

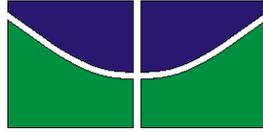
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**Estratégias de manejo de solo e adubação fosfatada em
cultivos anuais no cerrado.**

THAMIRES DUTRA PINHEIRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

**Brasília, DF
Setembro de 2022**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**Estratégias de manejo de solo e adubação fosfatada em
cultivos anuais no cerrado.**

THAMIRES DUTRA PINHEIRO

Orientador: Dr. José Ricardo Peixoto

Coorientador: Dr. Rafael de Souza Nunes

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

**Brasília, DF
Setembro de 2022**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**Estratégias de manejo de solo e adubação fosfatada em
cultivos anuais no cerrado.**

THAMIRES DUTRA PINHEIRO

Dissertação de Mestrado submetido à
Faculdade de Agronomia e Medicina
Veterinária da Universidade de Brasília –
UnB, como parte dos requisitos necessários
à obtenção do grau de Mestre em
Agronomia.

APROVADO POR:

José Ricardo Peixoto
Professor Doutor, Universidade de Brasília - UnB
Orientador / e-mail: peixoto@unb.br

Jader Galba Busato
Professor Doutor, Universidade de Brasília
Examinador interno/ e-mail: jaderbusato@unb.br

Thomaz Adolpho Rein
Pesquisador Doutor, Embrapa Cerrados
Examinador externo/ e-mail: thomaz.rein@embrapa.br

Brasília, setembro de 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Pinheiro, Thamires Dutra
Estratégias de manejo de solo e adubação fosfatada em cultivos anuais no cerrado.; orientação de José Ricardo Peixoto. – Brasília, 2022.

127 p. : il.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2022.

1. Fósforo
2. Sistema de preparo convencional
3. Sistema de plantio direto
4. Fontes de fósforo
5. Modos de aplicação do fósforo
6. Doses de fósforo
7. Eficiência de uso do fósforo
8. Frações inorgânicas e orgânicas de fósforo

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PINHEIRO, T. D. **Estratégias de manejo de solo e adubação fosfatada em cultivos anuais no cerrado**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2022, 127 p. Dissertação de Mestrado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: THAMIRES DUTRA PINHEIRO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Estratégias de manejo de solo e adubação fosfatada em cultivos anuais no cerrado.

GRAU: Mestre ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Nome: Thamires Dutra Pinheiro

CPF: 050.042.101-36

Endereço: SH Grande Colorado, condomínio Jardim Europa II, área especial LE 1C, edifício Eloin, apartamento 201.

Tel: 61 98531-4387

Email: thamires.dutrap@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu Amado Jesus e ao Seu Espírito Santo, doce hóspede da minha alma, por serem a minha força, a minha paz, a minha razão de seguir, por ser o meu grande amigo, presente majestosamente em todos os momentos da minha vida. Obrigada Senhor, por me salvar de mim mesma e por acreditar e por confiar essa missão e vocação a mim.

À Imaculada Virgem Maria, por ser uma Mãe tão amorosa e prontamente auxiliadora, desatando os nós, abrindo portas e portões, e me carregando no colo quando preciso.

Ao Seu Imaculado Coração a que pertenço por inteira e que é o meu refúgio: Totus tuus, Mariae!

Aos meus pais, Lúcia e Hélio, por toda oferta de vida, por todas as renúncias, e por todo amor e carinho depositado em minha vida. A minha mãe por ser a minha base e o meu grande modelo e inspiração. Obrigada mãe por todas as renúncias feitas, por sempre acreditar e me fazer ir além. Ao meu pai, por todo o seu amor, por todo o sustento, por cada suor derramado e por nunca ter desistido. O seu amor me fez chegar até aqui.

Ao meu noivo Luiz Eduardo, tão logo em breve esposo, por ser o amor da minha vida e a minha maior inspiração. Obrigada por todas as orientações, correções e contribuições que marcaram todo este trabalho. Sem você eu não teria conseguido chegar até aqui. Te amo até a eternidade!

Às minhas irmãs, Sofia Laura e Carolina, por serem as minhas melhores amigas e as minhas confidentes. Obrigada por tornarem a minha vida muito mais feliz.

E a todos os meus familiares da família Dutra e Pinheiro, que sempre vibraram e se orgulharam por cada vitória minha conquistada.

Ao meu orientador Dr. José Ricardo Peixoto, por ter aceitado me orientar e estar prontamente disponível para resoluções e todo o suporte necessário a este estudo.

Ao meu co-orientador, Rafael de Souza Nunes, por toda a orientação e por me formar diariamente como profissional, por ter acreditado no meu potencial e depositado em mim a confiança de conduzir este estudo e muitos outros. Obrigada Rafael, por toda a amizade e por todo o suporte que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho, obrigada pelo exemplo de profissional e por todos os ricos ensinamentos de vida e na ciência do solo.

Ao Djalma Martinhão Gomes de Sousa (*in memoriam*) pela confiança de entregar em minhas mãos um histórico de dados riquíssimo, e que a ele era muito caro, devido ao seu grande amor e zelo pelos seus experimentos de longo prazo. Obrigada Djalma por marcar em mim o amor pela ciência do solo e pelo ensino, que ecoará em mim para sempre. Saudades, tchê!

Ao meu amigo e companheiro de orações, André de Carvalho, por ter me acompanhado ao longo deste mestrado e ter intercedido e vibrado em cada vitória conquistada. Obrigada por ter sido instrumento de Deus para profetizar sobre a minha vida, me exortar, me animar e me curar nos momentos mais difíceis.

A todo o pessoal de campo: Valmir, Denes, Cláudio, Edson (Mineiro), José Ailson, José Francisco (Brasil), David, Jineldo e Aparecido por toda a condução impecável do experimento que fez ser possível a conclusão deste estudo. Obrigada pelos momentos incontáveis de risadas e descontrações que fizeram dos meus dias na Embrapa Cerrados muito mais felizes.

Ao pessoal de laboratório, Natalie e Vinícius, por toda a execução de análises necessárias a este estudo ao longo dos anos.

Ao professor Dr. Paulo Sérgio Pavinato e a Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz por toda a parceria e contribuições, especialmente por todo o auxílio prestado na execução das análises de solo em suas dependências.

À Lenir Gotz, por ter me acompanhado e orientado brilhantemente em todo o fracionamento do fósforo, pelo zelo e cuidado em todos os processos, e por toda a preocupação em fazermos o melhor trabalho. Obrigada por toda a amizade e risadas naqueles dias exaustivos, que fizeram deste meu tempo na Esalq/USP o melhor possível. Saudades!

À Universidade de Brasília e a todos os professores da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, em especial ao professor Cícero Célio de Figueiredo, por todas as contribuições na minha formação profissional desde a minha graduação.

À CAPES pela concessão de bolsa de estudos para realização deste programa de pós-graduação.

À Embrapa Cerrados, pelas instalações necessárias para condução do experimento e das análises pertinentes a este estudo.

Muito obrigada a todos!!!!

“Grandes maravilhas obrou comigo O Onipotente cujo nome é Santo, cuja misericórdia se estende de geração em geração em todos os que O temem”

Santa Maria, mãe de Deus e da Igreja

RESUMO GERAL

O fósforo (P) é um dos elementos mais limitantes e moduladores de produtividades e lucratividades de culturas agrícolas anuais cultivadas no Cerrado brasileiro, pois a sua utilização está atrelada a um recurso finito e não renovável, com um alto custo para o produtor, que quando aplicado em solos altamente intemperizados ocorre intensa interação química com a matriz sólida desses solos, levando a baixa eficiência de uso pelas plantas. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do manejo do solo e da adubação fosfatada nas produtividades e lucratividades de uma sucessão de soja (*Glycine max* L.) e milho (*Zea mays* L.) conduzida por um longo período em um Latossolo do Cerrado brasileiro com teor inicial adequado de P, bem como a distribuição das frações inorgânicas e orgânicas de P e a atividade da fosfatase ácida no solo. Para isto foi avaliado um experimento implantado em 1999/2000 que se perdurou até o ano de 2021 (22 anos) na Embrapa Cerrados, Planaltina-DF, onde se estabeleceu uma sucessão soja e milho na safra de verão, e cultivos de plantas de cobertura na entressafra com diferentes manejos do solo e de adubação fosfatada: sistema de plantio convencional com o milheto como planta de cobertura (SPC); sistema de plantio direto com o milheto como planta de cobertura (SPD mil); sistema de plantio direto com leguminosas como planta de cobertura (SPD leg); nestes sistemas considerados como parcela principal foi disposto um fatorial triplo com superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo de Gafsa (FNR), aplicados a lanço em superfície ou no sulco de semeadura, nas doses de 22 ou 44 kg de P total ha⁻¹, além de testemunhas sem aplicação de P em cada sistema. Com base na série histórica de produtividade foi possível observar que não houve efeito simples dos modos de aplicação do P e dos sistemas de manejo do solo avaliados. Houve interações significativas entre os sistemas e doses de P apenas no milho (p<0,05). A soja não apresentou reduções de produtividade quando a menor dose e/ou quando a fonte de menor solubilidade foi aplicada, especialmente nos cinco primeiros cultivos avaliados. O milho, no entanto, teve a sua produtividade média reduzida com esta dose baixa, principalmente no SPC em relação ao SPD mil, com uma redução de 600 kg ha⁻¹. Quando o FNR foi aplicado, houve redução da produtividade do milho apenas nos últimos anos de todos os sistemas avaliados. Quanto a lucratividade dos tratamentos em relação a uma referência, as maiores frequências de perdas ocorreram no SPC e com o FNR na dose de 22 kg de P ha⁻¹, principalmente quando o milho foi cultivado, enquanto de modo geral, no SPD mil, e com o FNR na dose de 44 kg de P ha⁻¹ em todos os sistemas, foram observados os menores percentuais de frequências de perdas. A partir das entradas e saídas de P foi possível calcular o balanço e a sua eficiência de uso, sendo a dose aplicada foi a principal moduladora,

com 22 kg de P ha⁻¹ apresentando os menores estoques de P residual, que variou de -31 a -105 kg de P ha⁻¹, e os maiores valores de eficiência, que variou entre 111 a 145%. Os sistemas de manejo do solo foram os principais fatores a influenciar a distribuição de todas as frações de P ao longo do perfil do solo, sendo que de modo geral, o SPC nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, a aplicação do FNR e a dose de 22 kg de P ha⁻¹ resultaram nos menores teores das frações avaliadas. Houve pouco efeito das estratégias de manejo nas frações orgânicas, no P residual, no P total e na atividade da fosfatase ácida. Foi viável, portanto, a redução da adubação e a substituição por uma fonte de menor solubilidade por alguns cultivos de soja a partir de um solo corrigido, enquanto para o milho não foi viável a redução da dose, mas pode-se por alguns cultivos substituir a fonte solúvel por uma de menor solubilidade, desde que aplicada na dose recomendada. Eficiências de uso de P elevadas foram alcançadas quando a dose abaixo da exportação pelos grãos foi aplicada, levando a diminuição dos estoques de P presentes no solo, contudo pode-se ter reduções de produtividade em culturas com altos tetos produtivos, como o milho. Sistemas conservacionistas como o SPD, uso de fertilizantes solúveis e doses mais elevadas são capazes de promover maiores teores da maioria das frações de P, principalmente nas camadas superficiais, e isto resultou em maiores produtividades quando se tratou se aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada. Por outro lado, o P residual, P total e atividade da fosfatase ácida não foram sensíveis às estratégias de manejo da adubação, sendo estes mais afetados pelos sistemas de manejo do solo.

Palavras chaves: fósforo; sistema de preparo convencional; sistema de plantio direto; fontes de fósforo; modo de aplicação do fósforo; doses de fósforo; eficiência de uso do fósforo; frações inorgânicas e orgânicas de fósforo.

GENERAL ABSTRACT

Phosphorus (P) is one of the most limiting and modulating elements of yield and profitability of annual agricultural crops grown in the Brazilian Cerrado, as its use is linked to a finite and non-renewable resource, with a high cost for growers. In addition, when phosphate fertilizers are applied to highly weathered soils, intense sorption of P by the solid phase may lead to low use efficiency by plants. Therefore, the objective of this work was to evaluate the effects of soil management and phosphate fertilization strategies on yields and profitability of a long-term soybean and corn rotation cultivated in an Oxisol of the Brazilian Cerrado with adequate initial P levels. The distribution of inorganic and organic P fractions and acid phosphatase activity in the soil were also assessed. The experiment was implemented in 1999/2000 and was cultivated for 22 years, until 2021 at Embrapa Cerrados, Planaltina-DF, where a rotation of soybean (*Glycine max* L.) and corn (*Zea mays* L.) as main crops, and cover crops in the winter were combined with different soil managements and phosphate fertilization strategies: conventional tillage with millet (*Pennisetum glaucum* L.) as cover crop (SPC); no-tillage system with millet as cover crop (SPD mil); no-tillage system with leguminous species (*Arachis pintoii*, *Mucuna aterrima* and *Crotalaria spectabilis*) as cover crop (SPD leg); Within these systems, considered as the main plots, a triple factorial was established with triple superphosphate (SFT) or Gafsa reactive natural phosphate (FNR) as P source, which were broadcast applied to the soil surface or placed at the sowing furrow at a P rate of 22 or 44 kg total P ha⁻¹. Based on yield time-series, it was possible to observe that there was no main effects of P application modes and of the evaluated soil management systems. There were significant interactions between systems and P rates only for corn (p<0.05). Soybean did not show yield reductions when the lowest rate and/or when the source of lower solubility was applied, especially in the first five crops evaluated. On the other hand, corn yield was reduced with this low P rate, mainly in the SPC in relation to the SPD mil, with a reduction of 600 kg ha⁻¹. When FNR was applied, there was a reduction in corn yields only in the last crops of all evaluated systems. Regarding the profitability of the treatments in relation to a reference, the highest frequencies of losses occurred in the SPC and with the FNR at the P rate of 22 kg ha⁻¹, mainly when corn was cultivated, while the lowest percentages of loss frequencies were observed, in general, in the SPD mil, and with the FNR at a rate of 44 kg of P ha⁻¹ in all systems. Considering the P inputs and outputs balance, it was possible to calculate residual P stocks and use efficiency. P rate was the main modulator, with 22 kg of P ha⁻¹ showing the lowest residual P stocks (-31 and -104 kg of P ha⁻¹) and the highest use efficiency values (111 to 145%). Soil management systems were

the main factors influencing the distribution of all P fractions along the soil profile, and in general, the SPC in the 0-5 and 5-10 cm layers, the application of FNR and the rate of 22 kg of P ha⁻¹ resulted in the lowest contents of the evaluated fractions. There was little effect of management strategies on organic fractions, residual P, total P and acid phosphatase activity. It is feasible, therefore, to reduce P fertilization and replace it with a source of lower solubility for soybean crops cultivated in a soil with adequate P contents, while for corn it is not recommended to reduce rates, but P source might be replaced by lower solubility options once in a while, provided that it is applied at the recommended rate. High P use efficiencies can be achieved when P rates are less than the amount removed by crop harvests, leading to a decrease in P stocks present in the soil. However, yield reductions can be observed in crops that absorb and offtake large amounts of P due to high amounts of grain produced, such as corn. Conservation systems such as SPD, use of soluble fertilizers and high P rates are capable of promoting higher levels of most P fractions, especially in the surface layers, and this resulted in improved yields considering aspects related to the management of phosphate fertilization. On the other hand, residual P, total P and acid phosphatase activity were not sensitive to fertilization management strategies, which were more affected by soil management systems.

Keywords: phosphorus; conventional tillage; no-tillage system; phosphorus sources; phosphorus application method; phosphorus rates; phosphorus use efficiency; inorganic and organic fractions of phosphorus.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	13
1. PROBLEMÁTICA E RELEVÂNCIA.....	15
1.1 OBJETIVO GERAL	16
2. HIPÓTESES	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA	18
3.2 SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO	26
3.3 PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS RELACIONADOS A CICLAGEM DE P.....	29
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
5. CAPÍTULO 01: PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO EM FUNÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA NO CERRADO EM UM ESTUDO DE LONGO PRAZO	39
5.1 RESUMO	39
5.2 INTRODUÇÃO	41
5.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	42
5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
a) Efeito do modo de aplicação do P e as suas interações com os demais aspectos do manejo	48
b) Efeito da interação entre fontes e doses de P na produtividade média de soja e milho ...	50
c) Efeito da interação entre os sistemas de manejo do solo e doses de P aplicadas	53
d) Efeito da interação entre sistemas, fontes e doses de P nas fases de soja e milho.....	55
e) Produtividade relativa e lucratividade de soja e milho ao longo de 22 anos.....	58
f) Eficiência de uso do P e estoque de P residual em função das estratégias de manejo adotadas	68
5.1 CONCLUSÕES.	71
5.2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
6. CAPÍTULO 02: FRACIONAMENTO QUÍMICO DO P E ATIVIDADE DA FOSFATASE ÁCIDA EM UM SOLO CULTIVADO POR 22 ANOS COM ESTRATÉGIAS DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA	77
6.1 RESUMO	77

6.2	INTRODUÇÃO	79
6.3	MATERIAL E MÉTODOS	81
6.4	RESULTADOS.....	86
6.5	DISCUSSÃO	95
6.6	CONCLUSÕES	105
6.7	REFERÊNCIAS.....	107
6.8	MATERIAL SUPLEMENTAR.....	114

1. INTRODUÇÃO GERAL

A crescente demanda por alimentos e preocupações com a segurança alimentar mundial são consequências de uma expectativa de contínuo crescimento populacional ao longo dos próximos séculos, que trará consigo a necessidade de alcances cada vez maiores de produtividades agrícolas, que por sua vez serão sustentadas, dentre os diversos insumos, por fertilizantes minerais (HELIN; WEIKARD, 2019).

Uma prospecção realizada em 2017 pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), estimou um de crescimento médio de 1,9% ao ano na demanda mundial por fertilizantes, que alcançou no ano de 2020 cerca de 201 milhões de toneladas, destes, 46 milhões de toneladas corresponderam aos fertilizantes fosfatados (FAO, 2017).

A dependência da agropecuária aos fertilizantes fosfatados é decorrente do papel que o P tem em todos os processos vitais dos organismos, além de ser constituinte de moléculas fundamentais para a vida (TAIZ; ZEIGER, 2004; CORBRIDGE, 2013). Em relação ao metabolismo vegetal, dentre os processos em que o P está envolvido, o crescimento de raízes, a floração, a frutificação e a formação de sementes merecem destaque (FOLLMY, 1996; SMIL, 2000; CORDELL; WHITE, 2011) por serem estes que estão relacionados diretamente com o potencial produtivo dos cultivos.

Estes fertilizantes são obtidos do processamento físico e/ou químico de rochas apatíticas, caracterizadas como um recurso finito, não renovável e geograficamente limitado (BAVEYE, 2015; CHOWDHURY et al., 2017), com prospecções de reduções de extração nas próximas décadas, bem como a diminuição da qualidade do que é extraído e o aumento do seu custo de produção (LUO et al., 2017).

Aliado a esta problemática, existe o fato de que em solos altamente intemperizados como os do Cerrado, a dinâmica reacional do P envolve reações de indisponibilização através da interação elétrica do P com a matriz do solo, existindo uma necessidade de busca por fontes alternativas (FIGUEIREDO et al., 2020) e/ou o aumento na eficiência de uso deste nutriente pelas culturas agrícolas (CUNHA et al., 2011; WITHERS et al., 2018).

Tal eficiência pode ser modulada também pelo tipo de fertilizante aplicado, uma vez que estes podem apresentar composições químicas, solubilidades e efeitos residuais contrastantes (SOUSA; VOLKWEISS; CASTRO, 1987; NUNES, 2014; LEMOS; PRADO, 2017; OLIVEIRA et al., 2019).

Acrescido do manejo da adubação fosfatada, fatores relacionados ao manejo do solo e de cultivos, são outros fatores que podem interferir na dinâmica de P no solo, uma vez que estes

podem interferir no perfil de distribuição do P ao longo das camadas e na distribuição em suas diferentes frações (TIECHER et al., 2018; RODRIGUES, 2018; SOLTANGHEISI et al., 2020).

Tratando-se de qualidade e sustentabilidade de um sistema, na última década houve um crescente interesse na compreensão de parâmetros relacionados a atividade microbológica que pudessem fornecer informações quanto a qualidade do sistema agrícola conduzido (MENDES et al., 2015; ANDREOTE et al., 2017; SCHLOTTER et al., 2018), uma vez que são estes organismos que realizam os processos de ciclagem de nutrientes no solo (ALVES et al., 2014; ALMEIDA et al., 2015; GHOSH et al., 2020).

Diante do que foi exposto, o objetivo deste trabalho consiste em avançar na compreensão do quanto as diferentes estratégias de manejo do solo e da adubação fosfatada impactam nos rendimentos dos cultivos de soja e milho conduzidos por 22 anos, na distribuição das frações de P, no compartimento do fósforo da biomassa microbiana (FBM) e na atividade de fosfatase no solo, avaliados em um experimento conduzido por 22 anos.

1. PROBLEMÁTICA E RELEVÂNCIA

A compreensão de qual ou quais manejos de solo e adubação a serem adotados, visando a maior eficiência de uso do fertilizante fosfatado e os maiores retornos em produtividade, é fundamental tanto do ponto de vista econômico, propiciando maiores lucratividades ao produtor, como do ponto de vista ambiental, reduzindo os riscos de poluição de corpos d'água e utilização racional de um recurso que é limitado. Para isto se faz necessária a compreensão de quais são as frações de P no solo mais envolvidas na nutrição dos cultivos e o quanto é expressiva a atividade microbiológica relacionada a essa ciclagem de fósforo. Compreendendo isto, o produtor pode manejar o seu sistema de modo a ter uma maior segurança quanto ao balanço de fósforo e a eficiência de uso do fertilizante que ele está aplicando, além de se assegurar em condições econômicas e políticas adversas, tornando-se competitivo no mercado agrícola. Além disso, são escassos os trabalhos de longo prazo que envolvam a maioria das fontes de variação relacionadas ao manejo do solo e da adubação fosfatada (sistema, fonte, modo e dose), de modo a permitir uma maior compreensão de como os diferentes manejos e estratégias interferem na produtividade de grãos, no balanço de P do sistema, na distribuição de suas frações e na atividade microbiológica relacionada a sua ciclagem. Diante do exposto, este trabalho objetiva determinar dentre os manejos adotados ao longo de 22 anos, quais são aqueles que propiciam a as maiores produtividades e lucratividades de soja e milho, maior eficiência de uso do fósforo, distribuição das frações inorgânicas e orgânicas de P e a atividade da fosfatase ácida do solo, de modo a definirmos qual ou quais são os sistemas e estratégias que tornam possíveis uma agricultura mais sustentável do ponto de vista econômico e ambiental.

1.1 OBJETIVO GERAL

Identificar os efeitos de estratégias de manejo de solo e adubação fosfatada adotados por um período de 22 anos sobre a produção de grãos de soja e milho, e como ocorre a distribuição das frações de fósforo no solo e a atividade da fosfatase ácida em função dos diferentes manejos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Avaliar as produtividades obtidas com as culturas de soja e milho ao longo de 22 anos e compreender o efeito nestes rendimentos das estratégias de manejo do solo e adubação fosfatada empregada.
2. Avaliar com base nos manejos adotados a lucratividade dos tratamentos e o seu comportamento ao longo dos anos.
3. Determinar o balanço e o estoque de fósforo após 22 anos de fertilizações com diferentes fontes, modos de aplicação e doses de utilizadas.
4. Caracterizar a distribuição das frações orgânicas e inorgânicas de fósforo em função das diferentes estratégias de manejo até a camada de 0-20 cm.
5. Compreender o efeito das diferentes estratégias de manejo na atividade da fosfatase ácida e a sua relação com as frações orgânicas de fósforo.

2. HIPÓTESES

O sistema de plantio direto com a planta de cobertura milheto e o SFT proporcionam maiores produtividades quando comparados ao sistema de plantio convencional e sistema de plantio direto com espécies leguminosas como planta de cobertura, e ao FRN, respectivamente.

Os modos de aplicação do fertilizante não se diferenciam quanto a capacidade de proporcionar maiores ou menores produtividades em um solo com teor inicial adequado de fósforo.

A dose de 44 kg ha⁻¹ de P possibilita o alcance das maiores produtividades em relação a dose de 22 kg de P ha⁻¹, mas ambas apresentam maiores produtividades em relação a testemunha (0 kg de P ha⁻¹).

A dose de P aplicada é a principal moduladora do balanço de P ao longo do tempo, enquanto os demais fatores interferem em uma menor intensidade.

O SPC apresenta uma maior proporção de frações pouco lábeis de P em comparação aos SPD com milheto e leguminosa, sendo que estes últimos apresentam maiores teores de P

orgânico, em diferentes graus de labilidade. A aplicação de diferentes fontes resulta em uma distribuição distinta das frações.

A atividade da fosfatase é afetada pelo manejo do solo e da adubação fosfatada, podendo ser correlacionada as frações orgânicas de fósforo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA

- FÓSFORO: RELEVÂNCIA NA NUTRIÇÃO VEGETAL E FRAÇÕES PRESENTES NO SOLO

O fósforo (P) é um dos principais elementos constituintes e participantes de moléculas fundamentais para a vida e de cadeias metabólicas que são responsáveis pelo funcionamento e manutenção da vida de diversos organismos existentes. Esse elemento faz parte da estrutura de ácidos nucleicos (DNA e RNA), transportadores de energia metabólica (ATP) e fosfolipídios constituintes das membranas celulares (GRANT et al., 1999; TAIZ; ZEIGER, 2004; CORBRIDGE, 2013). A sua importância também está relacionada ao fato de que não pode ser fabricado ou substituído (BAVEYE, 2015), apresentando-se como um importante modulador da produção vegetal nos diferentes sistemas agrícolas (FOHSE et al., 1988; GRANT et al., 1999).

O P presente nos solos e que é passível de assimilação pelos microrganismos edáficos e cultivos agrícolas, pode ser dividido em dois grandes grupos: inorgânico (Pi) e orgânico (Po). O Pi tem a sua origem no intemperismo de minerais primários, como as apatitas (hidroxi-apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) e fluorapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$)), (KRUSE et al., 2015) e de compostos secundários, variscita ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), strengita ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e vivianita ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), formados a partir de transformações dos minerais primários anteriormente mencionados, além de estar presente adsorvido na fração argila dos solos e ocluído em estruturas cristalinas de determinados minerais (ALMEIDA et al., 2003; RHEINHEMER et al., 2008). Essa fração existe na litosfera em mais de 150 formas distintas, variando em solubilidade e labilidade (PIERZYNSKI et al., 2005).

O Po por sua vez tem a sua origem na deposição dos resíduos vegetais e animais, e está presente em grande parte nas formas de inositol, fosfolipídios, ácidos nucleicos e seus derivados. A fração orgânica presente nos solos é um importante pool de reabastecimento dos teores de Pi no solo, processo este mediado pela ação de microrganismos e enzimas (DALAL, 1977; TIECHER et al., 2018).

Entretanto, apesar do P total do solo (correspondente ao somatório da fração Pi e Po) abranger uma grande diversidade de compostos, apenas uma pequena parte (menos de 1%) é classificado como P disponível que está presente nas formas dos íons H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} (nas faixas de pH usualmente encontradas nos solos agrícolas) e que pode ser assimilado pelas plantas (PIERZYNSKI et al., 2005; RYAN; RASHID, 2006; BARROW, 2016). Devido a isso,

os teores naturalmente encontrados de P disponível, em solos tropicais altamente intemperizados, são muito baixos e não são suficientes para a manutenção de elevadas produtividades agrícolas (TIESSEN et al., 1984; GOEDERT et al., 1987; ALMEIDA et al., 2003; NUNES, 2014), tão almejadas nos variados sistemas produtivos, se fazendo necessária a aplicação de fertilizantes fosfatados para sustentar as expectativas de produção, principalmente de sistemas altamente intensificados (GRANT et al., 2001; WITHERS et al., 2018).

- FONTES FOSFATADAS UTILIZADAS NA AGRICULTURA

Os fertilizantes fosfatados utilizados na agricultura compreendem os de alta solubilidade em citrato neutro de amônio (CNA) mais água, fertilizantes de média e baixa solubilidade em ácido cítrico a 2% (fosfatos naturais reativos (FNR) e fosfatos naturais (FN), respectivamente) (SOUSA et al., 2016).

Os mais utilizados são os de alta solubilidade em CNA mais água, com destaque para os fosfatos monocálcicos (FMC) [superfosfato simples (SFS) e superfosfato triplo (SFT)], os fosfatos monoamônico (MAP) e diamônico (DAP), e fertilizantes complexos que possuem N, P e K no mesmo grânulo (SOUSA et al., 2016). Estes são prontamente solúveis e aumentam rapidamente o conteúdo de P disponível na solução do solo, sendo passível de utilização imediata pelas plantas, contudo, pode também ser convertido em formas de média a baixa labilidade, se adsorvido à superfície dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al (CHIEN et al., 2011).

Os FNR e FN são menos utilizados na agricultura devido a sua média a baixa solubilidade, contudo estudos demonstram resultados satisfatórios no emprego dos FNR quando aplicados sob determinados manejos do solo (GOEDERT; LOBATO, 1980; NUNES, 2014; OLIVEIRA et al., 2019).

Os fertilizantes solúveis, assim como o FNR, são oriundos de rochas fosfáticas, ricas em minerais do grupo da apatita e fosforita (LOPES et al., 2004), mas com a diferença de que os fosfatos solúveis são produzidos a partir do processamento químico que leva a dissolução da apatita através do ataque com ácido sulfúrico ou ácido fosfórico, aumentando assim a solubilidade do material, enquanto que o FNR é submetidos apenas a processos de lavagem e/ou flotação para retirada de outros minerais misturados nas jazidas (KAMINSKI; PERUZZO, 1997).

Devido às diferentes características e propriedades químicas inerentes a cada tipo de fertilizante, quando estes são aplicados ao solo, as reações químicas envolvidas são diferenciadas e isto resulta em diferentes graus de solubilidade e efeito residual no solo (NUNES, 2014; OLIVEIRA et al., 2019).

Em relação aos fertilizantes solúveis, quando estes são aplicados ao solo, ocorre absorção de água por parte dos grânulos e a formação de uma solução saturada com alto teor de P e outros íons que apresentam o comportamento de difusão para fora do grânulo. Isto permite a formação de microrregiões pontuais enriquecidas com P ao longo do perfil de incorporação do fertilizante (YU, 1997), sendo o número destas dependentes da dose de P aplicada, do tamanho do grânulo, da homogeneidade de incorporação do fertilizante e do nível de compactação do solo (LAWTON; VOMOCIL, 1954; SOUSA, 1980).

Após a solubilização dos grânulos, ocorrem as reações de adsorção e precipitação entre a solução do solo recém-formada e a fase sólida do solo, permitindo sobretudo a formação de partículas de fosfatos com dimensões coloidais, com variados graus de cristalinidade e solubilidade, sendo que a natureza desses compostos depende das características químicas dos solos e do fertilizante fosfatado utilizado. Portanto, essas reações permitem a formação de uma diversidade de compostos com diferentes graus de disponibilidade e capacidades de reabastecimento do P da solução do solo (SOUSA, 1980; SAMPLE et al., 1979; HAVLIN et al., 2013).

Essa capacidade adsorptiva dos solos tropicais ocorre em resposta a predominância de minerais de argila do tipo 1:1 e de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, onde o P apresenta uma grande afinidade às suas superfícies coloidais inorgânicas (SÁ, 2004; ALMEIDA et al., 2003).

Já em relação aos FNR, o processo de dissolução leva a liberação de P na solução do solo, mas como a solubilidade e os tamanhos das partículas é menor nessa fonte, é pequena a taxa de formação de precipitados de Fe e Al em relação aos fertilizantes solúveis (FAO, 2004). Portanto, tanto partículas de FNR não dissolvido, como os produtos da sua reação no solo, podem fornecer P prontamente disponível às plantas (CHIEN, 1978), sendo que esta característica é muito interessante quando se trata de solos tropicais com alta capacidade adsorptiva de P, como os solos do Cerrado.

Devido a sua baixa reatividade e eficiência agrônômica inicial, o FNR apresenta um maior efeito residual quando comparado aos fertilizantes solúveis (PAVINATO et al., 2017), podendo fornecer P às plantas por períodos mais longos, após redução ou até mesmo interrupção da adubação por algum ciclo de cultivo (ONU et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2019). E a depender dos preços, o FNR pode se tornar um potencial substituto dos fertilizantes fosfatados solúveis (CHIEN et al., 2011), especialmente em adubações corretivas (GOEDERT; LOBATO, 1980; OLIVEIRA JUNIOR et al., 2008).

As recomendações técnicas de adubações com o FNR ainda suscitam dúvidas quanto ao melhor manejo a ser empregado, contudo, existe o consenso de que os fertilizantes solúveis

proporcionam maior resposta inicial (ONO et al., 2009; NUNES, 2014), enquanto os fosfatos naturais têm a sua eficiência aumentada ao longo do tempo, até o ponto de superar os fertilizantes solúveis em determinados manejos adotados (NUNES, 2014; OLIVEIRA et al., 2019).

Devido às características químicas de cada fonte e a dinâmica reacional após a aplicação nos solos, estudos mostram diferenças marcantes sob os rendimentos agrícolas, sendo dependente principalmente do tipo de solo e do nível de disponibilidade de P inicial (NUNES, 2014). Em relação a fonte, essas diferenças são observadas em resposta ao fato de que a taxa de disponibilização de P está diretamente relacionada com a solubilidade da fonte utilizada e do manejo adotado (CHIEN et al., 2011; NUNES, 2014).

A compreensão de qual a melhor fonte a ser utilizada em cada sistema agrícola faz parte do pacote tecnológico dos 4 C's (fonte certa, na dose certa, no momento certo e no lugar certo), com o objetivo de tornar os sistemas mais eficientes e sustentáveis, de forma agrônômica e ambiental, a curto, médio e longo prazo (GRANT; FLATEN, 2019). Em relação a este pacote, este estudo objetiva uma compreensão maior de três destes pontos destes mencionados, sendo eles: fonte certa, na dose certa e no lugar certo, considerando diferentes sistemas de manejo em um Latossolo do Cerrado. Sendo discutidos dois pontos destes nos dois tópicos a seguir.

- **MODO DE APLICAÇÃO DOS FERTILIZANTES FOSFATADOS**

O modo de aplicação dos fertilizantes fosfatados é um assunto que gera divisões dentro da comunidade científica, e que ainda carece de avanços na compreensão dos fatores referentes aos diferentes tipos de modos que interferem no impacto positivo ou negativo sobre as produtividades agrícolas. Essa problematização em torno do modo de aplicação decorre do fato de que existem diferenças no perfil de distribuição do P (ALAM et al., 2018; NUNES et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2020), e que a depender do manejo adotado e do tipo de solo, cada modo pode expressar ganhos ou diminuições na eficiência da adubação fosfatada (OLIVEIRA et al., 2019).

A aplicação no sulco é realizada simultaneamente à semeadura e tem como limitação a necessidade de reabastecimento das caixas de adubo acopladas ao maquinário a cada determinada área plantada. Além disso, existe a limitação de não conseguir se utilizar plantadeiras sem caixas de adubo que normalmente possuem um maior número de linhas, e que realizariam o plantio em um menor intervalo de tempo, tendo tudo isso a consequência do prolongamento do tempo destinado a semeadura. Isto é especialmente importante para médios

e grandes produtores, pois pode acarretar atrasos significativos a ponto de impossibilitar a condução de uma safra extra dentro de um sistema.

Apesar disso, a aplicação no sulco é preferencialmente utilizada pelos agricultores em virtude da preocupação que se tem em relação a baixa mobilidade do P, pois aplicando o fertilizante no sulco de semeadura se garante que o nutriente permaneça de forma localizada próximo ao sistema radicular e menos exposto aos sítios de fixação (GRANT et al., 2001; PRADO et al., 2001; GRANT; FLATEN, 2019). Contudo, diversos estudos vêm mostrando que em solos com teores adequados de P, a aplicação no sulco e a lanço dão retornos similares de produtividade ou quando existem diferenças, essas são em favor da aplicação a lanço, não justificando assim tal preocupação (SÁ et al., 2013; NUNES, 2014; BASHIR et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2020).

Em relação ao perfil de distribuição do P formado com a aplicação no sulco, o adubo é colocado de 5 a 8 cm de profundidade, e por isso, estudos mostram a ocorrência de maiores teores de P na camada de 5 a 10 em SPD (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001; SANTOS 2009). Todavia, alguns estudos apresentam resultados diferentes, como Nunes et al. (2011) e Oliveira et al. (2020), que não observaram maiores teores de P na camada de 5-10 cm com a aplicação no sulco em experimentos com sucessões de soja e milho ao longo de 14 e 21 anos, respectivamente. Já em SPC não se observa grandes diferenças no perfil de distribuição do P, entre os modos de aplicação, devido a homogeneização do perfil revolvido (NUNES et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2020).

A aplicação a lanço é o modo mais prático de se realizar a adubação e permite que as semeaduras ocorram de forma contínua, sem que sejam necessárias interrupções para reabastecimento de maquinários e a utilização de máquinas sem caixas de adubo, que normalmente possuem um maior número de linhas e conseqüentemente conseguem semear uma determinada área em um menor tempo (HANSEL et al., 2017; LEMOS; PRADO, 2017). Entretanto, vale ressaltar que esse tipo de aplicação é recomendado nos casos de adubações corretivas (com incorporação) (GRANT; FLATEN, 2019) e nas adubações de manutenção, apenas quando o teor de P no solo estiver em um nível adequado de disponibilidade (SOUSA et al., 2016).

No caso das adubações corretivas, em que doses muito elevadas de P são necessárias, a aplicação a lanço (com incorporação) mostra resultados mais satisfatórios quando comparada a aplicação no sulco. Isso é justificado devido ao fato de que através da incorporação do adubo, um perfil maior de solo é corrigido possibilitando uma maior exploração do sistema radicular (SOUSA; VOLKWEISS; CASTRO, 1987; FIXEN, 1992; NUNES, 2014). O mesmo não ocorre

em uma adubação corretiva no sulco, onde existe a limitação da impossibilidade de doses muito pesadas, além de que em doses a partir de 100 kg ha^{-1} , o volume de solo corrigido passa a ser menor quando comparado com a aplicação a lanço, devido a sobreposição das esferas de solo com altos teores de P ao redor de cada grânulo (SOUSA et al., 2016).

Em relação a adubação de manutenção a lanço, também existem ressalvas a se fazer sobre a sua eficiência no fornecimento de P às plantas. Existem estudos que suscitam questionamentos e problematizações sobre o fato de que neste modo de aplicação o P é acumulado na camada superficial (0-2,5 cm), especialmente em sistemas em que não há o revolvimento do solo (SPD) (WILLIAMSON et al., 2001; NUNES et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2020;), e que condiciona a planta a produzir raízes muito superficiais, de forma que em uma situação de veranico, a cultura ficaria susceptível a estresse hídrico (GRANT et al., 2001; SÁ et al., 2013; SOUSA et al., 2016). Aliado a problemas de suprimento hídrico à cultura, um dos fatores mais importantes do movimento de difusão do P no solo é a umidade, e nesta situação até a difusão do P seria comprometida, uma vez que a camada superficial é a primeira a perder umidade (GRANT; FLATEN, 2019).

Contudo, o estudo de Hansel et al. (2017) evidenciou que não houve diferenças quanto ao diâmetro de raízes quando comparados dois SPD com aplicação à lanço e no sulco de semeadura submetidos ou não a um estresse hídrico. Foi observado que houve um aumento no volume de raízes de soja de tamanho menor que 0,5 mm na camada de 10-15 cm, acompanhado também de maiores produtividades de soja no SPD com aplicação a lanço. Este estudo está de acordo com diversos outros estudos com SPD que vêm mostrando que o fato da planta produzir raízes muito superficiais em função da maior concentração de P na camada superficial, não leva ao comprometimento na sua nutrição e não há impactos negativos sobre a produtividade das culturas agrícolas (NUNES et al., 2011; SÁ et al., 2013; NUNES, 2014; LEMOS; PRADO, 2017). Também se observa que a concentração superficial de raízes está mais ligada às próprias características do SPD do que ao modo de aplicação do fertilizante fosfatado (Nunes, 2014).

Os resultados positivos da aplicação a lanço de P, mesmo diante das problemáticas mencionadas, pode ser justificado pela capacidade que as raízes têm de se alterarem morfológicamente (razão comprimento/diâmetro), aumentando a eficiência de absorção de P. Outro fator que já foi demonstrado em alguns estudos, é de que os maiores teores de MO nas camadas superficiais no SPD, pode exercer um papel de competição pelos potenciais sítios de adsorção de P ao menos tempo que contribui para que o P seja adsorvido em menor energia de ligação (ALMEIDA et al., 2003; SÁ et al., 2013; NUNES, 2014; FINK et al., 2016).

Sá et al. (2013) e Lemos e Prado (2017) salientaram também em seus estudos que apesar do adubo ser acumulado na camada superficial, a depender do espaçamento da cultura, o sistema radicular é muito bem distribuído e capaz de interceptar um volume maior de solo fertilizado. Além disso, ocorre a redistribuição do P, onde as plantas são capazes de assimilar o nutriente na zona de absorção e translocá-lo para as raízes em subsuperfície (OLIVEIRA et al., 2020), outrossim, estas mesmas raízes contribuem também, após a sua senescência, para o aumento de disponibilidade do P ao longo do perfil de solo explorado através da sua decomposição e ciclagem (COSTA et al., 2010; NUNES et al., 2011).

