2016). Após a implantação do pomar, recomenda-se aplicar até 70% do total da adubação com nitrogênio potássio e também o fósforo (quando necessário) em março, período em que as plantas ainda conseguem absorver e armazenar os nutrientes, e o restante em setembro, no início da brotação e de novo incremento na atividade do sistema radicular (SUZUKI; BASSO, 1997).

Vários estudos sobre o acúmulo e as diferentes formas de fósforo no solo vem sendo desenvolvidos com base no método proposto por HEDLEY, STEWART e CHAUHAN (1982). No fracionamento proposto de Hedley, o fósforo é extraído por uma sequência de extratores químicos em uma mesma amostra de solo, onde são usados extratores de menor até a maior força de extração, removendo P orgânico e P inorgânico, desde as formas lábeis até as recalcitrantes.

Os primeiros extratores utilizados no fracionamento químico de fósforo são resina trocadora de íons, que extrai fósforo inorgânico, e o NaHCO_3 , o qual extrai frações de fósforo inorgânica e orgânica. Esses extratores acessam frações de fósforo lábeis que podem contribuir ativamente no suprimento do nutriente para as plantas. As frações de fósforo, orgânico e inorgânico, consideradas modernamente lábeis, são extraídas com soluções de NaOH 0,1 e NaOH 0,5 mol l^{-1} . Essas frações de fósforo inorgânico extraídas representam, em geral, o fósforo ligado aos óxidos de ferro e alumínio e às argilas silicatadas, com energia de ligação intermediária. Já o fósforo orgânico extraído por esses extratores, representa o fósforo orgânico de média e baixa labilidade (CROSS; SCHLESINGER, 1995). A extração utilizando HCl retira fósforo inorgânico dos fosfatos de cálcio e mais fortemente adsorvidos que as frações anteriores. A fração de fósforo residual do fracionamento é extraída através da digestão do solo com $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{MgCl}_2$, onde são obtidos os valores de fósforo remanescente que não foram extraídos pelos extratores seletivos do fracionamento de HEDLEY. Nesta fração, estão incluídas formas recalcitrantes de fósforo inorgânico e orgânico, de difícil acesso pelos demais extratores. Essa fração pode contribuir para a nutrição das plantas apenas em situações de extrema carência do nutriente no solo (GATIBONI et al., 2007).

Através do fracionamento químico de fósforo, observou-se aumento nas frações orgânica e inorgânicas desse nutriente em solo que receberam a aplicação de adubação química (SANTOS et al., 2008; CONTE; ANGHINONI; RHEINHEIMER, 2003) e adubação orgânica (CERETTA et al., 2010; BOITT et al., 2018) em culturas anuais, e em frutíferas (SCHMITT et al., 2017; BRUNETTO et al., 2013; SCHMITT et al., 2013a; WANG et al., 2015; SCHMITT et al., 2013b).

Além disso, os cálculos de balanço de nutrientes têm sido utilizados para avaliar o manejo sustentável dos mesmos. As diferenças entre a quantidade de nutriente exportada pelas culturas e aplicada com os fertilizantes indica o aumento ou a redução do teor dos nutrientes do solo. O aumento no balanço de nutrientes é vital para aumentar o rendimento e a qualidade das culturas, reduzir o custo de entrada de nutrientes e melhorar a qualidade do solo e da água (BALIGAR; FAGERIA; HE, 2001). Como regra geral, quando a entrada de nutrientes excede às quantidades exportadas pelas culturas, o balanço se torna positivo. Isso sinaliza acúmulo de nutrientes no solo e melhoria na sua fertilidade, podendo resultar em baixa eficiência no uso do nutriente e baixo desempenho econômico. Quando a exportação de nutrientes excede a entrada de nutrientes, tem-se um balanço de nutrientes negativo, que indica a diminuição da fertilidade do solo (SINGH; SINGH; REDDY, 2002; BALIGAR; FAGERIA, 2001).

Balancos positivos causados pelo excesso de adubação com fósforo, pode levar a problemas ambientais, principalmente em função da erosão e escoamento superficial. As perdas de fósforo ocorrem principalmente por erosão. Por possuir ligações fortes com as partículas do solo, o fósforo é transportado juntamente com essas partículas, através da erosão. Por sua baixa mobilidade no solo, áreas que recebem adições de fósforo cujas exportações pelas culturas são baixas, tendem a ter camadas de solo com altas concentrações de fósforo. Com isso o fósforo pode ser transferido para os sistemas aquáticos, pois devido ao seu enriquecimento, o material erodido é rico nesse nutriente (GATIBONI et al., 2014). Além disso, a saturação dos sítios de adsorção resultante das altas fertilizações, libera fósforo para a solução do solo e, conseqüentemente, pode ocorrer a lixiviação do nutriente no perfil, além do escoamento superficial.

Quando o fósforo oriundo da erosão ou do escoamento chega até as águas (açudes, lagos, rios, reservatórios, entre outros) ocorre aumento na disponibilidade desse nutriente nos sistemas hídricos, causando rápido crescimento de algas no sistema aquático, chamado de eutrofização das águas. A eutrofização tem como consequência a morte de organismos aquáticos devido à baixa oxigenação do sistema, ao aumento da turbidez, e à redução na qualidade e potabilidade da água. Dessa maneira, as atividades agrícolas podem causar impactos ambientais e, por isso, muitos países vêm limitando o uso dos fertilizantes fosfatados nos solos, baseando suas recomendações na quantidade de fósforo que potencialmente pode ser liberada para os sistemas.

Diante disso, GATIBONI et al. (2014) propuseram uma equação para prever um limite de segurança ambiental no uso de fósforo (Limite Crítico Ambiental de Fósforo ou LCA-P), a qual leva em consideração os teores de fósforo disponíveis extraídos por Mehlich-1, na camada de 0-10 cm, e os teores de argila do referido solo. Na prática, quando a análise do solo indicar teor de fósforo disponível maior que o LCA-P, deve-se evitar a adição de adubos fosfatados, pois o solo tem grandes chances de ser um potencial gerador de poluição ambiental (GATIBONI et al., 2014).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi quantificar o acúmulo, a distribuição no perfil e as formas de fósforo no solo através do fracionamento de Hedley, determinar o balanço de fósforo no solo em função da taxa de exportação anual de fósforo pelos frutos, e ainda determinar o Limite Crítico Ambiental de Fósforo (LCA-P), em um solo cultivado com macieira no município de São Joaquim, que receberam aplicações anuais de superfosfato triplo.

7.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento teve início em 2010 e foi conduzido em um pomar comercial no município de São Joaquim, SC, (28°17'25" S, 49°56'56" W), com altitude de 1200 m, em um Cambissolo Húmico. Foi utilizada a cultivar 'Fuji Suprema' sobre o porta-enxerto Marubakaido/M9, num sistema de alta densidade de plantio (aproximadamente 1.984 plantas ha⁻¹).

Antes da implantação do pomar, foram realizadas análises químico-físicas do solo, as quais revelaram os seguintes resultados: pH em água = 6,4; 4,3 mg dm⁻³ de P; 95 mg dm⁻³ de K; 11,5 cmol_c dm⁻³ de Ca; 4,3 cmol_c dm⁻³ de Mg; 48 g dm⁻³ de matéria orgânica e 470 g dm⁻³ de argila.

Os tratamentos consistiram de doses de fósforo (0, 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅), aplicadas anualmente a partir de 2011, na forma de superfosfato triplo, após a colheita dos frutos, sobre a superfície do solo, sem incorporação, numa faixa de 2,2 m de largura centralizada junto à linha de plantio. Foram realizadas seis aplicações de P₂O₅, desde a implantação até a coleta do solo, que ocorreu em 2017. Assim as quantidades totais de P₂O₅ aplicadas nesses seis anos foram de 0, 240, 480, 720 e 960 kg ha⁻¹ de P₂O₅. A área experimental recebeu o mesmo manejo recomendado para pomares comerciais (EPAGRI, 2002), exceto em relação à adubação fosfatada. Utilizou-se o delineamento experimental de blocos ao acaso, com cinco repetições.

