UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

FRACIONAMENTO DE FÓSFORO EM SOLO SOB SISTEMAS DE PRODUÇÃO

MATHEUS ANDRADE MARTINEZ

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2019

FRACIONAMENTO DE FÓSFORO EM SOLO SOB SISTEMAS DE PRODUÇÃO

MATHEUS ANDRADE MARTINEZ
Engenheiro Agrônomo, Mestre em Produção Vegetal

Orientadora: PROFª. DRª. MARLENE ESTEVÃO MARCHETTI

Tese apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

M385f Martinez, Matheus Andrade
Fracionamento de fósforo em solo sob sistemas de produção [recurso eletrônico] / Matheus Andrade Martinez. -- 2019.
Arquivo em formato pdf.

Orientador: Marlene Estevão Marchetti.
Coorientadores: Luiz Carlos Ferreira de Souza, Ademar Pereira Serra.
Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2019.
Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:
https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio

1. P-lábil. 2. frações de fósforo. 3. rotação de culturas. I. Marchetti, Marlene Estevão. II. Souza, Luiz Carlos Ferreira De. III. Serra, Ademar Pereira. IV. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

FRACIONAMENTO DE FÓSFORO EM SOLO SOB SISTEMAS DE PRODUÇÃO

por

Matheus Andrade Martinez

Tese apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de DOUTOR EM AGRONOMIA

Aprovado em: 04 de Abril de 2019.

Prof. Drª. Marlene Estevão Marchetti
Orientador - UFGD/FCA

Prof. Dr. Luiz Carlos Ferreira
Membro Adjunto - UFGD/FCA

Prof. Dr. Ademar Pereira Serra
Membro Adjunto – EMBRAPA/Gado de Corte

Prof. Drª. Alessandra Mayumi Tokura Alovisi
Membro Adjunto - UFGD/FCA

Profª. Drª. Elaine Reis Pinheiro Lourente
Membro Adjunto - UFGD/FCA

Profª. Drª. Elisângela Duppas
Membro Adjunto - UFGD/FCA

Profª. Drª. Simone Cândido Ensinas
Membro Adjunto - UEMS

DEDICO

À minha mãe Ana Maria de Andrade Martinez e ao meu pai Edson Schieffer Martinez.

Aos meus irmãos, Thais Andrade Martinez e Thiago Andrade Martinez.

À minha esposa Natalia Ferrari Nóbrega.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Edson Schieffer Martinez e Ana Maria de Andrade Martinez, mesmo nos momentos mais difíceis se sacrificarem para me dar uma educação de qualidade.

Aos meus irmãos, Thais Andrade Martinez e Thiago Andrade Martinez, pelo companheirismo e zelo em todas as horas.

À minha esposa e eterna companheira, Natalia Ferrari Nóbrega, que sempre esteve ao meu lado nos momentos de angustia e felicidade, me trazendo paz.

À minha orientadora, Marlene Estevão Marchetti, pela amizade, confiança, incentivo e orientação durante a realização desse trabalho.

Aos meus coorientadores, Luiz Carlos Ferreira de Souza e Ademar Pereira Serra, pelas suas contribuições intelectuais.

À professora Alessandra Mayumi Tokura Alovisi e Elisângela Dupas por todo ensinamento transmitido durante todo processo de desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo Maílson Vieira Jesus por todo apoio concedido para realização do estudo estatístico.

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia pela oportunidade que me foi dada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (*CAPES*), pelo apoio financeiro com a disponibilização da bolsa de estudos.

Aos técnicos de laboratório, João Augusto Machado, Camila Farah, Ederson Marcelo Klein e Nilda Kobayashi Hoffman pelas ajudas laboratoriais, amizade e conselhos nas horas de nervosismo dentro do laboratório.

Aos amigos Lincoln Macedo, Rodrigo Carneiro e Thales Camargo por essa verdadeira amizade e pelo incentivo as minhas decisões profissionais.