- **DOSES RECOMENDADAS DOS FERTILIZANTES FOSFATADOS**

Os sistemas agrícolas vêm se tornando cada vez mais intensificados através da condução de várias safras dentro de um ano agrícola (WITHERS et al., 2018) e do emprego de tecnologias que têm como objetivo o alcance de produtividades cada vez maiores, sendo imprescindível um manejo eficiente da adubação fosfatada através da recomendação de doses que sejam capazes de promover um uso eficiente do nutriente, tanto do ponto de vista econômico como ambiental.

Dentro do manejo da adubação fosfatada, a recomendação da dose a ser aplicada é o fator mais importante e o principal modulador da produção vegetal (LOPES et al., 2004). No caso específico do P, especialmente em solos altamente intemperizados, é necessário que se realize a construção da fertilidade do solo através de adubações corretivas com o objetivo de se elevar o teor de P a um nível adequado (WITHERS et al., 2018 OLIVEIRA et al., 2020), e somente a partir disto, são realizadas as adubações de manutenção que irão suprir a demanda por P do cultivo agrícola para um determinado teto produtivo (SOUSA et al., 2004).

Diante da necessidade de correção desses solos, em virtude da problemática em torno das reações de precipitação e adsorção do P, têm-se observado o emprego de doses muito elevadas, muito acima da quantidade exportada pelas culturas, que conduzem a um considerável acúmulo de P nos solos agricultáveis, permitindo a formação de uma grande reserva de P que pode ser explorada pelos cultivos, de modo a possibilitar reduções nas doses aplicadas em cultivos subsequentes (CUNHA et al., 2011; WITHERS et al., 2018).

WITHERS et al. (2018) em seu estudo observaram que em 2016 as reservas de P encontradas nos solos oriundas principalmente de fertilizações, correspondiam em média a 70% da dose de fertilizante necessário para aquele ano, enquanto que Cunha et al. (2011) em um balanço realizado de 1988 a 2010, encontrou o valor médio de 51% de eficiência de uso do P no Brasil. Tais resultados evidenciam o quanto é ineficiente o uso atual de P no Brasil, mas que

a depender do manejo empregado, a eficiência de uso pode ser mais elevada (BLACKWELL et al., 2019).

Em relação a adubação de manutenção, existem tabelas de recomendação em diversos manuais de fertilidade do solo, que foram obtidas a partir de resultados de curvas de respostas com diferentes doses e níveis de disponibilidade de P, levando em consideração diferentes expectativas de produção. Todavia, discutindo uma tabela adaptada de Sousa et al. (2004), Sousa et al. (2016) discorre sobre a importância de se manejar a adubação não somente levando em consideração a expectativa de produção, mas também o nível de disponibilidade de P do solo, de modo em que em solos com níveis altos e muito altos de P, a adubação pode ser reduzida pela metade ou até mesmo dispensada por um ou mais anos sem haver prejuízos na produção (SÁ et al., 2013; WITHERS et al., 2018). Essa redução é justificável tendo em vista que aplicações anuais de P que forneçam quantidades maiores daquilo que é exportado pelos cultivos, na forma de grãos ou outros produtos no momento da colheita, permitem o acúmulo do nutriente no solo e a formação de uma reserva que pode ser utilizada para a nutrição dos cultivos subsequentes (WITHERS et al., 2018).

Essas reduções são especialmente importantes porque proporcionam ao produtor maiores lucratividades com a redução dos custos e permite que os cultivos agrícolas explorem a reserva de P presente no solo, aumentando assim a eficiência de uso de P (NUNES, 2014). Ademais, se tem a diminuição dos riscos de escoamento superficial de solo com altos teores do nutriente, que invariavelmente pode ocorrer mesmo em SPD, e que podem alcançar e poluir corpos d'água (GRANT; FLATEN, 2019).

Entretanto, quanto mais intensificado o sistema, ou seja, quanto maior o número de cultivos conduzidos dentro do ano agrícola, maior será a quantidade de P a ser exportada da área (WITHERS et al., 2018) e maior será a necessidade de monitoramento dos níveis de disponibilidade de P para que este não seja reduzido a níveis baixos.

Corroborando tais fatos explanados, Sá et al. (2013) e Lemos e Prado (2017) observaram aumentos nas taxas de absorção de P, taxas de crescimento radicular e produtividades de cultivos em resposta a aumentos das doses de P em solos com baixa disponibilidade de P, entretanto, quando tais níveis foram elevados à classe de adequada disponibilidade, observou-se que as respostas diminuiriam significativamente. Já Soares et al. (2018) observaram ausência de resposta na produtividade de soja cultivada em um solo com teor adequado de disponibilidade de P.

Além de fatores inerentes ao manejo da adubação fosfatada, o sistema de manejo do solo e os cultivos conduzidos no sistema podem ser definidores da métrica de eficiência de uso

do P, tendo em vista que estes são definidores da sua distribuição no perfil do solo, em diferenças nas formas orgânicas e inorgânicas e nas comunidades microbianas envolvidas em sua ciclagem (FENG et al., 2003; NUNES, 2014; RODRIGUES et al., 2018).

3.2 SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO

O preparo convencional do solo a cada novo cultivo tem como objetivo tornar o solo mais favorável às condições ótimas para germinação, emergência e estabelecimento das plântulas, além de proporcionar o controle populacional de certos patógenos do solo e de plantas invasoras (BAAN et al., 2009). Esse processo compreende um preparo primário e secundário: 1) uso de arados ou grades pesadas para desagregar o solo, permitindo a incorporação de corretivos, fertilizantes, resíduos vegetais e plantas daninhas, e a descompactação superficial; 2) operação de destorroamento e de nivelamento da camada arada por meio de gradagens do terreno (ALBUQUERQUE FILHO et al., 2021).

O preparo convencional do solo era amplamente adotado nas décadas de 1950 a 1960 quando se iniciava a produção de grãos, especialmente no sul do Brasil. Este manejo foi trazido por imigrantes europeus que empregaram o modelo das suas terras de origem (FREITAS; LANDERS, 2014), contudo, isto trouxe consigo problemas graves referentes a degradação do solo por erosão e formação de camadas compactadas abaixo da camada arável (VILARINNI et al., 1996). O que levou a grandes perdas de produtividade, mesmo com o início da implantação de tecnologias desenvolvidas na época (melhoramento genético, uso de agroquímicos, etc).

Com o surgimento dos problemas advindos da implantação do SPC, os produtores e técnicos se concentraram na busca por sistemas de manejo que visassem o mínimo revolvimento do solo, de onde surgiram duas soluções: 1) uso de escarificadores para solucionar o problema do “pé de grade” e com isso aumentar a infiltração de água ao longo do perfil do solo; 2) Implantação do sistema de plantio direto com a ausência do revolvimento do solo (CASÃO JUNIOR et al., 2012; FREITAS; LANDERS, 2014).

Em 1969 se iniciou o primeiro experimento de sistema de plantio direto no Brasil no campo experimental do Ministério da Agricultura, localizado no município de Não-me-toque (RS). Entretanto, em escala comercial o sistema de plantio direto foi iniciado pelo produtor Herbert Bartz de Rolândia (PR) em 1972 (CASÃO JUNIOR et al., 2012). O SPD compreende um conjunto de tecnologias (cultivo sem o revolvimento do solo, rotação de culturas e manutenção de cobertura permanente na superfície do solo) que tornam a agricultura mais

sustentável com diminuições da degradação do solo e perdas de corretivos, fertilizantes e materiais orgânicos (FREITAS; LANDERS, 2014; ANDRADE et al., 2018).

Desde então são numerosos os estudos que vêm demonstrando os benefícios de se utilizar o sistema de plantio direto em relação a maiores rendimentos agrícolas, conservação do solo, manutenção da umidade, diminuição da amplitude térmica, aumento dos teores de MOS, aumento na estabilidade de agregados e manutenção de condições favoráveis a microbiota do solo, etc (MENDES et al., 2003; REDEL et al., 2007; NUNES, 2014; LANDERS, 2014; FERREIRA et al., 2020; FREITAS et al., 2020; BLANCO-CANQUI; RUIS, 2020; TOPA et al., 2021).

O principal fator que distingue marcadamente o SPC e o SPD é aquele que impacta diretamente na eficiência de uso do P: o revolvimento do solo. Como já mencionado, uma vez o fertilizante fosfatado aplicado ao solo, ocorre a formação de microrregiões ricas em P ao longo do perfil de distribuição do fertilizante, que no SPC o revolvimento faz com que ocorra um maior contato do íon fosfato com as superfícies dos coloides minerais, aumentando assim a sua fixação (SOUSA; VOLKWEISS; CASTRO, 1987; SÁ, 2004; BAAN et al., 2009). Isto é particularmente importante em solos com teores baixos de P, que ainda não foram corrigidos e que por isso possuem uma elevada capacidade de fixação (SÁ, 2004). Vale ressaltar que no caso do SPC, o fertilizante é homoganeamente distribuído ao longo da camada arável (0-20 cm), não havendo estratificação em relação aos teores de P (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001; SCHWAB et al., 2006; MALLARINO; BORGES, 2006; TIECHER et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2020).

Já no SPD, a ausência de revolvimento leva a acúmulos do fertilizante na superfície do solo (quando se é aplicado a lanço) ou nos sulcos de semeadura, estratificando-se os teores de P, e se observando maiores teores nas camadas superficiais (0-5 cm) e baixos teores em camadas mais profundas (SCHWAB et al., 2006; MALLARINO; BORGES, 2006; BAAN et al., 2009; TIECHER et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2020). Devido a isto, é possível observar uma maior eficiência da adubação fosfatada, pois o fertilizante é aplicado e ali permanece até completa solubilização, e são nestas zonas que uma parte do P fica protegido do processo de fixação, permanecendo em formas de maior labilidade, e conseqüentemente, disponibilidade às plantas (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001; NUNES, 2014).

Ademais, os maiores rendimentos e eficiências de adubação fosfatada encontrados no SPD em relação ao SPC, podem ser justificados pela estratificação da MOS, que devido ao acúmulo de palhada na superfície e maior desenvolvimento do sistema radicular em camadas superficiais, têm-se maiores teores de carbono orgânico total na camada de 0-5 cm (NUNES et

al., 2011; NUNES, 2014), justamente na camada onde o fertilizante é distribuído, e assim a presença da MOS pode adsorver parte do P, aumentando a sua disponibilidade e/ou se ligar aos sítios com cargas positivas nas superfícies coloidais da fração mineral, competindo com o P pelos sítios de fixação (JONES, 1998; RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001; REDEL et al., 2007).

A estratificação de P nos diferentes sistemas perpassa também por diferenças marcantes quanto as formas de acúmulo desse nutriente. De acordo com o fracionamento proposto por Hedley et al. (1982), a depender do extrator utilizado, o P pode ser classificado desde lábil a pouco lábil, sendo a distribuição dessas frações muito dependentes do sistema de manejo do solo e adubação adotados, bem como também as espécies cultivadas, especialmente a entrada ou não de plantas de cobertura. (TIECHER et al., 2012; RODRIGUES, 2018).

- USO DE PLANTAS DE COBERTURA

Na agricultura em escala global, diversas espécies de plantas de cobertura do solo são usadas em sistemas de rotação e sucessão de culturas, em cultivos solteiros ou consorciadas entre elas ou com espécies comerciais (REDIN et al., 2016), sendo este manejo uma obrigatoriedade dentro do SPD, devido a necessidade de cobertura permanente do solo com palhada (SILVA et al., 2017).

A utilização das plantas de cobertura surgiu em decorrência da necessidade de produção de palhada para proteção do solo contra erosão, mas ao longo dos anos se consagrou o uso dessas plantas para promoção de inúmeros outros benefícios, como a diversificação biológica do sistema, ciclagem de nutrientes, controle biológico de patógenos e até alterações em propriedades físico-químicas do solo, bem como o aumento nos teores de MOS (BLANCO-CANQUI; RUIS, 2020). Estes benefícios trazem consigo uma estabilização da produção agrícola, sustentabilidade para o sistema e o mais importante, menor dependência de insumos externos (REDIN et al., 2016; BLANCO-CANQUI; RUIS, 2020).

Em razão do fato de que as plantas de cobertura são cultivadas dentro do sistema e toda a sua biomassa aérea e radicular retorna ou permanece no solo, pode-se ter uma maior eficiência de uso do P, uma vez que estas plantas podem apresentar um sistema radicular que explore um maior volume de solo fertilizado quando comparadas a cultura comercial, podendo assim assimilar o P de sítios do solo que a planta comercial não teria acesso (TIECHER et al., 2012). Além disso, podem apresentar uma maior eficiência na absorção de P (MAGALHÃES et al., 1991), onde a depender da planta de cobertura utilizada e do tempo de condução do sistema,

esta pode acessar frações de menor labilidade, tanto inorgânicas como orgânicas (REDEL et al., 2007; RODRIGUES, 2018; SOLTANGHEISI et al., 2020).

A contribuição das plantas de cobertura para o aumento da eficiência do uso do P pelos cultivos comerciais varia em função de diferentes fatores relacionados ao manejo do solo. Rodrigues (2018) observou variações nas frações de P nos SPC e SPD com a utilização de *Urochloa ruziziensis*, e estas se diferiram também em função do tempo de implantação desses sistemas. Soltangheisi et al. (2020) observaram diferenças quanto a capacidade de diferentes plantas de cobertura em aumentar o P de frações lábeis em um SPD conduzido por 9 anos, mas isto foi variável a depender da fonte de fertilizante fosfatado utilizada.

Fica evidente com a diversidade de estudos que as plantas de cobertura são capazes de promover variações na dinâmica do P nos tecidos vegetais, e conseqüentemente, nas suas frações presentes no solo, devido a diferentes capacidades que essas plantas possuem de absorver e ciclar o P (MAGALHÃES et al., 1991; PAVINATO et al., 2017; RODRIGUES, 2018; SOLTANGHEISI et al., 2020). Entretanto, uma compreensão cada vez maior dos processos envolvidos na dinâmica do P, em sistemas que utilizam plantas de cobertura, se faz necessária para alcançar maiores eficiências no uso dos fertilizantes fosfatados (REDIN et al., 2016).

3.3 PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS RELACIONADOS A CICLAGEM DE P

Solos saudáveis apresentam a competência de funcionar como um sistema vivo, mantendo uma comunidade diversificada de organismos que ajudam no controle de doenças de plantas, insetos pragas e plantas daninhas, além de ser um ambiente propício a formação de associações simbióticas benéficas às plantas. Além disso, a dinâmica de uma microbiota equilibrada e saudável propicia melhorias na ciclagem de nutrientes, que pode ter como resposta, ganhos na produtividade dos cultivos agrícolas (FAO, 2015; SCHLOTTER et al., 2018).

A avaliação de parâmetros microbiológicos, para se aferir a qualidade de um dado sistema, é bastante recente porque diferentemente dos parâmetros físicos e químicos, que já possuem níveis bem estabelecidos, para os parâmetros microbiológicos essa realidade não era possível até um tempo atrás, devido à falta de conhecimento e ferramentas para avaliação e análise (MENDES et al., 2015; SCHLOTTER et al., 2018).

Com base em estudos de metagenômicas realizadas por Nelson et al., (2016), Vestergaard et al., (2017) e Dini-Andreote et al., (2017), pôde-se concluir que existe no solo um número muito grande de genes que codificam enzimas-chave relacionadas a processos de ciclagem de carbono, enxofre e fósforo. E a ação destas enzimas conduzindo a uma maior ciclagem de nutrientes, levam a um aumento da qualidade do solo que por sua vez pode apresentar uma menor dependência de fertilizações externas, conseqüentemente, maior lucratividade.

Relacionado especificamente a ciclagem do P, a atividade de fosfatases tem grande importância na disponibilização do Po (WAN et al., 2021), mas este não é o único processo biológico relacionado a ciclagem de P. Outro indicador microbiológico do solo que tem papel importante no aumento da fertilidade do solo através da sua decomposição e mineralização, é o fósforo da biomassa microbiana (FBM). Este indicador fornece informações importantes quanto ao pool orgânico de P que é extremamente lábil (BROOKES et al 1982).

É fundamental então se avançar na compreensão de como determinados componentes microbiológicos atuam e promovem uma maior eficiência de uso do P pelos cultivos agrícolas. Desta forma, pode-se explorar de forma significativa as grandes reservas de P encontradas nos solos agrícolas, principalmente reservas orgânicas.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAM, M. K.; BELL, R. W.; SALAHIN, N.; PATHAN, S.; MONDOL, A. T. M. A. I.; ALAM, M. J.; RASHID, M. H.; PAUL, P. L. C.; HOSSAIN, M. I.; SHIL, N. C. Banding of Fertilizer Improves Phosphorus Acquisition and Yield of Zero Tillage Maize by Concentrating Phosphorus in Surface Soil. **Sustainability**, v. 10, 3234, 2018.

ALBUQUERQUE FILHO, M. R. de; PEREIRA FILHO, I. A.; VIANA, J. H. M.; ALVARENGA, R. C.; CRUZ, J. C. Preparo convencional. Agência Embrapa de informação tecnológica. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_32_59200523355.html>. Acesso em 18 jan., 2021.

ALMEIDA, R. F. D.; NAVES, E. R.; MOTA, R. P. D.; Soil quality: Enzymatic activity of soil β -glucosidase. **Global Journal of Agricultural Research and Reviews**, v. 3, p. 146-150, 2015.

ALVES, P. D. D.; SIQUEIRA, F. de F.; FACCHIN, S.; HORTA, C. C. R.; VICTÓRIA, J. M. N.; KALAPOTHAKIS, E. Survey of microbial enzymes in soil, water and plant microenvironments. **The Open Microbiology Journal**, v. 8, p. 25-31, 2014.

ANDRADE, AL. T.; TORRES, J. L. R.; PAES, J. M. V.; TEIXEIRA, C. M.; CONDE, A. B. T. Desafios do sistema plantio direto no cerrado. **Informe agropecuário**, v. 39, p. 18-26, 2018.

BAAN, C. D.; GREVERS, M. C. J. SCHOENAU, J. J. Effects of a single cycle of tillage on long-term no-till prairie soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 89, p. 521-529, 2006.

BAVEYE, P. C. Looming scarcity of phosphate rock and intensification of soil phosphorus research. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 637-642, 2015.

BLACKWELL; M.; DARCH, T.; HASLAM, R. Phosphorus use efficiency and fertilizers: future opportunities for improvements. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 6, p. 332-340, 2019.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. Cover crop impacts on soil physical properties: a review. **Soil Science Society of América Journal**, v. 84, p. 1527-1576, 2020.

BROOKES, P.C.; POWLSON, D.C. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. **Journal of the Science Food and Agriculture, London**, v.32, n.7, p.671-674, 1981.

BROOKES, P.C.; POWLSON, D.S.; JENKINSON, D.S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology & Biochemistry**, v.14, p.319-329, 1982.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G. de; LLANILLO, R. F. Plantio direto no sul do Brasil. Londrina: IAPAR, 77 p., 2012.

CHIEN, S. H. Interpretation of Bray I – extractable phosphorus from acid soil treated with phosphate rocks. **Soil Science**, v. 126, n. 01, 1978.

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

CHOWDHURY, R. B.; MOORE, G. A.; WEATHERLEY, A. J. Key sustainability challenges for the global phosphorus resource, their implications for global food security, and options for mitigation. **Journal of Cleaner Production**, Victoria, v. 140, p. 945-963, 1 jan. 2017.

CORDELL, D.; WHITE, S. Peak Phosphorus: Clarifying the Key Issues of a Vigorous Debate about Long-Term Phosphorus Security. **Sustainability**, v. 3, p. 2027-2049, 2011.

COSTA, S.E.V.G.A.; SOUZA, E.D. de; ANGHINONI, I.; FLORES, J.P.C.; VIEIRA, F.C.B.; MARTINS, A.P.; FERREIRA, E.V.O.; Patterns in phosphorus and corn root distribution and yield in long-term tillage systems with fertilizer application. **Soil and Tillage Research**, v.109, n.1, p.41-49, 2010.

CUNHA, J. F. da; CASARIN, V.; PROCHNOW, L. I. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira no período de 1988 a 2010. *Informações agrônômicas*, n. 135, 2011.

DALAL, R. C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.29, p.83-117, 1977.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de laboratórios: solo, água, nutrição animal e alimentos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 313p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 3.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2013. 353p.

FENG, Y.; MOTTA, A. C.; REEVES, D. W.; BURMESTER, C. H.; VAN SANTEN, E.; OSBORNE, J. A. Soil microbial communities under conventional-till and no-till continuous cotton systems. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 35, p. 1693-1703, 2003.

FERREIRA, A. de O.; SÁ, J. C. de; LAL, R.; AMADO, T. J. C.; INAGAKI, T. M.; BRIEDIS, C.; TIVET, F. Can no-till restore soil organic carbon to levels under natural vegetation in a subtropical and tropical Typic Quartzipissament? **Land Degradation & Development**, v. 32, p. 1742-1750, 2020.

FIGUEIREDO, C. C. de; PINHEIRO, T. D.; OLIVEIRA, L. E. Z. de; ARAULO, A. S. de; COSER, T. R.; PAZ-FERREIRO, J. Direct and residual effect of biochar derived from biosolids on soil phosphorus pools: A four-year field assessment. **Science of the total environment**, v. 739, 140013, 2020.

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

FOHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. **Plant Soil**, v. 110, p. 101-109, 1988.

FOLLMI, K. B. The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits. **Earth-Science Reviews**, Zurich, v. 40, p. 55-124, 1996.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. World fertilizer trends and outlook to 2020. Roma: Food and Agriculture Organization of United Nations, 2017.

FREITAS, P. L. de; LANDERS, J. N. The transformation of agriculture in Brazil through development and adoption of Zero Tillage Conservation Agriculture. **International soil and water conservation research**, v. 2, n. 1, p. 35-46, 2014.

GHOSH, A.; SINGH, A.B.; KUMAR, R.V.; MANNA, M.C.; BHATTACHARYYAC, R.; RAHMAN, M. M.; SHARMA, P.; RAJPUT, P.S.; MISRA, S. Soil enzymes and microbial elemental stoichiometry as bio-indicators of soil quality in diverse cropping systems and nutrient management practices of Indian Vertisols. **Applied Soil Ecology**, 145, 2020.

GOEDERT, W. J.; LOBATO, E. EFICIENCIA AGRONÓMICA DE FOSFATOS EM SOLO DE CERRADO. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 15, p. 311-318, 1980.

GRANT, C. A.; FLATEN, D. N.; TOMASIEWICZ, D. J.; SHEPPARD, S. C. The importance of early season phosphorus nutrition. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 81, p. 211-224, 2001.

GRANT, C. A.; GRANT; FLATEN, D. N. 4R Management of Phosphorus Fertilizer in the Northern Great Plains. **Journal of Environmental Quality**, v. 48, p. 1356-1369, 2019.

HANCE, R.J.; ANDERSON, G. A comparative study of methods of estimating soil organic phosphate. **Journal of Soil Science**, v.13, n.2, p.225-230, 1962.

HANSEL, F. D.; AMADO, T. J. C.; DIAZ, D. A. R.; ROSSO, L. H. M.; NICOLOSO, F. T.; SCHORR, M. Phosphorus Fertilizer Placement and Tillage Affect Soybean Root Growth and Drought Tolerance. **Soil Fertility & Crop Nutrition**, v. 28, p. 2936-2944, 2017.

HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.46, n.5, p.970-976, 1982.

HELIN, J.; WEIKARD, H. P. A model for estimating phosphorus requirements of world food production. **Agricultural Systems**, v. 176, 102666, 2019.

JOERGENSEN, R.G. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the kec value. **Soil Biology & Biochemistry**., 28:25-31, 1995.

JONES, D. L. Organic acids in the rhizosphere – a critical review. **Plant and Soil**, v. 205, p. 25-44, 1998.

KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Boletim técnico, n. 3, 31 p., 1997.

KRUSE, J.; ABRAHAM, M.; AMELUNG, W.; BAUM, C.; BOL, R.; KÜHN, O.; LEWANDOWSKI, H.; NIEDERBERGER, J.; OELMANN, Y.; RÜGER, C.; SANTNER, J;

SIEBERS, M.; SIEBERS, N.; SPOHN, M.; VESTERGREN, J.; VOGTS, A.; LEINWEBER, P. Innovative methods in soil phosphorus research: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 178, n. 1, p. 43-88, 2015.

LEMOS, E. F.; PRADO, R. de M. Relationships between doses and application on methods of phosphorus and corn nutrition status and grain yield. *Communications in soil Science and plant analysis*, v. 48, p. 1-10, 2017.

LUO, Z.; MA, S.; HU, S.; CHEN, D. Towards the sustainable development of the regional phosphorus resources industry in China: A system dynamics approach. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 126, p. 186-197, nov. 2017.

MAGALHÃES, J. C. A. J. de; VIEIRA, R. F.; PEREIRA, J.; PERES, J. R. R. Efeito da adubação verde na disponibilidade de fósforo de fosfatos, numa sucessão de culturas, em solo de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p. 329-337, 1991.

MALLARINO, A. P.; BORGES, R. Phosphorus and Potassium Distribution in Soil Following Long-Term Deep-Band Fertilization in Different Tillage Systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 702-707, 2006.

McGREGOR, K.C.; CULLUM, R.F.; MUTCHLER, C.K.; JOHNSON, J.R. Long-term no-till and conventional till soybean yields. **Mississippi Agricultural and Forestry Experiment Station Research Report**, n.1146, 2006. p.14.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G. de; REIS JÚNIOR, F. B. dos. Bioindicadores de qualidade do solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília**, v. 32, p. 185-203, 2015.

MENDES, I.C.; SOUZA, L.V.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Propriedades biológicas em agregados de um Latossolo Vermelho-escuro sob plantio convencional e direto no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.3, p.435-443, 2003.

Methods of Phosphorus and Corn Nutrition Status and Grain Yield. *Communications in soil Science and plant analysis*, v. 48, 2017.

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

NUNES, R. de S.; LOPES, C. de A.; SOUSA, D. M. G. de; MENDES, I. C. Sistemas de manejo e os estoques de carbono e nitrogênio em latossolo de cerrado com a sucessão soja-milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1407-1419, 2011.

NUNES, R.de S. Eficiência de uso do fósforo em sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada por um longo período. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2014, 150 p. (Tese de Doutorado).

NUNES, R. de S; SOUSA, D. M. G. de; GOEDERT, W. J.; OLIVEIRA, L. E. Z. de; PINHEIRO, T. D.; Crops' Yield and Roots Response to Soil Phosphorus Distribution Resulting From Long-Term Soil and Phosphate Fertilization Management Strategies. *Frontiers*, v. 3, 757100, 2021.

- NUNES, R. de S.; SOUSA, D. M. G. de; GOEDERT, W. J.; OLIVEIRA, L. E. Z. de; PAVINATO, P. S.; PINHEIRO, T. D. Distribution of Soil Phosphorus Fractions as a Function of Long-Term Soil Tillage and Phosphate Fertilization Management. *Frontiers*, v. 8, 350, 2020.
- OLIVEIRA JUNIOR, A. de; PROCHNOW, L. I.; KLEPKER, D. Eficiência agronômica de fosfato natural reativo na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 5, 2008.
- OLIVEIRA, L. E. Z. de; NUNES, R. de S.; SOUSA, D. M. G. de; BUSATO, J. G.; FIGUEIREDO, C. C. de. Response of Maize to Different Soil Residual Phosphorus Conditions. **Agronomy Journal**, v. 111, p. 1-10, 2019.
- OLIVEIRA, L. E. Z. de; NUNES, R. de S.; SOUSA, D. M. G. de; FIGUEIREDO, C. C. de. Dynamics of residual phosphorus forms under different tillage systems in a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, v. 367, 114254, 2020.
- OLSEN, S. R.; SOMMERS, L. E. Phosphorus. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, Q. R. (Eds.) **Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties**. 2.ed. Madison: ASA, SSSA, 1982. p.403-430.
- OLSEN, S.R.; COLE, C.V.; WATANABE, F.S, DEAN, L.A. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. **USDA Circ. 939**. USDA, Washington, DC. 1954.
- ONU, F. B.; MONTAGNA, J.; NOVELINO, J. O.; SERAFIM, M. E.; DALLASTA, D. C.; GARBIATE, M. V. Eficiência agronômica de superfosfato triplo e fosfato natural de Arad em cultivos sucessivos de soja e milho. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 03, 2009.
- PANTANO, G.; GROSSELI, G. M.; MOZETO, A. A.; FADINI, P. S. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. **Química Nova**, v. 39, n. 6, p. 732-740, 2016.
- PAVINATO, P. S.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; SARTOR, L. R.; WITHERS, P. J. A. Effects of Cover Crops and Phosphorus Sources on Maize Yield, Phosphorus Uptake, and Phosphorus Use Efficiency. **Soil Fertility & Crop Nutrition**, v. 109, p. 1039-1047.
- PAVINATO, P.S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Organic compounds from plant extracts and their effect on soil phosphorus availability. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.10, p.1379-1388, 2008.
- REDEL, Y. D.; RUBIO, R.; ROUANET, J. L.; BORIE, F. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. **Geoderma**, v. 139, p. 388-396, 2007.
- REDIN, M.; GIACOMINI, S. J.; FERREIRA, P. A. A.; ECKHARDT, D. P. Plantas de cobertura de solo e agricultura sustentável: espécies, matéria seca e ciclagem de carbono e nitrogênio. In:TIECHER, T. Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

- RHEINHEIMER, D. dos; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, v. 36, n. 01, p. 151-160, 2001.
- RODRIGUES, M. Legacy phosphorus in Brazilian agriculture and cover crops contribution to enhance this nutrient bioavailability in Oxisols. Tese (doutorado), Universidade de São Paulo – Escola de Agricultura Luiz de Queiroz, 2018. 100 p.
- SÁ, J. C. de M.; BRIEDIS, C.; FERREIRA, A. de O. No-till corn performance in response to P and fertilization modes. **Revista Ceres**, v. 60, p. 96-101, 2013.
- SCHLOTTER, M.; NANNIPIERI, P.; SORENSEN, S.; VAN ELSAS, J. D. Microbial indicators for soil quality. **Biology and Fertility of Soils**, v. 54, p. 1-10, 2018.
- SCHWAB, G.J.; WHITNEY, D.A.; KILGORE, G.L.; SWEENEY, D.W. Tillage and Phosphorus Management Effects on Crop Production in Soils with Phosphorus Stratification. **Agronomy Journal**, v.98, n.3, p.430-435, 2006.
- SILVA, F. A. M. da; EVANGELISTA, B. A.; MALAQUIAS, J. V.; OLIVEIRA, A. D. de; MULLER, A. G. Análise temporal de variáveis climáticas monitoradas entre 1974 e 2013 na estação principal da Embrapa Cerrados. In: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Planaltina-DF: Embrapa Cerrados, 2017.
- SMIL, V. PHOSPHORUS IN THE ENVIRONMENT: Natural Flows and Human Interferences. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 25, p. 53-88, 2000.
- SOARES, G. F.; CRUZ, S. C. S.; DUARTE, T. C.; MACHADO, C. G.; SENA JUNIOR, G. de. Gypsum and phosphorus in improving biometric and nutritional attributes of soybean/second season corn succession. **Revista Caatinga**, v. 31, p. 326-335, 2018.
- SOLTANGHEISI, A.; TELES, A. P. B.; SARTOR, L. R.; PAVINATO, P. S. Cover Cropping May Alter Legacy Phosphorus Dynamics Under Long-Term Fertilizer Addition. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, 2020.
- SOUSA, D. M. G. de; VOLKWEISS, S. J. Efeito residual do superfosfato triplo em função da granulação e dose e do Sistema de preparo do solo. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, ISSN: 022008, 1987.
- SOUSA, D. M. G. de; VOLKWEISS, S. J. Influência do sistema de preparo do solo no efeito residual da adubação fosfatada. In: Relatório técnico anual do centro de pesquisa agropecuária dos cerrados, Embrapa – CPAC, 1991.
- SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Planaltina: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416p.
- SOUSA, D.M.G.; REIN, T.A.; GOEDERT, W.J.; LOBATO, E.; NUNES, R.S. Fósforo. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. (Eds.) **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: volume 2, nutrientes**. Piracicaba: INPI - Brasil, 2010. p.67-132.
- SOUSA, D.M.G.; VOLKWEISS, S.J. Efeito residual do superfosfato triplo aplicado em pó e em grânulos no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, n.1, p.141- 146,

1987.

TABATABAI, M.A. Soil enzymes. In: Weaver, R.W.; Angle, S.; Bottomley, P.S.; Bezdicek, D.; Smith, S.; Tabatabai, A.; Wollum, A. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 2: Microbiological and Biochemical Properties*. Inc. Madison: **Soil Science Society of America**. 1994. p. 778-833.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal*. 3° ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TIECHER, T.; GOMES, M. V.; AMBROSINI, V. G.; AMORIM, M. B. Assessing linkage between soil phosphorus forms in contrasting tillage systems by path analysis. **Soil & Tillage Research**, v. 175, p. 276-280, 2018.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D.S.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil and Tillage Research**, v.124, p.57-67, 2012.

TIECHER, T.; SANTOS, D. R. dos; KAMINSKI, J.; CALEGARI, A. Forms of Inorganic Phosphorus in Soil under Different Long Term Soil Tillage Systems and winter Crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 271-281, 2012.

TIESSSEN, H.; STEWART, J. W. B.; COLE, C. V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v 48, p. 853-858, 1984.

TOPA, D.; CARA, I. G.; JITAREANU, G. Long term impact of different tillage systems on carbon pools and stocks, soil bulk density, aggregation and nutrients: A field meta-analysis. **Catena**, v. 199, 2021.

VANCE, E.D.; BROOKES, P.C. & JENKINSON, D.S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology & Biochemistry**., 19:703-707, 1987.

VILARINI, P. J.; SOUZA, M. D. de; TOKESHI, H.; OLIVEIRA, D. A.; MORSOLETO, R. V. IMPACTO AMBIENTAL DE SISTEMAS INTENSIVO DE CULTIVO EM AGRICULTURA IRRIGADA SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA DO SOLO. In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, XI, 1996, Campinas. Anais: Unicamp, 1996, p. 447-466.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid tritration method. **Soil Science**, Baltimore, v.75, p.37:29-38, 1934.

WAN, W. HAO, X.; XING, Y.; LIU, S.; ZHANG, X.; LI, X.; CHEN, W.; HUANG, Q. Spatial differences in soil microbial diversity caused by pH-driven organic phosphorus mineralization. **Land Degradation & Development**, v. 32, p. 766–776, 2021.

WILLIAMSON, L.C.; RIBRIOUX, S.P.C.P.; FITTER, A.H.; LEYSER, H. M. O. 2001. Phosphate availability regulates root system architecture in Arabidopsis. **Plant Physiol**, v. 126, p. 875-882, 2001.

WITHERS, P. J. A.; RODRIGUES, M.; SOLTANGUEISI, A.; CARVALHO, T. S. de; GUILHERME, L. R. G.; BENITES, V. de M.; GATIBONI, L. C.; SOUSA, D. M. G. de; NUNES, R. de S.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA JR, A. de; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Nature**, v. 8, 2537, 2018.

WRIGHT, S. F.; UPADHYAYA, A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Science**, v.161, p.1-12, 1996.

5. CAPÍTULO 01: PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO EM FUNÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA NO CERRADO EM UM ESTUDO DE LONGO PRAZO

5.1 RESUMO

Insegurança alimentar, tensões geopolíticas, alto custo, escassez de reservas e baixa eficiência de uso em solos tropicais altamente intemperizados são as problemáticas que norteiam a utilização dos fertilizantes fosfatados em culturas anuais no Cerrado brasileiro. Apesar da comunidade científica ter se dedicado por décadas à compreensão da dinâmica do fósforo nestes solos, ainda são incipientes os estudos de longo prazo que objetivem avaliar o efeito de sistemas de manejo do solo e todas as interações com os principais aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada nos rendimentos de culturas anuais, e quais são estas que permitem o alcance dos maiores rendimentos e eficiências de uso deste nutriente. Em um experimento implantado na Embrapa Cerrados, em Planaltina-DF, na safra de 1999/00 se estabeleceu uma sucessão de soja (*Glicine max* L.) e milho (*Zea mays* L.) no verão, que se perdurou até o ano de 2021 (22 cultivos) com diferentes estratégias de manejo do solo e de adubação fosfatada em um Latossolo Vermelho distrófico com disponibilidade adequada de P. Foram avaliadas interações entre sistema de plantio (direto com milho- SPD mil, direto com leguminosa- SPD leg ou convencional- SPC), com superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR) como fonte fosfatada aplicados na dose de 22 ou 44 kg P ha⁻¹ a lanço ou no sulco de plantio. A partir da série histórica de produtividade, entradas via fertilizantes e saída via produtos colhidos, foi possível avaliar o efeito das estratégias de manejo nos rendimentos de soja e milho, bem como a lucratividade destas estratégias, balanço e eficiência de uso do P. A soja não apresentou reduções de produtividade quando a adubação foi reduzida em 50% e/ou quando a fonte de menor solubilidade foi aplicada, especialmente nos cinco primeiros cultivos avaliados. O milho, no entanto, teve a sua produtividade reduzida com a menor dose baixa principalmente no sistema de plantio convencional (SPC). Além disso, o milho teve a sua produtividade reduzida quando aplicado o FNR nos últimos anos em todos os sistemas de manejo do solo em comparação ao SFT. Quanto à lucratividade, as maiores perdas em relação a fonte solúvel ocorreram no SPC e com o FNR na dose de 22 kg de P ha⁻¹, principalmente quando o milho foi cultivado, enquanto de modo geral, no SPD milho, e com o FNR na dose de 44 kg de P ha⁻¹ em todos os sistemas, foram observados os menores percentuais de perdas. Em relação ao balanço estimado e a eficiência de uso do P, a dose aplicada foi a principal moduladora, onde os menores estoques de P residual e os maiores valores de eficiência de uso foram encontrados

na menor dose, a de 22 kg de P ha⁻¹. Conclui-se, portanto, que em um solo com adequada disponibilidade de P foi possível reduzir a adubação na soja pela metade daquela é recomendada para a região do Cerrado por alguns cultivos, especialmente quando cultivado sob SPD. Para o milho isto não é recomendado, especialmente se cultivado sob SPC. Tanto na soja quanto no milho foi possível aplicar o P a lanço ou no sulco de semeadura sem que haja prejuízos na produtividade, além da possibilidade da substituição da fonte solúvel por uma de menor solubilidade, desde que essa fonte seja aplicada na dose recomendada. A redução da adubação gerou as maiores perdas de lucratividade no milho, principalmente se cultivado sob SPC, e o FNR aplicado na dose de 44 kg de P ha⁻¹ proporcionou lucratividades iguais ou superiores ao SFT na mesma dose. A menor dose de P resultou nas maiores eficiências de uso deste nutriente, que também foram acompanhadas pelos menores estoques de P nos sistemas, evidenciando que nem sempre as maiores eficiências de uso do P são acompanhadas das maiores produtividades e lucratividades.

5.2 INTRODUÇÃO

O Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil, abrangendo 11 estados além do Distrito Federal, e desde a década de 1980 a sua cobertura vegetal original vem sendo substituída por lavouras e pastos. De acordo com uma análise geoespacial de 2000/01 a 2013/14, a área cultivada com soja, milho e algodão passou de 9,33 para 17,43 Mha. Deste montante, cerca de 90% eram correspondentes às áreas de cultivo da soja (RUDORF et al., 2015).

A adoção de novas tecnologias e o avanço no conhecimento científico foram fundamentais para esta expansão da agricultura no Cerrado, de forma a se compreender as limitações das culturas às condições edafoclimáticas neste bioma, e a se alcançar soluções através da adoção de estratégias de manejo mais assertivas (CRUSCIOL et al., 2016).

Entretanto, ainda são várias as lacunas do conhecimento científico relacionadas ao manejo dos Latossolos, solos ácidos altamente intemperizados com elevado teor de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, que predominam neste bioma. Principalmente quando se trata do manejo de adubações corretivas e de manutenção com o fósforo (P), nutriente que tem uma forte interação com a matriz sólida desses solos (FINK et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2020).

O tipo de manejo do solo, a escolha da fonte, o modo de aplicação e doses de P a serem aplicadas, são decisões a serem tomadas pelo produtor que irão impactar diretamente na produtividade e lucratividade dos cultivos, bem como na sustentabilidade do sistema, principalmente quanto à eficiência de utilização do P que está sendo aplicado (HANSEL et al., 2017; HAOKIP et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2020; FREILING et al., 2022).

Estudos de longo prazo sobre o manejo do solo e da adubação fosfatada em solos tropicais, tendo por culturas a soja e o milho, são muito escassos e pouco vistos na literatura. Desta forma, as tomadas de decisões a partir de recomendações feitas por trabalhos científicos são adotadas com base em poucos anos de avaliação e se desconhecendo o efeito da estratégia a longo prazo.

Diante disto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da adoção de estratégias de manejo do solo e da adubação fosfatada envolvendo tipos de preparo do solo, espécies de plantas de cobertura na entressafra e fontes de fertilizante fosfatado aplicados em diferentes formas e doses. As hipóteses são de que o SPD com milheto, e a aplicação da maior dose de P com a fonte solúvel no sulco de plantio proporcionam as maiores produtividade e eficiência de uso deste nutriente em um experimento conduzido por 22 anos com cultivos de soja e milho em um Latossolo Vermelho distrófico, cuja fertilidade se encontrava inicialmente corrigida.