Após a colheita, em agosto de 2017, seis anos após o início das aplicações de fósforo, foi realizada a coleta de amostras de solo nas camadas de 0-2,5; 2,5-5,0; 5,0-10,0; 10,0-20,0 e 20,0-40,0 cm de profundidade (sendo a representação realizada através das médias das camadas sendo: 1,25; 3,75; 7,50; 15,0 e 30,0 cm). As amostras de solo foram secas a 65 °C até peso constante, moídas e passadas em peneira com malha de 2 mm. Em cada uma dessas amostras foi realizado o fracionamento químico de fósforo.

Os teores de fósforo no solo foram obtidos através do fracionamento químico conforme metodologia proposta por Hedley (HEDLEY, STEWART; CHAUHAN, 1982), com as modificações propostas por CONDRON et al. (1985) e GATIBONI (2003). Resumidamente a metodologia foi a seguinte: amostras de 0,5 g de solo foram submetidas à extração sequencial com resina trocadora de ânions (fração P_{iRTA}), que remove a fração P inorgânica lábil. Em seguida com NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ (fração P_{ibic} e P_{Obic}), frações que contribuem para o fornecimento de nutrientes das plantas. A extração com NaOH 0,1 mol L⁻¹ (fração P_{ihid} e P_{Ohid}) e com NaOH 0,5 mol L⁻¹ (fração P_{ihid05} e P_{Ohid05}), representa a fração pouco lábil,

correspondendo a formas inorgânicas de fósforo ligadas nas argilas de óxidos e silicatos com energia intermediária de ligação e a fração de fósforo orgânico associadas com compostos húmicos. Em seguida utilizando HCl 1 mol L⁻¹ (fração P_{iHCl}), representando frações não-lábeis de fósforo, correspondendo a fósforo dos fosfatos de cálcio e fortemente adsorvidos. Todas as extrações foram realizadas com 16 horas de contato solo/extrator.

Após as extrações, o solo remanescente foi seco em estufa a 50 °C e submetido à digestão com H₂SO₄ + H₂O₂ + MgCl₂ (P_{residual}), que pode contribuir para a nutrição das plantas em situações de extrema falta no solo. O fósforo inorgânico dos extratos alcalinos de NaHCO₃ e NaOH foi determinado pelo método proposto por DICK e TABATABAI (1977). Nesses extratos alcalinos, o fósforo total foi determinado por digestão com persulfato de amônio + ácido sulfúrico, em autoclave, sendo o fósforo orgânico obtido pela diferença entre fósforo total e o fósforo inorgânico. O fósforo dos extratos ácidos foi determinado conforme MURPHY e RILEY (1962). Os procedimentos laboratoriais para a realização do fracionamento foram esquematizados na figura 7.

Além da quantificação de fósforo pelos diversos extratores do método de Hedley, também se avaliou o fósforo pelo método de Mehlich 1, utilizado nos estados do RS e SC para avaliar a disponibilidade de fósforo para as plantas. Nesse método, usou-se a relação solo/extrator de 1:10. As amostras foram agitadas por 5 minutos em agitador horizontal, e posteriormente deixadas em repouso por 16 horas, para decantação, quando então foi retirado o sobrenadante. Nesses para cada extrato, determinou-se as concentrações fósforo por espectrometria ultravioleta (UV).

O balanço de fósforo no solo, em kg ha⁻¹ ano⁻¹, após seis anos de aplicação de P₂O₅, foi calculado utilizando a quantidade total de fósforo aplicada (P_{entrada}), em kg ha⁻¹ ano⁻¹, a quantidade exportada pela colheita dos frutos (P_{exportado}), em kg ha⁻¹ ano⁻¹, conforme a equação:

$$\text{Balanço do nutriente no solo (kg ha}^{-1}\text{ ano}^{-1}) = P_{\text{entrada}} - P_{\text{exportado}}$$

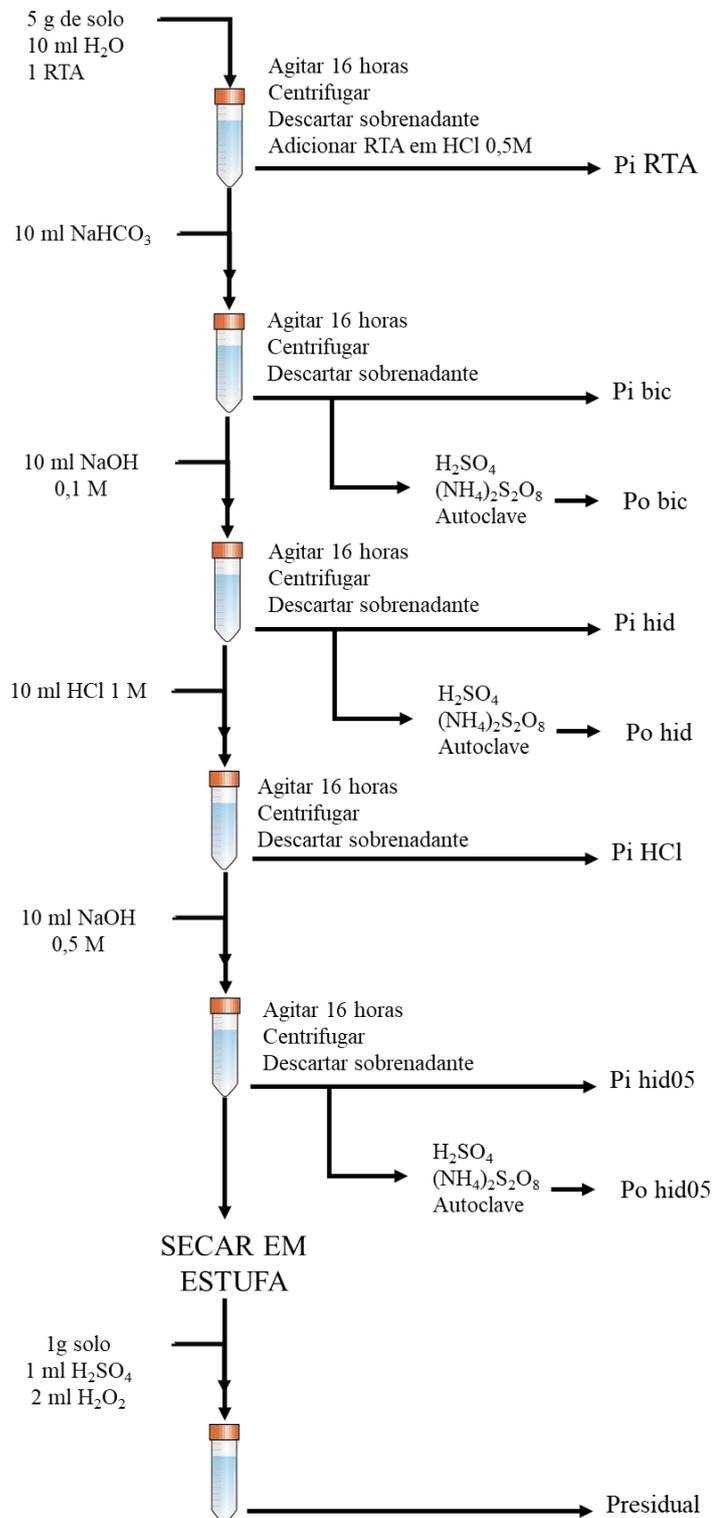
Os teores de P_{exportado} foram encontrados utilizando a média das produtividades obtidas a partir do trabalho de NAVA; CIOTTA; BRUNETTO (2017), os quais avaliaram a produtividade na área do presente trabalho, e a média dos teores de fósforo nos frutos.

O risco de poluição ambiental foi determinado através da equação proposta por GATIBONI et al. (2014), a qual prediz o limite de segurança ambiental no uso do fósforo (Limite Crítico Ambiental de Fósforo ou LCA-P), a qual leva em consideração os teores de fósforo disponível extraído por Mehlich-1, na camada de 0-10 cm, e os teores de argila do referido solo. A equação utilizada para calcular o LCA-P foi a seguinte:

$$\text{LCA-P (mg dm}^{-3}) = 40 + \% \text{ argila.}$$

Utilizando o programa Sisvar, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e análise de regressão ($p \leq 0,05$) em função das doses de P.