À toda família Andrade e Martinez que sempre me apoiaram em meus estudos.

Aos eternos professores, Eulene Francisco da Silva e José Oscar Novelino, por me mostrarem o caminho da sabedoria e conhecimento.

A todos que de alguma forma contribuíram na minha formação profissional e para a realização desse sonho.

MUITO OBRIGADO.

SUMÁRIO

RESUMO v
ABSTRACT vi
1. INTRODUÇÃO 1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
2.1 - Aspectos gerais do fósforo 3
2.1.1- Fracionamento de Fósforo 3
2.1.2 - Formas de fósforo no solo 4
2.1.4 - Absorção de P pelas plantas 7
2.1.5 - Manejo do solo e modificações de fósforo 8
2.2 - Culturas de inverno e a dinâmica do P no solo 10
3. MATERIAL e MÉTODOS 14
3.1 - Local, clima e solo 14
3.2 - Delineamento experimental e tratamentos 17
3.3 - Amostragem de solo 19
3.4 - Variáveis analisadas 19
3.4.1 - Fracionamento de P 19
3.4.2 – Cultura da soja – safra 2015/2016 20
3.5 - Análise estatística 21
4. RESULTADOS e DISCUSSÃO 22
4.1 – Análise de variância (ANOVA) 22
4.2 - Fracionamento de P 24
4.2.1 - Resina trocadora de ânions (P-RTA) 24
4.2.2 - P orgânico bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-$NaHCO_3$) 25
4.2.3 - P inorgânico bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-$NaHCO_3$) 27
4.2.4 – P orgânico hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Po-NaOH 0,1 mol L^{-1}) 28
4.2.5 - P inorgânico hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Pi-NaOH 0,1 mol L^{-1}) 30
4.2.6 - P-HCl 1,0 mol L^{-1} (P-HCl) 31
4.2.7 - P orgânico hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-NaOH 0,5 mol L^{-1}) 32
4.2.8 - P inorgânico hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-NaOH 0,5 mol L^{-1}) 33

4.2.9 - P Residual 34
4.2.10 - Fósforo Lábil (P-Lábil) 36
4.3 - Cultura da Soja - safra 2015/2016 39
5. CONCLUSÕES 45
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 46

RESUMO

MARTINEZ, MATHEUS ANDRADE. Universidade Federal da Grande Dourados. **Fracionamento de fósforo em solo sob sistemas de produção.** Orientadora: Marlene Estevão Marchetti. Coorientadores: *Luiz Carlos Ferreira de Souza* e *Ademar Pereira Serra*

Em solos altamente intemperizados, como os Latossolos, a capacidade de adsorção de P é elevada, principalmente do fosfato ($H_2PO_4^-$/ HPO_4^{2-}), o que pode levar a rápida adsorção do fósforo quando aplicado ao solo na forma de fertilizante mineral. O uso de espécies com diferentes capacidades de explorar o solo e dessa forma realizar a ciclagem de nutrientes, entre eles o fósforo, pode aumentar as frações mais lábeis e reduzir as frações não-lábeis de P no solo. Objetivou-se com esse trabalho quantificar e comparar as frações de fósforo do solo, teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio da cultura da soja e a produtividade pelo efeito da sucessão e rotação de culturas em área do Cerrado. O experimento teve início em 2009, porém o estudo foi realizado nos anos agrícolas 2014/2015 e 2015/2016, onde os tratamentos estavam dispostos sob delineamento de blocos casualizados com três repetições e sete tratamentos, onde cada tratamento representa um sistema de produção. Os tratamentos foram constituídos da utilização de combinações de monocultura, sucessão e rotação de culturas, sendo que três tratamentos são referentes a sistemas de rotação de culturas. Foram coletadas as amostras de solo em quatro profundidades (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm) e realizado o fracionamento do fósforo do solo para a quantificação das frações de P de acordo com a sua natureza (orgânico e inorgânico) e labilidade (lábil, moderadamente lábil e não lábil). Foi quantificado a concentração de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio e a produtividade da cultura da soja no ano agrícola 2015/2016. Os sistemas de rotação de cultura comparado a sucessão soja/milho aumenta os teores de fósforo lábil na camada de 0-5 cm. Na camada de 5-10 cm ocorre a redução de labilidade de P inorgânico, passando da fração lábil ($NaHCO_3$) para a fração moderadamente lábil (NaOH 0,5 mol L^{-1}) com o uso de sistemas de rotação de cultura. O sistema de rotação crambe/milho/trigo/soja e o uso do consórcio entre milho e *Brachiaria* promovem o aumento da produtividade de soja como cultura subsequente. O sistema de rotação crambe/milho/trigo/soja proporciona maior absorção de P pela cultura da soja.