5.3 MATERIAL E MÉTODOS

- DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi instalado em 1999 e conduzido por 22 anos em uma área experimental do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), localizada em Planaltina – DF (latitude 15°36'06" S e longitude 47°42'26" W). O clima da região é do tipo Cwa segundo a classificação de Köppen com temperatura e precipitação médias anuais de 21,2 °C e 1570 mm, respectivamente, e altitude de 1014 m. Sendo característico desta região duas estações climáticas bem definidas, chuvosa de outubro a abril e seca de maio a setembro (Figura 1).

Esta região é caracterizada naturalmente pela vegetação do Cerrado no sentido restrito e por um relevo suave a ondulado com 3% de declividade, onde o experimento foi instalado em um Latossolo Vermelho distrófico, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (EMBRAPA, 2013), com teor médio de argila, silte e areia na camada de 0 a 20 cm de 571, 72 e 357 g kg⁻¹, respectivamente.

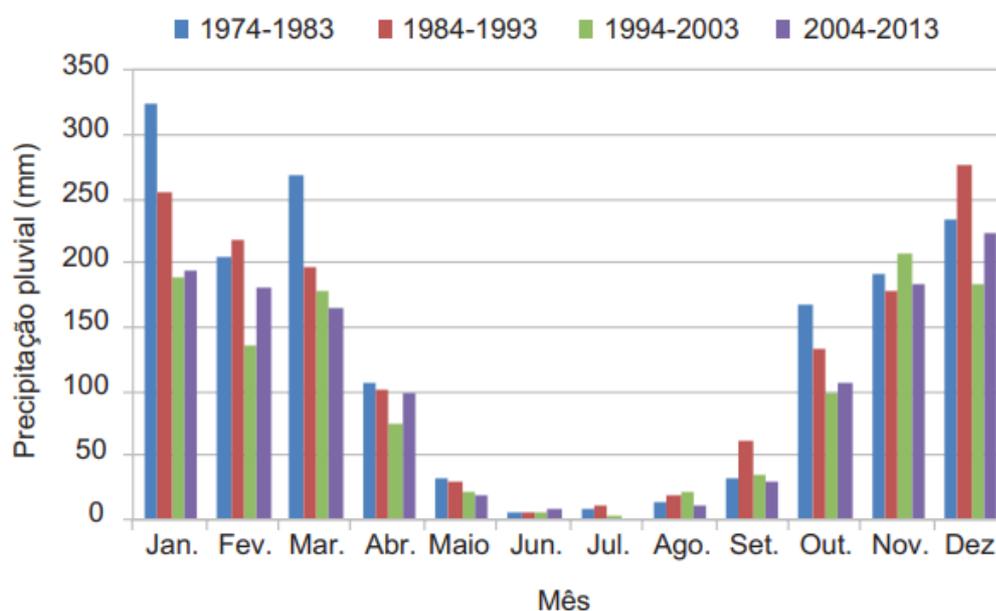


Figura 1. Precipitações médias mensais acumuladas (mm) por decênio, na estação principal da Embrapa Cerrados, localizada na região administrativa de Planaltina-DF. Fonte: Silva et al. (2017).

- HISTÓRICO DA ÁREA

Em 1976 a área foi desmatada para implantação de pastagem e para produção de grãos até 1996. No ano de 1996 a área passou por um preparo do solo, onde foi realizada a correção

da acidez e fertilidade do solo, com o objetivo de se alcançar altos rendimentos, conforme Sousa e Lobato (2004). Neste mesmo ano agrícola (1996/97) e no subsequente (1997/98), foi cultivada a soja em que se utilizaram as doses de 35 kg ha⁻¹ de P no sulco de plantio, 80 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio e 30 kg ha⁻¹ de S na forma de gesso aplicados a lanço. Na safra de 1998/99 foi cultivado o milho com a mesma adubação de K e S, mas com a adição de 150 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia e com a ausência da adubação fosfatada. Esses três cultivos mencionados tiveram como finalidade o conhecimento da variabilidade da área para se fazer a correta escolha do delineamento experimental e para construir um solo de elevada fertilidade, de modo a possibilitar o estudo do manejo do P nesta condição.

O experimento teve início na safra de 1999/2000, com os parâmetros químicos do solo dentro das faixas adequadas (Tabela 1), onde foi implementado uma sucessão soja-milho com plantas de cobertura sendo cultivadas na entressafra, semeadas no final da estação chuvosa e roçadas no momento do florescimento. As adubações com N, K e S foram realizadas nas mesmas doses aplicadas nos três anos anteriores e os tratamentos de P foram implantados. A partir do ano de 2008 as plantas de cobertura passaram a receber uma adubação de 45 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia, de modo a possibilitar uma maior produção de biomassa vegetal.

Tabela 1. Análise química do solo na camada de 0-20 cm antes da implantação do experimento.

pH	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	K ⁺	Al + H	CTC	V	P	COT
	-----cmol _c dm ⁻³ -----				%	mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹
5,40	4,54	0,15	3,66	8,35	56	10,50	13,34

Extratores: Ca + Mg (KCl 1 mol L⁻¹); P e K (Mehlich-1); Al + H (Acetato de cálcio 10,5 mol L⁻¹); COT (Walkley & Black).

Em consequência do fenômeno climático comum na região denominado de veranico, os cultivos de soja e milho receberam irrigação suplementar por aspersão em situações de seca durante a estação chuvosa. A irrigação era definida com base em leituras de tensiômetros instalados na área a 20 cm de profundidade no solo, onde a irrigação era sempre realizada quando o aparelho marcava uma pressão maior que 45 KPa. As plantas de cobertura também receberam irrigação no inverno, onde não houve limitação de água.

- DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com parcelas divididas, em que nas parcelas principais foram dispostos aleatoriamente três sistemas de manejo e nas

subparcelas (4,5 x 11 metros) as estratégias de adubação com P (Tabela 2).

O experimento consistiu em três sistemas de manejo: 1) sistema de preparo convencional, que compreendeu uma aração (arado de discos com profundidade ± 20 cm) e uma gradagem (grade niveladora), que foram realizadas todos os anos antes do plantio da soja ou do milho, e teve como planta de cobertura o milheto (*Pennisetum galucum*) (SPC); 2) sistema de plantio direto com o milheto como planta de cobertura (*Pennisetum galucum*) (SPD mil); 3) sistema de plantio direto com plantas leguminosas como planta de cobertura (SPD leg). Ao longo dos 22 anos houve o cultivo de diferentes espécies leguminosas neste sistema, em que se cultivou amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*), mucuna (*Mucuna aterrima*) e crotalária (*Crotalaria spectabilis*) (Tabela 3).

Em cada sistema foi disposto um fatorial que consistiu na utilização de duas fontes de fertilizante fosfatado: superfosfato triplo granulado (SFT) com 20,5% de P total, sendo 92% solúvel em CNA + água, e fosfato natural reativo (FNR) de Gafsa com 12% de P total, sendo 44% solúvel em ácido cítrico a 2% na relação 1:100 (fosfato moído (<0,063 mm), aplicados no sulco de semeadura ou a lanço, nas doses de 22 ou 44 kg ha⁻¹ de P total por ano, além de uma testemunha adicional (0 kg ha⁻¹ de P por ano, exceto aquele contido no gesso agrícola).

Tabela 02. Tratamentos conduzidos e avaliados dentro de cada parcela principal (sistema de cultivo).

TRATAMENTOS	FONTES	DOSES (kg P ha ⁻¹)	MODO DE APLICAÇÃO
1	-	0	-
2	SFT	22	Sulco
3	SFT	22	Lanço
4	SFT	44	Sulco
5	SFT	44	Lanço
6	FNR	22	Sulco
7	FNR	22	Lanço
8	FNR	44	Sulco
9	FNR	44	Lanço

SFT: superfosfato triplo

FNR: fosfato natural de alta reatividade

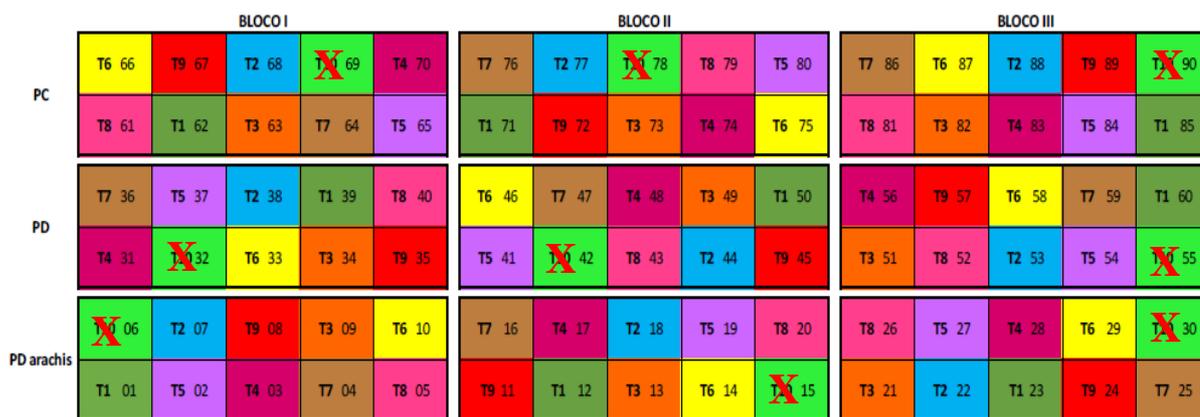


Figura 2. Croqui experimental apresentando a disposição dos tratamentos no campo.



Figura 3. Vista superior da área experimental.

Tabela 03. Histórico de culturas, cultivares de soja, híbridos de milho e eventos de calagem e gessagem ao longo dos 22 anos avaliados.

Ano	Safra	Cultura	Cultivar	Plantas de cobertura do SPD leg*
1	1999	Soja	Milena	Amendoim forrageiro (<i>Arachis pintoi</i>)
2	2000	Milho	-	Amendoim forrageiro (<i>Arachis pintoi</i>)
3	2001	Soja	Milena	Amendoim forrageiro (<i>Arachis pintoi</i>)
4	2002	Milho	30k75	Amendoim forrageiro (<i>Arachis pintoi</i>)
5	2003	Soja	Raimunda	Mucuna preta (<i>Mucuna aterrima</i>)
6	2004	Milho	-	Mucuna preta (<i>Mucuna aterrima</i>)
7	2005	Soja	Raimunda	Mucuna preta (<i>Mucuna aterrima</i>)
8	2006	Milho	30F35	Mucuna preta (<i>Mucuna aterrima</i>)
9	2007	Soja	Raimunda	Mucuna preta (<i>Mucuna aterrima</i>)
10	2008	Milho	30F53	Mucuna preta (<i>Mucuna aterrima</i>)
11	2009	Soja	BRSM 6850 GGR	Mucuna preta (<i>Mucuna aterrima</i>)
12	2010	Milho	30 F53	Mucuna preta (<i>Mucuna aterrima</i>)
13	2011	Soja	BRSGO 8660	Mucuna preta (<i>Mucuna aterrima</i>)
14	2012	Milho	30F53YH	Mucuna preta (<i>Mucuna aterrima</i>)
15	2013	Soja	BRS 8381	Mucuna preta (<i>Mucuna aterrima</i>)
16	2014	Milho	30P53 YH	Crotalária (<i>Crotalaria spectabilis</i>)

17	2015	Soja	8473 RSF RR	Crotalária (<i>Crotalaria spectabilis</i>)
18	2016	Milho	30 F53VYR	Crotalária (<i>Crotalaria spectabilis</i>)
19	2017	Soja	Desafio 8473RR	Crotalária (<i>Crotalaria spectabilis</i>)
20	2018	Milho	30 F53VYHR	Crotalária (<i>Crotalaria spectabilis</i>)
21	2019	Soja	desafio 8473 RSF	Crotalária (<i>Crotalaria spectabilis</i>)
22	2020	Milho	-	Crotalária (<i>Crotalaria spectabilis</i>)
23	2021	Soja	-	Crotalária (<i>Crotalaria spectabilis</i>)
24	2022	Milho	3703	Crotalária (<i>Crotalaria spectabilis</i>)

*No sistema de plantio convencional (SPC) e no sistema de plantio direto com milheto (SPD mil) em todos os anos foi cultivado o milheto (*Pennisetum galucum*).

- PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO

Em todos os anos a produtividade foi determinada conforme a colheita manual da área útil da parcela, desconsiderando linhas de borda e cerca de 1,5 m do início e final da parcela para diminuir os efeitos de contaminação dos tratamentos aos lados (Figura 4). A umidade dos grãos colhidos foi determinada e a produtividade calculada com base na umidade de 13%.

Na Figura 4 é apresentado um esquema representativo da colheita de soja, sendo o número de linhas a única diferença para o milho, pois o espaçamento para soja foi geralmente de 0,45 m e para milho foi de 0,70 m.

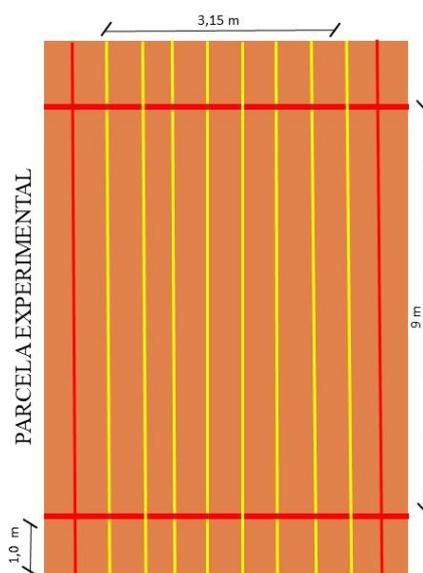


Figura 4. Esquema de vista superior da parcela evidenciando a área útil destinada a colheita de soja (delimitada pelas linhas vermelhas).

- DETERMINAÇÃO DA EXPORTAÇÃO DE P NOS GRÃOS

Os teores de P exportados nos grãos de milho foram determinados de acordo com Embrapa (2005).

- ESTIMATIVA DO BALANÇO E EFICIÊNCIA DE USO DO P

As diferenças entre as entradas anuais de P através dos fertilizantes fosfatados e a quantidade de P removidos pelas culturas foram utilizadas para estimar o balanço de P dos tratamentos avaliados após os 22 anos de condução do experimento.

Balanço de P = (Residual do ano anterior + entrada anual de P) – P exportado pelas culturas

- ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Foi realizada análise de variância para os dados de produtividade dos 22 anos, bem como para os dados de eficiência de uso.

Para análise de variância foi utilizado o seguinte modelo:

$$Y_{ijklm} = \mu + B_i + S_j + F_k + M_l + D_m + SF_{jk} + SM_{jl} + SD_{jm} + FM_{kl} + FD_{km} + MD_{lm} + SFD_{jkm} + SFM_{jkl} + MFD_{lkm} + SFMD_{jklm} + \text{erro}(ijklm).$$

onde: μ = média geral dos dados; B = bloco (i = 1,2,3); S = Sistema de preparo (j = 1,2); F = Fonte de fósforo (k = 1,2); M = Modo de aplicação (l = 1,2); D = dose (m = 1,2); Erro = erro experimental.

Quando a análise de variância apresentou significância, o teste de Tukey (p<0,05) foi utilizado para diferenciação das médias, e/ou quando necessário foi realizado o teste t de Student (p<0,05). Todos os procedimentos estatísticos foram realizados utilizando o programa R empregando-se o software R versão 4.0.2 (R Core equipe, 2020).

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

- EFEITO DAS ESTRATÉGIAS DE MANEJO NA PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO AO LONGO DOS 22 ANOS

Para que a descrição dos resultados seja clara, os efeitos das interações entre os fatores relacionados ao manejo do P serão abordados em tópicos. A saber que no **tópico (a)** será abordado o efeito do modo de aplicação, bem como sua interação com as doses de P; no **tópico (b)** serão apresentados os resultados das interações entre fontes e doses de P na produtividade média de soja e milho; no **tópico (c)** serão apresentados os resultados das interações entre os sistemas de manejo do solo e doses de P aplicadas; no **tópico (d)**, serão apresentados os resultados das interações entre sistemas, fontes e doses nas fases de soja e milho; no **tópico (e)**, serão apresentados os dados de produtividade relativa de soja e milho e lucratividade ao longo de 22 anos, e no **tópico (f)**, os dados de eficiência da taxa de recuperação de P e os estoques de P residual na média dos 22 anos avaliados.

a) Efeito do modo de aplicação do P e as suas interações com os demais aspectos do manejo

Apesar de existir uma polêmica generalizada quanto ao modo de aplicação do P, onde se utiliza de argumentos de como a aplicação localizada pode ser prejudicial à assimilação de P pelas plantas (FRANZINI et al., 2009; BASHIR et al. 2015, HANSEL et al., 2017), neste presente estudo, de modo geral, não foi observado diferenças significativas do modo de aplicação ao longo dos 22 anos, bem como não houve interação deste fator com as demais estratégias de manejo (Figura 5).

A preocupação do impacto negativo na produtividade de um modo de aplicação em relação ao outro é sustentada pela aplicação localizada de P à lanço na superfície, onde o P se limitaria a uma estreita camada superficial de solo que poderia levar a uma baixa eficiência de assimilação do nutriente pelas plantas, problema este que é minimizado em uma aplicação no sulco próximo às raízes da planta, o que também limitaria a adsorção de P pelo solo. Entretanto, Nunes et al. (2011) demonstraram pela análise do P disponível por Bray-1 que em SPD conduzido por 11 anos, mesmo o P sendo aplicado à lanço ou no sulco, este não se limitou estritamente a estas regiões porque houve uma redistribuição do P ao longo do perfil de solo explorado pelas raízes.

Alam et al. (2018) também concluíram em seu estudo que a maior concentração de P e de raízes na camada de 0-6 cm com o modo de aplicação na superfície e ao lado da linha

semeadura não resultou em perdas de produtividade de milho em relação aos outros modos de aplicação, pelo contrário, resultou nos maiores rendimentos e maior absorção de P. Também Coelho et al. (2019) constataram que mesmo o P sendo aplicado em profundidade, a absorção pela soja e pelo milho foi mais ativa na camada de 0-7,5 cm.

Além disso, este resultado pode ser justificado pelo fato do experimento ter sido estabelecido em um solo cujo o teor inicial de P se encontrava acima do nível crítico (10 mg kg⁻¹ por Mehlich-1), sendo esta uma condição em que muitos trabalhos já demonstraram não haver diferenças de rendimentos entre os modos de aplicação. E por isto, era esperado que em doses acima da exportação de P pelos grãos, como a de 44 kg ha⁻¹, não se observasse diferenças entre os modos (RANDALL; HOEFT, 1988; OLIVEIRA JUNIOR et al., 2008; NUNES et al, 2011; FREILING et al., 2022). Mas isto não é verdade quando se trata de doses abaixo da exportação que levam a reduções gradativas dos teores de P ao longo dos anos para abaixo do nível crítico, como a de 22 kg de P ha⁻¹, sendo esperado que a aplicação de P no sulco apresentasse rendimentos superiores (FREILING et al., 2022). Todavia, também nessa condição não foi observado diferenças entre os modos de aplicação.

Freiling et al. (2022) realizaram uma metanálise envolvendo 407 comparações entre a aplicação a lanço do P, no sulco e em faixas profundas de 37 estudos. Para a soja não foi observado diferenças entre os rendimentos alcançados à lanço e no sulco, desde solos que apresentaram teores baixos a solos com teores adequados de P.

Também para o milho, Freiling et al. (2022) não observaram diferenças significativas, contudo se observou uma tendência de diferenciação em condições de baixos teores de P e condições de seca, mas não significativa, com o sulco apresentando vantagens. Os autores citaram as associações micorrízicas como um possível fator de aumento da eficiência de absorção, juntamente com alterações morfológicas e fisiológicas no sistema radicular que ocorreram de modo a superar as possíveis limitações apresentadas por um e outro modo, e por isto não foi possível detectar diferenças nos rendimentos.

Mas vale ressaltar que a metanálise de Freiling e colaboradores (2022) concluiu que em condições de seca, a aplicação de P no sulco resultou em maiores produtividades das culturas avaliadas (soja, milho, trigo e colza), não sendo possível verificar este efeito neste estudo, uma vez que houve irrigação suplementar nas ocasiões de veranico. Apesar disto, Hansel et al. (2017) ao avaliarem o efeito do modo de aplicação na produtividade de soja submetida a estresses hídricos, não observaram diferenças de produtividade entre a aplicação a lanço e na condição de sulco de semeadura similar à utilizada neste estudo.

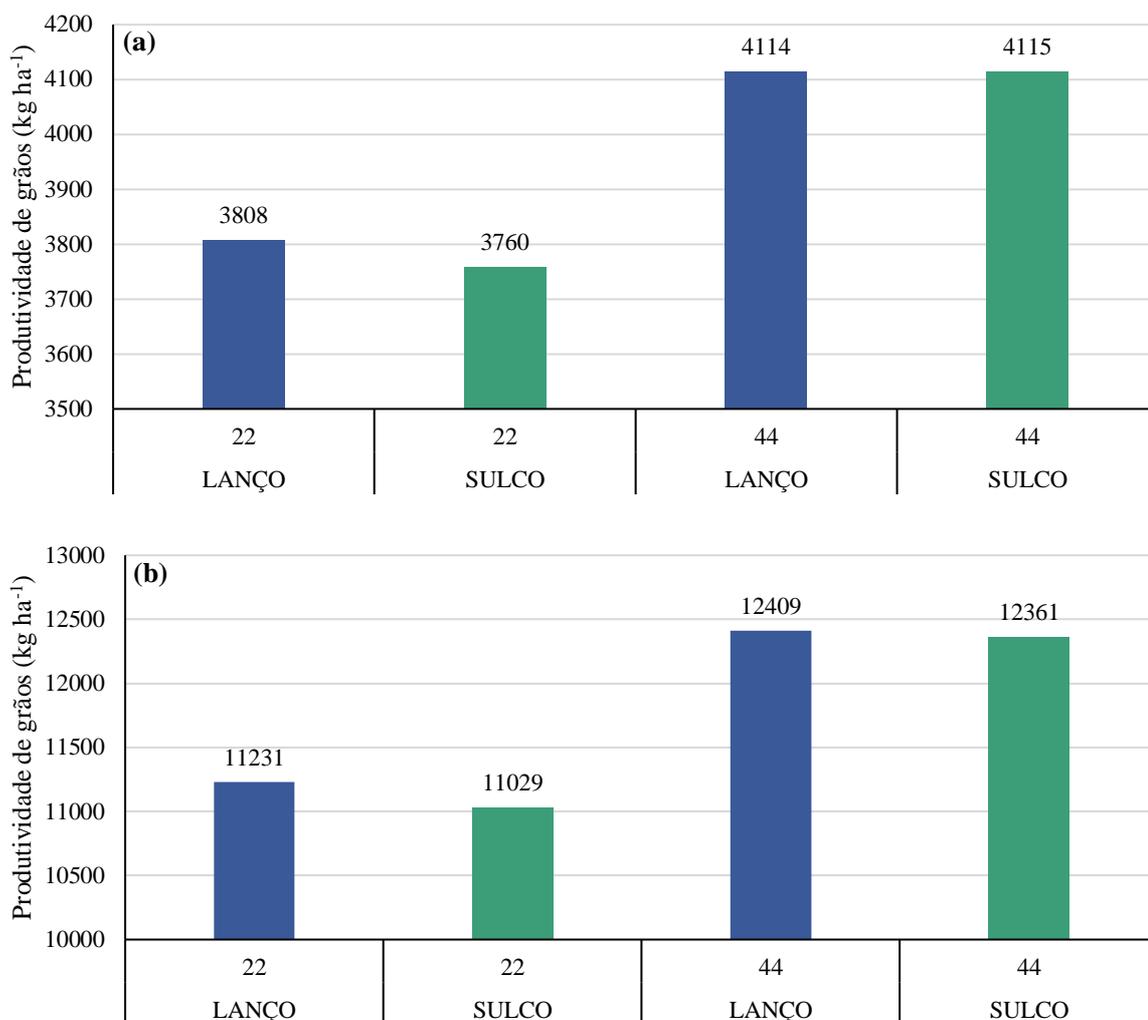


Figura 5. Produtividade média de grãos de soja (a) e milho (b) kg ha⁻¹ ao longo dos 22 anos de cultivos (11 anos de cultivos de soja e 11 anos de cultivos de milho) em função de diferentes modos de aplicação e doses de P em kg ha⁻¹. Não houve diferença significativa no teste F ($p > 0,05$).

b) Efeito da interação entre fontes e doses de P na produtividade média de soja e milho

De modo geral, na média dos 3 sistemas, para a cultura da soja o SFT na dose de 22 kg de P ha⁻¹ possibilitou um alcance maior de produtividade média dos 11 cultivos avaliados em comparação ao FNR na mesma dose (Figura 6). Em contrapartida, não houve diferenças entre as fontes quando estas foram aplicadas na dose de 44 kg de P ha⁻¹. Para a cultura do milho, na média dos 11 cultivos houve uma superioridade do SFT em relação ao FNR nas duas doses avaliadas ($p < 0,05$).

Diferenças de produtividades de soja proporcionadas por estas fontes contrastantes em sua solubilidade e velocidade de reação no solo, são comumente observadas apenas em solos com teores abaixo do nível crítico e com estoques de P muito baixos, como o observado por Coutinho et al. (1991), Silva et al. (2009), Caires et al. (2017), Oliveira et al., (2020) e Amorim (2020).

Entretanto, vale ressaltar que com base nos valores de P resina apresentados na Figura A1 o FNR proporcionou teores frequentemente mais altos e acima do nível crítico quando comparado ao SFT, o que não explicaria a menor produtividade alcançada por este. Todavia, a metodologia do P disponível por resina mista, a qual foi utilizada nas determinações ao longo do tempo, além de envolver etapas de agitações que podem levar a solubilização de partículas não reagidas de FNR (TEIXEIRA et al., 2017), também pode superestimar a disponibilidade de P devido ao seu efeito de dreno do Ca, o qual está presente em partículas não reagidas, tendo por consequência a disponibilização do fosfato antes ligado a este (ROBINSON; SYERS, 1990; FREITAS, 2012; SOUZA et al., 2014). Isto sugere que o FNR na realidade proporcionou menor disponibilidade de P quando comparado ao SFT, o que justifica a menor produtividade alcançada com este.

Em contrapartida, teores acima do nível crítico foram alcançados quando a dose de 44 kg de P ha⁻¹ foi empregada, sendo isto corroborado pela ausência de diferença nas produtividades encontradas com o uso do SFT e FNR nesta dose. Muitos são os trabalhos que demonstram pouca responsividade da soja em relação a fontes e doses de P quando o solo já se encontra corrigido (ANTONANGELO et al., 2019; AMORIM, 2020), aliado à sua menor exportação de P por unidade de massa de grãos e maior eficiência de assimilação de P por unidade de raiz em relação ao milho (FERNANDEZ; RUBIO, 2015).

Khan et al. (2020) ao realizar uma revisão sobre o efeito do P na produtividade da soja, constatou nos trabalhos mencionados, que de modo geral, a soja tem aumentos consistentes de produtividade até a dose de 26 kg de P ha⁻¹, e após esta não se observa efeitos do P aplicado. O que corrobora com os resultados apresentados.

Já para a cultura do milho, nas duas doses avaliadas, o uso de FNR resultou em perda de produtividade em relação ao SFT. Isto possivelmente ocorreu devido às maiores extrações e exportações de P pelo milho em comparação com a soja (Tabela A4), de modo em que a menor solubilidade do FNR não forneceu quantidades satisfatórias de P para a planta, conduzindo a menores teores de P disponível no solo, se considerado o problema metodológico citado da resina mista.

Na literatura é frequentemente observado que a aplicação dos FN's leva a reduções de produtividade e de seus componentes de produção, principalmente em culturas cereais, quando comparados aos fosfatos solúveis. Por outro lado, de modo geral não são observadas grandes diferenças quando cultivadas plantas leguminosas (GOEDERT et al., 1986; CHIEN; MENOR, 1995; RESENDE et al., 2006; FRANZINI et al., 2009; VELOSO et al., 2016). Isto foi o que ocorreu neste estudo, uma vez que, comparativamente, soja e milho apresentaram diferentes respostas às fontes e doses de P, principalmente na dose mais elevada. Sabe-se que doses mais elevadas de FNR têm a sua dissolução mais retardada (KORNDÖRFER et al., 1999), principalmente se aplicado de forma localizada, onde os elevados teores de Ca oriundo da dissolução das partículas torna-se um fator determinante para a diminuição da velocidade de dissolução. Raij e Van Diest (1979) concluíram que a soja é mais eficiente em ser um dreno de Ca quando se compara ao milho, tendo por consequência o aumento da dissolução do FNR, o qual favorece a maior eficiência agrônômica nesta cultura.

Em relação ao efeito das doses para cada fonte avaliada, de modo geral, a dose de 44 kg de P ha⁻¹ proporcionou maiores produtividades quando comparada à dose de 22 kg de P ha⁻¹, independente da fonte e da cultura avaliada ($p < 0,05$) (Figura 6). Contudo, vale ressaltar que as diferenças de produtividade entre essas doses foram mais acentuadas no milho em comparação à soja, apesar de ambos serem significativos. Houve um ganho médio por safra de 1.030 e 1480 kg de grãos ha⁻¹ de milho quando se partiu da dose de 22 para 44 kg de P ha⁻¹ através do SFT e FNR, respectivamente. Para soja, esses incrementos foram de 238 kg e 423 kg de grãos ha⁻¹ para SFT e FNR, respectivamente. Em todos estes casos evidencia-se um maior incremento quando se dobrou a dose do FNR, onde a menor solubilização deste é compensada no ato de dobrar a dose, o que não ocorre com o SFT, por exemplo.

A menor resposta da soja ao aumento das doses de P encontradas neste estudo corrobora com os resultados de Antonangelo et al. (2019), que avaliaram 20 anos de cultivos de soja submetida a diferentes doses de P que variaram de 0 a 22 kg de P ha⁻¹ em um solo com disponibilidade de P adequada. Os autores também observaram poucos incrementos de produtividade com o aumento da dose e concluíram que houve resposta significativa apenas até 9 kg de P ha⁻¹, não havendo incrementos de produtividade a partir desta dose.

Veloso e colaboradores (2016) observaram respostas crescentes de produtividade de milho às doses de P que variaram de 0 a 31 kg ha⁻¹ utilizando diferentes fontes em um solo com baixa disponibilidade de P. A maior produtividade alcançada neste estudo de Veloso e colaboradores (2016) foi com a dose de 31 kg de P ha⁻¹ com o SFT, uma vez que o solo não se

encontrava com teores adequados de P, e por isso a cultura respondeu até doses mais elevadas. Já Bashir et al. (2015), ao avaliarem uma curva de resposta com doses até 56 kg de P ha⁻¹, encontraram maiores produtividades e outras medidas biométricas de trigo também com a dose de 44 kg de P ha⁻¹.

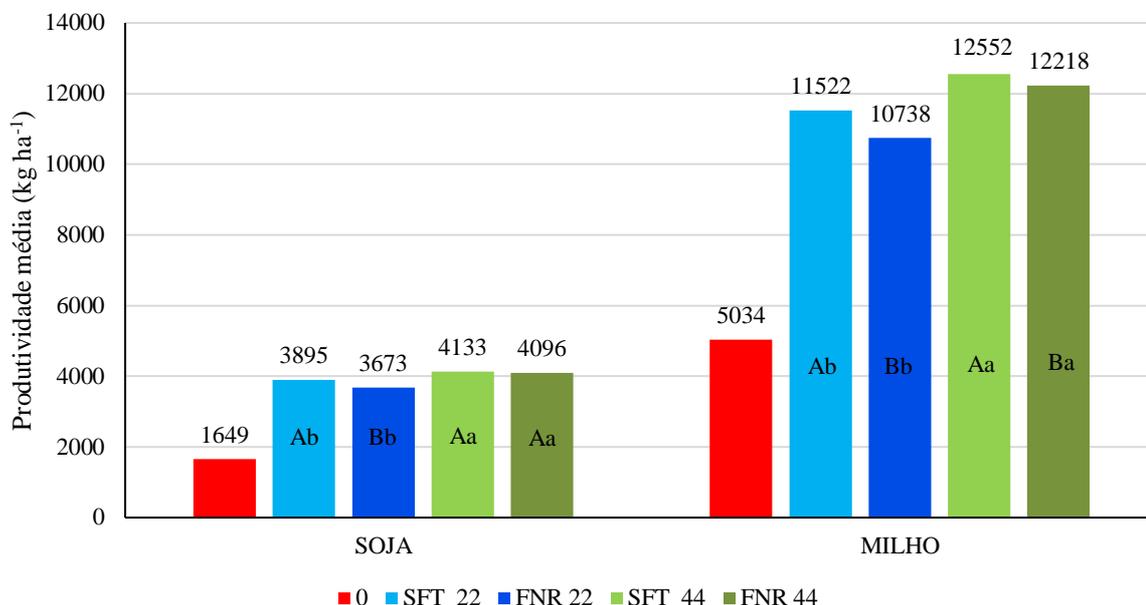


Figura 6. Produtividade média de grãos de soja e milho kg ha⁻¹ ao longo dos 22 anos de cultivos (11 anos de cultivos de soja e 11 anos de cultivos de milho) em função de diferentes fontes e doses de P em kg ha⁻¹. Letras maiúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para cada dose, e letras minúsculas correspondem a diferenças entre as doses para cada fonte pelo teste de Tukey (p < 0,05).

c) Efeito da interação entre os sistemas de manejo do solo e doses de P aplicadas

É sabidamente conhecido que os sistemas de manejo podem impactar positiva ou negativamente as estratégias de manejo da adubação com o P, principalmente a dose aplicada. Por isto, a Figura 7 apresenta resumidamente os dados médios de produtividade de soja e milho para os sistemas de manejo do solo em função das doses de P aplicadas.

Para a cultura da soja, não houve interações significativas entre os tipos de sistemas de manejo do solo e as doses de P aplicadas. Para a cultura do milho, contudo, tal interação foi significativa, de modo que na dose de 22 kg P ha⁻¹ houve uma maior produtividade do SPD mil quando comparado ao SPC, mas estes não se diferenciaram estatisticamente do SPD leg (Figura 7).

Este resultado vem para consolidar ainda mais a baixa resposta da soja às estratégias de manejo, que mesmo em condições de baixas doses de P de manutenção, não apresenta diferenças de produtividade nos diferentes sistemas de manejo do solo aqui conduzidos.

O milho, por ser uma cultura com maior potencial produtivo e consequente maior exportação de P, foi responsivo quando conduzido sob diferentes manejos do solo, especialmente em baixas doses como a de 22 kg de P ha⁻¹. Dose esta, que em um SPC, pode ter grande parte do P susceptível a passar para frações de menor labilidade, diminuindo a sua disponibilidade quando comparado a um SPD (FINK et al., 2016; TIECHER et al., 2018), como o presente caso.

Já em um cenário de doses mais elevadas como a de 44 kg de P ha⁻¹, o SPC promoveu a maior produtividade em relação ao SPD leg, enquanto o SPD mil não se diferenciou destes dois (p<0,05).

Em um cenário de não limitação quanto a nutrição do P, como no caso de doses elevadas, as diferenças de produtividade encontradas nos sistemas podem ocorrer devido às limitações próprias destes sistemas, como a compactação e acidez subsuperficial que frequentemente é encontrada no SPD (BEUTLER et al., 2001; CORTEZ et al., 2019), que em contrapartida não são observadas na camada arável de um SPC, o que pode justificar os melhores resultados apresentados por este.

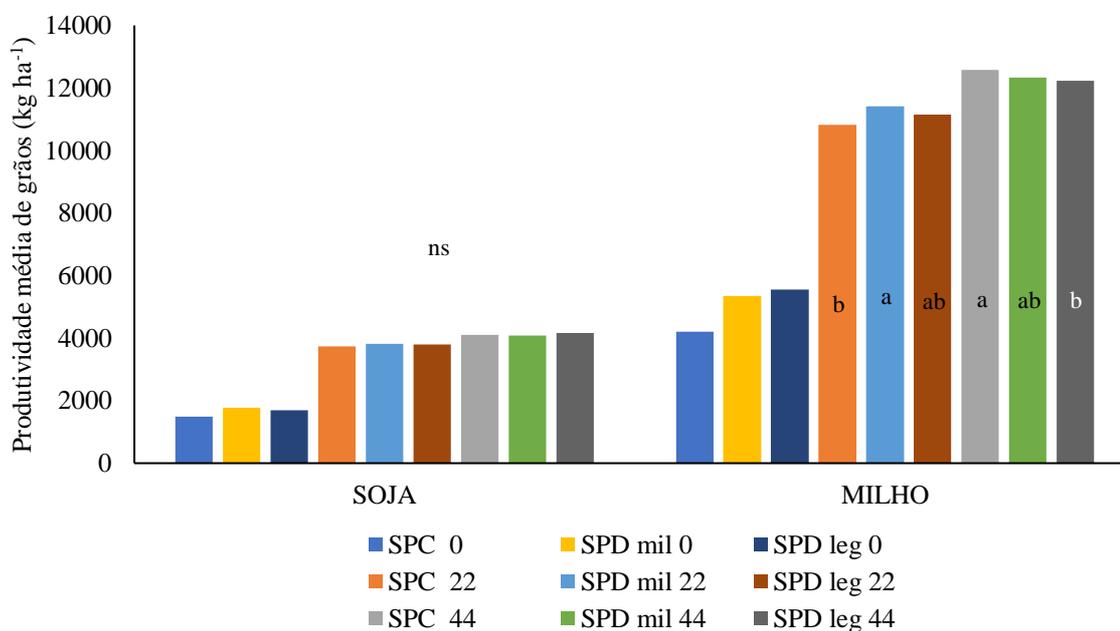


Figura 7. Produtividade média de grãos de soja e milho (kg ha⁻¹) dos 22 anos de cultivos (11 anos de cultivos de soja e 11 anos de cultivos de milho) em função de diferentes sistemas de

manejo do solo e doses de P em kg ha⁻¹. Letras correspondem a diferenças entre os sistemas de manejo do solo para cada dose pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

d) Efeito da interação entre sistemas, fontes e doses de P nas fases de soja e milho

Para compreender como os sistemas de manejo do solo conduzidos interferiram na resposta de soja e milho às fontes e doses de P aplicadas ao longo do tempo, os 22 anos foram divididos em fases, onde cada fase correspondeu a média de três cultivos da cultura em questão, com exceção apenas da última fase que contemplou apenas dois cultivos (Figura 8).

Não houve interação significativa entre os sistemas, fontes e doses nas fases 1 e 3 da soja, bem como para as fases 1 e 2 do milho ($p < 0,05$). Nestas fases ou se observou apenas o efeito simples de fonte e/ou dose ou ausência de qualquer efeito, os quais serão abordados e explanados no tópico seguinte. Os efeitos dos sistemas em relação às diferentes estratégias de manejo ocorreram apenas na fase 2 e 4 da soja e nas fases 3 e 4 do milho ($p < 0,05$).

Quando o SFT foi aplicado na dose de 22 kg de P ha⁻¹, não houve diferenças entre os sistemas na fase 2 da soja, contudo na fase 4 essas diferenças surgiram, de modo que o SPC apresentou a menor produtividade quando comparado aos dois SPD's (SPD mil e SPD leg).

Tal resultado evidencia bem o efeito do revolvimento do solo a longo prazo na soja, de modo a aumentar a intensidade das reações de adsorção do P diminuindo a sua disponibilidade e levando a reduções de produtividade (SOUSA et al., 1987; CHIEN; MENOR, 1995; FRANZINI et al., 2009; FINK et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2019).

Mas vale ressaltar que tal fato não ocorreu nas fases iniciais, provavelmente devido ao menor efeito da depleção dos estoques de P nestas fases iniciais, aliado à menor exigência de P pela soja (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2010), além de possíveis mecanismos de aumento da eficiência de absorção pela planta, como alterações morfológicas e fisiológicas no sistema radicular, produção de fosfatases e associações micorrízicas (FERNANDEZ; RUBIO, 2015; MALTAIS-LANDRY et al., 2015).

Quando considerado ainda a dose de 22 kg de P ha⁻¹, mas utilizando o FNR, na fase 2 da soja o SPD mil promoveu a maior produtividade em relação ao SPD leg. Já na fase 4 da soja, o SPC promoveu a maior produtividade em relação aos dois SPD's.

Ao contrário do que ocorreu com o SFT aplicado na dose de 22 kg de P ha⁻¹ no SPC, o revolvimento do solo aumenta a solubilização do FNR que tem como consequência a tendência de apresentar maiores rendimentos neste sistema em relação aos SPD's avaliados,

principalmente nas últimas fases (SOARES et al., 2000; CHIEN; MENON, 1995; FRANZINI et al., 2009).

Já na dose de 44 kg de P ha⁻¹, na fase 02 da soja, o SPD leg promoveu a maior produtividade quando o SFT foi utilizado, enquanto para o FNR, o SPC e o SPD leg promoveram as maiores produtividades. Já na fase 04, não houve diferenças entre os sistemas, para ambas as fontes.

Para a cultura do milho, quando o SFT foi aplicado na dose de 22 kg de P ha⁻¹, tanto na fase 3 como na fase 4, o SPC promoveu a menor produtividade quando comparado aos SPD'S, semelhante ao que ocorreu na fase 02 da soja, mas sendo um resultado bastante consistente para o milho. Já o FNR nesta mesma dose, nas fases 3 e 4, não apresentou diferenças significativas entre os sistemas.