Figura 7 - Esquema simplificado do fracionamento de HEDLEY, STEWART e CHAUHAN (1982), com as modificações propostas por CONDRON et al. (1985) e GATIBONI (2003).

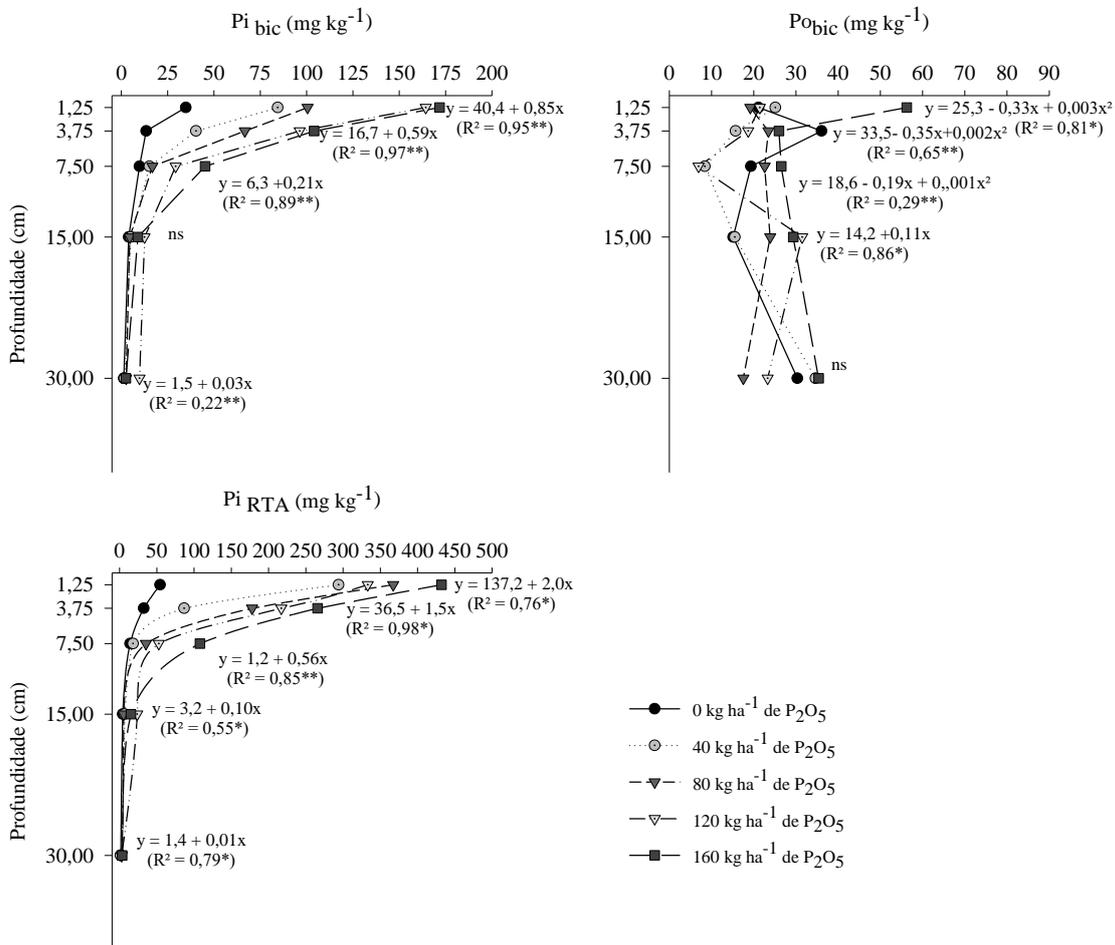


7.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores de fósforo extraídos por resina trocadora de ânions (P_{iRTA}) aumentaram com o aumento da dose de fertilizante aplicada, em todas as camadas avaliadas (figura 8). A proporção desses aumentos foi maior nas camadas mais próximas da superfície. Nas camadas inferiores a 10 cm, os teores reduziram cerca de 3 vezes quando comparado com as camadas mais superficiais (até 10 cm). Os valores de fósforo extraídos pela RTA até 10 cm de profundidade são considerados “muito alto” (40 mg kg^{-1} para fósforo extraído com RTA) segundo GATIBONI et al. (2008). Por outro lado, para as camadas de 10,0 a 20,0 cm, os valores são altos somente quando foram aplicados 120 e $160 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P_2O_5 . Esses altos valores encontrados indicam que a quantidade de fósforo requerida pelas árvores é pequena, e provavelmente está sendo suprida pela correção realizada na implantação do experimento e pelo fósforo oriundo da decomposição da matéria orgânica.

Os resultados mostraram aumento linear nos teores de P_{iBic} com a adição anual de superfosfato triplo, em todas as camadas avaliadas, exceto na de 10-20 cm de profundidade, onde esse aumento não foi estatisticamente significativo (figura 8). Assim como o P_{iRTA} , a proporção desse aumento decresce com a profundidade no perfil do solo. Quando comparamos o tratamento sem fósforo ($0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P_2O_5) com a maior dose aplicada ($160 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), o aumento diminui de 393 %, na camada superficial (0-2,5 cm), para 83%, na camada mais profunda (20-40 cm). Os teores de P_{oBic} foram afetados com a adição de P_2O_5 nas camadas avaliadas até 20 cm, porém com comportamento particular para cada camada de solo avaliada (Figura 8). Houve aumento nos teores de P_{oBic} quando adicionado adubação fosfatada nas camadas de 0-2,5, 5-10 e 10-20 cm, sendo o tratamento sem fósforo ($0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P_2O_5) o que apresentou os maiores valores, 36 mg kg^{-1} de fósforo na camada 2,5-5,0 cm. A camada mais profunda, 20-40 cm, não foi afetada significativamente pela adubação fosfatada.

Figura 8 - Teores de fósforo inorgânico extraído por resina trocadora de ânions (Pi_{RTA}), fósforo inorgânico e orgânico no solo extraídos por $NaHCO_3$ (Pi_{bic} e Po_{bic}) até 40 cm de profundidade após seis anos de aplicações anuais sucessivas de doses de P_2O_5 ao solo.



ns: não significativo ($p < 0,05$); *: significativo a ($p < 0,05$); **: significativo a ($p < 0,01$).

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

A fração lábil, embora muito importante para o suprimento de fósforo às plantas, representou uma fração pequena do total de fósforo no solo (tabela 7). Os maiores valores dessa fração ocorreram na camada superficial (0-2,5 cm), na maior dose aplicada, de 160 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P_2O_5 , onde foram encontradas 660 mg kg⁻¹ de fósforo, valor esse que representa 22,4 % do fósforo total do solo. Mesmo com sua pequena participação no total de fósforo no solo, a aplicação anual de superfosfato triplo aumentou a disponibilidade de fósforo no solo, o qual pode ser utilizado tanto pelas plantas de macieira, por plantas daninhas e de cobertura, e também pelos microrganismos presentes no solo. Os resultados de Pi_{RTA} e Pi_{bic} no solo se assemelham aos obtidos em outros trabalhos (SANTOS et al., 2008; CONTE; ANGHINONI;

RHEINHEIMER, 2003), os quais relataram o aumento das frações lábeis com aplicações de fosfatos ao solo.

Tabela 7 - Teores de fósforo lábil (mg kg^{-1}) do solo, obtidos através do somatório das frações $\text{Pi}_{\text{RTA}} + \text{Pi}_{\text{bic}} + \text{Po}_{\text{bic}}$, até 40 cm de profundidade, após seis anos de aplicações anuais sucessivas de doses de P_2O_5 ao solo.