Palavras-chave: P-lábil; frações de fósforo; rotação de culturas.

ABSTRACT

MARTINEZ, MATHEUS ANDRADE. Universidade Federal da Grande Dourados. **Phosphorus fractionation in soil under production systems.** Adviser: Marlene Estevão Marchetti. Coadviser: *Luiz Carlos Ferreira de Souza*, *Ademar Pereira Serra*

In highly weathered soils, such as the Oxisols, the P adsorption capacity is high, mainly phosphate ($H_2PO_4^-$ / HPO_4^{2-}), which can lead to quick phosphorus adsorption when applied to soil in the form of mineral fertilizer. The use of species with different capacities to explore the soil and thus to perform the nutrient cycling, among them phosphorus, can increase the most lábile fractions and reduce the non-lábile fractions of P in the soil. The aim of this research was to quantify and compare soil phosphorus fractions, nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium contents of soybean crop and productivity by the effect of succession and rotation of crops in the Brazilian Cerrado. The experiment started in 2009, but the study was carried out in the agricultural years 2014/2015 and 2015/2016, where the treatments were arranged under a randomized block design with three replicates and seven treatments, where each treatment represents a production system. The treatments were constituted using combinations of monoculture, succession and crop rotation, with three treatments referring to crop rotation systems. Soil samples were collected at four depths (0-5, 5-10, 10-20 and 20-40 cm) and soil phosphorus fractionation was performed for the quantification of P fractions according to their nature (organic and inorganic) and lábility (lábile, moderately lábile and non-lábile). The concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium and the yield of soybean crop in the agricultural year 2015/2016 were quantified. The crop rotation systems compared to the soybean / corn succession increase the levels of lábile phosphorus in the 0-5 cm layer. In the 5-10 cm layer, the lábility of inorganic P is reduced, from the lábile fraction ($NaHCO_3$) to the moderately lábile fraction (NaOH 0,5 mol L^{-1}) with the use of culture rotation systems. The crambe/corn/wheat/soybean rotation system and the use of the maize intercropped with *Brachiaria* promote the increase of soybean yield as a subsequent crop. The crambe/corn/wheat/soybean rotation system provides higher P uptake by soybean crop.

Keywords: P-lábile; phosphorus fractionation; crop rotation.

1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) e o nitrogênio (N) são os elementos que mais limitam a produtividade nos solos oxídicos. É um componente essencial dos tecidos e células, e é necessário para a formação de ácidos nucleicos e moléculas de energia, tal como adenosina trifosfato (ATP). Em solos altamente intemperizados, como os Latossolos, a capacidade de adsorção de P na forma de $H_2PO_4^-$ é elevada, o que pode levar a rápida adsorção do fósforo quando aplicado ao solo na forma de fertilizante mineral. Desta forma os estudos do uso de P de forma mais eficiente tornou-se um tema abordado de forma ampla por pesquisadores.

Para amenizar os efeitos da adsorção de P ao solo, é aplicado altas doses de fertilizantes fosfatados com o intuito de saturar os sítios de adsorção, porém é uma técnica que onera o custo de produção. Com a intenção de tornar menos custoso o uso de fertilizantes fosfatados, deve ser levado em consideração os fatores que podem reduzir a adsorção do P aos colóides minerais do solo.