O uso de uma dose mais baixa de um fosfato mais solúvel aliado ao revolvimento do solo, consistentemente reduziu a produtividade do milho em um cenário de baixos estoques de P no sistema, sendo estas condições favoráveis para o aumento da taxa de indisponibilização do P, a qual foi sentida com a resposta de redução da produtividade do milho (FINK et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2019).

A aplicação do SFT na dose de 44 kg de P ha⁻¹ apresentou diferenças apenas na fase 3 do milho, em que o SPC promoveu a maior produtividade e este foi estatisticamente superior apenas ao SPD mil. Com uso de uma dose acima da exportação e de uma fonte solúvel de P, espera-se que diferenças de produtividade entre os sistemas de manejo não ocorram em relação ao manejo propriamente dito do P, mas sim em relação a aspectos relacionados ao próprio sistema de manejo do solo. Nestas condições ideais de manejo do P, o SPC pode apresentar vantagens em relação ao SPD, relacionadas a menores níveis de compactação e conseqüentemente, menor impedimento físico ao desenvolvimento das raízes (BEUTLER et al., 2001; PEIXOTO et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2021).

Diferenças pontuais entre o SPD mil e SPD leg foram observadas nas fases de soja e milho, o que pode estar relacionado aos diferentes aportes de biomassa vegetal, relação C/N, perfis de produções de enzimas e ácidos orgânicos diferenciados, fazendo com que pudessem ocorrer diferentes efeitos ao longo dos anos (PAVINATO et al., 2008; PAVINATO et al., 2017; ANSCHAU et al., 2018).

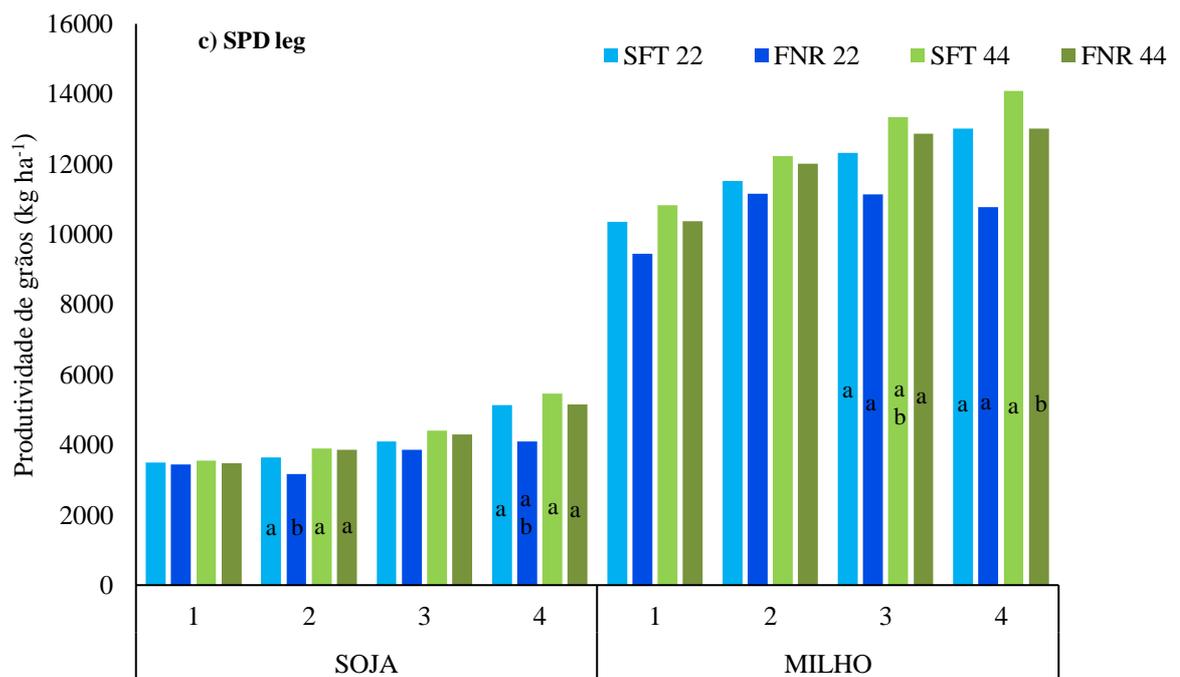
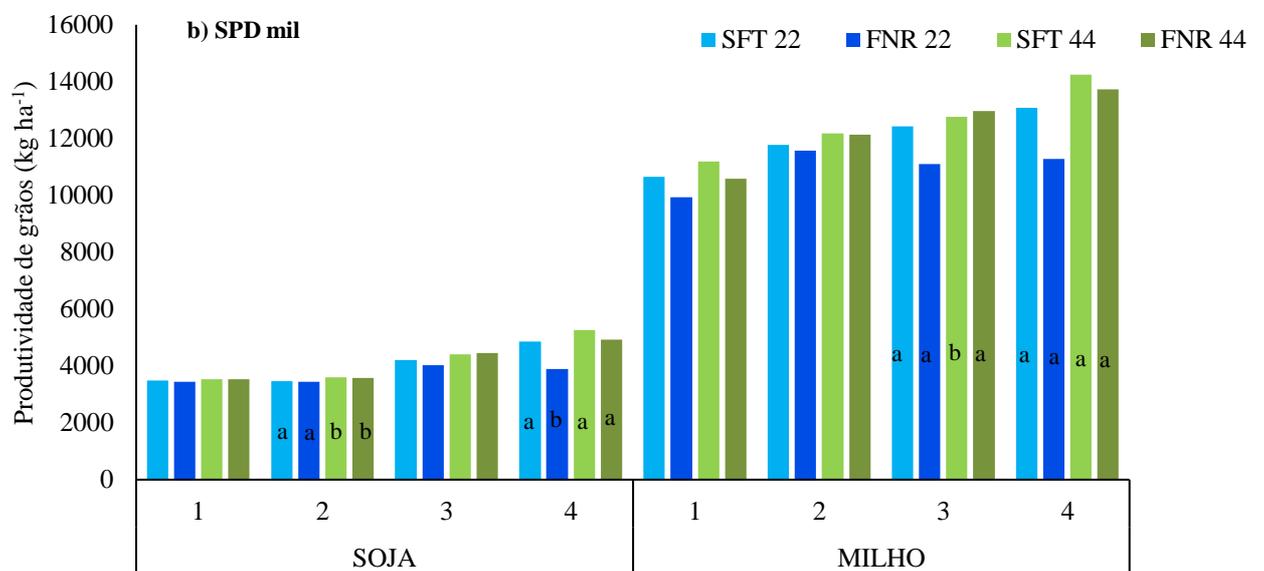
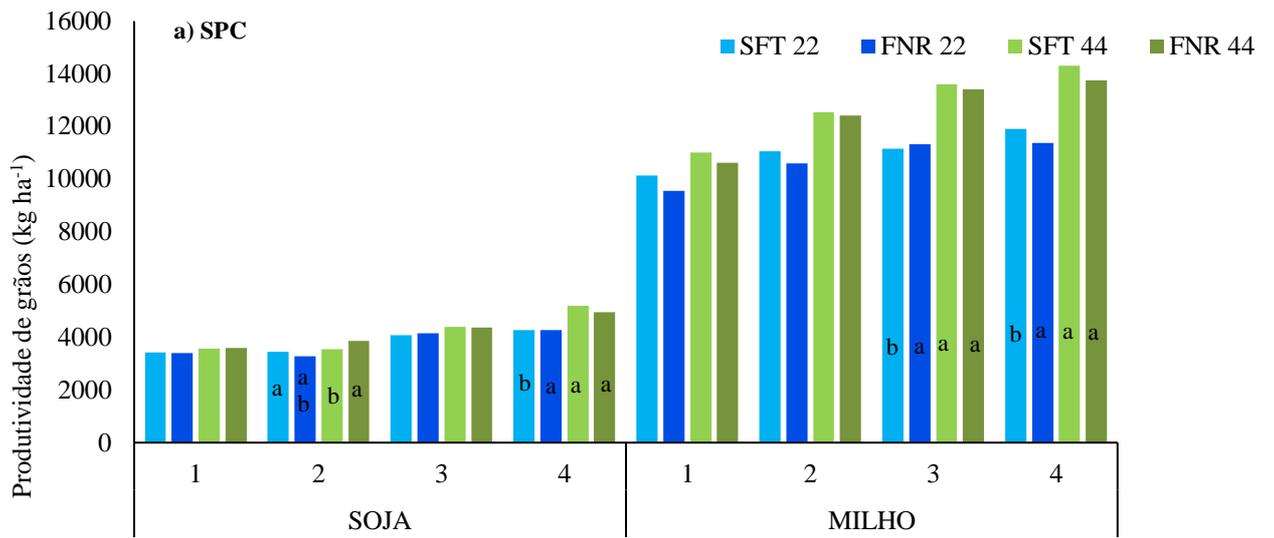


Figura 8. Produtividade de grãos de soja e milho kg ha^{-1} no (a) sistema de plantio convencional com a planta de cobertura milheto (SPC); (b) no sistema de plantio direto com a planta de cobertura milheto SPD mil e (c) no sistema de plantio direto com a planta de cobertura sendo uma leguminosa SPD leg em função de diferentes fontes e doses de P em kg ha^{-1} (22 e 44 kg de P ha^{-1}). Letras correspondem a diferenças entre os sistemas para cada nível de fonte e dose, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

e) Produtividade relativa e lucratividade de soja e milho ao longo de 22 anos

Para se avaliar o potencial das fontes e doses, especialmente de estratégias de manejo alternativas e diferentes do recomendado, foram tomadas como referências de produtividades para soja e milho os valores de 4000 kg ha^{-1} e 12000 kg ha^{-1} , respectivamente, e lhes foi atribuído os valores de 100% (Figura 9). Deste modo foi possível se avaliar o potencial das estratégias de manejo ao longo do tempo para ambas as culturas e como estas se diferenciaram entre si a cada ano. E como não houve diferenças entre os modos de aplicação ($p < 0,05$), para estes resultados, foram tomados apenas os dados dos tratamentos aplicados no sulco de semeadura.

Em todos os 3 sistemas de manejo do solo houve reduções gradativas de produtividade com a interrupção da adubação fosfatada no tratamento controle, que se perdurou ao longo dos 22 anos avaliados. Partindo de um solo corrigido (com $10 \text{ mg de P Mehlich-1 dm}^{-3}$), no primeiro ano de cultivo da soja e no segundo ano de cultivo do milho, o controle apresentou uma produtividade média de 77% e 69%, respectivamente (Figura 9).

Em todos os sistemas, de modo geral, até o quinto cultivo de soja no SPC e SPD mil, e terceiro cultivo no SPD leg, não houve diferenças de produtividade entre as doses de P aplicadas (Figura 9 e Tabelas A1, A2 e A3). Entretanto, as diferenças surgiram frequentemente nos últimos anos em todos os sistemas de manejo do solo avaliados ($p < 0,05$). Quanto ao efeito das fontes, de modo geral, não foi observado diferenças entre o SFT e o FNR no SPC, mas foi observado mais consistentemente nos últimos anos do SPD mil e do SPD leg, onde o SFT promoveu a maior produtividade quando comparado ao FNR.

Apenas no 7º, 9º e 13º ano da soja no SPC, 21º ano no SPD mil, e 19º e 21º ano no SPD leg, foi observado interações entre fontes e doses de P ($p < 0,05$). Sendo que de modo geral, a interação observada foi o FNR na dose de $22 \text{ kg de P ha}^{-1}$ reduzindo a produtividade e se diferenciando dos demais tratamentos.

Para o milho, em todos os anos do SPC, a partir do 6º ano (ou 3º cultivo) do SPD mil e a partir do 4º ano (ou 2º cultivo) do SPD leg, houve efeito de dose, independente das fontes, com a dose de 44 kg de P ha⁻¹ promovendo maior produtividade quando comparada a dose de 22 kg de P ha⁻¹. Já em relação ao efeito das fontes, apenas no 4º, 8º e 20º ano do SPC, nos dois últimos anos do SPD mil (20º e 22º anos), e do 16º ao 22º ano do SPD leg, houve diferenças entre as fontes, com o SFT promovendo maior produtividade quando comparado ao FNR.

Não houve interações entre fontes e doses de P no milho em nenhum ano avaliado do SPC e do SPD leg, enquanto no SPD mil ocorreu apenas no 18º e 20º ano, ocorrendo reduções de produtividade apenas quando o FNR foi utilizado.

De modo geral em todos os sistemas de manejo do solo conduzidos, a cultura da soja pouco teve a sua produtividade influenciada pelas fontes, e demorou alguns cultivos para demonstrar reduções de produtividade quando a dose utilizada foi a de 22 kg de P ha⁻¹. Isto é particularmente importante porque evidencia que partindo de um solo corrigido, dentre as estratégias de manejo da adubação de P, pode-se realizar ajustes para a cultura da soja por alguns cultivos, uma vez que nem mesmo a redução da adubação e/ou a substituição de fonte solúvel (SFT) por de menor solubilidade (FNR) foi capaz de reduzir a produtividade nos cultivos iniciais, e se distinguir do tratamento que é considerado o recomendado e o mais utilizado pelos produtores, o SFT e a dose de 44 kg de P ha⁻¹. E mesmo em um cenário de longo prazo, as esporádicas ocasiões de perda de produtividade com o uso do FNR ocorreram apenas quando este foi aplicado na menor dose.

Santini et al. (2019) também não verificaram resposta na produtividade de soja em um solo com alta disponibilidade de P a doses de 0 a 104 kg de P ha⁻¹ como SFT, assim como o observado neste estudo. Assim como Brasil et al. (2013) não verificaram diferenças de produtividade de soja com 60% e 120% da dose recomendada em um solo também corrigido quanto ao nível crítico de P. Contudo, mesmo em um solo com baixa disponibilidade de P, Ono et al. (2009) não verificaram interações significativas entre fontes e doses até 224 kg de P ha⁻¹.

Diferentemente da soja, o milho foi mais responsivo em relação às doses, sendo que já no primeiro cultivo do SPC, segundo cultivo do SPD leg e terceiro cultivo do SPD mil, apresentou reduções de produtividade quando aplicada a dose de 22 kg de P ha⁻¹.

Apesar da soja exportar mais P por unidade de massa de grãos, o milho apresenta uma produção muito mais elevada em relação a soja, o que leva a uma maior exigência de P, que não foi suprida pela menor dose, levando a reduções de produtividade. Sendo que dentre os sistemas, a dose de 22 kg de P ha⁻¹ conseguiu sustentar até mais tardiamente a produtividade do milho no SPD mil.

Vale ressaltar que de acordo com o manual de recomendações de corretivos e fertilizantes para o Cerrado (SOUSA; LOBATO, 2004), a dose de 44 kg de P ha⁻¹ seria recomendada em condições de adequada disponibilidade deste nutriente, como a condição em que o experimento foi implantado, enquanto a dose de 22 kg de P ha⁻¹, seria a recomendada para solos com alta disponibilidade de P. Diante disto foi possível observar que a dose de 44 kg de P ha⁻¹ ao longo do tempo possibilitou aumentos nos estoques de P no solo (Figura 12), e conseqüentemente, aumentos nos teores de P disponível (Figura A1), de modo a alterar a classificação do solo para a categoria de alta disponibilidade de P, e a partir disto, poderia-se reduzir a adubação pela metade.

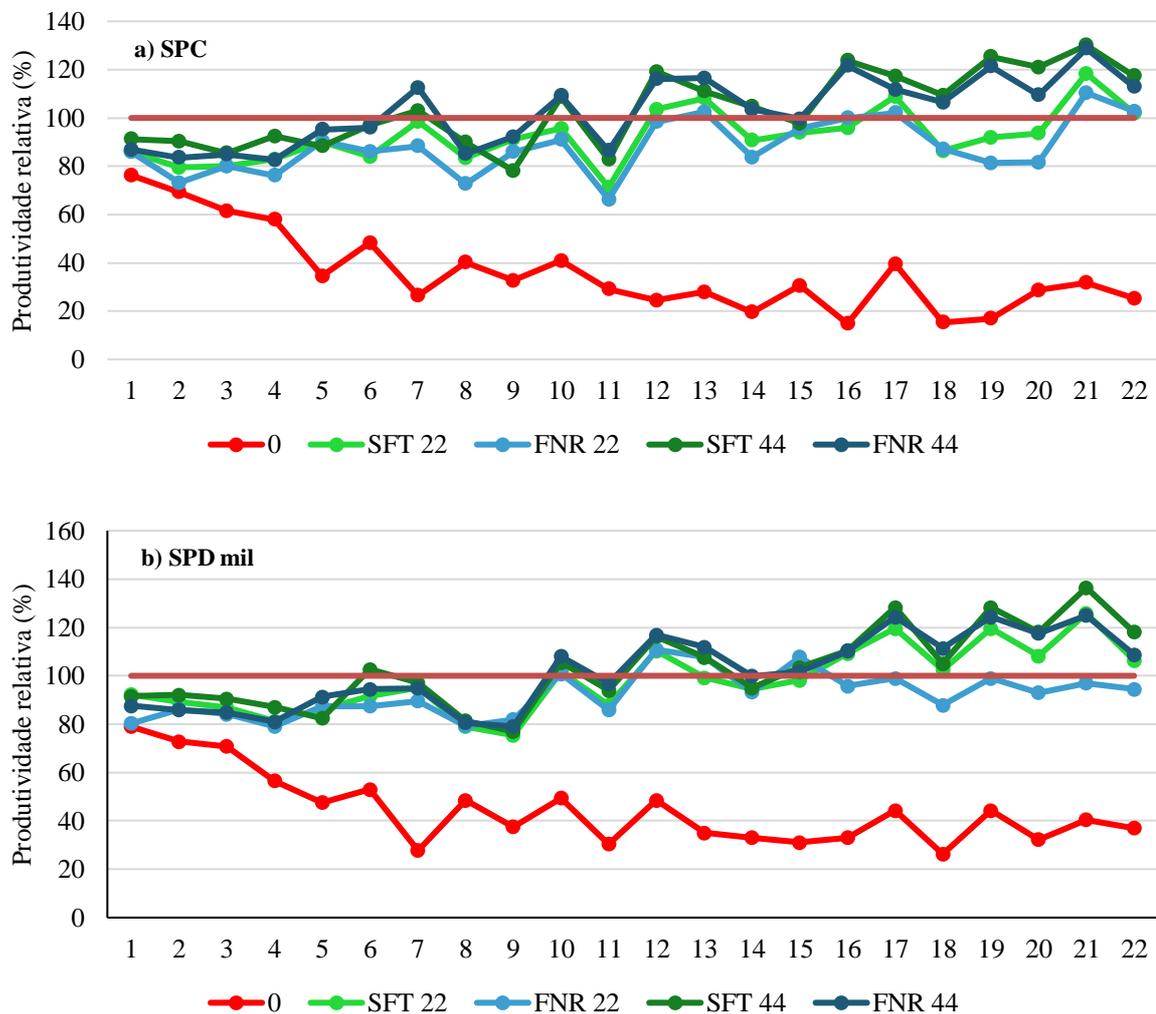
Entretanto, isto não foi o observado para a cultura da soja, uma vez que mesmo em um solo com adequada disponibilidade, a dose de 22 kg não reduziu a produtividade em relação à recomendada.

Quanto ao efeito da fonte, o milho perdeu produtividade consistentemente apenas nos últimos anos, especialmente nos SPD's avaliados, com a aplicação do FNR em comparação ao SFT. Possivelmente este resultado é explicado pela menor solubilização do FNR, principalmente se aplicado localizado e sem o revolvimento do solo (CHIEN et al., 2010), que ao longo do tempo foi disponibilizando menores quantidade de P disponível, de modo que a cultura foi assimilando parte do P nativo, até o ponto de se tornar insustentável nos anos finais avaliados.

Diogenes (2015) também observou diferenças de produtividade de milho entre o SFT e o FNR de Arad apenas no primeiro cultivo avaliado em um solo com baixa disponibilidade de P. Entretanto, quando considerado o efeito das doses neste estudo de Diogenes (2015), o milho respondeu até 52 kg de P ha⁻¹ no primeiro ano com ambas as fontes, mas no segundo ano avaliado, a resposta máxima alcançada do FNR foi com a dose de 70 kg de P ha⁻¹. Isto demonstrou a necessidade de doses mais elevadas do FNR para se equivaler em produtividade ao SFT, e isto corrobora aos resultados apresentados, considerando que a baixa disponibilidade de P do solo avaliado por este autor permitiu o aparecimento das diferenças de produtividades proporcionadas entre as fontes de modo mais precoce em relação ao estudo aqui conduzido.

Souza et al. (2014) também encontraram diferenças de produtividade de milho proporcionadas por SFT e FNR de Bayóvar e Itafós em um solo com adequada disponibilidade de P, onde ambos os FNR's reduziram a produtividade do milho em comparação ao SFT. E assim como o observado neste estudo, houve resposta significativa entre as doses de 26 e 52 kg de P ha⁻¹, mostrando a sensibilidade do milho a reduções na adubação. Ainda vale ressaltar que

neste estudo, nos dois anos avaliados, se observou tais diferenças ainda mais pronunciadas no segundo cultivo, mostrando o efeito da depleção dos teores de P na dose mais baixa.



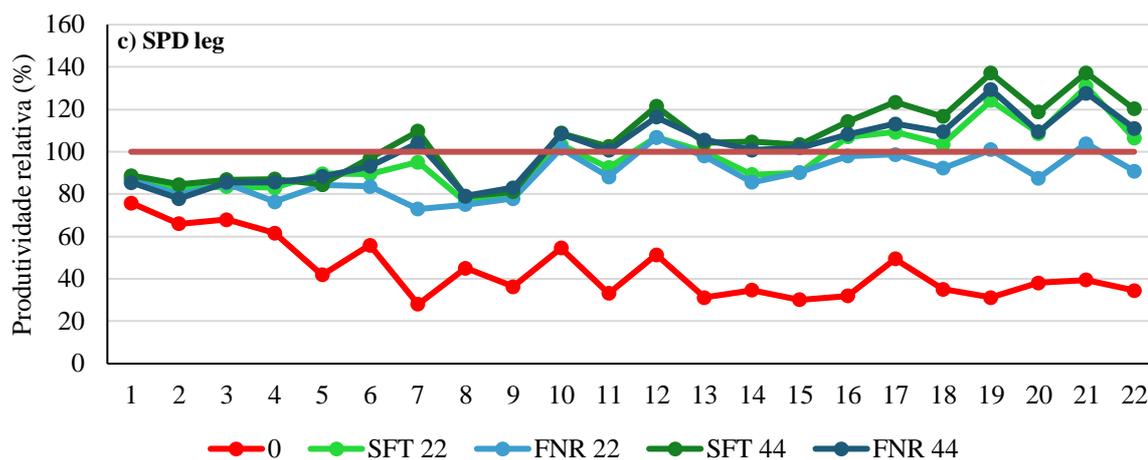


Figura 9. Produtividade relativa de soja e milho (%) ao longo dos 22 anos de cultivos sob diferentes sistemas de plantio: a) convencional (SPC), b) SPD milho, c) SPD leguminosa, em função de diferentes fontes e doses de P em kg ha⁻¹. A referência considerada para 100% da produtividade relativa foi a produtividade de 4000 kg de soja ha⁻¹ e 12000 kg de milho ha⁻¹. As médias para cada ano foi obtida a partir das três repetições, considerando apenas o modo de aplicação no sulco para os tratamentos de manejo do P (n= 3).

A partir dos dados de produtividade apresentados ao longo do tempo (Figura 10), foi possível calcular a rentabilidade dos tratamentos, tomando como referência o tratamento mais recomendado e utilizado pelos produtores, o SFT na dose de 44 kg de P ha⁻¹.

A tomada de decisão pela redução da adubação, seja esta com uma fonte solúvel ou de baixa solubilidade, ou até mesmo a manutenção da dose recomendada, mas com a substituição das fontes, são estratégias que devem ter a sua economicidade levada em consideração para que sejam adotadas com assertividade. Apesar dos preços das commodities variarem ao longo do tempo, buscou-se com os dados de produtividade deste estudo, aliado aos preços médios atuais (AGROLINK, 2022) das sacas de soja e milho (R\$ 150,00 saca⁻¹ e R\$ 80,00 saca⁻¹, respectivamente) e dos custos do SFT e do FNR (R\$ 5000,00 tonelada⁻¹ e 2170,00 tonelada⁻¹, respectivamente), realizar um estudo de lucratividade das estratégias de manejo.

Na Figura 10 são apresentados os percentuais médios de perda ou ganho de produtividade em relação ao SFT aplicado na dose de 44 kg de P ha⁻¹, tendo como referência de produtividade para todos os tratamentos os valores de 4000 kg ha⁻¹ para soja e 12000 kg ha⁻¹ para milho.

Na média, é possível observar que de modo geral os maiores percentuais de perda tanto de produtividade como de lucratividade foram encontrados no SPC, principalmente para o

milho quando as fontes foram aplicadas na dose de 22 kg de P ha⁻¹, enquanto os menores percentuais foram encontrados no SPD mil.

A soja apresentou os menores percentuais de perda em relação ao milho, sendo que houve um ganho de produtividade e lucratividade, de 2% e R\$ 646,00 ha⁻¹, respectivamente, quando o FNR foi aplicado na dose de 44 kg de P no SPC, e apesar de não ter ocorrido ganhos de produtividade, esta mesma fonte e dose levou a um saldo positivo de R\$ 277,00 ha⁻¹ no SPD mil e R\$ 103,00 ha⁻¹ no SPD leg. Além disso, no SPD mil, apesar do SFT na dose de 22 kg de P ha⁻¹ ter perdido 5% de produtividade em relação à referência, esta perda não foi suficiente para negativar a lucratividade, pois o mesmo apresentou um saldo positivo de R\$ 105,00 ha⁻¹.

Apenas a utilização do FNR na dose de 44 kg ha⁻¹ sob SPD mil possibilitou ganhos de lucratividade para o milho, sendo este de R\$ 168,00 ha⁻¹, apesar de ter ocorrido uma perda de 2% de produtividade. Este manejo da adubação com P também resultou nos menores percentuais de perda de produtividade observados para os outros dois sistemas. Isto ocorreu em parte por conta do custo do kg de P contido no fertilizante ser 26% menor na fonte pouco solúvel, de acordo com os preços considerados acima.

Como descrito acima, os maiores percentuais de perda de produtividade e lucratividade em ambas as culturas ocorreram quando a dose de 22 kg de P ha⁻¹ foi utilizada no SPC, seja por meio de SFT ou FNR. Apenas uma condição específica apresentou perdas ainda maiores: o FNR aplicado nesta dose no SPD leg na cultura da soja.

Todavia, de modo geral, o uso de sistemas conservacionistas como o SPD mil e o SPD leg reduziram bastante o impacto negativo da redução de dose. Por exemplo, no milho, a perda de produtividade com o uso da dose mais baixa de SFT passou de 16% no SPC para 5% no SPD mil e 9% no SPD leg.

Vale ressaltar que o uso de leguminosas no SPD resultou em maiores reduções de produtividade e lucratividade em relação ao uso de milheto, assim como maior frequência de perda dessa estratégia ao longo dos 22 anos, como será discutido adiante (Figura 11). Estes dois sistemas são marcadamente diferentes quanto à capacidade que estas plantas de cobertura têm em produzir biomassa vegetal, seja de parte aérea ou de raízes, e aumentar os estoques de matéria orgânica do solo (MOS), além das diferenças quanto a capacidade de desenvolver um sistema radicular vigoroso e que explore um maior perfil do solo (BERTOLINI et al., 2019).

É sabidamente conhecido que as gramíneas apresentam uma maior produção de biomassa e maior capacidade de desenvolver um sistema radicular que explore em profundidade o perfil do solo, contribuindo para uma maior ciclagem de nutrientes, principalmente o P (CALEGARI et al., 2012). Apesar de Maltais-Landry (2015) ter

encontrado maior atividade de fosfatase e produção de ácidos orgânicos pelas leguminosas, as gramíneas apresentaram maior biomassa e capacidade de ciclagem de P, sendo apontadas pelo autor como as espécies mais eficientes em ciclar P de reservatórios de baixa labilidade.

Assim como o observado por Calegari (2012), o cultivo de plantas de cobertura que apresentam uma maior capacidade de ciclagem de nutrientes torna o sistema menos dependente de fertilizantes externos, resultando ao que foi observado por este estudo, menores percentuais de perda e lucratividade quando adotados ajustes na adubação fosfatada.

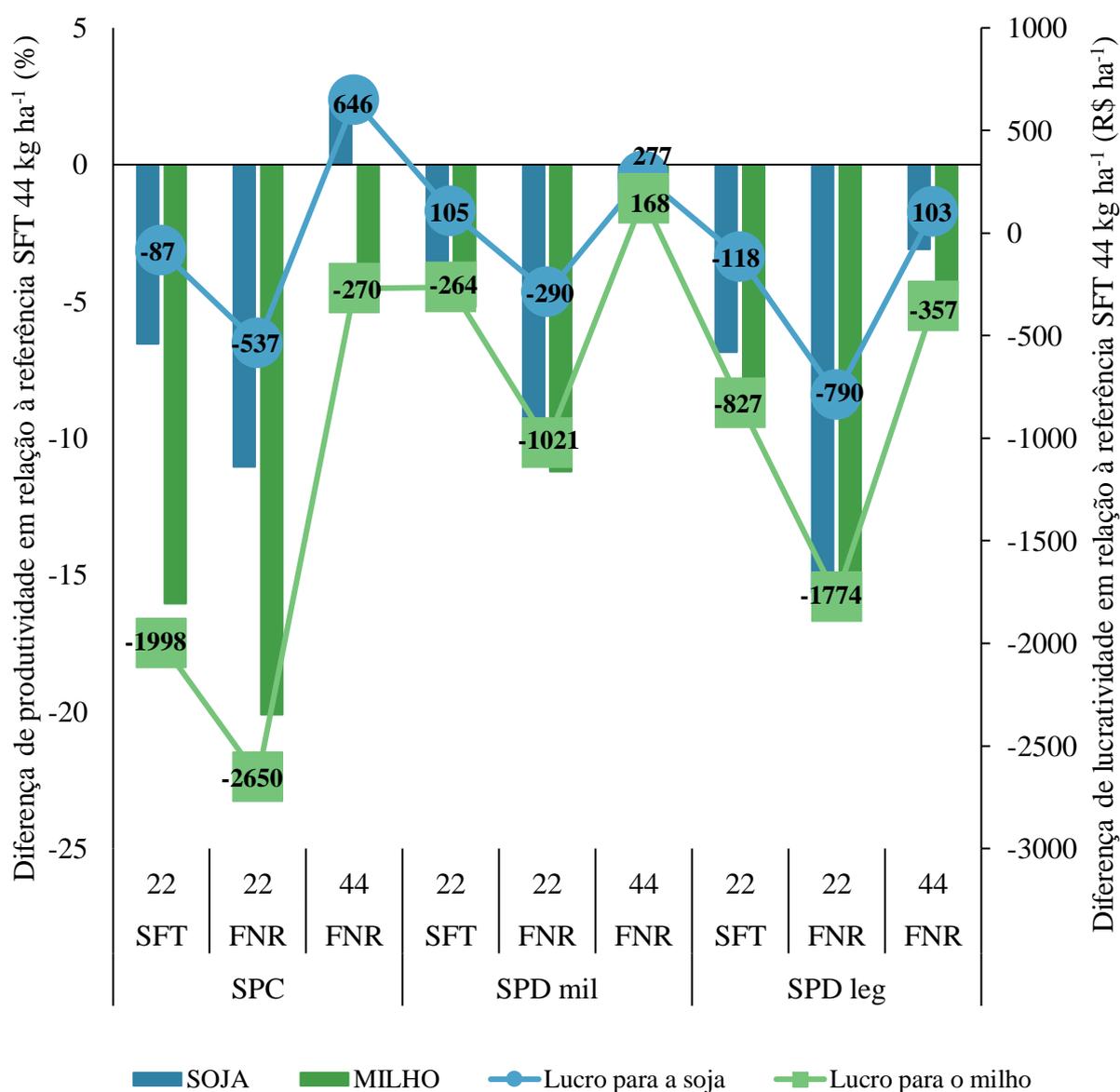


Figura 10. Diferença média de lucratividade, considerando os 22 anos de cultivos de soja e milho avaliados, entre as estratégias de fontes e doses de P em kg ha⁻¹ em relação a referência do SFT aplicado na dose de 44 kg de P ha⁻¹, sob sistema de plantio convencional com o milheto

como planta de cobertura (SPC); sob sistema de plantio direto com o milho como planta de cobertura (SPD mil); sob sistema de plantio direto com uma espécie leguminosa como planta de cobertura (SPD leg). As médias foram obtidas a partir de dois modos de aplicação e três repetições ($n = 6$).

Apesar da média fornecer uma visão global do que ocorreu ao longo dos 22 anos com as estratégias de manejo, quando se têm os dados de ano a ano, pode-se calcular e observar as frequências de perdas de lucratividade ao longo do tempo, como o mostrado na Figura 11. Nela, são apresentados os valores de ganho ou perda de lucratividade tomando como referência o tratamento com o SFT na dose de $44 \text{ kg de P ha}^{-1}$, dentro de cada sistema de manejo do solo, podendo-se assim avaliar as possibilidades de redução de custo de produção por meio de redução de dose de P aplicado e/ou substituição por uma fonte de menor custo e solubilidade.

Em todos os sistemas de manejo do solo houve uma maior frequência de perda das estratégias avaliadas na cultura do milho quando comparada à cultura da soja.

No SPC, observou-se uma frequência de 36% de ocasiões de perda de uma ou mais estratégias de manejo ao longo dos 11 cultivos de soja avaliados, enquanto este valor subiu para 88% quando se tratou do milho. No SPD mil, o percentual para soja se manteve em 36%, e o do milho reduziu para 44%. Já no SPD leg, foi encontrada a maior frequência de perdas para a soja, alcançando 59%, e para o milho foi encontrado um percentual de 60%.

Estas frequências de perda ao longo dos anos por cultura e sistema evidenciam o que foi mostrado na Figura 10, onde o SPC apresentou as maiores reduções de produtividade e conseqüentemente lucratividade, sendo muito mais pronunciadas para a cultura do milho.

A frequência de perda também variou entre as estratégias de adubação, conforme a cultura e o sistema de manejo conduzido, sendo que quando apenas se reduziu a adubação pela metade na soja, a menor frequência de perda observada ocorreu no SPC com um percentual de 36%, enquanto o SPD mil e SPD leg apresentaram 45% e 54%, respectivamente.

Quando o SFT foi substituído pelo FNR na dose de $44 \text{ kg de P ha}^{-1}$, no SPC e no SPD mil ocorreu apenas 18% de frequência de perdas, enquanto no SPD leg foi encontrado o percentual de 67%. Quando a adubação foi reduzida e ainda ocorreu a substituição de uma fonte solúvel por uma de menor solubilidade, as frequências de perdas foram semelhantes em todos os sistemas, com 55%, 45% e 55% no SPC, SPD mil e SPD leg, respectivamente.

No milho foram observadas as maiores frequências de perdas quando as estratégias alternativas de manejo do P foram adotadas. No SPC, em 100% das vezes o SFT e o FNR, ambos na dose de 22 kg de P ha⁻¹, perderam em relação à referência. Valores semelhantes foram observados no SPD leg, com 82% e 91% de frequências, respectivamente. Contudo, este percentual caiu para 55% e 73% quando o sistema adotado foi o SPD mil. Quando o FNR foi aplicado na dose recomendada, houve perda em 64%, 36% e 73% de vezes no SPC, SPD mil e SPD leg, respectivamente.

Quanto às culturas, houve uma tendência da cultura da soja apresentar as menores frequências de perda ao longo dos 11 cultivos com as estratégias de manejo alternativas em relação à padrão. Isto já era esperado tendo em vista os dados de produtividade pouco influenciados pela redução da adubação e/ou substituição da fonte. A menor frequência de perdas encontrada foi com a aplicação do FNR na dose de 44 kg de P ha⁻¹, mostrando ser essa a estratégias com menores riscos de perda de lucratividade dada as condições deste estudo. Isto provavelmente ocorreu uma vez que o FNR de Gafsa estudado, de origem sedimentar, apresenta elevado grau de substituições isomórficas e conseqüentemente um bom índice de eficiência agrônômica e solubilização ao longo do tempo (OLIVEIRA et al., 2020).

No milho, em todos os casos avaliados, houve grandes percentuais de perda, com a exceção apenas da aplicação do FNR na dose de 44 kg de P ha⁻¹ no SPD mil que resultou em um percentual de 36%, sendo o menor encontrado nesta cultura. Souza et al. (2014) também encontraram a maior economicidade com a utilização do FNR de Bayóvar na dose de 26 e 52 kg de P ha⁻¹, que se equívaleu à economicidade proporcionada pelo SFT na dose recomendada de 26 kg de P ha⁻¹.

Já Santos et al. (2012), em seu estudo de economicidade da aplicação de diferentes fosfatos naturais no cultivo da cana-de-açúcar, concluiu que estes geraram uma receita sempre inferior ao SFT, mas salientaram o benefício do elevado efeito residual destas fontes e a viabilidade de utilizá-las a depender do seu custo.

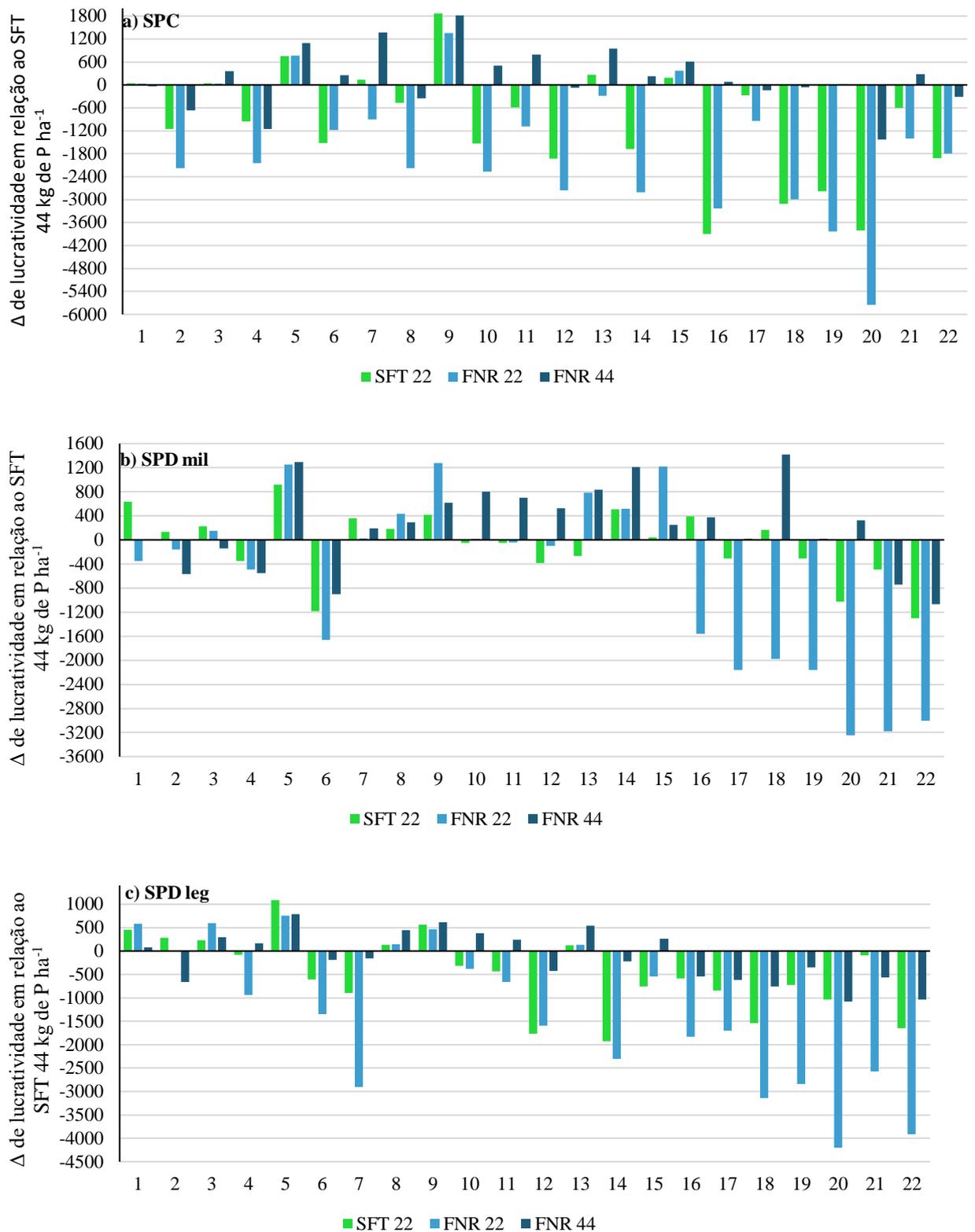


Figura 11. Diferença de lucratividade entre as diferentes estratégias de fontes e doses de P em kg ha^{-1} em relação a referência do SFT aplicado na dose de $44 \text{ kg de P ha}^{-1}$, ao longo dos 22 anos de cultivos sob sistema de plantio convencional com o milho como planta de cobertura (SPC) (a); sob sistema de plantio direto com o milho como planta de cobertura (SPD mil) (b);

sob sistema de plantio direto com uma espécie leguminosa como planta de cobertura (SPD leg). As médias foram obtidas a partir de dois modos de aplicação e três repetições (n = 6).

f) Eficiência de uso do P e estoque de P residual em função das estratégias de manejo adotadas

Na média dos 22 anos e nos 3 sistemas de manejo do solo, a dose de 22 kg de P ha⁻¹, independente da fonte, apresentou percentuais acima de 100% de eficiência de uso do P, com o SPC apresentando os menores percentuais em relação aos SPD's, e tendo o SPD mil com os maiores percentuais de eficiência observados, apesar de não ser significativa a interação (p<0,05) (Figura 12). Já para a dose de 44 kg de P ha⁻¹, houve percentuais abaixo de 100% para todos os sistemas avaliados, sendo que, principalmente quando a fonte utilizada foi o SFT, o SPC novamente apresentou os menores valores numéricos e os SPD's os maiores.