Doses de P_2O_5 (kg ha^{-1})	Camadas (cm)				
	0-2,5	2,5-5,0	5,0-10,0	10,0-20,0	20,0-40,0
0	110,2	81,8	43,3	23,5	33,3
40	403,4	142,7	41,6	27,0	37,7
80	487,0	268,1	74,8	33,7	23,0
120	518,8	332,0	88,9	67,5	113,4
160	660,0	395,7	179,7	53,4	41,3

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Os teores de fósforo inorgânico extraídos por $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol l}^{-1}$ (Pi_{hid}) aumentaram com o aumento da dose de superfosfato triplo aplicada anualmente no solo, até 10 cm de profundidade (figura 9). Em comparação com a ausência de adubação fosfatada ($0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P_2O_5), a maior dose aplicada ($160 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P_2O_5) apresentou aumento de cerca de 170, 208 e 119% nos teores de Pi_{hid} , nas camadas 0-2,5, 2,5-5,0 e 5,0-10,0 cm respectivamente. A camada de 20-40 cm de profundidade apresentou redução nos teores de Pi_{hid} em função da adubação, sendo no tratamento que não recebeu adubação os valores foram maiores (206 mg kg^{-1}) que quando aplicado $160 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P_2O_5 (137 mg kg^{-1}). Com a adição da adubação fosfatada, possivelmente ocorreu aumento na disponibilidade de fósforo, levando à redução das frações ligadas aos óxidos de ferro e alumínio.

Os teores de fósforo orgânico extraídos por $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol l}^{-1}$ (Po_{hid}) aumentaram com o aumento da dose de superfosfato triplo aplicada anualmente ao solo, em todas camadas, exceto na camada de 2,5-5,0 cm, onde esses valores não foram significativos. Quando comparado com o tratamento testemunha ($0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P_2O_5), aquele que recebeu $160 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ apresentou valores de Po_{hid} cerca de 64, 201, 10 e 175% maiores, nas camadas 0-2,5, 5,0-10,0, 10,0-20,0 e 20-40 cm respectivamente.

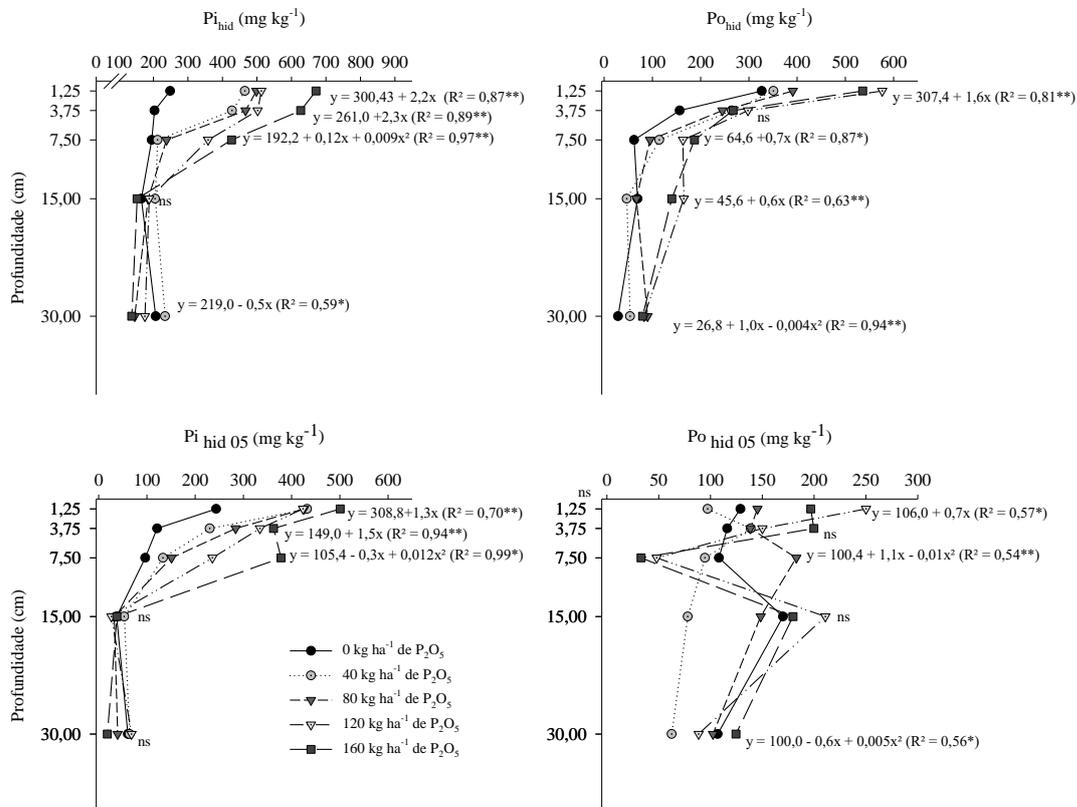
Assim como a solução $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol l}^{-1}$, a solução $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol l}^{-1}$ extrai formas de fósforo, orgânicas e inorgânicas, que não foram retiradas com os extratores anteriores. Os teores de fósforo inorgânico extraído com $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol l}^{-1}$ ($\text{Pi}_{\text{hid}05}$) aumentou somente nas camadas superficiais, até 10 cm de profundidade (Figura 9). Esse aumento foi de 106, 199 e 292% nas camadas 0-2,5, 2,5-5,0 e 5,0-10,0 cm de profundidade respectivamente.

A fração de fósforo orgânico extraído com NaOH 0,5 mol L⁻¹ (P_{ohid05}) aumentou cerca de 53% na camada superficial de 0-2,5 cm quando recebeu a aplicação de 160 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P₂O₅ em comparação com a testemunha (0 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P₂O₅). As camadas de 5,0-10,0 e 20,0-40,0 cm de profundidade apresentaram comportamento quadrático, onde os maiores valores de P_{ohid05} foram observados nos tratamentos com 80 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P₂O₅ (183 mg kg⁻¹) e 160 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P₂O₅, respectivamente. As demais camadas avaliadas não apresentaram efeitos significativos (figura 9).

No presente estudo, os teores de P_{iHCl} foram crescentes nas camadas superficiais, até 10 cm de profundidade (figura 10). Esses aumentos foram de cerca de 922, 1832 e 430 % maiores nos tratamentos que receberam a maior dose (160 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P₂O₅) em comparação com a ausência de adição de P₂O₅ (0 kg ha⁻¹ ano⁻¹). Apesar disso, a proporção desse aumento foi reduzindo perfil até não ser mais significativa a partir de 10 cm de profundidade.

No presente estudo, os valores de P_{residual} (figura 10) diminuíram na camada superficial (0-2,5 cm), sendo o tratamentos sem aplicação de fósforo (0 kg ha⁻¹ ano⁻¹) e aquele que recebeu 120 kg ha⁻¹ ano⁻¹ os que apresentaram os maiores valores, 900 e 919 mg kg⁻¹ respectivamente. Nas camadas 2,5-5,0, 10,0-20,0 e 20,0-40,0 cm os teores de P_{residual} aumentaram com o aumento da dose anual de P₂O₅ aplicada ao solo (figura 10).

Figura 9 - Teores de fósforo inorgânico e orgânico do solo extraídos por NaOH 0,1 mol l⁻¹ (Pi_{hid} e Po_{hid}) e fósforo inorgânico e orgânico extraídos por NaOH 0,5 mol l⁻¹ (Pi_{hid05} e Po_{hid05}), até 40 cm de profundidade, após seis anos de aplicações anuais sucessivas de doses de P₂O₅ ao solo.

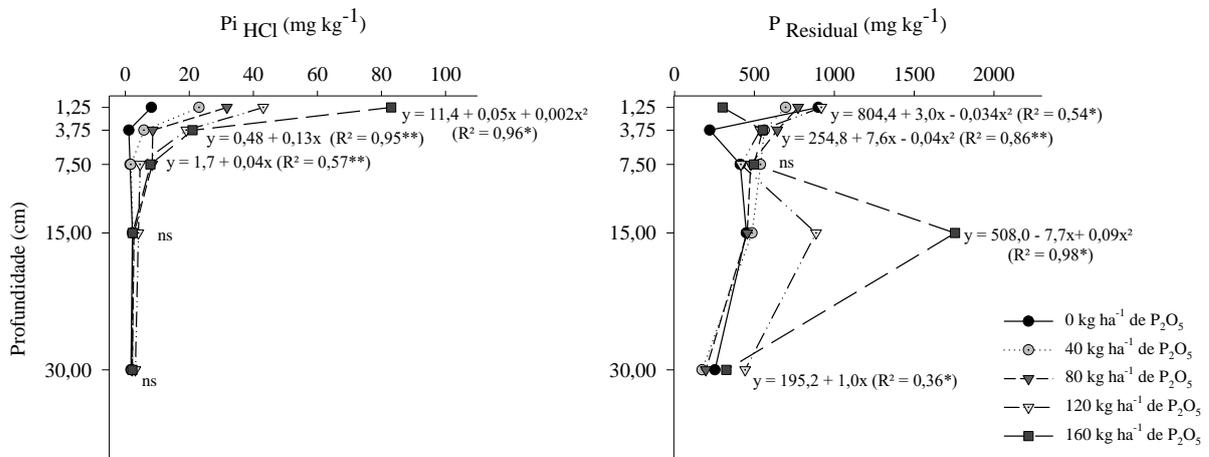


ns: não significativo ($p < 0,05$); *: significativo a ($p < 0,05$); **: significativo a ($p < 0,01$).