Em todas as circunstâncias, os maiores percentuais de eficiência de uso do P foram acompanhados também pelos menores valores de P residual, que ocorreram em todos os casos com a utilização da dose de 22 kg de P, que variaram de 111 a 145% de eficiência de uso, e -71 e -240 kg de P₂O₅ ha⁻¹ de P residual, respectivamente. E o inverso também ocorreu, com os menores percentuais de eficiência de uso, apresentados pela dose de 44 kg ha⁻¹, acompanhados dos maiores valores de P residual, que variaram de 72 a 84% de eficiência de uso, e 353 a 616 kg de P₂O₅, respectivamente.

A alta eficiência de uso do P obtida na dose de 22 kg de P ha⁻¹ foi alcançada pelo fato de que esta dose está abaixo daquilo que é exportado pela cultura do milho (Tabela A4), permitindo que esta cultura assimile grande parte do P que já se encontrava estocado no solo, seja em formas inorgânicas ou orgânicas. Devido ao milho apresentar índices de eficiência bastante altos, os valores médios ficaram acima dos 100%, sendo válido ressaltar que a soja apresentou eficiências de uso abaixo de 100%, uma vez que mesmo esta menor dose está acima daquilo que é potencialmente exportado por esta cultura.

Van Der Bom et al. (2019) ressalta em seu estudo que apesar de ser uma estratégia sustentável, se deve ter cautela ao considerar explorar os estoques de P já presentes no solo, pois parte do P aplicado via fertilizantes dos cultivos anteriores passou para frações de menor labilidade. Além de que se deve considerar os aspectos econômicos, pois nem sempre a maior eficiência de uso do P está atrelada à maior rentabilidade.

Quando consideradas as fontes, foi observado que o SFT em todos os casos, tanto na dose de 22 kg de P ha⁻¹ como a dose de 44 kg de P ha⁻¹, apresentou maiores valores de eficiência

de uso do P quando comparado ao FNR, com os menores estoques de P residual também, demonstrando a maior absorção de P quando utilizado esta fonte mais solúvel. E por consequência, foram observados os maiores estoques de P residual quando utilizado o FNR. Nunes et al. (2020) também observaram menores estoques de P residual em tratamentos que apresentaram as maiores produtividades.

Este resultado está de acordo com o estudo de Caires et al. (2017) que também encontraram maiores valores de eficiência de uso para o SFT em relação ao FNR em 4 anos de cultivos de soja em um solo com baixa disponibilidade de P. Estes autores observaram nesta condição, eficiência de 2 a 3 vezes menor do FNR em relação ao SFT.

Haokip et al. (2019) avaliaram dois cultivos de milho e trigo em um solo com adequada disponibilidade de P, e constataram também maior eficiência de uso do P quando a dose foi 50% da recomendada. Tais autores levantaram como hipóteses a solubilização e mobilização de grande parte do P nativo, onde em uma menor dose, o milho torna-se mais dependente do pool nativo de P. Enquanto em uma dose mais elevada, a magnitude do aumento da absorção e exportação de P nos grãos é muito menor comparada à magnitude do aumento da dose aplicada, o que conduz o sistema a apresentar menores valores de eficiência.

Estes resultados de alta eficiência do uso do P, mesmo com a maior dose aplicada, contrariam o que os diversos estudos propagaram em relação a baixíssima eficiência deste nutriente aplicado em solos tropicais intemperizados. Todavia, isto é verdade se não adotada práticas conservacionistas de manejo e/ou práticas que aumentem o aporte de MOS, como o cultivo de plantas de cobertura conduzidas neste estudo (CAIRES et al., 2017; BLACKWELL et al., 2019).

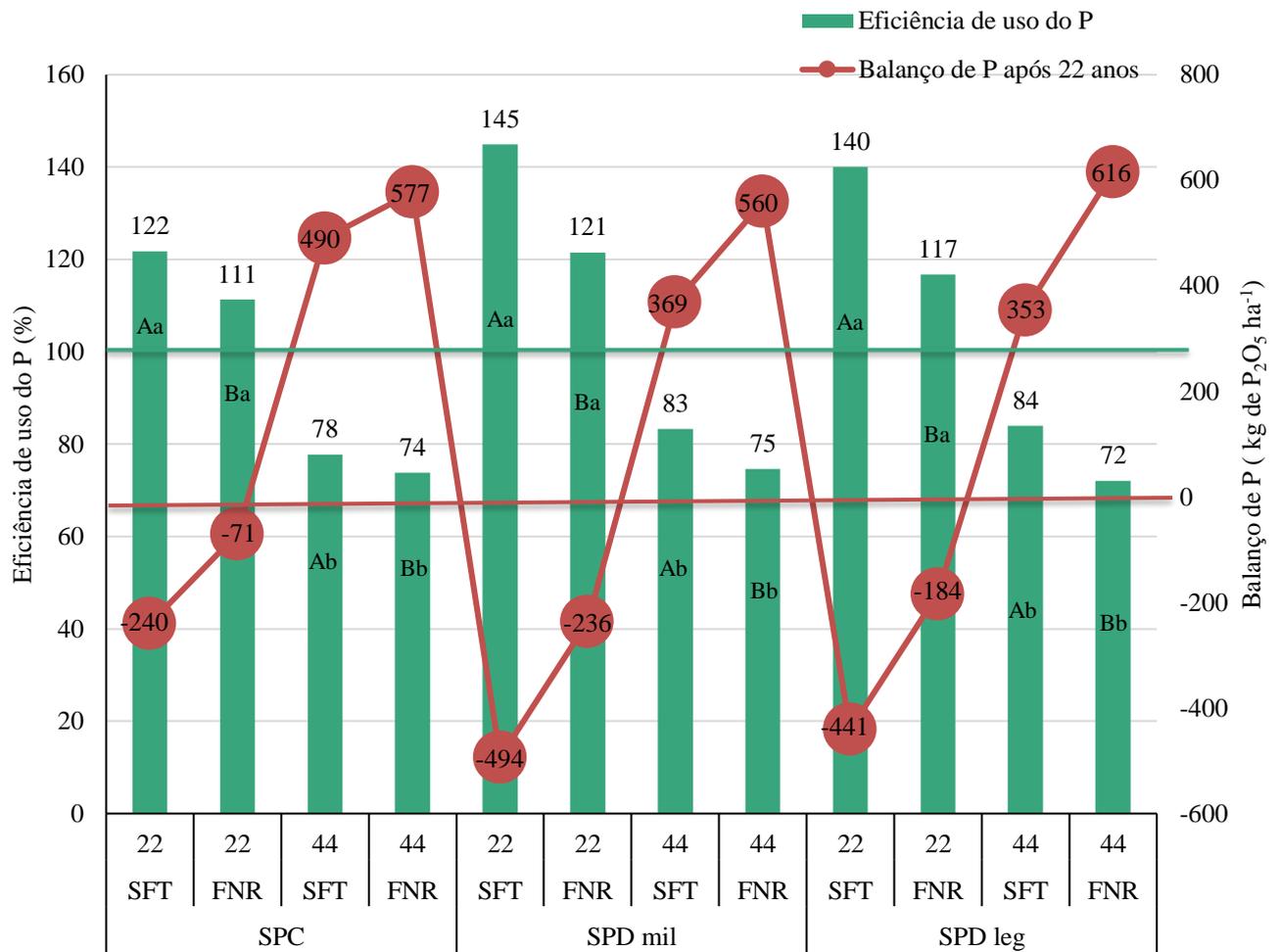


Figura 12. Eficiência média de uso do P (%) e o balanço de P (kg de P₂O₅ exportado nos grãos/kg de P₂O₅ aplicado via fertilizantes fosfatados, kg ha⁻¹) considerando os 22 anos de cultivos de soja e milho avaliados. As médias foram obtidas a partir de dois modos de aplicação e três repetições (n = 6). Letras maiúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para cada dose. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as doses para cada nível de fonte pelo teste de Tukey (p < 0,05).

5.1 CONCLUSÕES.

1. Os efeitos das estratégias de manejo do solo e da adubação com o P variaram ao longo do tempo e conforme a cultura, onde o milho foi a cultura que teve a sua produtividade mais influenciada pelas estratégias de manejo adotadas, enquanto a soja apresentou pouca responsividade.
2. Na condição de solo corrigido é possível o P a lanço ou no sulco de semeadura sem que haja prejuízos na produtividade de soja e milho, ficando a critério do produtor a escolha do modo de aplicação com base nas questões operacionais.
3. Partindo de um solo com teores adequados de fósforo, conclui-se que se pode reduzir a adubação na soja pela metade daquela que é recomendada para a região do Cerrado para culturas anuais por alguns cultivos, além de ser possível a substituição de uma fonte solúvel por uma de menor solubilidade, como os fosfatos naturais reativos, desde que este seja aplicado na dose recomendada.
4. Para a cultura do milho não é recomendado a redução da adubação por nenhum cultivo quando o manejo do solo se trata de um SPC, mas por um ou dois cultivos é possível reduzir a adubação quando sob SPD. Pode-se realizar a substituição da fonte solúvel por uma de menor solubilidade, principalmente por alguns cultivos, desde que também seja aplicada na dose recomendada.
5. A redução da adubação gerou as maiores perdas de lucratividade na cultura do milho, e principalmente se este foi cultivado sob SPC. A estratégia de manejo que possibilitou rentabilidades iguais ou superiores ao SFT na dose de 44 kg de P ha⁻¹ foi a aplicação do FNR nesta mesma dose, podendo ser esta uma estratégia de manejo alternativa que pode ser adotada com assertividade pelos produtores.
6. A dose aplicada foi a principal moduladora do balanço e eficiência de uso do P, enquanto os demais fatores interferiram em uma menor intensidade. A menor dose de P resultou nos maiores valores de eficiência de uso do P, que foram acompanhadas dos menores estoques deste nutriente após 22 anos de cultivos, evidenciando a capacidade dos cultivos em acessar o P nativo e oriundo de aplicações anteriores.
7. Fica evidente que nem sempre a associação de maiores eficiências de uso do P podem estar aliadas às maiores rentabilidades e produtividades de soja e milho, sendo necessário adotar estratégias que permitam um equilíbrio entre esses aspectos. Além da necessidade de se atualizar os manuais de recomendação de adubação para a região do Cerrado, tendo em vista o avanço no melhoramento genético e os altos tetos produtivos expressos, refletindo em novos

comportamentos frente às exigências nutricionais de P e todos os aspectos relacionados ao manejo deste nutriente.

5.2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAM, M. K.; BELL, R. W.; SALAHIN, N.; PATHAN, S.; MONDOL, A. T. M. A. I.; ALAM, M. J.; RASHID, M. H.; PAUL, P. L. C.; HOSSAIN, M. I.; SHIL, N. C. Banding of Fertilizer Improves Phosphorus Acquisition and Yield of Zero Tillage Maize by Concentrating Phosphorus in Surface Soil. **Sustainability**, v. 10, 3234, 2018.
- AMORIM, M. B. MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA, RESPOSTA DAS CULTURAS E FORMAS DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS EM PLANTIO DIRETO. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 118 f. 2020.
- ANSCHAU, K. A.; SEIDEL, E. P.; MOTTIN, M. C.; LERNER, K. L.; FRANZISKOWSKI, M. A.; ROCHA, D. H. PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO, CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS E PRODUTIVIDADE DA SOJA EM SUCESSÃO A PLANTAS DE COBERTURA. **Scientia agraria paranaenses**, v. 17, p. 293-299, 2018.
- ANTONANGELO, J. A.; FIRMANO, R. F.; ALLEONI, L. R. F.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; ZHANG, H. Soybean Yield Response to Phosphorus Fertilization in an Oxisol under Long-Term No-Till Management. **Soil Science Society American Journal**, v. 83, p. 173-180, 2019.
- BASHIR, S.; ANWAR, S.; AHMAD, B.; SARFRAZ, Q.; KHATK, W.; ISLAM, M. Response of Wheat Crop to Phosphorus Levels and Application Methods. **Journal of Environment and Earth Science**, v. 5, n. 9, 2015.
- BERTOLINI, A.; FINCO, D.; NORA, T. J.; OMIZZOLLO, R.; SORDI, A.; KLEIN, C. COBERTURA DE SOLO E TAXA DE CICLAGEM DE NUTRIENTES EM PLANTAS DE COBERTURA DE VERÃO NO OESTE DE SANTA CATARINA. **Unoesc & Ciência**, v. 10, n. 2; p. 83-92, 2019.
- BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E PERMEABILIDADE DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO TÍPICO SOB SISTEMAS DE MANEJO NA REGIÃO DOS CERRADOS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 167-177, 2001.
- BLACKWELL, M.; DARCH, T.; HASLAM, R. Phosphorus use efficiency and fertilizers: future opportunities for improvements. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 6, p. 332-340, 2019.
- BRASIL, E. C.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. de; CARVALHO, M. da C. S.; SANTOS, D. G. dos; AMARAL, A. J. M. S. do; HUNGRIA, L. C. da H. Eficiência de fosfatos reativos associados à fonte solúvel de fósforo na sucessão milho/soja. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, XXXIV, Florianópolis, 2013.
- CAIRES, E. F.; SHARR, D. A.; JORIS, H. A. W.; HALISKI, A. Phosphate fertilization strategies for soybean production after conversion of a degraded pastureland to a no-till cropping system. **Geoderma**, v. 308, p. 120-129, 2017.
- CALEGARI, A. Plantas de cobertura em sistema Plantio Direto de Qualidade (SPDQ). **Revista A Granja**, Porto Alegre: Centaurus, v. 68, n. 763, p. 67-69, jul. 2012.
- CHIEN, S.H.; MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, v. 41, p. 227-234, 1995.
- CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; MIKKELSEN, R. Agronomic Use of Phosphate Rock for Direct Application. **Better Crops**, v. 94, n. 4, p. 21-23, 2010.

- COELHO, M. J. A.; DIAZ, D. R.; HETTIARACHCHI, G. M.; HANSEL, F. D.; PAVINATO, P. S. Soil phosphorus fractions and legacy in a corn-soybean rotation on Mollisols in Kansas, USA. **Geoderma Regional**, v. 18, 2019.
- CORTEZ, J. W.; MORENO, C. T. M.; FARINHA, L. S.; ARCOVERDE, S. N. S.; VALENTE, I. Q. M. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um sistema de semeadura direta. **Científica**, v. 47, p. 175-182, 2019.
- COUTINHO, E. L. M.; NATALE, W.; VILLA NOVA, A. S.; SITTA, D. S. X. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados para a cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, p. 1393-1399, 1991.
- CRUSCIOL, C. A. C.; COSTA, C. H. M. da; CASTRO, G. S. A.; VOLF, M. R. Manejo adequado da fertilidade do solo para uma agricultura sustentável no Cerrado/; Avanços e Desafios. In: FLORES, R. A.; CUNHA, P. P. da. Práticas de Manejo do Solo para Adequada Nutrição de Plantas no Cerrado. 1 ed. Goiânia: Gráfica UFG, 2016.
- DIOGENES, H. C.; FONTES E DOSES DE FÓSFORO NO CULTIVO DE MILHO EM CONDIÇÕES DE TERRA FIRME EM MANAUS-AM. 2015. 114 f. Tese (Doutorado em Agronomia Tropical) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2015.
- FERNANDEZ, M. C.; RUBIO, G. Root morphological traits related to phosphorus-uptake efficiency of soybean, sunflower, and maize. **Journal plant nutrition soil Science**, v. 178, p. 807-815, 2015.
- FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. *Soil & Tillage Research*, v. 155, p. 62-68, 2016.
- FRANZINI, V. I.; MURAOKA, T.; CORASPE-LEÓN, H. M.; MENDES, F. L. Eficiência de fosfato natural reativo aplicado em misturas com superfosfato triplo em milho e soja. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 44, p. 1092-1099, 2009.
- FREILING, M.; TUCHER, S. V.; SCHMIDHALTER, U. Factors influencing phosphorus placement and effects on yield and yield parameters: A meta-analysis. **Soil & Tillage Research**, v. 216, 105257, 2022.
- FREITAS, I. F. de; FÓSFORO EXTRAÍDO COM RESINAS TROCADORAS DE ÍONS E MEHLICH-1 DE LATOSSOLOS SUBMETIDOS A FONTES E DOSES DE FÓSFORO E TEMPOS DE CONTATO. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, p. 43. 2012.
- GOEDERT, W. J.; REIN, T. A.; SOUSA, D. M. G. de. EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS NÃO TRADICIONAIS. Documentos, 24, Planaltina: Embrapa CPAC, 1986.
- HANSEL, F. D.; AMADO, T. J. C.; DIAZ, D. A. R.; ROSSO, L. H. M.; NICOLOSO, F. T.; SCHORR, M. Phosphorus Fertilizer Placement and Tillage Affect Soybean Root Growth and Drought Tolerance. **Soil Fertility & Crop Nutrition**, v. 28, p. 2936-2944, 2017.
- HAOKIP, I. C.; DWIVEDI, B. S.; MEENA, M. C.; DATTA, S. P.; SHARMA, V. K.; SAHARAWAT, U. S. Effect of phosphorus fertilization and microbial inoculants on yield, phosphorus use-efficiency and available phosphorus in maize (*Zea mays*)- wheat (*Triticum aestivum*) cropping system. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, V. 89, p. 806-812, 2019.
- KHAN, B. A.; HUSSAIN, A.; ELAHI, A.; ADNAN, M.; AMIN, M. M.; TOOR, M. D.; AZIZ, A.; SOHAIL, M. K.; WAHAB, A.; AHMAD, R. Effect of phosphorus on growth, yield and

quality of soybean (*Glycine max* L.); A review. **International Journal of Applied Research**, v. 6, p. 1-6, 2020.

KORNDÖRFER, G. H.; LARA-CABEZAS, W. A.; HOROWITZ, N. EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FOSFATOS NATURAIS REATIVOS NA CULTURA DO MILHO. **Scientia Agricola**, v. 56, 1999.

MALTAIS-LANDRY, G. Legumes have a greater effect on rhizosphere properties (pH, organic acids and enzyme activity) but a smaller impact on soil P compared to other cover crops. **Plant Soil**, v. 394, p. 139-154, 2015.

OLIVEIRA, M. F.; FERNANDES, R. B. A.; FREDDI, O. da S.; FERREIRA, C. J. B.; TAVARES, R. L. M. ASPECTOS RELEVANTES DA SEMEADURA DIRETA NA QUALIDADE DO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS. In: MOURA, P. H. A.; MONTEIRO, V. da F. C. Ponta Grossa, PR: Inovação e tecnologias nas ciências agrárias. Atena, 2021.

OLIVEIRA, L. E. Z. de; Long-term phosphate fertilization strategies evaluation in a Brazilian Oxisol. **Agronomy Journal**, v. 112, p. 4303–4320, 2020.

OLIVEIRA JUNIOR, A. de; PROCHNOW, L. I.; KLEPKER, D. Eficiência agronômica de fosfato natural reativo na cultura da soja. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 43, n. 5, p. 623-631, 2008.

OLIVEIRA JÚNIOR, A. de; CASTRO, C.; de; KLEPKER, D.; OLIVEIRA, F. A. de. Soja. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes. Volume 3. Piracicaba: International plant nutrition institute, 2010.

PEIXOTO, D. S.; SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C. de; MOREIRA, S. G.; SILVA, F. da; CURI, N. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. **Soil & Tillage**, v. 194, 104307, 2019.

RESENDE, A.V. de; FURTINI NETO, A.E.; ALVES, V.M.C.; MUNIZ, J.A.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KINPARA, D.I.; SANTOS, J.Z.L.; CARNEIRO, L.F. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da Região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.453-466, 2006.

RAIJ, B. van & VAN DIEST, A. Utilization of phosphate from different sources by six plant species. **Plant Soil**, 51:577- 589, 1979.

RANDALL, G.W.; HOEFT, R.G. Placement methods for improved efficiency of P and K fertilizers: A review. **Journal of Agricultural Production**, v. 1, p. 70-79, 1988.

ROBINSON, J. S.; SYERS, J. K. A critical evaluation of the factors influencing the dissolution of Gafsa phosphate rock. **Journal of Soil Science**, v. 41, p. 597-605, 1990.

RUDORF, B. Análise Geoespacial da Dinâmica das Culturas Anuais no Bioma Cerrado: 2000 a 2014. Agrosatélite Geotecnologia Aplicada Ltda, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2015.

SANTINI, J. M. K.; BUZETTI, S.; PERIN, A.; CASTRO, C. F. de S.; FURQUIM, L. C.; NUNEZ, D. N. C.; SILVEIRA, F. de O.; LOPES FILHO, L. C.; CABRAL, A. C. DINÂMICA DO FÓSFORO EM SOLOS DE ALTA FERTILIDADE: FONTES E DOSES FOSFATADAS EM CULTIVO DA CULTURA DE SOJA NO CERRADO. **Científica**, v. 7, n. 2, p. 14-23, 2019.

SANTOS, G. A.; SOUSA, R. T. X. de; KORNDÖRFER, G. H. LUCRATIVIDADE EM FUNÇÃO DO USO E ÍNDICE DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES

- FOSFATADOS APLICADOS EM PRÉ- PLANTIO DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 6, p. 846-851, 2012.
- SILVA, F. N.; NETO, A. E. F.; CARNEIRO, L. F.; MAGALHÃES, C. A. de S.; CARNEIRO, D. N. M. CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE GRÃOS DA SOJA SOB DIFERENTES DOSES E FONTES DE FÓSFORO EM SOLOS DISTINTOS. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1220-1227, set./out., 2009
- SOARES, W. V.; LOBATO, E.; SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A. R. AVALIAÇÃO DO FOSFATO NATURAL DE GAFSA PARA RECUPERAÇÃO DE PASTAGEM DEGRADADA EM LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 4, p. 819-825, 2000.
- SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2.ed. Planaltina: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416p.
- SOUSA, D. M. G. de; VOLKWEISS, S. J. Efeito residual do superfosfato triplo em função da granulação e dose e do Sistema de preparo do solo. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, ISSN: 022008, 1987.
- SOUZA, R. M. de; SOBRAL, L. F.; VIÉGAS, P. R. A.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CARVALHO, M. C. S. EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FOSFATOS DE ROCHA EM SOLO COM ELEVADO TEOR DE CÁLCIO TROCÁVEL. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 38, p. 1816-1825, 2014.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de Métodos de Análise de Solo. 3ª ed. Brasília: Embrapa, 2017.
- VAN DER BOM, F. J. T.; MCLAREN, T. I.; DOOLETTE, A. L.; MAGID, J.; FROSSARD, E.; OBERSON, A., JENSEN, L. S. Influence of long-term phosphorus fertilisation history on the availability and chemical nature of soil phosphorus. **Geoderma**, v. 355, 113909, 2019.
- VELOSO, C. A. C.; SILVA, A. R.; CARVALHO, E. J. M.; SILVEIRA FILHO, A. Produção de Grãos de Milho sob Manejo da Adubação Fosfatada em Latossolo Amarelo Distrófico no Oeste Paraense. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2016.

6. CAPÍTULO 02: FRACIONAMENTO QUÍMICO DO P E ATIVIDADE DA FOSFATASE ÁCIDA EM UM SOLO CULTIVADO POR 22 ANOS COM ESTRATÉGIAS DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA

6.1 RESUMO

Os rendimentos dos cultivos são excelentes indicadores de como estratégias de manejo do solo e da adubação fosfatada podem interferir nos produtos finais de colheita, entretanto, é necessário se compreender como estes fatores estão afetando aspectos relacionados a disponibilidade de P às plantas em função das suas formas químicas de acúmulo, especialmente em estudo de longo prazo. Diante disto o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de sistemas de manejo do solo e da adubação fosfatada conduzidos por 22 anos nas frações de P no solo. O experimento foi conduzido em um Latossolo Vermelho argiloso com disponibilidade inicial adequada de P, cultivado por 22 anos com uma sucessão soja e milho no verão, e plantas de cobertura no inverno (milheto ou leguminosas), com dois tipos de sistema de manejo do solo: sistema de preparo convencional (SPC) ou direto (SPD mil – milheto cultivado na entressafra e SPD leg – espécies leguminosas cultivadas na entressafra), e em oito tipos de manejo da adubação fosfatada: superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR), com aplicação no sulco de semeadura ou a lanço na superfície, nas doses de 22 ou 44 kg de P ha⁻¹. Após 22 anos foi realizada amostragem do solo até a camada de 20 cm, de modo a se determinar os teores de frações inorgânicas e orgânicas pelo fracionamento químico sequencial e a atividade da fosfatase ácida. Houve estratificação na distribuição das frações inorgânicas (Pi) e orgânicas (Po) de P nos SPD's, enquanto houve apenas das frações orgânicas no SPC. O revolvimento do solo no SPC resultou em minimização dos efeitos da adubação fosfatada. Já nos SPD's, a fonte solúvel e a maior dose resultaram em maiores teores da maioria das frações avaliadas. Entretanto, foi possível obter maiores teores de Pi-HCl e Pi NaOH 0,5 foram obtidos com a aplicação do FNR. Os teores de P residual e total pouco foram influenciados pelas estratégias de manejo da adubação fosfatada, se observando apenas o efeito do sistema de manejo do solo, com o SPD leg apresentando os maiores teores. A atividade da fosfatase ácida foi modulada pelos sistemas de manejo do solo e pela camada amostrada, de modo que os maiores valores foram observados nos SPD's e na camada de 0-10 cm de todos os sistemas. Os sistemas conservacionistas, como o SPD, podem resultar em maiores teores de frações inorgânicas e orgânicas de P nas camadas mais superficiais, bem como em maiores atividades da fosfatase ácida. Diferenças quanto à distribuição das frações inorgânicas e orgânicas de P a partir da aplicação de fontes contrastantes em solubilidade foram observadas apenas nos SPD's, de modo

que a fonte solúvel resultou no aumento da maioria das frações inorgânicas de P, devido a sua rápida solubilização e disponibilização para as plantas. Por outro lado, a aplicação do FNR resultou em maiores teores de frações mais estáveis ou relacionadas a resíduos de fertilizante não solubilizados. Sistemas conservacionistas, como o SPD e aplicação de fontes solúveis podem aumentar os teores de P de diferentes labilidades, contudo, a aplicação de fertilizantes de menor solubilidade podem promover aumentos de frações mais estáveis que podem ser importantes no reabastecimento do P da solução do solo e na nutrição dos cultivos. Apesar das estratégias de manejo da adubação fosfatada serem citadas como potenciais influenciadoras na atividade da fosfatase ácida, não foram observados tais efeitos, de modo que ficou bastante evidente o efeito do sistema de manejo do solo e da camada avaliada na modulação da atividade desta enzima, o que está provavelmente relacionado aos maiores teores de Po e matéria orgânica do solo (MOS).

Palavras chaves: frações inorgânicas de fósforo; frações orgânicas de fósforo; atividade enzimática; sistema de preparo convencional do solo; sistema de plantio direto; fontes fosfatadas; doses de fósforo aplicadas.

6.2 INTRODUÇÃO

Os solos do Cerrado brasileiro naturalmente apresentam baixa disponibilidade de fósforo (P), e não sendo suficiente para sustentar a produtividade dos cultivos agrícolas, se faz necessária a aplicação de fertilizantes fosfatados para se elevar os seus teores a um determinado nível crítico que resulte em 80 (sistema de sequeiro) ou 90% (sistema irrigado) da produtividade relativa da cultura em questão, além de adubações de manutenção para suprir e repor o P exportado pelos cultivos (SOUSA; LOBATO, 2004).

Contudo, ao ser aplicado, os fertilizantes fosfatados reagem e liberam P inorgânico na solução do solo, o qual fica susceptível às reações de adsorção na matriz sólida do solo e precipitações na forma de compostos de baixa disponibilidade (SOUSA; VOLKWEISS, 1987; FINK et al., 2016). E por isto, o P muitas vezes se acumula nos solos após aplicações anuais de fertilizantes fosfatados a longo prazo (PAVINATO et al., 2020), resultando no seu acúmulo em diversas formas químicas com diferentes labilidades e capacidades de reabastecimento da solução do solo (RODRIGUES et al., 2016; PAVINATO et al., 2020; TIECHER et al., 2018).

Do P aplicado no ano em questão, de acordo com Vu et al. (2008), cerca de 10 a 20% é assimilado pelas plantas. E uma vez assimilado por plantas e microrganismos, este P passa para formas orgânicas as quais podem retornar para o solo através de exsudação de ácidos orgânicos e liberação de enzimas pelas raízes (MARGALEF et al., 2017; TOUHAMI et al., 2020), além da decomposição de palhada depositada na superfície e de raízes ao longo do perfil do solo (NUNES et al., 2021).

Tantos as frações inorgânicas como as frações orgânicas de P compreendem uma diversidade de compostos com diferentes graus de disponibilidade e labilidade, que podem ser comparáveis entre si, mas que diferem quanto as suas quantidades e proporções (HEDLEY et al., 1982; NUNES et al., 2020).

E uma das formas de se avaliar a distribuição das frações inorgânicas e orgânicas de um solo é através do fracionamento sequencial proposto por Hedley et al. (1982) que tem como princípio submeter uma amostra de solo a uma sequência de extrações com soluções ácidas e alcalinas que extraem o P contido em diferentes compostos inorgânicos e orgânicos lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis para as plantas (HEDLEY et al., 1982; COELHO et al., 2019). Esta classificação quanto a labilidade é possível devido a capacidade que cada extrator tem em extrair o P contido em compostos com diferentes forças de ligação, prevendo-se assim, a magnitude do tempo em que o P pode ser disponibilizado a partir de cada fração (GUPPY, 2021).

Essas frações com diferentes graus de labilidade, são mobilizadas a cada vez que surge a necessidade de repor os íons $\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$ que são assimilados nas áreas ao redor das raízes das plantas (SUÑER et al., 2018). Entretanto, a dinâmica de mobilização das diferentes frações de P dependem de diversos fatores relacionados aos parâmetros físico-químicos do solo (FINK et al., 2014; FINK et al., 2016), mas principalmente dos agentes biológicos que demandam este nutriente e se valem de ferramentas para obtê-lo, como as plantas e microrganismos que são capazes de produzir ácidos orgânicos e enzimas específicas para acessar um P de baixa a média labilidade, o qual pode ser imobilizado na estrutura dos microrganismos e outra parte disponibilizado diretamente na solução do solo, contribuindo na nutrição dos cultivos (MARGALEF et al., 2017; REDEL et al., 2019; TOUHAMI et al., 2020).

Entretanto, todos estes aspectos mencionados que interferem na distribuição das frações de P podem ser afetados por sua vez pelas estratégias de manejo do solo e da adubação fosfatada. Sistemas de preparo do solo, fertilizantes fosfatados com solubilidades contrastantes, modos de aplicações e doses aplicadas, podem impactar na distribuição química do P segundo as frações e quanto a sua distribuição ao longo do perfil do solo (SOLTANGHEISI et al., 2018; SOLTANGHEISI et al., 2020; NUNES et al., 2020). E a medida em que se avança no conhecimento da interação entre todos estes fatores, compreende-se mais sobre a dinâmica do P em solos tropicais de modo a se manejar mais eficientemente o P, culminando em maiores eficiências de uso deste nutriente e maior economicidade pelo produtor.

Diante disto o objetivo deste estudo foi avaliar a distribuição de frações inorgânicas e orgânicas de P e a atividade da fosfatase ácida até a camada de 20 cm, em um experimento conduzido por 22 anos com diferentes sistemas de manejo do solo e espécies de plantas de cobertura na entressafra, e com diversas estratégias de manejo da adubação fosfatada que envolvem fontes, modos de aplicações e doses de P aplicadas.

A partir disto foram estabelecidas como hipóteses de que sistemas de plantio direto nas camadas mais superficiais apresentam maiores teores de frações lábeis de P comparados ao sistema de plantio convencional, mas que este último apresenta maiores teores na camada de 10-20; A fonte solúvel promove os maiores teores de frações lábeis e moderadamente lábeis, com exceção das frações relacionadas ao P contido em minerais primários presentes em resíduos de apatita e de outras frações mais estáveis e de menor disponibilidade, como o P residual e P total; A maior dose promove os maiores teores de todas as frações inorgânicas e orgânicas de P.

6.3 MATERIAL E MÉTODOS

- DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O estudo se deu início em 1999 e foi conduzido por 22 anos em uma área experimental do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), localizada em Planaltina – DF (latitude 15°36'06" S e longitude 47°42'26" W). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é classificado como Cwa com temperatura e precipitação médias anuais de 21,2 °C e 1570 mm, respectivamente, e altitude de 1014 m. É característico desta região duas estações climáticas bem definidas, chuvosa de outubro a abril e seca de maio a setembro (Figura 1).

A fitofisionomia da região é o Cerrado no sentido restrito com um relevo suave a ondulado com 3% de declividade. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distrófico, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (EMBRAPA, 2013), com teor médio de argila, silte e areia na camada de 0-20 cm de 571, 72 e 357 g kg⁻¹, respectivamente.

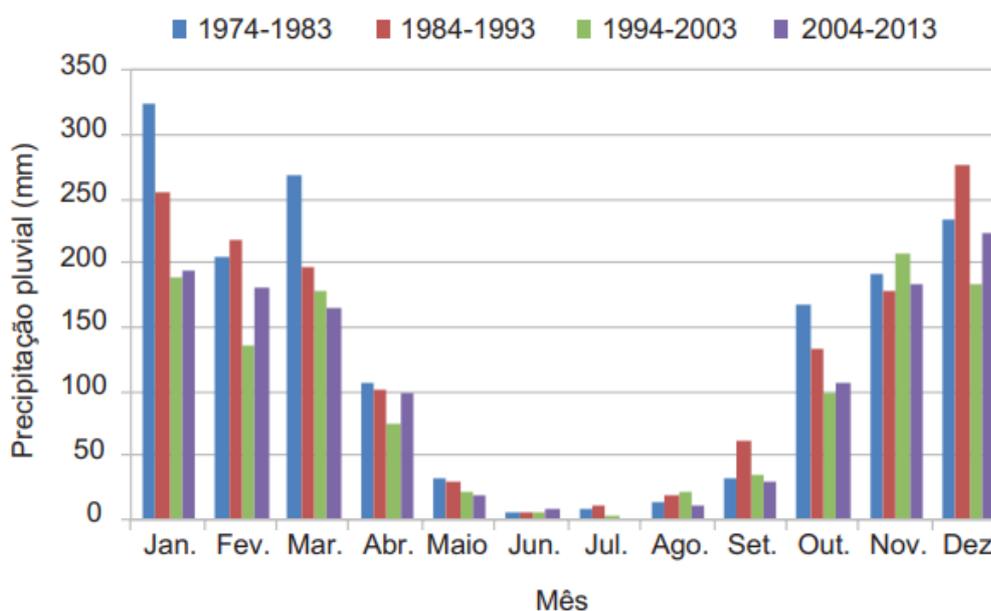


Figura 1. Precipitações médias mensais acumuladas (mm) por decênio, na estação principal da Embrapa Cerrados, localizada na região administrativa de Planaltina-DF. Fonte: Silva et al. (2017).

- HISTÓRICO DA ÁREA

Antes da implantação do experimento, a área em questão vinha sendo cultivada desde 1976, onde foi desmatada para implantação de pastagem e para produção de grãos que se

perdurou até 1996.

Em 1996 a área foi preparada com o objetivo de se corrigir a acidez do solo e os níveis de P e K, com o objetivo de se alcançar altos rendimentos, conforme Sousa e Lobato (2004). Neste mesmo ano agrícola (1996/97) e no subsequente (1997/98), a soja foi cultivada com 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no sulco de plantio, 80 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio e 30 kg ha⁻¹ de S na forma de gesso aplicados a lanço. Na safra de 1998/99 o milho foi cultivado com a mesma adubação de K e S, mas com a adição de 150 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia e com a ausência da adubação fosfatada. Esses três cultivos mencionados foram conduzidos com a finalidade do conhecimento da variabilidade da área, permitindo a correta escolha do delineamento experimental e a construção de uma elevada fertilidade, possibilitando o estudo do manejo do P nesta condição corrigida.

Em 1999/2000 o experimento foi implantado, com os parâmetros químicos do solo dentro das faixas adequadas (Tabela 1). A partir deste ano foi estabelecido nos cultivos de verão (1ª safra) uma sucessão soja-milho, e nos cultivos de outono/inverno (entressafra) plantas de cobertura, milheto ou plantas leguminosas, semeadas no final da estação chuvosa e roçadas no momento do florescimento.

As adubações com N, K e S foram realizadas nas mesmas doses aplicadas nos três anos anteriores à implantação do experimento e os tratamentos de P foram estabelecidos.

Com o objetivo de aumentar a produção da biomassa vegetal pelas plantas de cobertura, a partir do ano de 2008 as plantas de cobertura passaram a receber uma adubação de 45 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia, de modo a possibilitar uma maior produção de biomassa vegetal.

Tabela 1. Análise química do solo na camada de 0-20 cm antes da implantação do experimento.

pH	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	K ⁺	Al + H	CTC	V	P	COT
	-----cmol _c dm ⁻³ -----				%	mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹
5,40	4,54	0,15	3,66	8,35	56	10,50	13,34

Extratores: Ca + Mg (KCl 1 N); P e K (Mehlich-1); Al + H (Acetato de cálcio 1 N); COT (Walkley & Black).

Devido ao fenômeno climático comumente observado na região, denominado de veranico, os cultivos de soja e milho receberam irrigação suplementar por aspersão em situações de seca durante a estação chuvosa. A irrigação foi sempre definida com base em leituras de tensiômetros instalados na área a 20 cm de profundidade no solo, onde a irrigação era realizada quando o aparelho marcava uma pressão maior que 45 KPa. As plantas de

cobertura também receberam irrigação no inverno, onde não houve limitação de água.

- DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

Os tratamentos foram dispostos em um delineamento experimental de blocos ao acaso com parcelas divididas, em que nas parcelas principais estavam os três sistemas de manejo e nas subparcelas (4,5 x 11 metros) as estratégias de adubação com P.

O experimento consistiu em três sistemas de manejo:

1) sistema de preparo convencional, que compreendeu uma aração (arado de discos com profundidade ± 20 cm) e uma gradagem (grade niveladora), que foram realizadas todos os anos antes do plantio da soja ou do milho, e teve como planta de cobertura o milho (*Pennisetum galucum*) (SPC);

2) sistema de plantio direto com o milho como planta de cobertura (*Pennisetum galucum*) (SPD mil);

3) sistema de plantio direto com plantas leguminosas como planta de cobertura (SPD leg). Ao longo dos 22 anos houve o cultivo de diferentes espécies leguminosas neste sistema, em que se cultivou amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*), mucuna (*Mucuna aterrima*) e crotalária (*Crotalaria spectabilis*) (Tabela 2).

Em cada sistema foi disposto um fatorial que consistiu na utilização de duas fontes de fertilizante fosfatado: superfosfato triplo (SFT) com 20,5% de P total, sendo 92% solúvel em CNA + água, e fosfato natural reativo (FNR) de Gafsa com 12% de P total, sendo 44% solúvel em ácido cítrico a 2% (fosfato moído (<0,063 mm) para solução de extração de 1:100), aplicados no sulco de semeadura ou a lanço, nas doses de 22 e 44 kg ha⁻¹ de P por ano. Além de uma testemunha adicional (0 kg ha⁻¹ de P por ano).

Tabela 02. Tratamentos conduzidos e avaliados

TRATAMENTOS	FONTES	DOSES (kg P ha ⁻¹)	MODO DE APLICAÇÃO
1	-	0	-
2	SFT	22	Sulco
3	SFT	22	Lanço
4	SFT	44	Sulco
5	SFT	44	Lanço
6	FNAR	22	Sulco
7	FNAR	22	Lanço
8	FNAR	44	Sulco
9	FNAR	44	Lanço

SFT: superfosfato triplo

FNR: fosfato natural de alta reatividade

- AMOSTRAGEM DO SOLO

Em junho de 2021 (22º cultivo da área) após a colheita do milho, amostragens de solo foram realizadas nas profundidades de 0-5; 5-10, 10-20 cm, utilizando um trado de 5 cm de diâmetro. Para cada parcela foi formada uma amostra composta a partir de três locais dispostos aleatoriamente, sendo que em cada local foram amostrados 5 pontos equidistantes e transversalmente à linha de plantio. Considerando então três locais dentro de cada parcela x cinco subamostras por local – uma na linha e quatro nas entrelinhas equidistantes, coletou-se 15 subamostras por parcela para cada camada amostrada (Figura 2).

O solo foi homogeneizado e separado em duas porções, uma para realização de análises químicas, sendo esta seca ao ar e passada em peneira de 2 mm ou de 0,5 mm e outra para análise microbiológica, que foi passada em peneira de 4 mm e armazenada a uma temperatura de 7° C até o momento das análises.