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

A fração de P_{residual} contribuiu em média com 38 % do fósforo total do solo. Resultados semelhantes foram encontrados por GONÇALVES e MEURER (2009) e SCHIMITT et al. (2013), que relataram que a maior parte do solo fósforo total em solos do sul do Brasil estava na fração residual. Para frutíferas assim como a macieira, esses valores de P_{residual} é importante para o fornecimento de fósforo a longo prazo, já que realizara absorção de fósforo por vários anos. Para esse tipo de cultura, quanto mais fósforo ficar adsorvido ao solo melhor, já que maior será o potencial do solo em fornecer esse nutriente ao longo dos anos. Assim, como o solo é um sistema em equilíbrio, com a absorção do fósforo disponível, na solução do solo, ocorre o deslocamento desse nutriente de outras frações para a solução. Com isso, o P_{residual} de difícil liberação pode passar a suprir a necessidade de fósforo, ao longo dos anos e com a diminuição do fósforo prontamente disponível.

Figura 10 - Teores de fósforo inorgânico do solo extraído por HCl (P_{iHCl}), fósforo inorgânico e orgânico extraídos por digestão com $H_2SO_4 + H_2O_2$ ($P_{Residual}$), até 40 cm de profundidade, após seis anos de aplicações anuais sucessivas de doses de P_2O_5 ao solo.



ns: não significativo ($p < 0,05$); *: significativo a ($p < 0,05$); **: significativo a ($p < 0,01$).
Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Os teores de fósforo total do solo foram obtidos somando-se todas as frações determinadas no fracionamento ($P_{iRTA} + P_{ibic} + P_{obic} + P_{ihid} + P_{ohid} + P_{ihid05} + P_{ohid05} + P_{iHCl} + P_{Residual}$). A adição anual de fósforo por seis anos resultou em um aumento dos teores de fósforo total (P_{total}) até 20 cm de profundidade. Os aumentos na maior dose de fosfato aplicada foram de 982, 1525, 791,6 e 1404 mg kg⁻¹ de fósforo, nas camadas 0-2,5, 2,5-5,0, 5,0-10,0 e 10,0-20,0 cm respectivamente (tabela 8). Os teores de fósforo inorgânico total ($P_{i_{total}}$) foram obtidos somando-se as frações Pi ($P_{iRTA} + P_{ibic} + P_{ihid} + P_{ihid05} + P_{iHCl} + P_{Residual}$); já os teores de P orgânico total ($P_{o_{total}}$) foram obtidos somando-se as frações Po ($P_{obic} + P_{ohid} + P_{ohid05}$). Em toda as camadas avaliadas, os teores de fósforo inorgânico foram maiores que os de fósforo orgânico, sendo a camada de 0-2,5 a que apresentou os maiores valores, os quais diminuíram com a profundidade do solo (tabela 8). Em média, 77% do fósforo do solo estão na forma de fósforo inorgânico e 23% estão na forma de fósforo orgânico. Resultados semelhantes foram encontrados por GONÇALVES e MEURER (2009), GATIBONI et al. (2008) quando avaliaram as formas de fósforo após várias aplicações de dejetos líquido de suíno em pastagem natural, e por SCHMITT et al. (2013) quando avaliaram solos arenosos cultivados com videira. Além disso, SCHMITT et al. (2017), avaliando frações de fósforo em dois pomares de macieira, também encontram acúmulos nos teores de fósforo inorgânico e orgânico, mostrando que a adubação com fosfato pré-plantio e a fertilização de manutenção ao longo dos ciclos de produção excedem os níveis de fósforo extraídos pelas plantas.

Em resumo, o fósforo adicionado ao solo incrementou os teores de $P_{\text{residual}} - P_{\text{hid}} - P_{\text{ohid}} - P_{\text{hid05}} - P_{\text{ohid05}} - P_{\text{IRTA}} - P_{\text{obic}} - P_{\text{ibic}} - P_{\text{HCl}}$ em ordem decrescente. GONÇALVES e MEURER (2009) encontraram resultados semelhantes, onde o fósforo adicionado incrementou principalmente a fração moderadamente lábil e, em menores quantidades, as frações que compõem o P lábil do solo.

Tabela 8 - Teores de fósforo inorgânico total do solo (P_{total}), P orgânico total (P_{ototal}) e fósforo total do solo (P_{total}), até 40,0 cm de profundidade, após seis anos de aplicações anuais sucessivas de doses de P_2O_5 ao solo.

Doses de P_2O_5 (kg ha ⁻¹)	Camadas (cm)				
	0 a 2,5	2,5 a 5,0	5,0 a 10,0	10,0 a 20,0	20,0 a 40,0
Fósforo inorgânico total (mg kg ⁻¹) ^(a)					
0	1489,2 ⁽¹⁾	591,0 ⁽²⁾	728,4 ⁽³⁾	662,7 ⁽⁴⁾	524,6 ^{ns}
40	1993,9	1352,9	918,0	756,5	475,4
80	2197,3	1647,4	926,7	684,4	388,6
120	2395,3	1705,6	1096,0	1140,0	700,8
160	2158,9	1931,7	1463,0	1972,0	487,6
CV (%)	16,7	14,4	15,9	44,1	27,7
Fósforo orgânico total (mg kg ⁻¹) ^(b)					
0	476,7 ⁽⁵⁾	308,7 ^{ns}	189,7 ^{ns}	254,5 ⁽⁶⁾	166,2 ⁽⁷⁾
40	473,3	419,1	217,3	140,2	150,7
80	555,5	407,0	300,6	239,2	209,9
120	847,9	466,7	218,5	407,4	272,3
160	788,8	493,1	246,6	349,1	239,6
CV(%)	22,6	32,3	38,3	25,2	41,5
Fósforo total (mg kg ⁻¹) ^(c)					
0	1966,0 ⁽⁸⁾	899,79 ⁽⁹⁾	918,1 ⁽¹⁰⁾	917,1 ⁽¹¹⁾	690,8 ^{ns}
40	2467,2	1772,1	1135,3	896,7	626,1
80	2752,8	2054,4	1227,3	923,6	598,5
120	3243,1	2172,3	1314,5	1547,4	973,1
160	2947,8	2424,8	1709,7	2321,1	727,1
CV(%)	12,2	11,3	15,1	37,8	24,6

^(a)Somatório das frações P inorgânicas (P_{IRTA} , P_{ibic} , P_{hid} , P_{hid05} , P_{HCl} e P_{residual}); ^(b)Somatório das frações P orgânico (P_{obic} , P_{ohid} e P_{ohid05}); ^(c)Somatório de todas as frações.