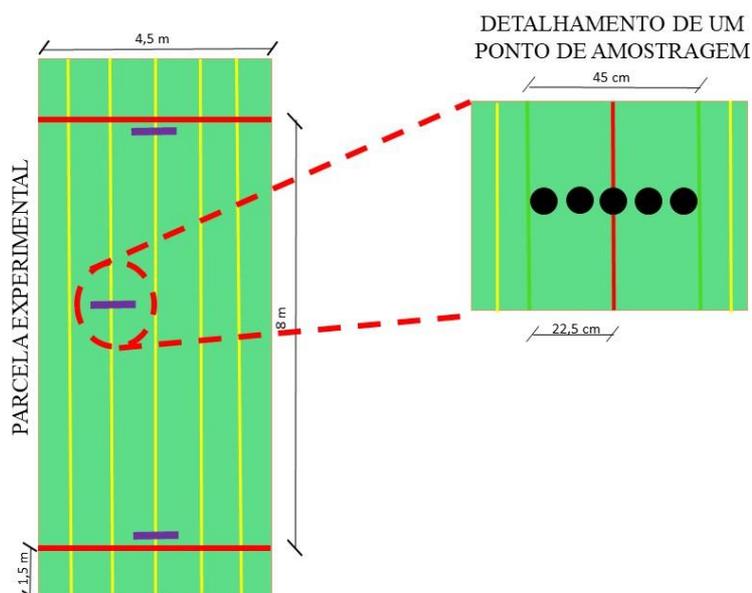


Figura 2. Esquema de vista superior da parcela evidenciando a área útil destinada a amostragem (delimitada pelas linhas vermelhas) e os locais de amostragens representados pelas linhas roxas transversais às linhas de cultivos (representadas pelas linhas amarelas).

- FRACIONAMENTO QUÍMICO DO P

A partir das amostras de solo foi realizado o fracionamento químico do P originalmente proposto por Hedley et al., (1982) com modificações de Condrón et al., 1985.

Amostras de 0,5 g de solo foram submetidas a extrações sequenciais com resina trocadora de ânions, NaHCO_3 0,5 mol L^{-1} , NaOH 0,1 mol L^{-1} , HCl 1,0 mol L^{-1} e NaOH 0,5 mol L^{-1} . Após essas extrações, o solo remanescente foi seco em estufa (40° C), e submetido a digestão com $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{MgCl}_2$ (BROOKES; POWLSON, 1981; HEDLEY et al., 1982), para obtenção do P residual.

Nos extratos alcalinos do fracionamento, o P_i foi obtido por acidificação do extrato e centrifugação, visando à precipitação de compostos orgânicos (TIESSEN; MOIR, 2008) e determinados por espectrofotometria a 820 nm (MURPHY; RILEY, 1962), enquanto o P total foi obtido por digestão do extrato com $\text{H}_2\text{SO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ em autoclave (103,4 kPa, 121° C, 2 h) (USEPA, 1971) e determinação por espectrofotometria a 882 nm. O P_o desses extratos será calculado pela diferença entre P total e P_i .

O P_i dos extratos ácidos foi obtido por espectrometria a 882 nm de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP/AES). Neste fracionamento, as frações de P podem ser classificadas em três grupos: (1) P lábil, composto pelo P_i da resina, P_i e P_o extraído por NaHCO_3 mol L^{-1} ; (2) P moderadamente lábil, composto pelo P_i e P_o extraído por NaOH 0,1 mol L^{-1} e 0,5 mol L^{-1} e P_i extraído por HCl 1,0 mol L^{-1} ; e (3) P pouco lábil, composto pelo P residual (NUNES et al., 2020).

- ATIVIDADE ENZIMÁTICA

As atividades da enzima fosfatase ácida foram analisadas conforme Tabatabai (1994), baseado na determinação colorimétrica do p-nitrofenol (coloração amarela) formado após a adição de p-nitrofenil fosfato (PNF) (MENDES et al., 2003). Estas análises foram realizadas em duplicatas, com um branco para cada amostra e as atividades expressas como mg p-nitrofenol kg^{-1} de solo h^{-1} .

- ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Foi realizada análise de variância para todas as frações inorgânicas e orgânicas de P obtidas pelo fracionamento e para os valores de atividade da fosfatase ácida.

Para análise de variância foi utilizado o seguinte modelo:

$$Y_{ijklm} = \mu + B_i + S_j + F_k + M_l + D_m + C_n + SF_{jk} + SM_{jl} + SD_{jm} + SC_{jn} + FM_{kl} + FD_{km} + FC_{kn} + MD_{lm} + MC_{ln} + SFD_{jkm} + SFM_{jkl} + SFC_{jkn} + MFD_{lkm} + MFC_{lkn} + SFMDC_{jklmn} + \text{erro} (ijklm).$$

onde: μ = média geral dos dados; B = bloco ($i = 1,2,3$); S = Sistema de preparo ($j = 1,2$); F = Fonte de fósforo ($k = 1,2$); M = Modo de aplicação ($l = 1,2$); D = dose ($m = 1,2$); Camada de solo ($n = 1,2,3$), Erro = erro experimental.

Quando a análise de variância apresentou significância, o teste de Tukey ($p < 0,05$) foi utilizado para diferenciação das médias, e/ou quando necessário foi realizado o teste t de Student ($p < 0,05$). Todos os procedimentos estatísticos foram realizados utilizando o programa R empregando-se o software R versão 4.0.2 (R Core equipe, 2020).

6.4 RESULTADOS

- *Interação entre sistemas de manejo do solo e das camadas avaliadas*

Os sistemas de manejo do solo foram os principais moduladores de estratificação dos teores de P ao longo do perfil do solo, tendo outros fatores relacionados ao manejo do solo e da adubação fosfatada menor influência. A Figura 3 e Tabela A5 apresenta o cenário de distribuição das frações para as camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm após 22 anos de condução das estratégias de manejo aqui adotadas.

Para as frações inorgânicas (P-resina, $P_i \text{NaHCO}_3$, $P_i \text{NaOH } 0,1$, $P_i \text{-HCl}$ e $P_i \text{NaOH } 0,5$), de modo geral, o SPC apresentou os menores teores nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, em relação aos dois SPD's avaliados. Apenas na camada de 5-10 cm para as frações de P-resina e $P_i \text{NaOH } 0,1$, e na camada de 0-5 cm para a fração do HCl, que não houve diferenças significativas entre o SPC e o SPD mil.

Vale ressaltar também que para todos os efeitos e interações entre as estratégias de manejo, os teores de P disponível por resina ficaram muito abaixo daquilo que se esperava como tendência ao longo dos anos (Figura A1), e para o valor que é estabelecido como nível crítico, até para tratamentos com a maior dose de P aplicada. Isto ocorreu possivelmente devido a uma questão metodológica, pois foi utilizada nesta análise do último ano uma resina trocadora de ânions na forma de lâmina com uma área de superfície menor quando comparada com resina trocadora de ânions na forma de esfera, que foi a utilizada nos anos anteriores. Por isto, com esta menor área disponível para adsorção do P, uma menor quantidade de P foi extraído e determinado, resultando nos baixos valores observados (MUMBACH et al., 2018).

Para as frações orgânicas ($P_o \text{NaHCO}_3$, $P_o \text{NaOH } 0,1$ e $P_o \text{NaOH } 0,5$), em todas as camadas avaliadas, não houve diferenças entre os sistemas para a fração $P_o \text{NaHCO}_3$; o SPD mil apresentou os maiores teores de $P_o \text{NaOH } 0,1$ em relação aos outros dois sistemas; e os

dois SPD's (SPD mil e SPD leg) apresentaram os maiores teores de Po NaOH 0,5 em relação ao SPC.

Para o P residual, tanto o SPC como o SPD mil apresentaram os menores teores em relação ao SPD leg, independente da camada avaliada. Já para o P total, o SPD leg apresentou os maiores teores, e estes foram semelhantes estatisticamente apenas na camada de 10-20 cm do SPC e na camada de 0-5 cm do SPD mil. Os menores teores de P total encontrados ocorreram na camada de 0-5 cm do SPC.

Não houve diferenças entre os sistemas na camada de 10-20 cm, com exceção apenas do Po NaOH 0,1 e 0,5 ($p < 0,05$), além do P residual e total. O SPD mil apresentou os maiores teores para a fração do Po NaOH 0,1 em comparação ao SPC e ao SPD leg, para todas as camadas, enquanto para a fração Po NaOH 0,5, o SPD mil e o SPD leg apresentaram os maiores teores nesta camada.

Não houve diferenças entre os teores de P inorgânico nas camadas de solo do SPC, apenas das frações orgânicas, Po NaHCO₃, Po NaOH 0,1 e 0,5, onde os maiores teores observados foram na camada de 0-5 cm, com exceção apenas do Po NaOH 0,1 que apresentou maiores teores nas camadas de 0-5, e 5-10 cm.

Já para o SPD mil e SPD leg, foi observada estratificação de quase todas as frações, sendo que de modo geral a camada de 0-5 cm apresentou os maiores teores. Apenas Pi e Po NaOH 0,1 apresentaram os maiores teores nas camadas de 0-5 e de 5-10 cm em relação a de 10-20 cm. E para o P residual não houve diferenças entre as camadas nestes dois sistemas.

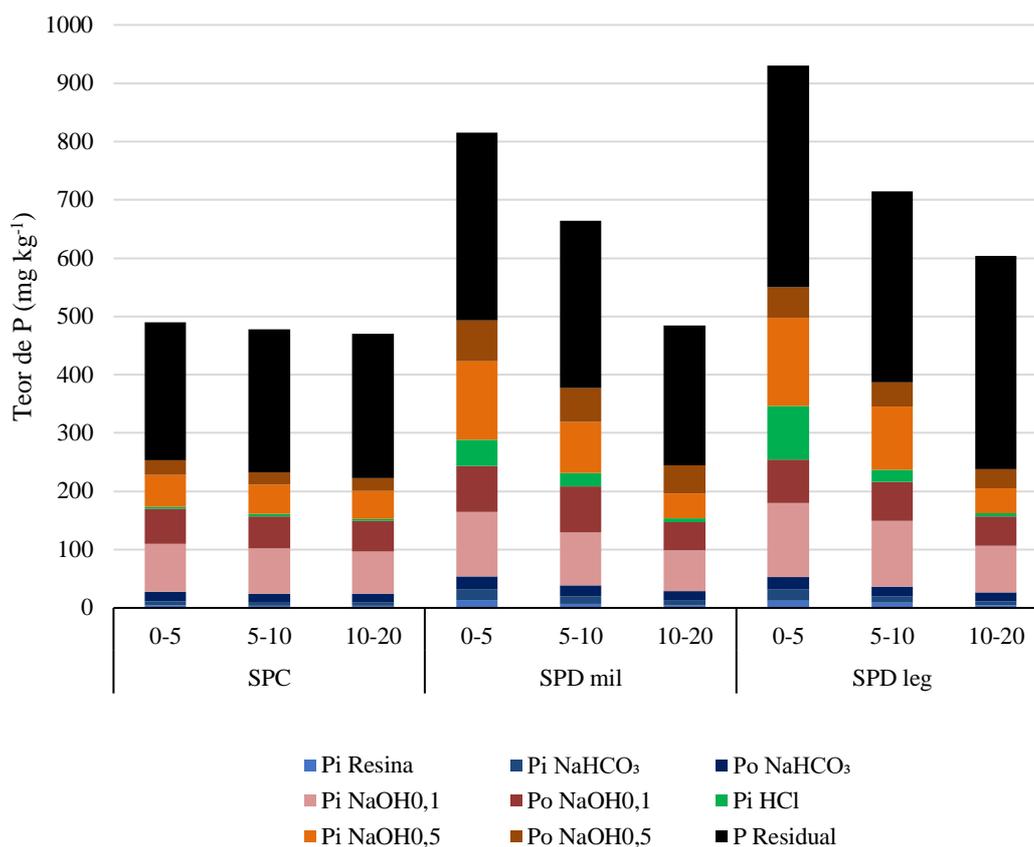


Figura 3. Distribuição das frações inorgânicas e orgânicas de P (mg kg^{-1}) nos sistemas de manejo do solo e nas camadas avaliadas. As médias foram obtidas a partir das duas fontes de adubo fosfatado, dois modos de aplicação, duas doses de P, três camadas de solo e três repetições ($n = 81$).

- *Interação entre sistemas de manejo do solo e doses de p aplicadas*

A Figura 4 e Tabela A6 apresenta a distribuição das frações de P em função dos sistemas de manejo do solo e das doses de P aplicadas considerando a média das camadas amostradas. Em relação às testemunhas ($0 \text{ kg de P ha}^{-1}$) para a fração P-resina, os dois SPD's apresentaram os maiores teores em relação ao SPC ($p < 0,05$). Não houve diferenças entre os sistemas de manejo do solo na dose de $22 \text{ kg de P ha}^{-1}$, enquanto na dose de $44 \text{ kg de P ha}^{-1}$, o SPC apresentou os menores teores.

Em relação às frações Pi NaHCO_3 , Pi NaOH 0,1 e Pi NaOH 0,5, o SPC também apresentou os menores teores em relação aos dois SPD's, em ambas as doses de P aplicada. Não houve diferenças entre as testemunhas para Pi NaHCO_3 e Pi NaOH 0,5, apenas para Pi NaOH 0,1, onde a testemunha do SPD leg apresentou os maiores teores ($p < 0,05$).

O SPD leg proporcionou os maiores teores da fração P-HCl em ambas as doses de P aplicadas, mas apenas em relação ao SPC. Contudo, a testemunha do SPD mil apresentou os maiores teores desta fração em relação aos demais sistemas ($p < 0,05$).

Em relação às frações orgânicas, não houve diferenças entre os sistemas para os teores de Po NaHCO₃ em nenhuma dose de P aplicada e nem na testemunha ($p < 0,05$). Independente da dose, o SPD leg e o SPC apresentaram os menores teores de Po NaOH 0,1 em relação ao SPD mil, e o oposto ocorreu nas testemunhas, onde o SPD leg apresentou o maior teor em relação ao SPC.

Assim como ocorreu com a fração de Po NaOH 0,1, para o Po NaOH 0,5, tanto nas doses de 22 e 44 kg de P ha⁻¹ como na testemunha, o SPC apresentou os menores teores ($p < 0,05$).

Quanto ao P residual, que consiste em formas de P ocluído com alta força de ligação e baixa disponibilidade, o SPD leg apresentou os maiores teores em relação aos demais sistemas, independente da dose de P aplicada ($p < 0,05$).

Para o P total, na dose de 44 kg de P ha⁻¹, o SPD leg apresentou os maiores teores em relação aos outros dois sistemas, enquanto na dose de 22 kg de P ha⁻¹, este apresentou os maiores teores apenas em relação ao SPC. Para as testemunhas também foram encontrados os maiores teores no SPD leg ($p < 0,05$).

Quanto ao efeito das doses dentro de cada sistema de manejo do solo, de modo geral, para os SPD's (SPD mil e SPD leg) foi observado maiores teores das frações de P quando a dose aplicada foi a de 44 kg de P ha⁻¹ em comparação a de 22 kg de P ha⁻¹, com exceção apenas do Po NaOH 0,1, P-HCl e P residual. Enquanto para o SPC, houve diferenças entre as doses para as frações Po NaHCO₃, Pi NaOH 0,1 Pi e Po NaOH 0,5, além de P total, sendo as exceções as frações de P-resina, Pi NaHCO₃, Po NaOH 0,1, P-HCl e P residual.

Para todos os sistemas de manejo do solo avaliados, o maior aporte de P na dose mais elevada, não levou a aumentos das frações Po NaOH 0,1, P-HCl e P residual, em comparação à dose de 22 kg ha⁻¹.

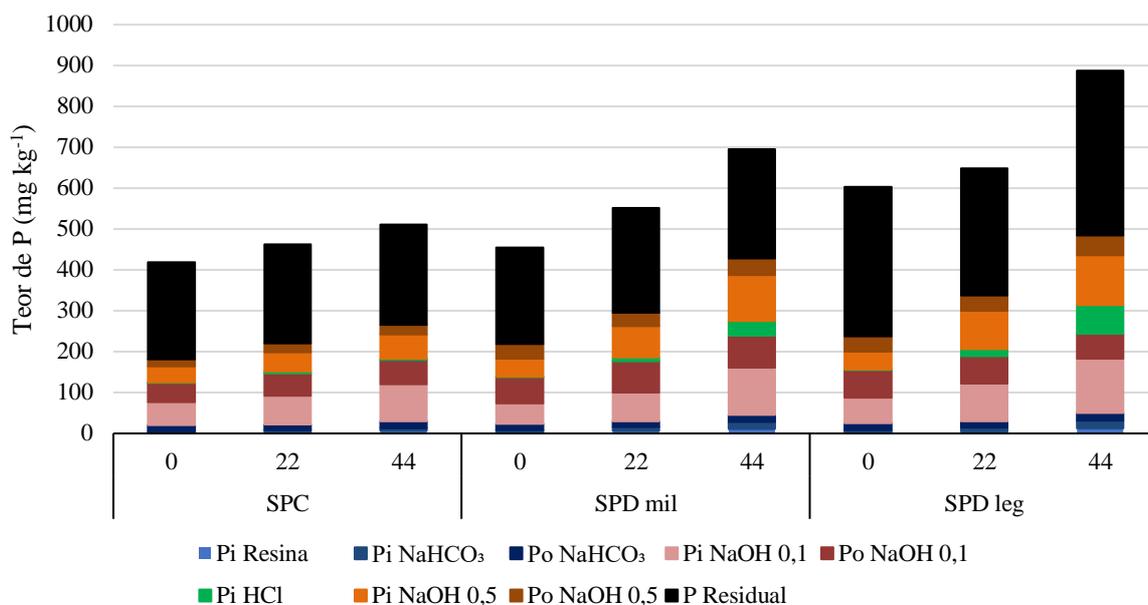


Figura 4. Distribuição das frações inorgânicas e orgânicas de P (mg kg^{-1}) nos sistemas de manejo do solo e nas doses de P aplicadas. As médias foram obtidas a partir das duas fontes de adubo fosfatado, dois modos de aplicação, três camadas de solo e três repetições ($n = 36$).

- *Interação entre sistemas e fontes de p aplicadas*

Na interação sistemas de manejo do solo e fonte de P aplicadas, foi observado novamente, para a maioria das frações, os maiores teores de P para os dois SPD's e os menores para o SPC quando o SFT foi aplicado ($p < 0,05$) (Figura 5 e Tabela A7). As exceções foram apenas para as frações de Po NaHCO₃ e Po NaOH 0,1 onde não houve diferenças entre os sistemas, e para o P residual e total, onde o SPD leg apresentou maiores teores que o SPD mil e o SPC, independente da fonte aplicada.

Houve diferenças entre os sistemas quando o FNR foi aplicado, nas frações P-HCl, Pi e Po NaOH 0,5, P residual e total. O SPC e o SPD mil apresentaram os menores teores em relação ao SPD leg de P-HCl, P residual e P total; e para as frações de Pi e Po NaOH 0,5, os dois SPD's apresentaram os maiores teores em relação ao SPC.

De modo geral, quando se tratou do SPC, não houve diferenças entre as fontes ($p < 0,05$), apenas para Po NaOH 0,5, caso em que o SFT promoveu os maiores teores. Para os dois SPD's, foi observado para a maioria das frações que o SFT promoveu os maiores teores, salvo as exceções do Po NaHCO₃, Po NaOH, P residual e P total, onde não houve diferenças entre as fontes, e o P-HCl, onde o FNR promoveu os maiores teores.

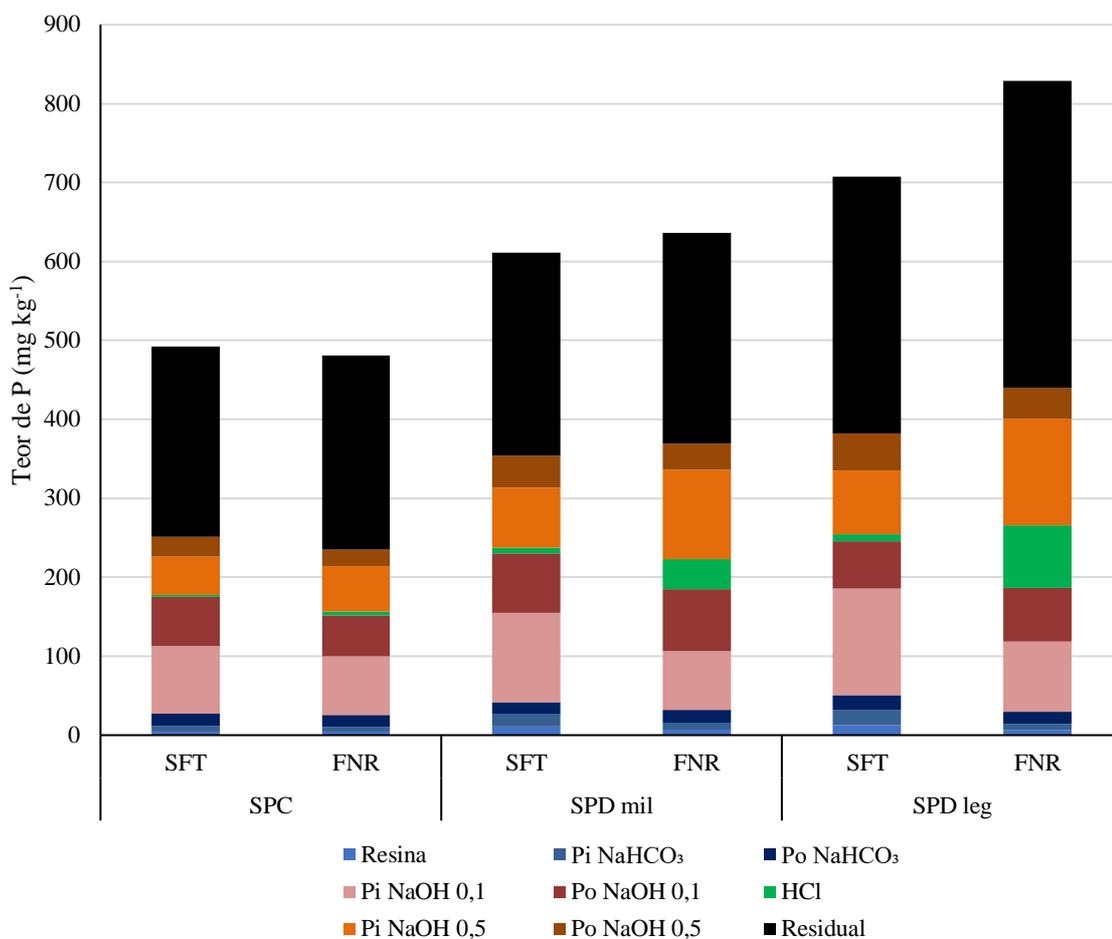


Figura 5. Distribuição das frações inorgânicas e orgânicas de P (mg kg^{-1}) nos sistemas de manejo do solo e nas fontes de P aplicadas. As médias foram obtidas a partir de dois modos de aplicação, duas doses de P, três camadas de solo e três repetições ($n = 36$).

- *Aumento das frações inorgânicas e orgânicas de P considerando as doses aplicadas*

A Figura 6 apresenta a diferença observada para cada fração quando se partiu da testemunha para o tratamento com a dose de $22 \text{ kg de P ha}^{-1}$, e deste último para a dose de $44 \text{ kg de P ha}^{-1}$ na média das camadas amostradas, evidenciando quais foram as frações mais impactadas com a entrada do fertilizante, e quando esta foi dobrada em magnitude.

De modo geral, a introdução do fertilizante fosfatado na menor dose incrementou os teores de Pi moderadamente lábil, como Pi HCl e Pi NaOH 0,1, e os teores de P lábil (resina e NaHCO_3), em relação às testemunhas. As diferenças observadas entre a dose mais alta e a mais baixa de P, por sua vez, revelam os efeitos de um novo aporte deste nutriente. Neste caso, os incrementos nas frações mais lábeis foram ainda mais elevados, porém também houve ganhos nas frações menos ou pouco lábeis.

Em todos os casos, as variações nos teores de P orgânico foram bem menos intensas do que as vistas nas frações inorgânicas. De modo geral, houve tendência de ganhos de Po quando se adotou uma condição menos restritiva de P no sistema (maior dose), e quando a dose foi baixa (22 kg P ha⁻¹), houve alguma tendência de mineralização de Po ou manutenção dos teores, em relação à testemunha.

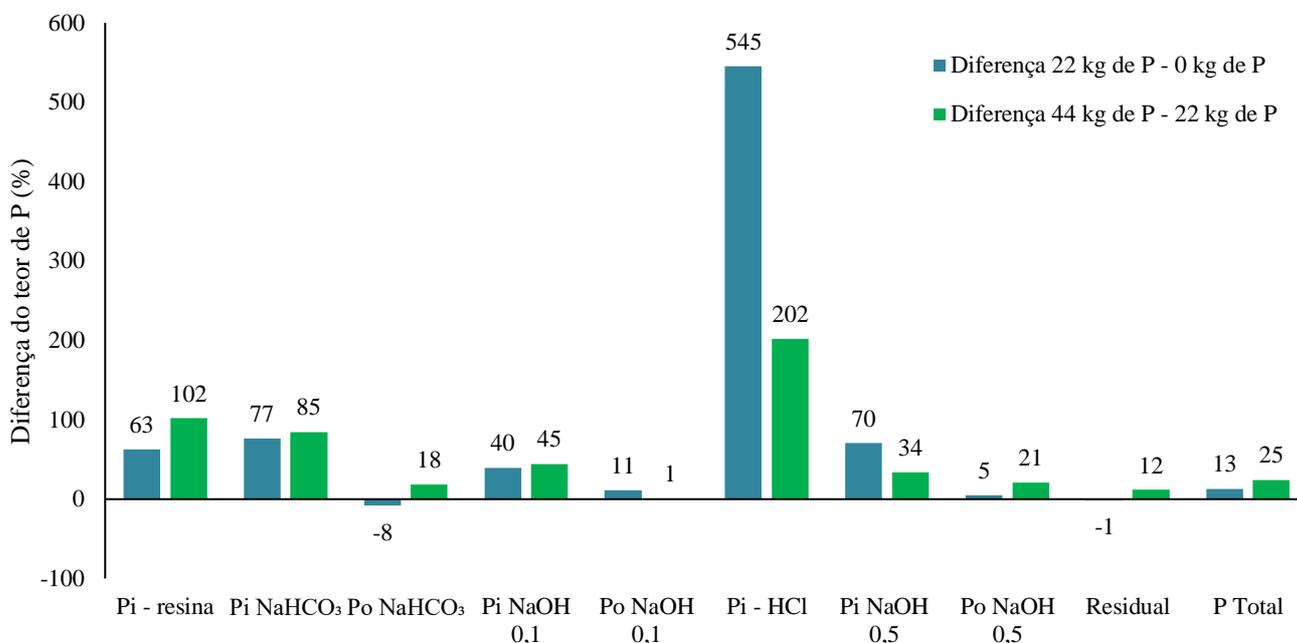


Figura 6. Distribuição das frações inorgânicas e orgânicas de P (%) nos sistemas de manejo do solo e nas fontes de P aplicadas. As médias foram obtidas a partir de três sistemas de manejo do solo, dois modos de aplicação, duas fontes de P, três camadas de solo e três repetições (n = 108).

- *Atividade da fosfatase ácida*

A atividade da fosfatase ácida foi influenciada pelos sistemas de manejo do solo e pela camada avaliada ($p < 0,05$) (Figura 7). A maior atividade da fosfatase ácida na camada de 0-10 cm foi observada no SPD mil, e a menor atividade no SPC. Já na camada de 10-20 cm, o SPC apresentou a maior atividade, e o SPD mil a menor. Independente do sistema, a camada de 0-10 cm apresentou os maiores valores de atividade da fosfatase ácida em relação a camada de 10-20 cm.

Quando se avaliou a interação entre sistemas, fontes e doses, foi observado ausência de resposta significativa para os efeitos simples dos fatores, e para as interações duplas e triplas ($p < 0,05$) (Figura 8). Mas mesmo não havendo diferença significativa, houve uma tendência da

testemunha apresentar os maiores valores de atividade enzimática em relação aos tratamentos adubados, com exceção do SFT aplicado na dose de 44 kg de P ha⁻¹.

Na Figura 9 é apresentada a relação entre a atividade da fosfatase ácida e os teores de P orgânico obtido com os diferentes extratores no fracionamento sequencial de Hedley et al. (1982). Todas as relações foram significativas pelo modelo linear ($p < 0,05$), onde houve aumento da atividade enzimática a medida em que se aumentou os teores de P orgânico de diferentes labilidades.

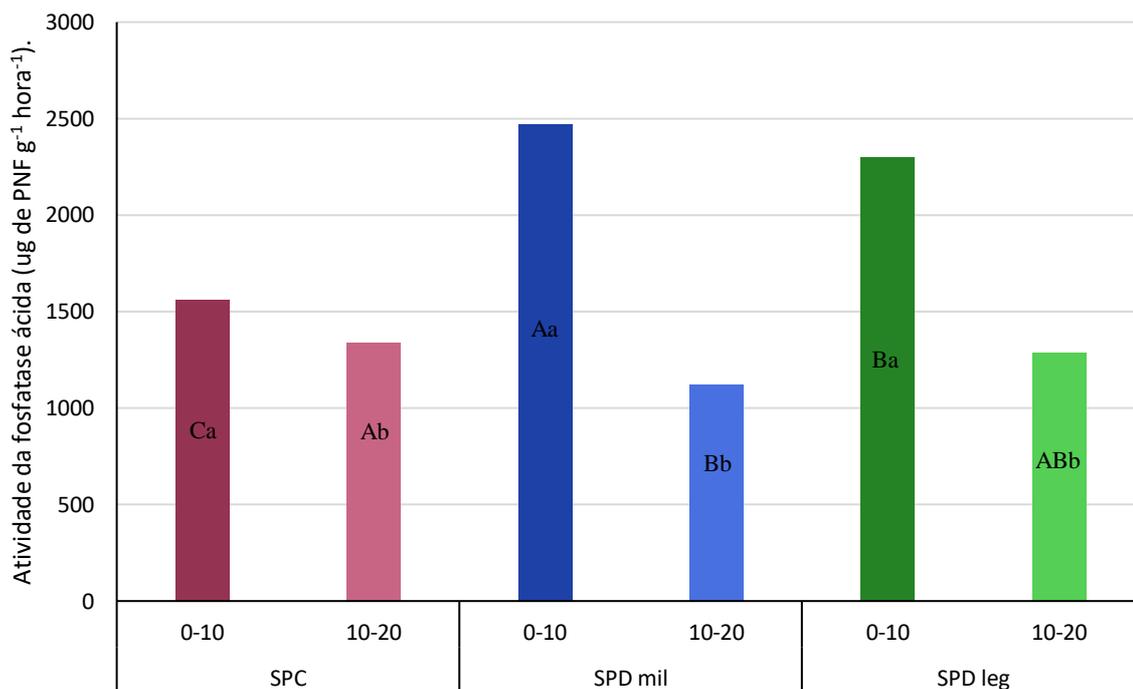


Figura 7. Atividade da fosfatase ácida (ug de PNF g⁻¹ hora⁻¹) nas camadas de 0-10 e 10-20 cm em função dos sistemas de manejo do solo. As médias foram obtidas a partir de duas fontes, dois modos de aplicação e duas doses de P, três camadas de solo e em três repetições (n = 72). Letras maiúsculas comparam os sistemas de manejo do solo dentro de um mesmo nível de camada. Letras minúsculas comparam as camadas dentro de um mesmo nível de sistema de manejo do solo ($p < 0,05$).

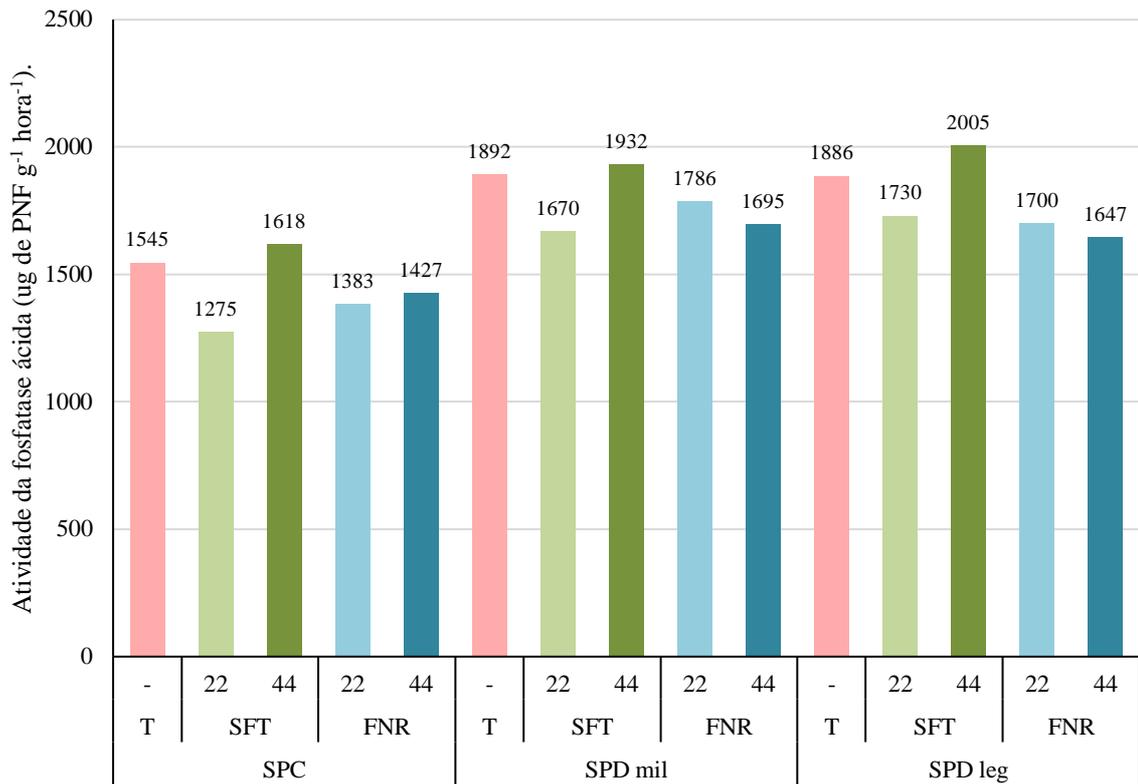


Figura 8. Atividade da fosfatase ácida (ug de PNF g⁻¹ hora⁻¹) em função dos sistemas de manejo do solo, e das fontes e doses de P aplicadas. As médias foram obtidas a partir de dois modos de aplicação e três repetições (n = 6).

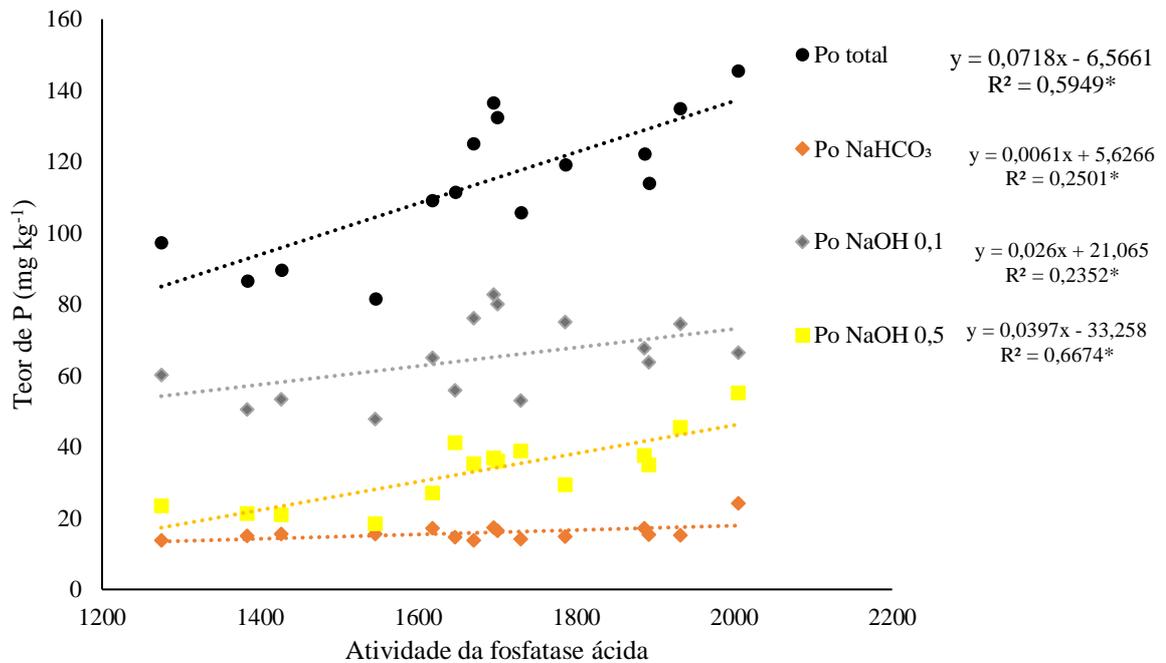


Figura 9. Relações da atividade da fosfatase ácida (μg de PNF g^{-1} hora^{-1}) com os teores das diferentes frações orgânicas de P obtidas na extração sequencial de Hedley et al. (1982), considerando das estratégias de manejo do solo e da adubação fosfatada. As médias foram obtidas a partir de dois modos de aplicação e três repetições ($n = 6$). *Significância pelo modelo linear ($p < 0,05$).

6.5 DISCUSSÃO

Devido à complexidade do fracionamento e o grande número de estratégias de manejo do solo e da adubação envolvidas, para facilitar o entendimento, a discussão se atentará às tendências consistentemente observadas entre as várias interações avaliadas, tendo sido descrito anteriormente as exceções observadas.

- *Sistemas de manejo do solo como moduladores da estratificação de P no perfil, e sua interação com doses de P aplicadas*

Para todas as interações entre sistemas de manejo do solo e as estratégias de manejo da adubação fosfatada, foi observado uma tendência do SPC apresentar os menores teores, principalmente das frações inorgânicas, nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, em comparação ao SPD mil e SPD leg nestas mesmas camadas, e de ausência de diferenças entre os sistemas quando se tratou da fração mais lábil (Po NaHCO_3), e os dois SPD's apresentando os maiores teores de frações moderadamente lábeis, como Po NaOH 0,1 e Po NaOH 0,5 (Figura 3 e Tabela A5).

Como observado no estudo de Fink et al. (2016) em diferentes tipos de solos, a capacidade máxima de adsorção de P foi maior em um solo submetido ao preparo convencional quando comparado ao SPD, bem como por consequência, os autores também encontraram maiores teores de P remanescente em solos sob SPD. Isto está de acordo com os baixos teores de frações lábeis (P-resina, Pi e Po NaHCO_3) encontrados no SPC em comparação aos SPD's, existindo também consequentemente uma tendência de que o P aplicado em um SPC passe para as frações menos lábeis, principalmente devido ao revolvimento e exposição de P a novos sítios de adsorção. A maior disponibilidade de P em solos sob SPD, principalmente das camadas superficiais, é justificada pelos maiores teores de MOS encontrados (coincidindo com o local de deposição do fertilizante), permitindo que esta seja uma competidora pelos sítios de adsorção do P, ao mesmo tempo que age como fonte, aumentando a disponibilidade deste (YAN et al., 2013; HUA et al., 2008; JIMÉNEZ et al., 2019; SOLTANGUEISI et al., 2020).

Mas estes resultados se diferem daqueles encontrados por Costa (2019), que ao avaliarem diferentes sistemas de manejo do solo, com diferentes tempos de condução, não detectaram diferenças significativas nas frações inorgânicas lábeis nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, entre o sistema convencional e os de plantio direto.

Em relação a fração orgânica lábil, Soltangheisi et al. (2018) não encontraram também alterações nas proporções destas frações quando se utilizou diversas plantas de cobertura com o superfosfato simples ou o FNR, podendo ser este o comparativo para o milho versus leguminosas aqui avaliados, o que entra em conflito com aquilo que se espera segundo Motavalli e Miles (2002) e Qiau et al. (2012), de que as plantas de cobertura seriam capazes de aumentar a ciclagem de P_i e aumentar as frações de P_o. Contudo, Soltangheisi et al. (2018) salientou que a mineralização do P orgânico, absorção pelas plantas ou transformação em frações mais estáveis, tem impedido o aumento das frações de modo geral em solos tropicais altamente intemperizados, e conseqüentemente a observância do efeito das estratégias de manejo. E mesmo tendo o tempo como um fator influenciador das alterações nas frações orgânicas, Subero e colaboradores (2016) também não encontraram diferenças nas frações orgânicas de P, que não se alteraram significativamente ao longo de 50 anos de condução dos sistemas.

Outra possível justificativa para a ausência de resposta da fração orgânica lábil é a de que a entrada de C é a principal moduladora da atividade microbiana que realiza a mineralização/imobilização do P orgânico (HALLAMA et al., 2019), e uma vez que em todos os sistemas foram cultivadas plantas de cobertura visando o aumento do aporte de C, possivelmente os níveis de C se estabilizaram nestes sistemas e não foi possível verificar grandes efeitos nas alterações dos reservatórios desta fração. Entretanto, Hallama et al. (2019) salienta que o efeito do acúmulo de C na disponibilidade de P orgânico ainda não é totalmente esclarecido e envolve complexas relações entre solo, microrganismos e plantas.

O aumento das frações inorgânicas e orgânicas de P moderadamente lábeis nos SPD's em relação ao SPC já foi relatado em estudos anteriores, como foi observado com a fração P_i e P_o NaOH 0,5 (COSTA, 2019; NUNES et al., 2020). O aumento destas frações em sistemas conservacionistas ocorre em virtude deste extrator extrair um P que está fisicamente protegido nos agregados do solo (HEDLEY et al., 1982), de modo que com a ausência do revolvimento, aumenta-se a diversidade e a atividade microbiana (KRAUT-COHEN et al., 2020), conseqüentemente a estabilização da MOS e dos agregados do solo de um SPD (ASSIS; LANÇAS, 2010), intensificando a passagem do P para esta fração, ao contrário do que ocorre no SPC com o constante revolvimento e destruição dos agregados (RESENDE, 2019).

E os menores teores de P_o NaOH 0,5 no SPC podem também ser justificados tendo por embasamento o estudo de trilha realizado por Tiecher et al. (2018). O objetivo do estudo de Tiecher et al. (2018) foi compreender a magnitude da contribuição das frações inorgânicas e orgânicas de P no reabastecimento do P da solução do solo, e tiveram como conclusão que em um SPC as frações que mais reabastecem o P da solução do solo são as orgânicas, enquanto no SPD há uma contribuição mais equilibrada de todas as frações inorgânicas e orgânicas. Tendo as frações orgânicas um papel mais fundamental na nutrição dos cultivos no SPC, espera-se depleções destas frações, como apresentado neste estudo.

Os maiores teores de P observados nas camadas de 0-5 e 5-10 cm nos SPD's em relação ao SPC já era algo esperado e amplamente consolidado na literatura (GATIBONI et al., 2007; JERKE et al., 2012; NUNES et al., 2021; RODRIGUES et al., 2021). Entretanto, a ausência de diferenças das frações inorgânicas entre os sistemas de manejo do solo para a camada de 10-20 cm (Figura 3 e Tabela A5) é um resultado que se contrapõe com o observado na maioria dos estudos, onde o SPC normalmente passa a apresentar maiores teores de P em relação ao SPD nesta camada (SOUZA, 2013; NUNES et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2020).

Em função dos menores teores de P total encontrados no SPC em relação aos SPD's (Figura 3e Tabela A5), e a não observância de grandes diferenças de produtividade e exportação do P entre esses sistemas, supõe-se que na ocasião do revolvimento, parte do P foi distribuído para camadas abaixo dos 20 cm no SPC, não permitindo a detecção de todo o P deste sistema. Isto auxilia no entendimento da ausência de diferenças entre os sistemas na camada de 10-20 cm, onde normalmente se esperaria maiores teores no SPC em relação aos SPD's.

Ao contrário do que muitos estudos mostram (OLIVEIRA et al., 2020; NUNES et al., 2020), foi observado estratificação das frações orgânicas no SPC (P_o NaHCO₃, P_o NaOH 0,1 e 0,5), onde foi observado maiores teores na camada de 0-5 cm. Este resultado é justificado pela deposição de resíduos vegetais na superfície do solo (SCHWAB et al., 2006; MALLARINO; BORGES, 2006; BAAN et al., 2009; TIECHER et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2020b). Além de que é nas camadas superficiais que ocorre a maior concentração do sistema radicular (SCARPARE et al., 2019), que pode também contribuir para estabelecer certa estratificação, ainda que ocorra o revolvimento anual.

Quando considerada a dose de P aplicada (Figura 4, Figura 6 e Tabela A6), devido a entrada de P via fertilizantes ser um fator primordial para aumentos nos pools inorgânicos e orgânicos de P do solo (CONTE et al., 2003; SOLTANGUEISI et al., 2020), os maiores teores, da maioria das frações avaliadas, foram obtidos na dose de 44 kg de P ha⁻¹ em relação a dose de 22 kg de P ha⁻¹ em todos os sistemas de manejo do solo, salvo algumas exceções (P_o NaOH

0,1, P-HCl e P residual). Isto está de acordo com os estudos de Gatiboni et al. (2007) e Souza (2008), que constataram que adubações mais elevadas e acima da exportação pela cultura, provocam aumentos na maioria das frações das extrações sequenciais de Hedley et al. (1982).

Também Costa (2019), ao avaliar sistemas de manejo do solo, convencional e direto, com diferentes tempos de condução, constataram que a quantidade de P aplicada foi o principal fator modulador para se observarem maiores teores das frações inorgânicas.

De modo especial, Gatiboni et al. (2007) e Souza (2008) salientaram em seus estudos que adubações mais elevadas de P podem provocar aumentos nas frações inorgânicas moderadamente lábeis (Pi NaOH 0,1 e 0,5), o que também foi observado neste estudo.

O que corrobora também com os estudos de Pavinato et al. (2009) e Rosolem et al. (2014), que concluíram que frações moderadamente lábeis, como Pi NaOH 0,1 e 0,5, aumentam com a aplicação dos fertilizantes fosfatados, especialmente em maiores doses. Pavinato et al. (2009) concluiu com os seus resultados que são essas frações moderadamente lábeis as responsáveis por reabastecer as frações lábeis e estas o P da solução do solo.

Independente da dose de P aplicada, e da camada de solo avaliada, o SPD leg apresentou os maiores teores de P residual e total em relação ao SPC e SPD mil. Não foram observadas grandes diferenças de exportação do P e produtividade que justificassem essas diferenças, apenas o SPD leg que produziu um pouco menos que o SPD mil (58 kg de grãos ha⁻¹ de diferença). Mas possivelmente os menores teores de P residual apresentados pelo SPC e SPD mil em relação ao SPD leg podem ter ocorrido devido a diferenças na capacidade de ciclagem do P pelas plantas de cobertura (milheto versus leguminosas) (TELES et al., 2017). Já os menores teores de P total observados no SPC em relação aos dois SPD's pode ter ocorrido pela ineficiência da determinação de todo o P neste sistema, como já mencionado anteriormente.

Teles et al. (2017) observaram que algumas espécies de plantas de cobertura foram capazes de diminuir os estoques de P residual através de uma maior absorção de P, como a aveia preta, nabo forrageiro e azevém, apoiado pelos maiores teores de P foliar nestas plantas. Isto possivelmente pode ter ocorrido com o milheto em comparação às leguminosas neste estudo, uma vez que o milheto apresenta um sistema radicular mais vigoroso e com maior capacidade de exploração do perfil do solo (FERREIRA et al., 2006; RICHARDSON et al., 2011). Isto pode ter aumentado a ciclagem destas frações pouco lábeis, resultando nos menores teores de P residual, como observado pelo estudo de RIGON et al., 2022, onde o milheto reduziu em 14% o teor de P total quando comparado a um sistema sob pousio.

Embora as hipóteses acima possam ser verdadeiras, e se justifique a diferença encontrada no P residual entre os sistemas, são vários os estudos que avaliaram estes aspectos e não observaram grandes efeitos nestas frações (P residual e P total), tanto para manejo do solo, como para manejo da adubação fosfatada (GATIBONI et al., 2007; TIECHER et al., 2012; SOLTANGHEISI et al., 2018; JIMÉNEZ et al., 2019; RIGON et al., 2022). Por exemplo, Rodrigues et al. (2021), ao avaliarem diversas plantas de cobertura cultivadas sob SPC e SPD, e as suas capacidades de acesso às frações de P, concluíram que nenhum sistema e nenhuma planta de cobertura avaliada foram capazes de influenciar os estoques de P residual. Gatiboni et al. (2007) e Jiménez et al. (2019) ao estudarem diferentes solos contrastantes em teores de MOS e com adubações variando de 0 a 120 kg de P ha⁻¹ e 0 a 145 kg de P₂O₅ ha⁻¹, respectivamente, não também não constataram alterações na fração de P residual.

Hallama et al. (2019) salienta em seu estudo que as plantas Fabaceae se utilizam de uma modificação bioquímica da rizosfera para mobilizar o P, enquanto as Poaceae absorvem o P predominantemente utilizando de seus extensos sistemas radiculares (MALTAIS-LANDRY, 2015). Mas isto se trata de mecanismos complexos e cujo resultado depende da química e dos teores de P disponível no solo, nem sempre apresentando resultados consistentes (WANG et al., 2016). Contudo, trata-se de uma hipótese que pode ser factível à observância das diferenças entre os sistemas quanto às espécies de cobertura (milheto versus espécies leguminosas), sendo que o mecanismo das Poaceae (milheto) pode ter sido mais eficiente na assimilação do P.

O pequeno efeito que as plantas de cobertura apresentam sobre as frações de P podem também ser explicado pela curta duração da exsudação de ácidos orgânicos, limitando o efeito no cultivo das culturas principais (NURUZZAMAN et al. 2005). Além disso, sabe-se que os efeitos das plantas de cobertura na físico-química do solo também são dependentes dos efeitos que estas causam na comunidade microbiana do solo e na capacidade destes microrganismos na ciclagem de P (NURUZZAMAN et al., 2005; MAT HASSAN et al., 2013; SOLTANGHEISI et al., 2018; HALLAMA et al., 2019), sendo que estes podem ser potenciais sumidouros e/ou agentes mineralizadores (DEUBEL et al. 2000), com relações bastante complexas que necessitam de maiores esclarecimentos quanto à sua atividade e regulação (HALLAMA et al., 2019).

- *Efeito das interações entre sistemas e fontes de P aplicadas*

Assim como ocorreu em outras interações e já descrito anteriormente, independente das fontes de P, os SPD's apresentarem maiores teores em relação ao SPC. E devido a

homogeneização da camada arável do SPC, não foram observadas diferenças consistentes entre o SFT e o FNR neste sistema (Figura 5 e Tabela A8).

Com o revolvimento do solo, têm-se uma homogeneização das camadas do solo que são influenciadas diretamente pelas estratégias de manejo da adubação fosfatada (OLIVEIRA et al., 2020; NUNES et al., 2020), e uma vez que a grande característica que diferencia estas duas fontes é a solubilidade (CAMARGO, 1997), o revolvimento do solo pode acelerar a solubilização do FNR e diminuir a amplitude de diferença com a fonte solúvel quanto à velocidade de disponibilização do P às plantas (NOVAIS et al., 1985). Isto ficou evidente pela ausência de diferenças entre as frações para estas fontes nestes sistemas.

Por outro lado, quando se tratou de sistemas conservacionistas como o SPD, o SFT passou a apresentar os maiores teores em relação ao FNR, apenas com algumas exceções (Pi-HCl e Pi NaOH 0,5). Uma vez que com a ausência do revolvimento, e limitação quanto ao contato do fertilizante com a matriz sólida do solo, a solubilização do FNR passa ser prejudicada, principalmente em doses mais elevadas (NOVAIS et al., 1985), o que não ocorre com um fertilizante de alta solubilidade como o SFT (NUNES et al., 2020). Aliado a isto, devido a menor solubilidade do FNR, a mobilização das reservas de P inorgânico e orgânico para a nutrição das plantas passa a ser maior, tendo-se reduções significativas nos estoques quando comparado com uma fonte solúvel (SANTOS et al., 2008).

Soltangheisi et al. (2018) ao comparar as frações lábeis de P (Pi-resina, Pi e Po NaHCO₃) em diferentes períodos ao longo de 5 anos de cultivos de diversas plantas de cobertura em SPD, também verificaram que o fertilizante solúvel, o superfosfato simples, foi capaz de promover maiores teores da maioria das frações avaliadas. Ainda que os autores tenham considerado o P solúvel em 2% do ácido cítrico na recomendação da dose do FNR, tendo uma dose de P total aplicada de 3,2 vezes maior que o superfosfato simples. E estes mesmos autores encontraram maiores teores de P moderadamente lábil (Pi e Po NaOH 0,1 e Pi-HCl) com a aplicação do FNR, sendo observado neste estudo apenas maiores teores do FNR na fração de Pi-HCl.

Os maiores teores de P-HCl quando aplicado o FNR no SPD leg em comparação ao SPC e SPD mil e os maiores teores desta fração nos dois SPD's em relação ao SFT estão relacionados a um pool de P que está associado ao cálcio (HEDLEY et al., 1982; CROSS; SCHLESINGER, 1995), presente nos minerais primários como a apatita, e sendo a sua detecção associada a partículas de fertilizantes não reagidas (OKALEBO et al. 1993), é esperado que a aplicação do FNR resulte nos maiores teores em relação ao SFT, principalmente em sistemas conservacionistas como o SPD (GOEDERT, 1983; NUNES et al., 2020). Isto se caracteriza

como um importante pool de P promovido por estes fertilizantes de menor solubilidade, pois o P fica protegido das reações de adsorção em solos ácidos e altamente adsortivos como o Latossolo aqui estudado, ao mesmo tempo que se constitui como uma fonte de P para cultivos subsequentes após a aplicação do FNR, como bem salientado por Nunes et al. (2020) e demonstrado por Oliveira et al. (2019).

Após 5 anos de aplicações, com revolvimento, de diversos fosfatos naturais em Latossolos com elevada acidez e com alto teor de argila, Goedert (1983) encontrou uma média de 20% do P aplicado na forma de apatita, sendo esperado que na ausência de revolvimento e em um solo com acidez corrigida esse percentual seja muito maior, como no caso dos SPD's avaliados neste estudo. Teles et al. (2017) e Redel et al. (2019) também encontraram maiores teores de Pi-HCl associados a uma aplicação de fosfato reativo em comparação a um solúvel quando estes foram aplicados superficialmente, sem revolvimento.

Entretanto, isto não explica o fato do SPD mil ter apresentado teores baixos desta fração assim como o SPC. Uma hipótese que pode ser levantada para justificar este resultado é a de que quando o SPD é conduzido utilizando uma gramínea como planta de cobertura, como o caso do milho, a maior capacidade de desenvolvimento do sistema radicular em profundidade e maior potencial de produção biomassa aérea e radicular (SASSENATH; FARNEY, 2019) favorecem a ciclagem do P (BALEMI; NEGISHO, 2012).

Esta maior abundância de raízes apresentada pelas gramíneas em relação às leguminosas tem como consequência também a formação de uma maior área de rizosfera que tem a capacidade de aumentar a acidificação do seu meio de influência e produzir uma maior quantidade de ácidos orgânicos, que podem favorecer a solubilização de partículas de fertilizantes não reagidas (BALEMI; NEGISHO, 2012; TOUHAMI et al., 2020).

O estudo de Soltangheisi et al. (2018) corrobora com as hipóteses mencionadas acima, pois o teor encontrado de P-HCl quando se utilizou plantas de cobertura foi menor quando comparado ao pousio, evidenciando a transformação dessa fração em frações de maior labilidade por estas plantas, que pode ser em uma magnitude maior ou menor a depender da espécie em questão.

Os maiores teores de Pi NaOH 0,5 (Figura 5 e Tabela A8) promovidos pela aplicação do FNR, especialmente quando o sistema foi o SPD, é apoiado pelo estudo de Teles e colaboradores (2017) conduzido por 3 anos em solo muito argiloso, onde os autores salientaram que nesta condição houve uma conversão mais intensa de frações lábeis para esta fração pouco lábil quando o fertilizante de baixa solubilidade foi aplicado. Soltangheisi et al. (2018) também encontraram maiores teores de Pi NaOH 0,5 na camada de 0-5 cm associados a aplicação do

FNR, contudo estes autores também encontraram este resultado para a respectiva fração orgânica desta fração, o que não foi observado neste estudo. Nunes et al. (2020) justifica o aumento das frações mais estáveis de P com a aplicação do FNR devido a lenta solubilização deste, levando ao favorecimento da estabilização destas frações.

- *Efeito das estratégias de manejo do solo e da adubação sob a atividade da fosfatase ácida*

O P de frações orgânicas somente pode ser assimilado pelas plantas depois que ocorrer a ação das fosfatase ácidas sobre esses compostos, liberando o ortofosfato na solução do solo (TURNER et al., 2002). Sendo as fosfatase ácidas atuante em solos com pH de 4 a 6 (DODOR; TABATABAI, 2003), faixa usualmente encontrada nos solos agrícolas, constitui-se em uma ferramenta bastante útil quanto a mensuração da ciclagem do P orgânico (MENEZES-BLACKBURN et al., 2013), e por isso foi a utilizada neste estudo (Figura 6).

São diversos os fatores que podem influenciar a atividade da fosfatase ácida nos solos, como o teor de P disponível (KAI et al., 2012), pH do solo (ADETUNJI et al., 2017), teor de MOS (GHOSH et al., 2020; ADETUNJI et al., 2017), umidade do solo, espécies vegetais cultivadas (LIU et al., 2004; MAKOI et al., 2010; MASEKO; DAKORA, 2013) e os tipos de manejo do solo e da adubação (GREEN et al., 2007; PANDEY et al., 2014). Contudo, diversos estudos evidenciam que dentre todos os fatores, o teor de MOS é a principal moduladora da atividade biológica, e conseqüentemente da atividade enzimática (ALMEIDA et al., 2015; GHOSH et al., 2020), o que apoia os resultados apresentados na Figura 7.

Os maiores teores de MOS normalmente apresentados na camada mais superficial de 0-10 cm (SOUZA, 2013; OLIVEIRA et al., 2020a), e conseqüentemente os maiores teores de frações orgânicas de P (Figura 3 e Tabela A5), em todos os sistemas, resultaram nas maiores atividades desta enzima (Figura 7). Como nesta camada ocorre a deposição dos resíduos vegetais, é nela em que são observados os maiores teores de MOS, e isto é apoiado pela estratificação apresentada em todos os sistemas, inclusive no SPC, para as frações orgânicas.

Ademais, estes resultados são confirmados pela relação significativa entre a atividade da fosfatase ácida e os teores de P orgânicos (Figura 9), onde existe um aumento na atividade desta enzima a medida em que se aumentam os teores de frações orgânicas de P, especialmente das mais estáveis (NaOH 0,5).

As maiores atividades da fosfatase ácida apresentadas pelos dois SPD's (SPD mil e SPD leg) em relação ao SPC na camada de 0-10 cm, também podem ser justificadas pelos maiores teores de MOS apresentados por estes sistemas conservacionistas em relação a sistemas que

são conduzidos com o preparo do solo (SOUZA, 2013). Estes resultados estão de acordo com os estudos de Green et al. (2007) e Pandey et al. (2014) que também observaram maior atividade da fosfatase nos sistemas conservacionistas em relação ao SPC, especialmente nas camadas superficiais. Além da ausência de revolvimento favorecer o acúmulo de MOS nas camadas superficiais, há um favorecimento à maior estabilidade dos agregados do solo (MCDOWELL et al.; 2007), bem como das fosfatases ácidas produzidas, que por sua vez são adsorvidas a fração argila e se mantem estável e ainda ativa, mesmo na ausência de organismos vivos (MARGALEF et al., 2017), o que corrobora com a observação de que estas enzimas têm sua atividade significativamente aumentada especialmente com o aumento de frações mais estáveis de Po.

Já por outro lado, na camada de 10-20 cm, mesmo não havendo diferenças significativas entre os sistemas para as frações orgânicas de P nesta camada (Figura 3), mas havendo maiores teores de P total no SPC e no SPD leg, estes refletiram em maior atividade enzimática nestes sistemas (Figura 6).

A influência da MOS como principal fator de modulação da atividade da fosfatase ácida é ainda mais confirmada pelos resultados apresentados para as estratégias de manejo da adubação fosfatada, uma vez que não houve diferença significativa na atividade da fosfatase ácida entre as fontes e doses de P aplicada (Figura 7).

A relação entre a atividade da fosfatase e os teores de MOS também foi observada por Adetunji et al. (2017). Os autores justificaram o aumento da atividade de fosfatase ácida nos solos avaliados baseados nas entradas de resíduos orgânicos, que foi considerado como o substrato alvo da ação da fosfatase ácida. E concluíram que a atividade desta enzima é uma boa indicadora de qualidade e quantidade de matéria orgânica, o que corrobora com os resultados aqui apresentados de evidências da estreita relação da fosfatase ácida com a MOS.

Nakayama et al. (2021) realizaram uma metanálise envolvendo 18 estudos com 363 observações de relações entre as frações inorgânicas e orgânicas de P pelo método de Hedley et al. (1982) e as atividades das fosfatases. E foi concluído neste estudo que existe um efeito muito mais significativo das frações orgânicas sobre a atividade da fosfatase, de modo em que os autores constataram a atividade desta enzima é inibida na presença do íon fosfato, tanto em vitro como em escalas de ecossistemas. Esta inibição pode ocorrer de forma direta e indireta, com as altas concentrações do fosfato na solução inibindo a atividade da fosfatase (HARSANYI; DORN, 1972; JONES; OBURGER, 2011) ou esta alta concentração inibindo a expressão de genes que são codificadores da enzima (OSHIMA et al., 1996; NANNIPIERI et al., 2011).

Mas mesmo não havendo diferenças significativas entre os tratamentos de manejo da adubação fosfatada, se observou uma tendência de a testemunha apresentar os maiores valores em relação aos tratamentos adubados, com exceção apenas do tratamento com o SFT na maior dose. Este resultado está de acordo com o estudo de Kai et al., 2012, Marklein e Houlton (2012) e Wang et al., (2016) que mostra que a atividade da fosfatase ácida aumenta em situações de deficiência de P. Contudo, o mesmo resultado não foi encontrado por Ikoyi et al. (2018) e Zheng et al. (2021), que após adubações com o P, encontraram aumentos na atividade da fosfatase ácida.

No estudo de Marklein e Houlton (2012) foi possível constatar uma correlação negativa de fertilizações com o P sobre a atividade da fosfatase ácida. Foram 34 estudos capazes de evidenciar que a fertilização com N aumentou muito mais a atividade da fosfatase ácida, possivelmente devido ao estímulo do crescimento microbiano, enquanto a fertilização com P diminuiu a mesma em diferentes biomas. E quando se compara aplicações de fertilizações minerais e orgânicas, o estudo de GHOSH et al. (2020) demonstrou que a atividade de fosfatase alcalina em solos que receberam adubação orgânica foi maior que aqueles que receberam adubação mineral, corroborando com os estudos de Nannipieri et al. (2011). Entretanto, o estudo de Zheng et al. (2021) demonstrou após avaliarem um experimento conduzido por 27 anos com tratamentos envolvendo diferentes combinações entre N, P e K, que o N e o P foram os principais responsáveis pelo aumento das atividades das fosfatases ácidas e alcalinas, e estes também modelaram as comunidades microbianas do solo.

6.6 CONCLUSÕES

Após 22 anos de cultivos de grãos de soja e milho e uso de fertilizantes fosfatados, a distribuição das frações inorgânicas e orgânicas do solo foi influenciada pelo sistema de manejo do solo e pelas fontes e doses de aplicadas.

Ambos os SPD's (SPD mil e SPD leg) resultaram nos maiores teores de P inorgânico, residual e total nas camadas que foram mais influenciadas pelas estratégias de manejo da adubação com o P (0-5 e 5-10 cm).

O revolvimento anual levou a uma distribuição mais homogênea das frações inorgânicas no SPC, diminuindo o efeito das estratégias de manejo da adubação fosfatada. Contudo, houve estratificação dos teores de todas as frações orgânicas, com a camada de 0-5 cm apresentando os maiores valores. Enquanto nos SPD's houve estratificação dos teores de P da maioria das frações avaliadas, com as camadas de 0-5 e 5-10 cm apresentando os maiores valores.

No SPC o efeito da dose de P foi minimizado pelo revolvimento para a maioria das frações de P avaliadas (Pi-resina, Pi NaHCO₃, Po NaOH 0,1, Pi-HCl, residual e total), mas no SPD o efeito foi mais pronunciado com o aumento dos teores das frações inorgânicas e orgânicas com a aplicação da maior dose.

O fertilizante solúvel promoveu os maiores teores de P inorgânico da maioria dos extratores avaliados (Pi-resina, Pi NaHCO₃, Pi NaOH 0,1) nos SPD's, devido a sua rápida solubilização e disponibilização para as plantas. Enquanto a aplicação do FNR, em uma condição de ausência do revolvimento, levou a maiores teores de Pi-HCl e Pi NaOH 0,5, indicando a não total solubilização deste e a passagem do P para frações de maior estabilidade.

Os teores de P residual e P total foram mais influenciados pelas estratégias de manejo do solo, com ambos os SPD's resultando em maiores teores em relação ao SPC. Contudo, os baixos teores de P total encontrados no SPC podem ter sido resultantes de problemas no momento da amostragem, sendo necessário cautela na interpretação dos dados.

O sistema de manejo do solo e a camada amostrada foram os principais fatores moduladores da atividade da fosfatase ácida. Pois estes refletiram diferenças entre os manejos relacionadas a deposição da matéria orgânica, confirmadas pela relação significativa entre a atividade da fosfatase ácida e todas as frações orgânicas de P. Diante disto, os SPD's, e a camada de 0-10 cm em todos os sistemas, apresentaram maiores atividades desta enzima em relação ao SPC e à camada de 10-20 cm, respectivamente.

Os maiores teores de Pi e Po lábeis e moderadamente lábeis nos SPD's, e da atividade fosfatase ácida nas camadas mais superficiais são indicadores de como esses sistemas podem

contribuir para o uso sustentável do P, repercutindo em uma melhor nutrição dos cultivos, que a depender das demais condições, pode levar a maiores produtividades, lucratividades das culturas e eficiência de uso do P.

6.7 REFERÊNCIAS

- ADETUNJI, A. T.; LEWU, F. B.; MULIDZI, R.; NCUBE, B. The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. **Journal of soil Science and plant nutrition**, 17, 794-807, 2017.
- ALMEIDA, R.F.D., NAVES, E.R., MOTA, R.P.D. Soil quality: Enzymatic activity of soil β -glucosidase. **Global Journal of Agricultural Research and Reviews**. 3, 146-150, 2015.
- ASSIS, R. L. de; LANÇAS, K. P. AGREGAÇÃO DE UM NITOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO SOB SISTEMAS DE PLANTIO DIRETO, PREPARO CONVENCIONAL E MATA NATIVA. **Engenharia agrícola**, v. 30, p. 58-66, 2010.
- BAAN, C. D.; GREVERS, M. C. J. SCHOENAU, J. J. Effects of a single cycle of tillage on long-term no-till prairie soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 89, p. 521-529, 2006.
- BALEMI, T.; NEGISHO, K. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 12, p. 547-561, 2012.
- BROOKES, P.C.; POWLSON, D.C. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. **Journal of the Science Food and Agriculture, London**, v.32, n.7, p.671-674, 1981.
- CAMARGO, M. S. de. SOLUBILIDADE E DISPONIBILIDADE DO FÓSFORO DE FOSFATOS NATURAIS COM ORIGENS GEOLÓGICAS DIFERENTES. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-graduação em Agronomia - Universidade de São Paulo. Piracicaba, p. 100. 1997.
- COELHO, M. J. A.; DIAZ, D. R.; HETTIARACHCHI, G. M.; HANSEL, F. D.; PAVINATO, P. S. Soil phosphorus fractions and legacy in a corn-soybean rotation on Mollisols in Kansas, USA. **Geoderma**, v. 18, p. 1-11, 2019.
- COSTA, D. D. de A. FRACIONAMENTO DO FÓSFORO NO SOLO EM FUNÇÃO DOS SISTEMAS DE MANEJO. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-graduação em Agronomia - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 50. 2019.
- CROSS, A.F. & SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, 64:197-214, 1995.
- DEUBEL A., GRANSEE A., MERBACH, W. Transformation of organic rhizodepositions by rhizosphere bacteria and its influence on the availability of tertiary calcium phosphate. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 163, p. 387–392, 2000.
- DODOR, D.E, TABATABAI, M.A. Efeito de sistemas de cultivo em fosfatase ácidas em solos. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 166, 7-13, 2003.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. 3.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2013. 353p.

- FERREIRA, G. B.; SILVA, M. S. L. da; SILVA, S. dos A. B.; MENDONÇA, C. E. S.; GOMES, T. C. de A.; MENDES, A. M. S. Distribuição radicular de espécies para adubação verde e/ou cobertura do solo. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA SEMI-ÁRIDO, 1., 2006, Petrolina. Anais... Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2006.
- FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil & Tillage Research**, v. 155, p. 62-68, 2016.
- FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAYER, C. TORRENT, J.; BARRÓN, V. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. **Acta Scientiarum**, v. 36, p. 379-387, 2014.
- FREILING, M.; TUCHER, S. V.; SCHMIDHALTER, U. Factors influencing phosphorus placement and effects on yield and yield parameters: A meta-analysis. **Soil & Tillage Research**, v. 216, 105257, 2022.
- GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; FLORES, J. P. C. BIODISPONIBILIDADE DE FORMAS DE FÓSFORO ACUMULADAS EM SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO. Revista brasileira de ciência do solo, v. 31, p. 691-699, 2007.
- GOEDERT, W. J. EFEITO RESIDUAL DE FOSFATOS NATURAIS EM SOLOS DE CERRADO. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 18, p. 499-506, 1980.
- GOEDERT, W. J. EFEITO RESIDUAL DE FOSFATOS NATURAIS EM SOLOS DE CERRADO. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 18, p. 499-506, 1983.
- GHOSH, A.; SINGH, A.B.; KUMAR, R.V.; MANNA, M.C.; BHATTACHARYYAC, R.; RAHMAN, M. M.; SHARMA, P.; RAJPUT, P.S.; MISRA, S. Soil enzymes and microbial elemental stoichiometry as bio-indicators of soil quality in diverse cropping systems and nutrient management practices of Indian Vertisols. **Applied Soil Ecology**, 145, 2020.
- GREEN, V., STOTT, D., CRUZ, J., CURI, N. Impactos do cultivo na atividade de biologia do solo e agregação em um latossolo de cerrado brasileiro. Pesquisa de solo e cultivo. 92, 114-121, 2007.
- GUPPY, C.; Is soil phosphorus fractionation as valuable as we think? **Plant Soil**, v. 459, p. 19-21, 2021.
- HALLAMA, M.; PEKRUN, C. LAMBERS, H.; KANDELER, E. Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. **Plant Soil**, v. 434, p. 7-45, 2019.
- HARSANYI, Z.; DORN, G. L. Purification and characterization of acid phosphatase V from *Aspergillus nidulans*. **American Society for microbiology**, v. 110, 1972.
- HUA, Q.X.; LI, J.Y.; ZHOU, J.M.; WANG, H.Y.; DU, C.W.; CHEN, X.Q. Enhancement of phosphorus solubility by humic substances in Ferrosols. **Pedosphere** 18, 533–538, 2008.
- HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.46, n.5, p.970-976, 1982.

- JIMÉNEZ, J. L. G.; HEALY, M. G.; DALY, K. Effects of fertiliser on phosphorus pools in soils with contrasting organic matter content: A fractionation and path analysis study. **Geoderma**, v. 338, p. 128-135, 2019.
- JONES, D. L.; OBURGER, E. Solubilization of Phosphorus by Soil Microorganisms. **Soil biology**, v. 26, p. 169-198, 2011.
- KAI, M., TAKAZUMI, K., ADACHI, H., WASAKI, J., SHINANO, T., OSAKI, M. Cloning and Characterization of four phosphate transportador cdnas in tabaco. **Plant Science**, v. 163, 837-846, 2002.
- KRAUT-COHEN, J.; ZOLTI, A.; SHATIEL-HARPAZ, L.; ARGAMAN, E.; RABINOVICH, R.; GREEN, S. J.; MINZ, D. Effects of tillage practices on soil microbiome and agricultural parameters. **Science of the total environment**, v. 705, 135791, 2020.
- LIU, Y., MI, G., CHEN, F., ZHANG, J., ZHANG, F. Efeito da rizosfera e crescimento da raiz de dois genótipos de milho (zea mays L.) com eficiência de p contrastante em baixa disponibilidade de p. **Plant Science**, v. 167, 217-223, 2004.
- MCDOWELL, R. W.; SCOTT, J. T.; STEWART, I.; CONDRON, L. M. Influence of aggregate size on phosphorus changes in a soil cultivated intermittently: analysis by ³¹P nuclear magnetic resonance. **Biology and Fertility of Soil**, v. 43, p. 409-415, 2007.
- MALLARINO, A. P.; BORGES, R. Phosphorus and Potassium Distribution in Soil Following Long-Term Deep-Band Fertilization in Different Tillage Systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 702-707, 2006.
- MAKOI, J.H., CHIMPHANGO, S.B., DAKORA, F.D. Níveis elevados de atividade da fosfatase ácida e alcalina em raízes e rizosfera de genótipos de feijão-caupi (vigna unguiculata L. Walp.) Cultivados em cultura mista e em diferentes densidades com sorgo (sorgo bicolor) **Ciência de Culturas e Pastagens**, p. 279-286, 2010.
- MARGALEF, O.; SARDANS, J.; FERNÁNDEZ-MARTINEZ, M.; MOLOWNY-HORAS, R.; JANSSENS, A.; CIAIS, P.; GOLL, D.; RICHTER, A.; OBERSTEINER, M.; ASENSIO, D.; PENUELAS, J. Global patterns of phosphatase activity in natural soils. **Nature**, 2017.
- MARKLEIN, A.; HOULTON, B. Z. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems. **New Phytologist**, v. 193, p. 696-704, 2012.
- MASEKO, S. DAKORA, F. Rizosfera ácida e atividade de fosfatase ácida alcalina como um marcador de nutrição p em espécies noduladas de ciclopia e aspalathus no cabo fynbos da África do sul. **South African Journal of Botany**, 89, 289-295, 2013.
- MAT HASSAN, H., HASBULLAH, H., MARSCHNER, P. Growth and rhizosphere P pools of legume-wheat rotations at low P supply. **Biology and Fertility of Soils**, v. 49, p. 41-49, 2013.
- MENEZES-BLACKBURN, D.; JORQUERA, M. A.; GREINER, R.; GIANFREDA, L.; MORA, M. L. L. Phytases and Phytase-Labile Organic Phosphorus in Manures and Soils. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 43, p. 916-954, 2013.

- MOTAVALLI, P. P.; MILES, R. J. Soil phosphorus fractions after 111 years of animal manure and fertilizer applications. **Biol Fertil Soils**, v. 36, p. 35-42, 2002.
- MUMBACH, G. L.; GATIBONI, L. C.; DALL'ORSOLETTA, D. J.; SCHMITT, D. E.; PESSOTTO, P. P.; OLIVEIRA, C. M. B. de. Phosphorus Extraction with Soil Test Methods Affected by Soil P Sorption Capacity. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 20, p. 1882-1890, 2020.
- MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Oxford, v.27, p.31-36, 1962.
- NAKAYAMA, Y.; WADE, J.; MARGENOT, A. J. Does soil phosphomonoesterase activity reflect phosphorus pools estimated by Hedley phosphorus fractionation? **Geoderma**, v. 401, 115279, 2021.
- NANNIPIERI, P.; GIAGNONI, L.; LANDI, L.; RENELLA, G. Role os phosphatase enzymes in soil. **Soil Biology**, v. 26, p. 215-243, 2011.
- NOVAIS, R. F.; BAHIA FILHO, A. F. C.; RIBEIRO, A. C.; VASCONCELOS, C. A. SOLUBILIZAÇÃO DE FOSFATOS INCUBADOS COM AMOSTRAS DE LATOSSOLO SUBMETIDAS A DIFERENTES NÚMEROS DE REVOLVIMENTO. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 9, p. 23-26, 1985.
- NUNES, R. de S.; SOUSA, D. M. G. de; GOEDERT, W. J.; OLIVEIRA, L. E. Z. de; PINHEIRO, T. D.; Crops' Yield and Roots Response to Soil Phosphorus Distribution Resulting From Long-Term Soil and Phosphate Fertilization Management Strategies. **Frontiers**, v. 3, 757100, 2021.
- NUNES, R. de S.; SOUSA, D. M. G. de; GOEDERT, W. J.; OLIVEIRA, L. E. Z. de; PAVINATO, P. S.; PINHEIRO, T. D. Distribution of Soil Phosphorus Fractions as a Function of Long-Term Soil Tillage and Phosphate Fertilization Management. **Frontiers**, v. 8, 350, 2020.
- NURUZZAMAN, M.; LAMBERS, H.; BOLLAND, M. D. A.; VENEKLAAS, E. J. Phosphorus benefits of different legume crops to subsequent wheat grown in different soils of Western Australia. **Plant and soil**, v. 271, p. 175-187, 2005.
- OKALEBO J. R., GATHUA, K. W., WOOMER, P. L. (1993) Laboratory methods of soil and plant analysis: a working manual. Tropical **Soil Biology and Fertility Programme**, Nairobi, Kenya, 1993.
- OSHIMA, Y.; OGAWA, N.; HARASHIMA, S. Regulation of phosphatase synthesis in *Saccharomyces cerevisiae*— a review. *Gene*, v. 179, p. 171-177, 1996.
- PANDEY, D., AGRAWAL, M., BOHRA, J.S. Effects of conventional tillage and no tillage permutations on extracellular soil enzyme activities and microbial biomass under rice cultivation. **Soil and Tillage Research**, v. 136, 51-60, 2014.
- PAVINATO, P. S.; DAO, T. H.; ROSOLEM, C. A.; Tillage and phosphuris management effects on enzyme-labile bioactive phosphorus availability in Cerrado Oxisols. **Geoderma**, Amsterdam, v. 156, p. 207-215, 2010.

- PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; SOLTANGHEISI, A.; ROCHA, G. C.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Nature**, v. 10, 15615, 2020.
- QIAO, S. M. Y.; Distribution of Inorganic and Organic Phosphorus Fractions in Two Phosphorus-Deficient Soils as Affected by Crop Species and Nitrogen Applications. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 43, p. 631-644, 2012.
- REDEL, Y.; STAUNTON, S.; DURÁN, P.; GIANFREDA, L.; RUMPEL, C.; MORA, M. de la L. Fertilizer P Uptake Determined by Soil P Fractionation and Phosphatase Activity. **Journal of soil Science and plant nutrition**, v. 19, p. 166-174, 2019.
- RESENDE, S. C. ESTRUTURA DO SOLO EM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO EM ARGIS-SOLO VERMELHO-AMARELO. **Revista Expressão Científica**, v. 4, p. 57-65, 2019.
- RHEINHEIMER, D. dos; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, v. 36, n. 01, p. 151-160, 2001.
- RICHARDSON, A. E.; LYNCH, J. P., RYAN, P. R. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. **Plant Soil**, v. 349, p. 121–156, 2011.
- RIGON, J. P. G.; CRUSCIOL, C. A. C.; CALONEGO, J. C.; PAVINATO, P. S.; AZEVEDO, A. C.; ROSOLEM, C. A. Intensive crop rotations and residue quality increase soil phosphorus lability under long-term no-till in tropical soils. **Soil & Tillage Research**, v. 223, 105446, 2022.
- RODRIGUES, M.; PAVINATO, P. S.; WITHERS, P. J. A.; TELES, A. P. B.; HERRERA, W. F. B. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savana. **Science of the total environment**, v. 542, p. 1050-1061, 2016.
- RODRIGUES, M.; WITHERS, P. J. A.; SOLTANGHEISI, A.; VARGAS, V.; HOLZSCHUH, M.; PAVINATO, P. S. Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. **Soil & Tillage Research**, v. 205, 104770, 2021.
- ROSOLEM, C. A.; MERLIM, A.; LONGO, J. C. Soil phosphorus dynamics as affected by Congo grass and P fertilizer. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, n. 4, p. 309-315, 2014.
- ROSSI, C.; MONTEIRO, F. A. DOSES DE FÓSFORO, ÉPOCAS DE COLETA E O CRESCIMENTO E DIAGNOSE NUTRICIONAL NOS CAPINS BRAQUIÁRIA E COLÔNIAO. **Scientia agrícola**, v. 56, n. 4, p. 1101-1110, 1999.
- SANTOS, J. Z. L.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V. de; CURI, N.; CARNEIRO, L. F.; COSTA, S. E. V. G. de A. FRAÇÕES DE FÓSFORO EM SOLO ADUBADO COM FOSFATOS EM DIFERENTES MÓDOS DE APLICAÇÃO E CULTIVADO COM MILHO. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 705-714, 2008.
- SASSENATH, G. F.; FARNEY, J. K. Biomass Production of Single Species Cover Crop. **Kansas agricultural experimente station research reports**, v. 5, p. 1-6, 2019.

- SCARPARE, F. V.; VAN LIER, Q. de J.; CAMARGO, L. de; PIRES, R. C. M.; RUIZ-CORRÊA, S. T.; BEZERRA, A. H. F.; GAVA, G. J. C.; DIAS, C. T. S. Tillage effects on soil physical condition and root growth associated with sugarcane water availability. **Soil & Tillage Research**, v. 187, p. 110-118, 2019.
- SCHWAB, G.J.; WHITNEY, D.A.; KILGORE, G.L.; SWEENEY, D.W. Tillage and Phosphorus Management Effects on Crop Production in Soils with Phosphorus Stratification. **Agronomy Journal**, v.98, n.3, p.430-435, 2006.
- SOLTANGHEISI, A.; RODRIGUES, M.; COELHO, M. J. A.; GASPERINI, A. M.; SARTOR, L. R.; PAVINATO, P. S. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. **Soil & Tillage Research**, v. 179, p. 20-28, 2018.
- SOUZA, G. P. FRAÇÕES LÁBEIS E HUMIFICADAS DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO SOB SISTEMAS DE MANEJO COM SUCESSÃO SOJA-MILHO NO CERRADO. Dissertação (Mestrado em agronomia) – Universidade de Brasília / Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Brasília, p. 102 páginas. 2013.
- SUBERO, N.; RAMÍREZ, R.; SEQUERA, O.; PARRA, J. Fraccionamiento de fósforo em suelos cultivados com arroz por largos períodos de tempo. II. Relación fósforo orgânico-inorgânico. **Bioagro**, v. 2, p. 81-86, 2016.
- SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2.ed. Planaltina: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416p.
- SOUSA, D. M. G. de; VOLKWEISS, S. J. Efeito residual do superfosfato triplo em função da granulação e dose e do Sistema de preparo do solo. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, ISSN: 022008, 1987.
- SOLTANGHEISI, A.; RODRIGUES, M.; COELHO, M. J. A.; GASPERINI, A. M.; SARTOR, L. R.; PAVINATO, P. S. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. **Soil & Tillage Research**, v. 179, p. 20-28, 2018.
- SOLTANGHEISI, A.; TELES, A. P. B.; SARTOR, L. R.; PAVINATO, P. S. Cover Cropping May Alter Legacy Phosphorus Dynamics Under Long-Term Fertilizer Addition. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, 2020.
- TELES, A. P. B.; RODRIGUES, M.; HERRERA, W. F. B.; SOLTANGHEISI, A.; SARTOR, L. R.; WITHERS, P. J. A.; PAVINATO, P. S. Do cover crops change the lability of phosphorus in a clayey subtropical soil under different phosphate fertilizers? **Soil use and management**, v. 33, p. 34-44, 2017.
- TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D.S.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil and Tillage Research**, v.124, p.57-67, 2012.
- TIECHER, T.; GOMES, M. V.; AMBROSINI, V. G.; AMORIM, M. B. Assessing linkage between soil phosphorus forms in contrasting tillage systems by path analysis. **Soil & Tillage Research**, v. 175, p. 276-280, 2018.