⁽¹⁾ $y = 1486,3 + 15,0x$ ($R^2 = 0,98^{**}$); ⁽²⁾ $y = 652,1 + 16,9x - 0,06x^2$ ($R^2 = 0,96^{**}$); ⁽³⁾ $y = 697,0 + 4,1x$ ($R^2 = 0,89^{**}$); ⁽⁴⁾ $y = 728,9 - 6,8x + 0,09x^2$ ($R^2 = 0,97^*$); ⁽⁵⁾ $y = 428,7 + 2,5x$ ($R^2 = 0,79^{**}$); ⁽⁶⁾ $y = 186,8 + 1,1x$ ($R^2 = 0,49^{**}$); ⁽⁷⁾ $y = 154,0 + 0,7x$ ($r^2 = 0,71^*$); ⁽⁸⁾ $y = 1929,1 + 16,8x - 0,06x^2$ ($R^2 = 0,94^*$); ⁽⁹⁾ $y = 974,0 + 18,7x - 0,06x^2$ ($R^2 = 0,96^{**}$); ⁽¹⁰⁾ $y = 908,5 + 4,4x - 0,06x^2$ ($R^2 = 0,96^{**}$); ⁽¹¹⁾ $y = 908,5 + 4,4x^2$ ($R^2 = 0,92^{**}$); ⁽¹²⁾ $y = 941,6 - 7,0x + 0,1x^2$ ($r^2 = 0,99^*$); ns: não significativo ($p < 0,05$); *: significativo a ($p < 0,05$); **: significativo a ($p < 0,01$).

Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

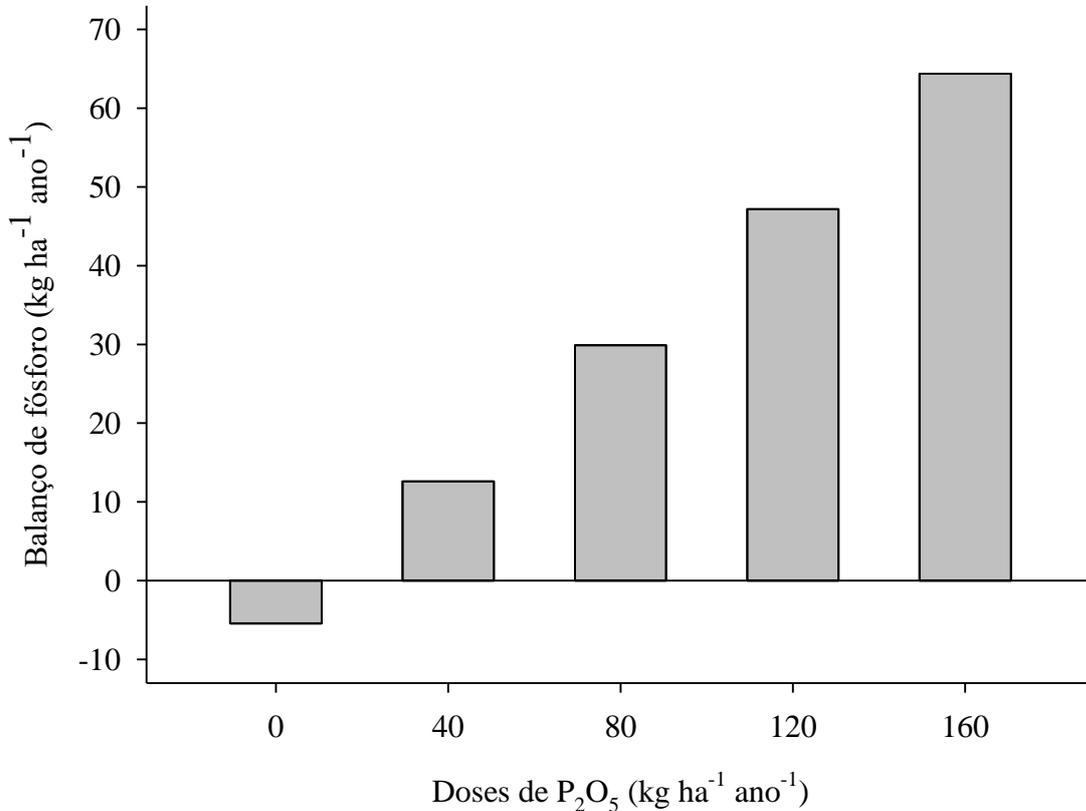
Assim como aconteceu na maioria das frações de fósforo avaliada pelo fracionamento, os teores de P_{total} , P_{ototal} e P_{total} diminuíram com o aumento da profundidade do solo (tabela 8). Esse fenômeno era esperado, já que as aplicações de P_2O_5 ao longo dos anos ocorreram sobre

a superfície, sem incorporação, e o fósforo é um nutriente de baixa mobilidade no solo. A aplicação sobre a superfície teve o objetivo de evitar danos às raízes das plantas de macieira que seriam ocasionados se o solo fosse mobilizado.

Frações de fósforo orgânicas são mais importantes em solos com baixa disponibilidade de fósforo, principalmente se os teores de fósforo inorgânico não suprem a necessidade das plantas. Em solos como o do presente estudo, onde ocorre o acúmulo de fósforo na forma inorgânica, as plantas geralmente usam menos as frações orgânicas de fósforo (GATIBONI et al., 2008).

No presente estudo, o balanço de fósforo no solo foi positivo para todas as doses aplicadas (figura 11). Apesar de apresentar balanço negativo, a ausência de aplicação de fósforo ao solo ($0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P_2O_5) apresentou valores negativos baixos, $-5,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de fósforo. Isso mostra que a correção realizada na implantação do pomar vem suprindo a necessidade das plantas até o momento. Se não ocorrer a reposição de fósforo, esse balanço tende a se tornar cada vez mais negativo, fazendo com que as plantas passem a utilizar as reservas do solo. Por outro lado, o balanço positivo originado pela aplicação de P_2O_5 ao longo dos anos mostra um acúmulo de fósforo no solo, o que explica os aumentos em todas as frações extraídos pelo fracionamento de Hedley. WANG et al. (2015), ao avaliarem o balanço de fósforo em pomares de maçã, em solo com acidez corrigida, fertilizado anualmente por vários anos, encontraram balanço positivo, e por consequência, aumentos nos teores de fósforo no solo, semelhante ao ocorrido no presente trabalho.

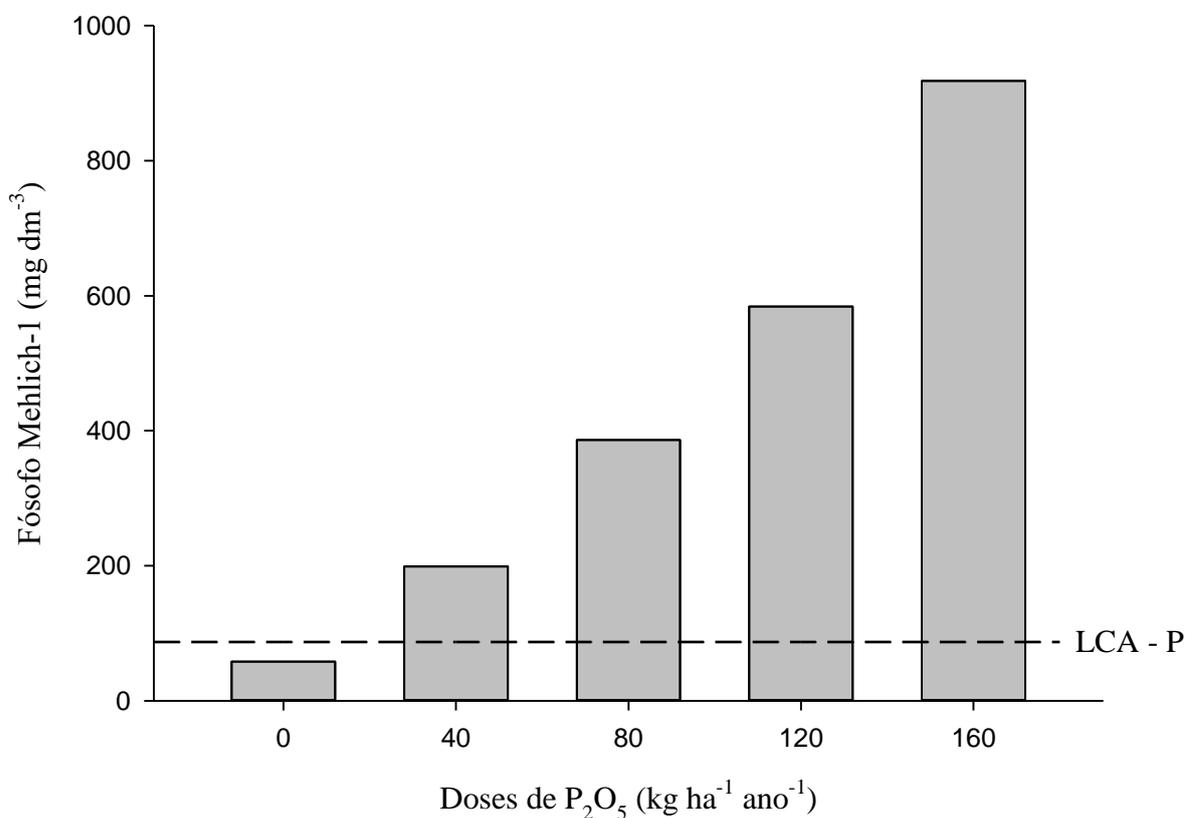
Figura 11- Balanço de fósforo no solo ($\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) após seis anos de aplicações anuais sucessivas de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo.



Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

Quando analisamos os teores de fósforo encontrados no presente trabalho, o valor do LCA-P é de 87 mg dm^{-3} de fósforo, já que o teor de argila presente nesse solo é de 47 %. Diante disso, os valores de fósforo extraídos pelo método de Mehlich-1, na camada de 0-10 cm (figura 12), mostram que todos os tratamentos que receberam a aplicação de superfosfato triplo anualmente durante seis anos apresentaram valores acima do LCA-P, mostrando que são potenciais causadores de poluição ambiental. Já o tratamento que não recebeu adubação de manutenção com fósforo, possui teor abaixo do LCA-P (58 mg dm^{-3}). Apesar de mostrar potencial poluidor, o solo do presente estudo não apresenta perdas visíveis de fósforo, já que o solo do pomar se encontra sempre coberto por plantas de cobertura e está localizado em uma área plana o que dificulta as perdas de solo por erosão e escoamento superficial.

Figura 12 - Teores de fósforo no solo (mg dm^{-3}) na camada 0-10 cm, extraídos com solução Mehlich-1, após seis anos de aplicações anuais sucessivas de doses de P_2O_5 sobre a superfície do solo.



⁽¹⁾ Valores obtidos com o somatório dos teores extraídos nas camadas 0-2,5 + 2,5-5,0 + 5,0-10,0 cm.
Fonte: elaborado pelo autor, 2019.

7.4 CONCLUSÕES

1. Aplicações sucessivas de superfosfato triplo em pomares de maçã na região produtora de São Joaquim aumentaram as concentrações de fósforo em todas as formas avaliadas pelo método de fracionamento de Hedley. Esses aumentos foram mais pronunciados nas camadas superficiais do solo, até 20 cm.
2. As frações de fósforo inorgânico apresentaram acúmulos maiores que as frações de fósforo orgânico em decorrência da aplicação anual de P_2O_5 durante seis anos.

3. Devido à baixa exigência e exportação de fósforo pela macieira, o balanço do fósforo no solo foi positivo, confirmando os acúmulos em todas as frações de fósforo avaliadas pelo fracionamento de Hedley.
4. As altas concentrações de fósforo disponível, verificada nos tratamentos que receberam aplicações de superfosfato triplo durante seis anos, estão acima do LCA-P determinado para o respectivo solo e, por isso, podem se tornar um agente poluente.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar do presente trabalho ter sido conduzido em período de avaliação significativo (7 safras), o experimento foi realizado em uma única condição de solo e clima e com uma única cultivar. Assim, experimentos futuros devem levar em consideração a avaliação de outras regiões produtoras de maçã, com condições de solos diferentes e outras cultivares, para que resultados mais conclusivos sobre o real efeito de aplicações em manutenção de fósforo na qualidade dos frutos produzidos sejam obtidos.

Entretanto, os resultados obtidos no presente estudo indicam que adições de fósforo ao solo afetam pouco os atributos de qualidade de frutos e a composição mineral dos mesmos, evidenciando a falta de resposta da macieira. Isso mostra que não há necessidade de aplicações anuais de fósforo em pomares de maçã adultos, onde as árvores estejam desenvolvidas, que sofreram correção de solo na implantação e que apresentem médios a altos teores de matéria orgânica no solo. Constata-se também que a exigência da macieira e as quantidades de fósforo exportados são baixos, sendo o mesmo suprido, muitas vezes, pela decomposição da matéria orgânica do solo.

Apesar disso, aplicações de fósforo em manutenção ainda é uma prática realizada por diversos produtores, muitas vezes sem ter sua necessidade comprovada devidamente pelas análises de folhas, frutos e solo. Essas aplicações, em conjunto com a baixa exigência da planta aliado aos pequenos valores de fósforo exportado com os frutos causam acúmulos de fósforo no solo, já que o balanço desse nutriente é positivo, o que pode vir causar problemas ambientais, principalmente em função da ocorrência de erosão e escoamento superficial nesses pomares.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. A. de et al. Propriedades químicas de um Cambissolo Húmico sob preparo convencional e semeadura direta após seis anos de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 437-445, 2005.

AMARANTE, C. V. T. do; CHAVES, D. V.; ERNANI, P. R. Composição mineral e severidade de “bitter pit” em maçãs ‘Catarina’. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 28, n. 1, p. 51–54, 2006.

AMARANTE et. al. O teor de cálcio na casca é indicativo da suscetibilidade ao “bitter pit” em maçãs ‘fuji’. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 33, n. 1, 2011.

AMARANTE, C. V. T. do et al. Composição mineral de maçãs 'Gala' e 'Fuji' produzidas no Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 4, p. 550–560, 2012.

ANTONIOLLI, L. R. et al. Qualidade de maçãs baseada nas condições nutricionais e meteorológica. **Inovações tecnológicas para o setor da maçã – Inovamaçã: relatório técnico**, Embrapa Uva e Vinho, p. 275-310, 2011.

ARAÚJO, A. P.; MACHADO, C. T. de T. Fósforo. In: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 253-280.

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

BALIGAR, V.C; FAGERIA, N. K. Nutrient use efficiency in plants: An overview. In: RAKSHIT, A.; SINGH, H. B.; SEN, A. (eds). **Nutrient Use Efficiency: from Basics to Advances**. Springer, 2015.

BASSO, C.; WILMS, F. W. W.; SUZUKI, A. Fertilidade do solo e nutrição da macieira. EMPASC. **Manual da cultura da macieira**, EMPASC, p. 236-265, 1986.

BRACKMANN, A. et al. Armazenamento de maçã ‘Royal Gala’ sob diferentes concentrações de etileno. **Revista Brasileira Agrociência**, v. 6, n. 1, p. 39-41, 2000.

BRACKMANN, A.; BENEDETTI, M. STEFFENS, C. A.; MELLO, A. M. DE. Efeito da temperatura e condições de atmosfera controlada na armazenagem de maçãs ‘Fuji’ com

- incidência de pingo de mel. **Revista Brasileira Agrociência**, v. 8, n. 1, p. 37-42, 2002.
- BRACKMANN, A. et al. Temperatura e otimização da atmosfera controlada para o armazenamento de maçã 'Gala'. **Revista Brasileira Agrociência**, v. 11, n. 4, p. 505-508, 2005
- BRACKMANN, A. et al. Aplicações pré-colheita de cálcio na qualidade pós-colheita de maçãs 'Fuji'. **Ciência Rural**, v. 40, n. 6, p. 1435-1438, 2010.
- BRUNETTO, G. et al. Soil phosphorus fractions in a Sandy Typic Hapludalt as affected by phosphorus fertilization and grapevine cultivation period. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 44, p. 1937-1950, 2013.
- BRUNETTO, G. et al. The pear tree response to phosphorus and potassium fertilization. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 37. n. 2, p. 507-516, 2015.
- BOITT, G. et al. Fate of phosphorus applied to soil in pig slurry under cropping in southern Brazil. **Geoderma**, v. 321, p. 164-172, 2018.
- BOWEN, J. H.; WATKINS, B. C. Fruit maturity, carbohydrate and mineral content relationships with watercore in 'Fuji' apples. **Postharvest Biology and Technology**, v. 11, p.31-18, 1997
- CERETTA, C. A. et al. Frações de fósforo no solo após sucessivas aplicações de dejetos de suínos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 6, p. 593-602, 2010.
- CIOTTA, M. N. et al. Manejo da calagem e os componentes da acidez de latossolo bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 317-326, 2004
- CONTE, A.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 27 n.5, p. 893-900, 2003.
- CONDON, 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**, Oxford, v. 36, p. 199-207, 1985.
- COSTA, M. D.; LOVATO, P. E. Fosfatases na dinâmica do fósforo do solo sob culturas de cobertura com espécies micorrízicas e não micorrízicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 6, p. 603-605, 2004.

CORRÊA, T. R. et al. Qualidade de maçãs ‘Fuji’ armazenadas em atmosfera controlada e influência do clima na degenerescência da polpa. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 6, p. 531-538, 2010.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS-RS/SC. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, 10 Ed. **SBCS - Núcleo Regional Sul**, 2004.

CQFS-RS/SC (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC). **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2016. p. 376.

CROSS, A. F.; SCHLESINGER, W. H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in nature ecosystems. **Geoderma**, v. 64, p. 197-214, 1995.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição das plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 91-132.

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

DRIS, R.; NISKANEN, R.; FALLAHI, E. Nitrogen and calcium nutrition and fruit quality of commercial apple cultivars grown in Finland. **Journal of plant nutrition**, v. 21, p. 2389-2402, 1998.

EPAGRI. **Manual da Cultura da Macieira**; GMC/Epagri, Florianópolis. 2002.

ERNANI, P.R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes às plantas**, Lages, p. 229, 2008.

FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**, 22 Ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006.

FREITAS, S. T. et al. Cellular approach to understand bitter pit development in apple fruit. **Postharvest Biology and Technology**, v. 57, n. 1, p. 6–13, 2010.

GAŚTOL, M. et al. The effect of mycorrhizal inoculation and phosphorus application on the growth and mineral nutrient status of apple seedlings. **Journal of Plant Nutrition**, v.39, p.288-299. 2016.

GATIBONI, L.C et al. Fracionamento Químico das formas de fósforo do solo: Usos e Limitações. In: ARAÚJO, A.P.; ALVES, B.J.R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. p. 141-187.

GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. Tese de Doutorado em Agronomia apresentada ao Programa de pós-graduação em Agronomia, Santa Maria, 2003.

GATIBONI, L. C., et al. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas m solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 691-699, 2007.

GATIBONI, L. C. et al. Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos líquidos de suínos em pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1753-1761, 2008.

GATIBONI, L. C. et al. Proposta de limites críticos ambientais de fósforo para solos de Santa Catarina. **UDESC/CAV**, Lages, p; 38, 2014.

GIRARD, C. L.; SANCHUEZ, R. M. V.; BENDER, R. J. Manejo pós-colheita e rastreabilidade na produção integrada de maçãs, Bento Gonçalves: EMBRAPA, 2002. (Circular Técnica, 31).

GONÇALVES, G. K.; MEURER, E.J. Frações de fósforo no solo e sua relação com a absorção pelas plantas de arroz irrigado por alagamento em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2, p.357-362, 2009.

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

IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola. Rio de Janeiro v.30 n.2 p.1-83. 2017. Disponível em:
<[ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_\[mensal\]/Fasciculo/lspa_201702.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/lspa_201702.pdf)>. Acesso em dezembro de 2019.

JOHNSON, D. S.; YOGORATNAM, N. The effects of phosphorus sprays on the mineral composition and storage quality of Cox's Orange Pippin apples. **Journal of Horticultural Science**, v. 53, p. 171-178, 1978.

JOHNSON, D. S. Influence of phosphorus sprays on the storage quality of apples. **Acta Hort**, v. 92, p. 327-328, 1980.

KEREBAUUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008. p. 452.

LI, Z.; GEMMA, H.; IWAHORI, S. Stimulation of 'Fuji' apple skin color by ethephon and phosphorus-calcium mixed compounds in relation to flavonoid synthesis. **Scientia Horticulturae**, v. 94, p. 193-199, 2002.

MIQUELOTO, A. et al. Atributos fisiológicos, físico-químicos e minerais associados à ocorrência de "bitter pit" em maçãs. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 7, p. 689-696, 2011

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

NAVA, G. et al. Fertilidade do solo e nutrição na produção integrada de maçã, Bento Gonçalves: EMBRAPA, 2002. 13 p. (Circular Técnica, 33)

NAVA, G.; CIOTTA, M. N.; BRUNETTO, G. 'Fuji' apple tree response to phosphorus fertilization. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 39, n. 1, e-369, 2017.

NAVROSKI, R. et al. Response of 'Sensação' peach trees to phosphate fertilization. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 40, n. 6, p. 3345-3382, 2019.

NEILSEN, G. H. et al. Annual Bloom-time phosphorus fertigation affects soil phosphorus, apple tree phosphorus nutrition, yield, and fruit quality. **HortScience**, v. 43, n. 3, p. 885-890, 2008.

NEILSEN, D.; NEILSEN, G. Nutritional effects on fruit quality for apple trees. **New York Fruit Quarterly**, v. 17, n. 3, p. 21-24, 2009.

OLIVEIRA, J. P. M. de et al. Alterações químicas e avaliação de P disponível na região adjacente aos grânulos de superfosfato triplo e diamônio fosfato em solos ácidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38 n. 5, p. 1526-1536, 2014.

PETRI, J. L. et al. Avanços na cultura da macieira no Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 33. n.spe, p. 48-56, oct. 2011.

PETRI, J. L.; LEITE, G. B. Macieira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 30. n.4, dez. 2008. Disponível em:
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-29452008000400001&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt. Acesso em: 15 de out. 2019.

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

SANTOS, D. R. dos; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586, mar-abr. 2008.

SANTOS, J. Z. L. et al. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivados com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 705-714, 2008.

SCHMITT, D. E. et al. Phosphorus fractions in sandy soils of vineyards in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 2, p.472-481, 2013a.

SCHMITT, D. E. et al. Accumulation of phosphorus fractions and contamination potential in vineyard soils in the southern region of the state of Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 37 n.5, p. 1256-1266, 2013b

SCHMITT, D. E. et al. Phosphorus fractions in apple orchards in southern Brazil. **Bragantia**, Campinas, v. 76, n. 3, p. 422-432, 2017.

SINGH, M.; SINGH, V. P.; REDDY, D. D. Potassium balance and release kinetics under continuous rice-wheat cropping system in Vertisol. **Field Crops Research**, v. 77, p. 81-91, 2002.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. de. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 275-374.

SILVA, F. C. da (Ed.) **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 2 ed. p. 627.

SOUZA, F. de. et al. Qualidade de maçãs 'Fuji' influenciada pela adubação nitrogenada e potássica em dois tipos de solo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 1, p. 305–315, 2013.

SUZUKI, A.; BASSO, C. Orientações básicas para adubação e nutrição da macieira. **Agropecuária Catarinense**, v. 10, n. 1, p. 41-46, 1997.

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de solos, UFRGS (Boletim técnico, 5), 1995. 2 ed. p. 174.

TERBLANCHE, J.H. et al. An integrated approach to orchard nutrition and bitter pit control. **Acta Hortic**, v.92, p. 71-82, 1980.

TREPTOW, R. O.; QUEIROZ, M. I.; ANTUNES, P. L. Caracterização físico-química e sensorial de quatro cultivares de maçãs (*Malus doméstica* Borkh.). **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 1, n. 3, p. 179-184, 1995.

WANG, R. et al. Phosphorus accumulation and sorption in calcareous soil under long-term fertilization. **Plos One**, v. 10, n. 8, 2015.

WEBSTER, D. H.; LIDSTER, P. D. Effects of phosphate sprays on McIntosh apple fruit and leaf composition, flesh firmness and susceptibility to low-temperature disorders. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 66, p. 617–626, 1986.

WOJCIK, P.; WOJCIK, M. Response of mature phosphorus-deficient apple trees to phosphorus fertilization and liming. **Journal of Plant Nutrition**, v. 30, p. 1623-637, 2007.