TIESSEN, H.; MOIR, J.O. Characterization of available P by sequential extraction. In: CARTER, M.R.; GREGORICH, E.G. (Eds.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2.ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. p.293-306.

TOUHAMI, D.; MCDOWELL, R. W.; CONDRON, L. M. Role of Organic Anions and Phosphatase Enzymes in Phosphorus Acquisition in the Rhizospheres of Legumes and Grasses Grown in a Low Phosphorus Pasture Soil. **Plants**, v. 9; 1185, 2020.

WANG, Y.; KROGSTAD, T.; CLARKE, J. L.; HALLAMA, M.; ØGAARD, A. F.; GREATORZ, S. E.; KANDELER, E.; CLARKE, N. Rhizosphere Organic Anions Play a Minor Role in Improving Crop Species' Ability to Take Up Residual Phosphorus (P) in Agricultural Soils Low in P Availability. **Frontiers Plant Soil**, v. 7, 1664, 2016.

YAN, X., WANG, D., ZHANG, H., ZHANG, G., WEI, Z. Organic amendment saffect phosphorus sorption characteristics in a paddysoil. **Agric., Ecosyst. Environ.** 175, 2013.

ZHENG, M. M.; WANG, C.; LI, W. X.; GUO, L.; CAI, Z. J.; WANG, B. R.; CHEN, J.; SHEN, R. F. Changes of acid and alkaline phosphatase activities in long-term chemical fertilization are driven by the similar soil properties and associated microbial community composition in acidic soil. **European journal of soil biology**, v. 104, 103312, 2021.

22	Ab	Ab	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Ab	Bb	Aa	Ab	Ab	Bb	Ab	Bb	Aa	Bb	Ab	Bb
44	Aa	Ba	Aa	Aa	Aa	Ba	Aa	Aa	Aa	Ba	Aa	Ba										

(*) interação não significativa

Letras maiúsculas diferenciam as fontes para cada nível de dose de P aplicada e letras minúsculas diferenciam as doses de P aplicadas dentro de cada nível de fonte de P pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela A3. Estatística de teste de médias por Tukey ($p < 0,05$) para os 22 anos de produtividade de soja e milho em função das estratégias de manejo da adubação fosfatada no sistema de plantio direto com espécies leguminosas como planta de cobertura (SPD leg).

SISTEMA DE PLANTIO DIRETO COM LEGUMINOSA (SPD leg)

	1*		2*		3*		4*		5*		6*		7*		8*		9*		10*		11*	
	SFT	FNR																				
22	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Bb	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Ab	Ab	Ab
44	Aa	Ba	Aa																			
	12*		13*		14*		15*		16*		17*		18*		19		20*		21		22*	
	SFT	FNR																				
22	Ab	Ab	Aa	Aa	Ab	Ab	Ab	Ab	Ab	Bb	Ab	Ab	Ab	Bb	Ab	Bb	Ab	Bb	Aa	Bb	Ab	Bb
44	Aa	Ba																				

(*) interação não significativa

Letras maiúsculas diferenciam as fontes para cada nível de dose de P aplicada e letras minúsculas diferenciam as doses de P aplicadas dentro de cada nível de fonte de P pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela A4. Quantidades de P exportado pelos cultivos de soja e milho (kg ha⁻¹) ao longo dos 22 anos avaliados.

Sistema	Fonte	Modo	Dose	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
SPC mil	Testemunha	-	0	9	29	9	21	4	17	3	13	5	14	4	8	4	5	4	5	4	5	2	8	4	8	
		Sulco	22	11	28	14	39	13	38	17	37	17	44	13	47	19	31	16	40	14	35	15	36	18	41	
	SFT	Laço	22	14	38	17	36	13	40	18	32	17	43	15	41	19	28	17	41	13	36	16	38	18	37	
		Sulco	44	14	36	18	47	16	48	21	42	18	53	18	58	24	38	21	55	19	47	25	50	25	51	
	FNR	Laço	44	14	37	19	43	16	49	22	38	21	54	19	56	26	37	21	57	21	48	26	49	27	51	
		Sulco	22	10	30	13	33	13	36	14	30	15	38	11	41	17	26	16	38	13	32	12	29	16	38	
	SPD mil	Testemunha	Laço	22	10	26	14	34	13	36	15	29	16	38	13	41	19	29	17	38	16	35	18	29	20	40
			Sulco	44	12	30	16	40	16	44	21	38	19	51	17	53	24	36	21	51	16	44	22	43	23	46
		SFT	Laço	44	13	28	19	45	17	47	23	37	21	54	17	57	26	38	23	56	18	46	25	46	25	53
			Sulco	22	10	23	10	22	5	19	4	16	6	18	4	17	5	9	4	11	4	8	5	10	4	12
FNR		Laço	22	14	39	16	42	15	45	19	37	17	50	19	53	20	34	19	49	17	44	22	45	22	46	
		Sulco	44	14	43	18	50	16	54	21	38	19	55	22	59	25	36	24	52	24	47	28	51	29	53	
SFT		Laço	44	14	44	19	52	16	54	22	40	20	60	23	63	26	40	24	57	21	54	28	55	29	57	
		Sulco	22	12	34	14	36	14	38	16	33	17	44	17	48	20	30	20	38	9	34	15	34	14	36	
FNR		Laço	22	12	33	15	40	15	41	17	33	16	46	16	51	19	29	19	43	7	37	15	35	14	40	
		Sulco	44	13	37	16	42	17	45	20	35	18	52	21	55	26	35	25	47	21	46	27	47	26	45	
SPD leg	Testemunha	Laço	44	14	41	17	43	17	46	19	35	19	51	20	55	25	36	25	50	16	46	24	46	24	48	
		Sulco	0	10	22	10	23	5	19	3	15	5	19	4	17	4	9	4	10	5	11	4	11	5	10	
	SFT	Laço	22	14	34	15	41	15	44	18	36	17	50	18	52	18	32	15	47	18	44	22	45	22	46	
		Sulco	44	15	35	16	45	15	44	17	33	18	50	19	52	19	33	17	50	22	44	23	44	24	45	
	FNR	Laço	44	14	33	17	48	16	51	23	40	19	57	23	63	22	41	21	55	26	54	29	53	29	56	
		Sulco	44	16	42	20	49	17	54	24	40	20	57	24	65	25	40	21	58	26	55	30	52	30	55	
	SFT	Laço	22	14	31	14	37	13	39	13	34	15	48	16	50	16	30	14	42	13	38	15	35	15	38	
		Sulco	44	13	28	14	36	14	35	12	28	14	42	15	46	18	28	16	38	13	35	16	32	17	34	
	FNR	Laço	22	13	27	15	45	16	46	21	37	18	54	21	56	22	36	21	48	19	47	25	46	24	48	
		Sulco	44	13	32	16	43	17	43	20	32	17	48	20	50	23	33	21	47	22	44	26	41	27	42	

SPC: Sistema de plantio convencional;

SPD mil: Sistema de plantio direto com o milho como planta de cobertura;

SPD leg: Sistema de plantio direto com espécies leguminosas como planta de cobertura.

SFT: Superfosfato triplo;
FNR: Fosfato natural reativo

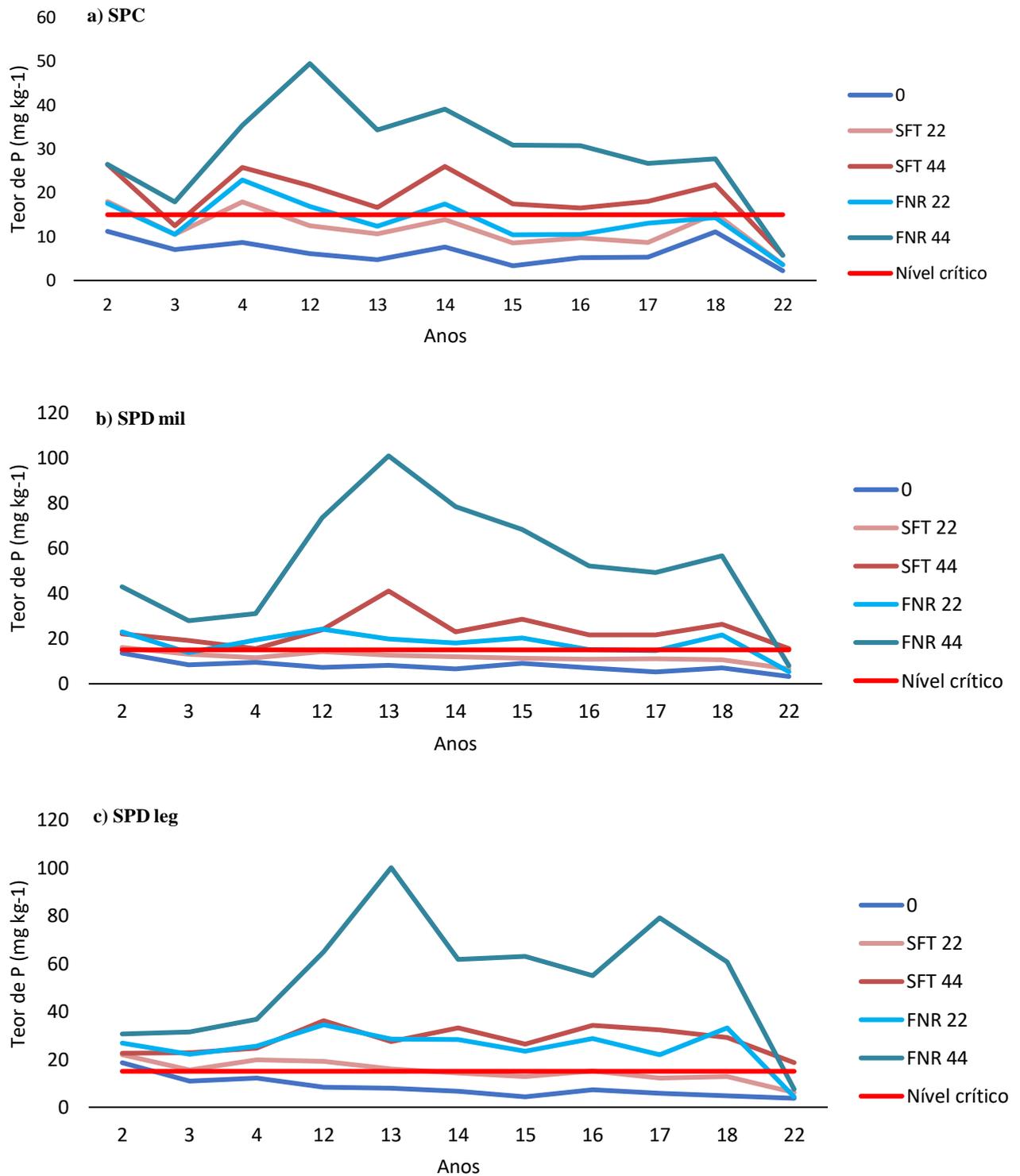


Figura A1. Teor de P disponível por resina (mg kg^{-1}) nos sistemas de plantio convencional (SPC) (a), sistema de plantio direto com o milho como planta de cobertura (SPD mil) (b) e sistema de plantio direto com espécies leguminosas como planta de cobertura (SPD leg) (c) em função de fontes e doses de P aplicada ao longo dos anos. O nível crítico estabelecido foi o de 15 mg kg^{-1} de P para sistemas de sequeiro (SOUSA; LOBATO, 2004).

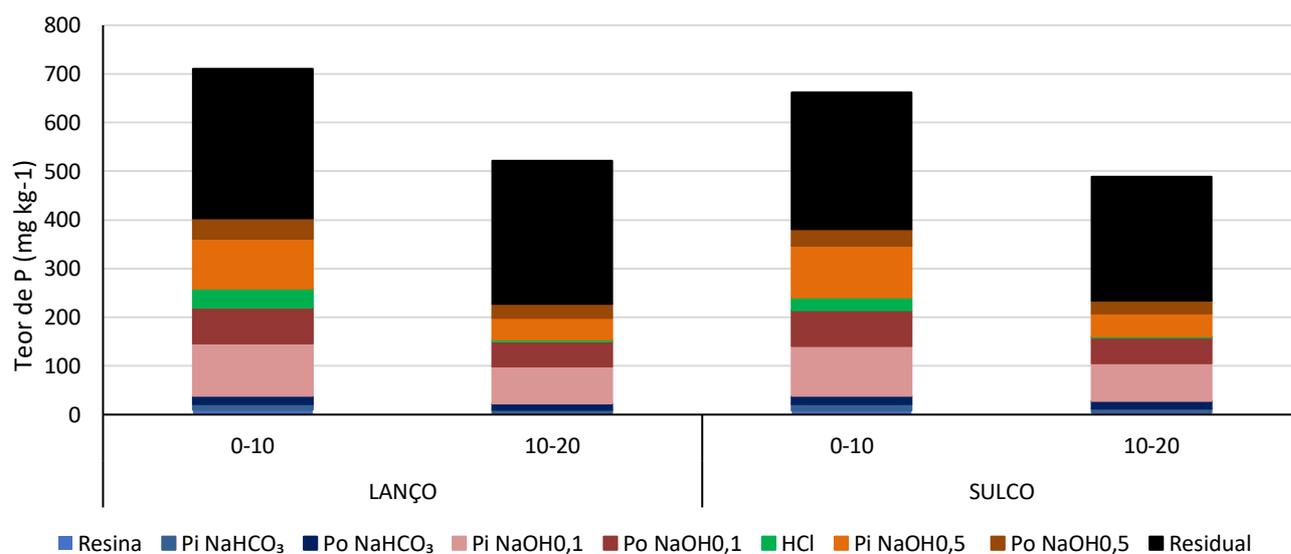


Figura A2. Teor das diferentes frações inorgânicas e orgânicas de P (mg kg^{-1}) em função dos modos de aplicação dos fertilizantes fosfatados e da camada de solo avaliada. As médias foram obtidas a partir de três sistemas de manejo do solo, duas fontes e duas doses de P aplicadas em três repetições ($n = 36$).

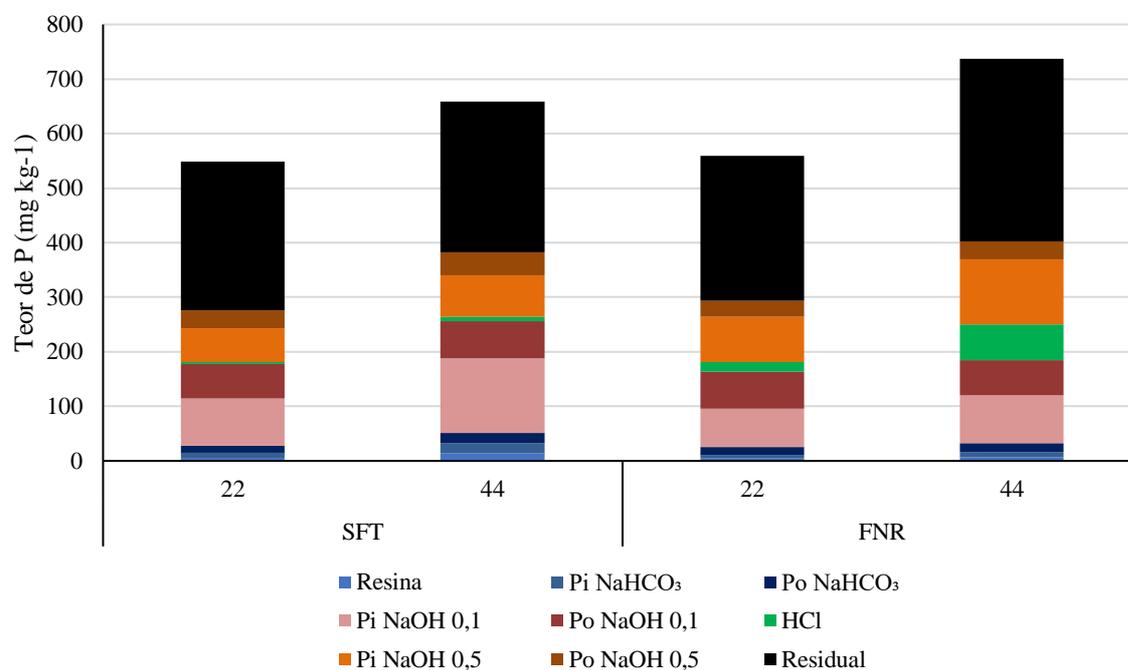


Figura A3. Teor das diferentes frações inorgânicas e orgânicas de P (mg kg^{-1}) em função das fontes e das doses de P aplicada. As médias foram obtidas a partir de três sistemas de manejo do solo e dois modos de aplicação do P em três repetições ($n = 18$).

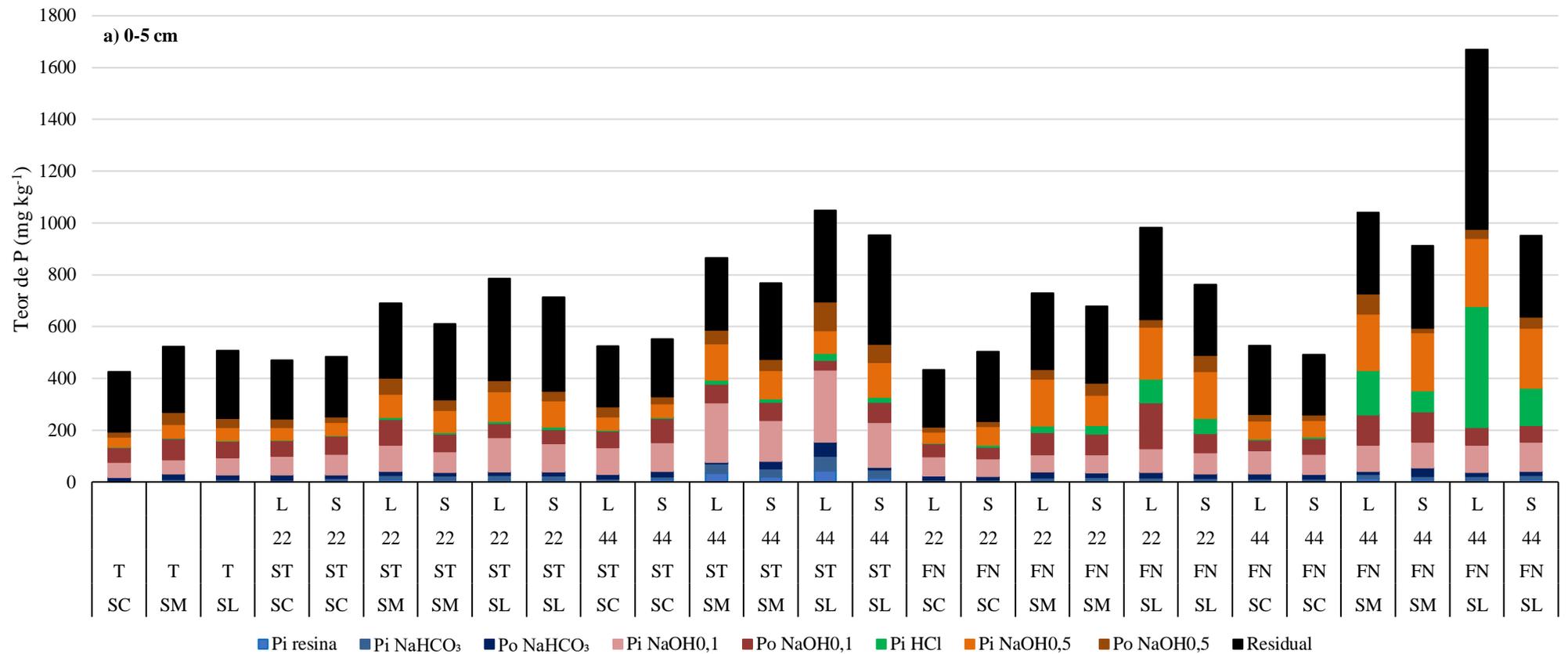


Figura A4. Teor das diferentes frações inorgânicas e orgânicas de P (mg kg^{-1}) na camada de 0-5 cm em função dos sistemas de manejo do solo (SC: sistema de plantio convencional; SM: sistema de plantio direto com o milho como planta de cobertura; SL: sistema de plantio direto com espécies leguminosas como planta de cobertura), das fontes de fertilizante fosfatado (ST: superfosfato triplo; FN: fosfato natural reativo), dos modos de aplicação (L: lanço em superfície; S: sulco de semeadura) e das doses de P aplicada (22 e 44 kg de P ha^{-1}). As médias foram obtidas a partir de três repetições ($n = 3$).

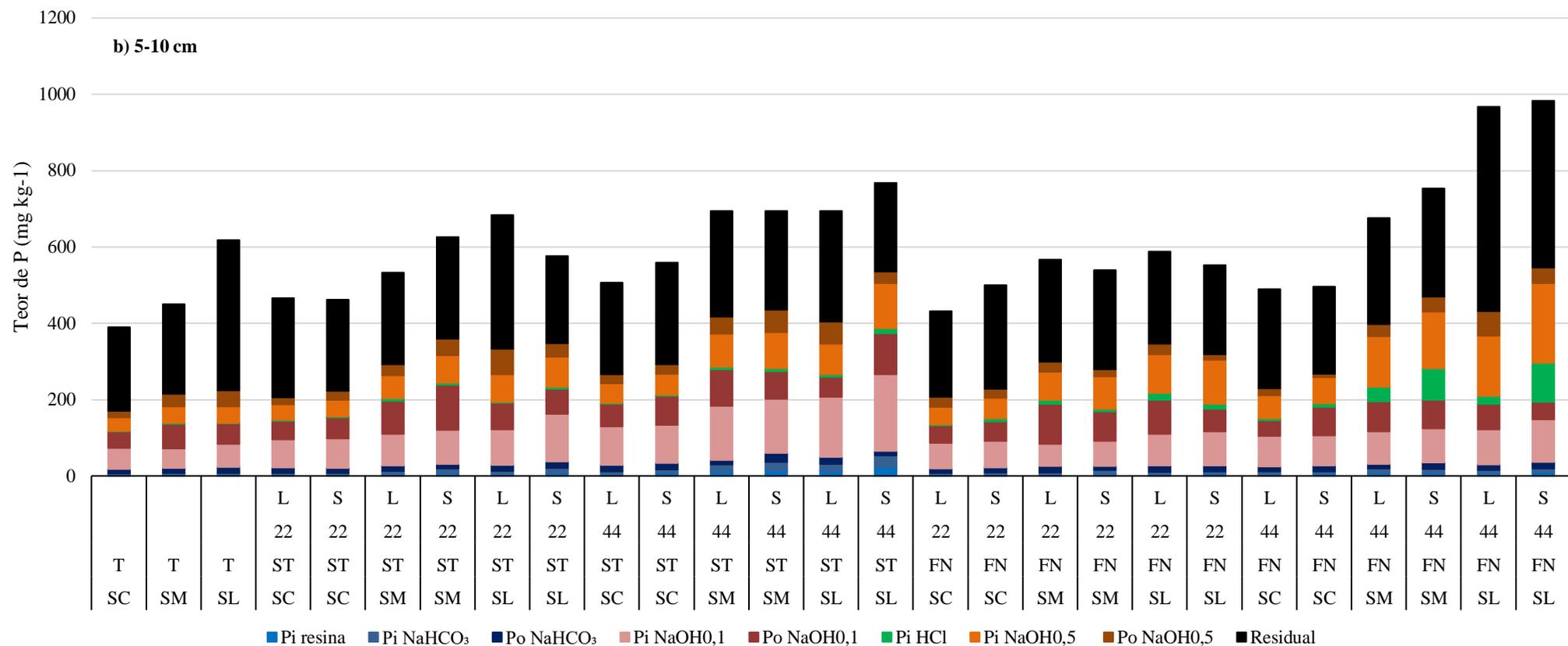


Figura A5. Teor das diferentes frações inorgânicas e orgânicas de P (mg kg^{-1}) na camada de 5-10 cm em função dos sistemas de manejo do solo (SC: sistema de plantio convencional; SM: sistema de plantio direto com o milho como planta de cobertura; SL: sistema de plantio direto com espécies leguminosas como planta de cobertura), das fontes de fertilizante fosfatado (ST: superfosfato triplo; FN: fosfato natural reativo), dos modos de aplicação (L: lançamento em superfície; S: sulco de semeadura) e das doses de P aplicada (22 e $44 \text{ kg de P ha}^{-1}$). As médias foram obtidas a partir de três repetições ($n = 3$).

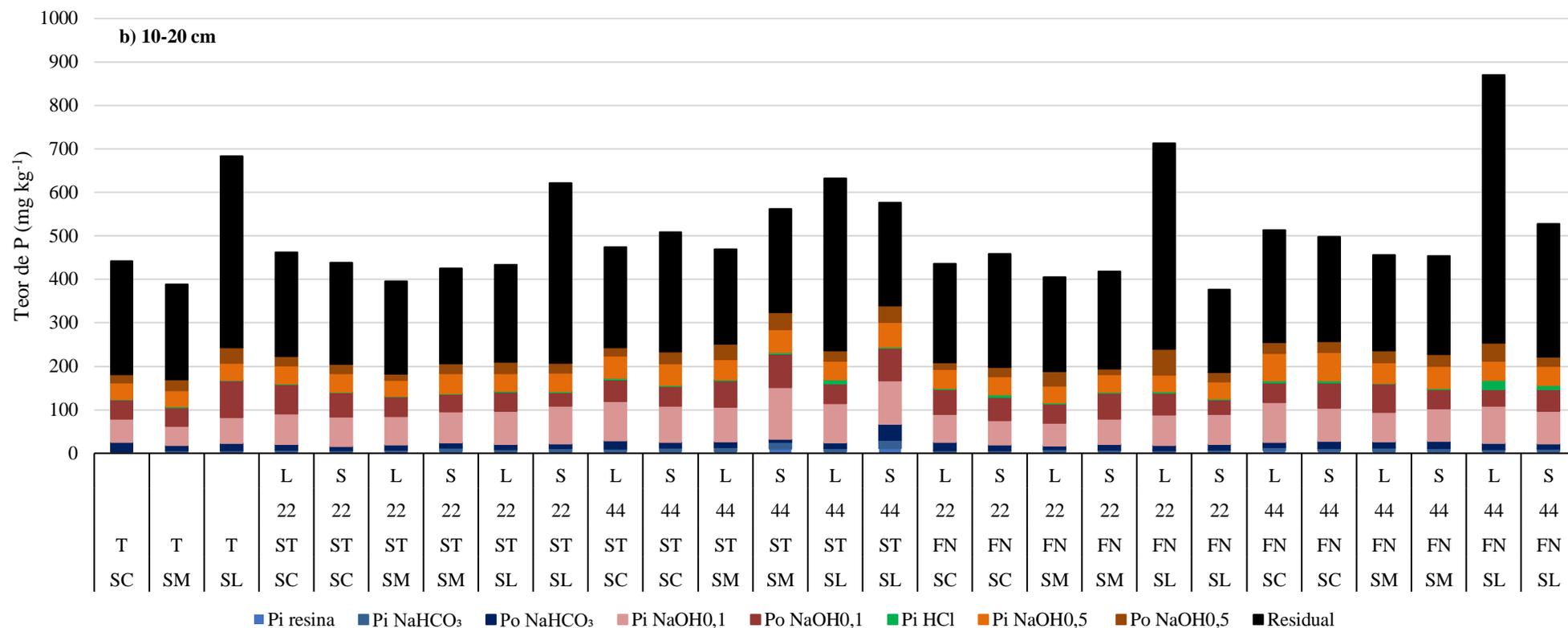


Figura A6. Teor das diferentes frações inorgânicas e orgânicas de P (mg kg^{-1}) na camada de 10-20 cm em função dos sistemas de manejo do solo (SC: sistema de plantio convencional; SM: sistema de plantio direto com o milho como planta de cobertura; SL: sistema de plantio direto com espécies leguminosas como planta de cobertura), das fontes de fertilizante fosfatado (ST: superfosfato triplo; FN: fosfato natural reativo), dos modos de aplicação (L: lanço em superfície; S: sulco de semeadura) e das doses de P aplicada (22 e $44 \text{ kg de P ha}^{-1}$). As médias foram obtidas a partir de três repetições ($n = 3$).

Tabela A5. Estatística de teste de médias por Tukey ($p < 0,05$) para os teores das frações inorgânicas e orgânicas obtidas no fracionamento sequencial de Hedley et al. (1982) em função dos sistemas de manejo do solo e das camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

SISTEMA	CAMADA (cm)	RESINA	Pi NaHCO ₃	Po NaHCO ₃	Pi NaOH 0,1	Po NaOH 0,1	Pi HCl	Pi NaOH 0,5	Po NaOH 0,5	Residual	Total
SPC	0-5	5,2 Ba	6,3 Ba	16,7 Aa	81,6 Ba	60,4 Ba	3,6 Ba	54,3 Ba	25,3 Ba	236,4 Ba	489,8 Ca
	5-10	4,2 Ba	6,0 Ba	13,9 Ab	78,0 Ba	55,1 Ba	3,9 Aa	50,7 Ba	20,5 Bb	245,5 Ba	477,9 Ba
	10-20	3,8 Aa	5,2 Aa	15,3 Ab	72,5 Aa	53,0 Bb	3,0 Aa	48,4 Aa	21,8 Bb	247,1 Ba	470,1 Aba
SPD mil	0-5	13,3 Aa	18,6 Aa	22,7 Aa	109,8 Aa	79,0 Aa	45,4 B	134,6 Aa	69,8 Aa	322,2 Ba	786,9 Ba
	5-10	7,4 ABb	12,6 Ab	18,7 Ab	91,1 Bab	79,0 Aa	23,0 A	87,1 Ab	58,6 Ab	287,0 Ba	635,4 Ab
	10-20	4,8 Ab	8,4 Ab	15,6 Ab	70,4 Ab	48,2 Ab	6,3 A	42,9 Ac	47,9 Ab	240,2 Ba	448,4 Bc
SPD leg	0-5	12,7 Aa	19,3 Aa	20,4 Aa	127,5 Aa	74,8 Ba	91,8 Aa	151,6 Aa	52,1 Aa	380,1 Aa	930,2 Aa
	5-10	8,6 Ab	11,9 Ab	15,7 Ab	112,8 Aa	67,6 Ba	20,4 Ab	108,5 Ab	42,0 Ab	327,1 Aa	714,5 Ab
	10-20	4,3 Ac	7,1 Ac	15,6 Ab	79,3 Ab	50,3 Bb	5,9 Ab	42,9 Ac	32,3 Ab	366,2 Aa	604,0 Ac

SPC: Sistema de plantio convencional;

SPD mil: Sistema de plantio direto com o milho como planta de cobertura;

SPD leg: Sistema de plantio direto com espécies leguminosas como planta de cobertura.

Letras maiúsculas diferenciam os sistemas para cada nível de profundidade e letras minúsculas diferenciam as camadas dentro de cada sistema pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela A6. Estatística de teste de médias por Tukey ($p < 0,05$) para os teores das frações inorgânicas e orgânicas (mg kg^{-1}) obtidas no fracionamento sequencial de Hedley et al. (1982) em função dos sistemas de manejo do solo e das doses de P aplicadas.

SISTEMA	DOSE (kg de P ha^{-1})	RESINA	Pi	Po	Pi NaOH	Po NaOH	Pi HCl	Pi NaOH	Po NaOH	Residual	Total
			NaHCO_3	NaHCO_3	0,1	0,1		0,5	0,5		
SPC	0	2,2 B*	3,3 A*	15,4 A ns	55,6 B*	47,8 B ns	1,6 B*	37,8 A*	18,3 B ns	236,6 B ns	418,5 B *
	22	3,6 Aa	4,6 Ba	14,3 Ab	69,9 Cb	55,3 Ba	3,3 Ba	47,0 Cb	22,3 Bb	241,7 Ba	462,1 Ba
	44	5,7 Ba	7,7 Ba	16,3 Aa	90,4 Ca	59,2 Ba	4,2 Ba	58,5 Ca	23,9 Ba	245,8 Ba	511,6 Ca
SPD mil	0	3,2 A*	5,3 A*	15,3 A ns	49,5 B*	63,7 AB ns	2,3 A*	44,2 A*	34,8 A ns	235,6 B ns	454,0 B*
	22	6,0 Ab	9,0 Ab	14,2 Ab	71,7 Bb	75,6 Aa	9,1 ABa	77,3 Ab	32,3 Ab	256,3 Ba	551,4 ABb
	44	11,8 Aa	16,8 Aa	16,2 Aa	115,8 Ba	78,5 Aa	35,9 ABa	112,5 Aa	41,1 Aa	267,2 Ba	695,7 Ba
SPD leg	0	3,7 A*	4,2 A*	17,0 A ns	62,2 A*	67,6 A ns	1,4 B*	44,2 A*	37,6 A ns	364,8 A ns	602,7 A*
	22	5,2 Ab	9,1 Ab	15,2 Ab	92,3 Ab	66,5 Ba	18,2 Aa	93,8 Ab	37,3 Ab	311,4 Aa	649,0 Ab
	44	13,1 Aa	18,5 Aa	19,3 Aa	131,8 Aa	61,1 Ba	70,0 Aa	122,4 Aa	48,1 Aa	402,5 Aa	886,8 Aa

SPC: Sistema de plantio convencional;

SPD mil: Sistema de plantio direto com o milho como planta de cobertura;

SPD leg: Sistema de plantio direto com espécies leguminosas como planta de cobertura.

As médias foram obtidas a partir de duas fontes, dois modos de aplicação do P e de três camadas de solo avaliadas em três repetições ($n=36$).

Letras maiúsculas diferenciam os sistemas para cada nível de dose de P aplicada e letras minúsculas diferenciam as doses de P aplicada dentro de cada sistema pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

*Representa diferença significativa pelo teste de contraste entre a testemunha e a média das duas doses de P (tratamentos adubados) dentro de cada sistema de manejo ($p < 0,05$).

Tabela A7. Estatística de teste de médias por Tukey ($p < 0,05$) para os teores das frações inorgânicas e orgânicas (mg kg^{-1}) obtidas no fracionamento sequencial de Hedley et al. (1982) em função das fontes e das doses de P aplicadas.

FONTE	DOSE (kg de P ha^{-1})	RESINA	Pi NaHCO_3	Po NaHCO_3	Pi NaOH 0,1	Po NaOH 0,1	HCl	Pi NaOH 0,5	Po NaOH 0,5	Residual	Total
SFT	22	5,5 Ab	9,0 Ab	13,8 Ab	86,3 Ab	63,0 Aa	3,9 Aa	61,5 Bb	32,5 Ab	273,2 Aa	548,6 Ab
	44	13,3 Aa	19,4 Aa	18,8 Aa	136,6 Aa	68,6 Aa	8,1 Ba	75,6 Ba	42,5 Aa	275,6 Aa	658,5 Aa
FNR	22	4,4 Ab	6,2 Ab	15,3 Ab	69,6 Bb	68,5 Aa	16,5 Ab	83,9 Ab	28,8 Bb	266,4 Aa	559,7 Ab
	44	7,1 Ba	9,3 Ba	15,7 Aa	88,7 Ba	63,9 Aa	65,3 Aa	120,0 Aa	32,9 Ba	334,7 Aa	737,6 Aa

SFT: Superfosfato triplo;

FNR: Fosfato natural reativo;

As médias foram obtidas a partir de três sistemas de manejo do solo, dois modos de aplicação e três camadas de solo avaliadas em três repetições ($n=54$). Letras maiúsculas diferenciam as fontes para cada nível de dose de P aplicada e letras minúsculas diferenciam as doses de P aplicada dentro de cada nível de fonte pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela A8. Estatística de teste de médias por Tukey ($p < 0,05$) para os teores das frações inorgânicas e orgânicas (mg kg^{-1}) obtidas no fracionamento sequencial de Hedley et al. (1982) em função dos sistemas de manejo do solo e das doses de P aplicadas.

SISTEMA	FONTE	RESINA	Pi NaHCO_3	Po NaHCO_3	Pi NaOH 0,1	Po NaOH 0,1	HCl	Pi NaOH 0,5	Po NaOH 0,5	Residual	Total
SPC	SFT	4,7 Ba	6,8 Ba	15,4 Aa	85,8 Ca	62,5 Aa	2,5 Aa	48,0 Ba	25,2 Ba	241,4 Ba	492,4 Ca
	FNR	4,7 Aa	5,5 Aa	15,2 Aa	74,5 Aa	51,9 Aa	5,1 Ba	57,5 Ba	20,9 Bb	246,1 Ba	481,3 Ca
SPD mil	SFT	11,1 Aa	16,5 Aa	14,4 Aa	113,4 Ba	75,2 Aa	6,6 Ab	76,7 Ab	40,3 Aa	257,0 Ba	611,2 Ba
	FNR	6,7 Ab	9,4 Ab	16,0 Aa	74,1 Ab	78,8 Aa	38,3 Ba	113,0 Aa	33,0 Ab	266,6 Ba	635,9 Ba
SPD leg	SFT	12,4 Aa	19,3 Aa	19,1 Aa	135,2 Aa	59,6 Aa	8,8 Ab	80,9 Ab	46,9 Aa	324,8 Aa	707,1 Aa
	FNR	5,9 Ab	8,4 Ab	15,5 Aa	88,9 Ab	67,9 Aa	79,4 Aa	135,2 Aa	38,5 Ab	389,0 Aa	828,7 Aa

SPC: Sistema de plantio convencional;

SPD mil: Sistema de plantio direto com o milho como planta de cobertura;

SPD leg: Sistema de plantio direto com espécies leguminosas como planta de cobertura.

As médias foram obtidas a partir de dois modos de aplicação do P, duas doses de P aplicadas e de três camadas de solo avaliadas em três repetições (n=36). Letras maiúsculas diferenciam os sistemas de manejo do solo para cada nível de fonte de P aplicada e letras minúsculas diferenciam as fontes de P aplicada dentro de cada nível de sistema de manejo do solo pelo teste de Tukey (p<0,05).

Tabela A9. Estatística de teste de médias por Tukey (p<0,05) para os teores de P das frações inorgânicas e orgânicas (mg kg⁻¹) obtidas no fracionamento sequencial de Hedley et al. (1982) em função dos sistemas de manejo do solo e das camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

FONTE	DOSE (kg de P ha ⁻¹)	RESINA	Pi NaHCO ₃	Po NaHCO ₃	Pi NaOH 0,1	Po NaOH 0,1	HCl	Pi NaOH 0,5	Po NaOH 0,5	Residual	Total
LANÇO	22	4,7 Ab	9,0 Ab	13,8 Ab	86,3 Ab	63,0 Aa	3,9 Ab	61,5 Ab	32,5 Ab	273,2 Aa	548,6 Ab
	44	10,3 Aa	19,4 Aa	18,8 Aa	136,6 Aa	68,6 Aa	8,1 Aa	75,6 Aa	42,5 Aa	275,6 Aa	658,5 Aa
SULCO	22	5,2 Ab	6,2 Ab	15,3 Ab	69,6 Ab	68,5 Aa	16,5 Ab	83,9 Ab	28,8 Ab	266,4 Aa	559,7 Ab
	44	10,1 Aa	9,3 Aa	15,7 Aa	88,7 Aa	63,9 Aa	65,3 Aa	120,0 Aa	32,9 Aa	334,7 Aa	737,6 Aa

As médias foram obtidas a partir de três sistemas de manejo do solo, duas fontes de P aplicadas e de três camadas de solo avaliadas em três repetições (n=54). Letras maiúsculas diferenciam os modos de aplicação para cada nível de dose de P aplicada e letras minúsculas diferenciam as doses de P aplicada dentro de cada nível de modo de aplicação pelo teste de Tukey (p<0,05).

Tabela A10. Valores de atividade da fosfatase ácida e sua estatística de teste de médias por Tukey (p<0,05) em função dos sistemas de manejo do solo, das fontes e doses de P aplicadas.

SISTEMA	FONTE	DOSE (kg de P ha ⁻¹)	FOSFATASE ÁCIDA (ug de PNF g ⁻¹ hora ⁻¹)
SPC	T	-	1545
	SFT	22	1275
		44	1618
		22	1383
	FNR	44	1427
SPD mil	T	-	1892
	SFT	22	1670
		44	1932

		22	1786
	FNR	44	1695
	T	-	1886
		22	1730
SPD leg	SFT	44	2005
		22	1700
	FNR	44	1647

As médias foram obtidas a partir de dois modos de aplicação de P e de três camadas de solo avaliadas em três repetições (n=18).

Não houve diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) para as interações duplas e triplas entre os fatores de sistema de manejo do solo e da adubação fosfatada.