Levando em consideração a baixa mobilidade do P no solo aliado a alta capacidade de "fixação", um dos pontos chaves para planta aumentar a eficiência na absorção de P do solo é o aumento da proporção da parte radicular em relação à parte aérea, aumento da pilosidade radicular, mudança da arquitetura radicular, associação das raízes com micorrizas e exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes para elevar a solubilidade do fósforo do solo.

O uso de rotação de culturas frente a sucessão e monocultura pode ter maior influência sobre a transformação do P em formas mais disponíveis, visto que o uso de diversas culturas traz para o solo diferentes morfologias e volumes de raízes, qualidade de palhada e liberação de ácidos orgânicos pelas raízes.

A forma de uso e o manejo do solo têm a capacidade de alterar a dinâmica do P no solo, pois ocorre mudanças na fase física, química e biológica do solo. Sistemas como plantio direto tem como característica o não revolvimento do solo, acúmulo de palhada sobre o solo e rotação de culturas. É conhecido que este sistema proporciona acúmulo de matéria orgânica no solo e, consequentemente, é possível observar mudanças no P do solo.

Uma vez que nenhuma espécie apresenta todas estas características citadas anteriormente há, também, a possibilidade de realizar o cultivo na forma de consórcio ou em rotação de culturas. O uso de espécies com diferentes capacidades de explorar o solo e dessa forma realizar a ciclagem de nutrientes, entre eles o fósforo, pode aumentar as frações mais lábeis e reduzir as frações não-lábeis de P no solo.

Atualmente, a maior parte dos produtores agrícolas do Cerrado cultivam em forma de sucessão de culturas, utilizando soja na safra de verão e milho na safra de outono/inverno. Ao utilizar somente duas culturas e de forma repetida por vários anos, as plantas de soja e milho absorvem, constantemente, a mesma forma de fósforo do solo.

É conhecido que cada espécie de planta tem a capacidade de absorver diferentes formas de fósforo com distintas forças de adsorção aos colóides como, por exemplo, P ligado ao cálcio, P ligado ao ferro e P ligado ao alumínio. Uma possível alternativa é o uso diferentes culturas para aumentar o conjunto de formas de P absorvidos, e por meio da ciclagem de nutrientes disponibilizar à cultura seguinte o P de maior labilidade.

Diante do exposto, objetivou-se com esse trabalho analisar a dinâmica das frações de fósforo do solo, teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio da planta de soja e produtividade de soja pelo efeito da sucessão, monocultivo e rotação de culturas em área do Cerrado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Aspectos gerais do fósforo

2.1.1- Fracionamento de Fósforo

Para entender melhor a dinâmica do fósforo no solo é necessário dividir as frações orgânicas, inorgânicas e microbianas obtidas por uma sequência de extratores com aumento do potencial de extração das soluções.

A primeira metodologia de fracionamento de fósforo foi citada por Fraps (1906), porém a metodologia utlizada com mais frequência foi a de Chang e Jackson (1957), porém somente contempla as frações inorgânicas de fósforo.

Em uma revisão bibliográfica realizada por Condron e Newman (2011) os autores citam treze metodologias geralmente usadas para o fracionamento de fósforo, com características distintas quanto à capacidade de separar frações orgânicas e inorgânicas, e indicar a labilidade dos compostos determinados.

A publicação do método de Hedley é um divisor metodológico importante, pois a partir desse trabalho várias pesquisas foram desenvolvidas em diversos tipos de solo (RHEINHEIMER et al., 2000).

O método de extração sequêncial de Hedley ou fracionamento de P (Hedley et al., 1982) permite a caracterização das diferentes frações de fósforo orgânico e inorgânico com base na solubilidade do fósforo (lábil, moderadamente lábil e não lábil) em soluções de extração sequênciais com suporte nas mudanças no pH e na resistência à extração. Em sequência, a primeira fração é extraida utilizando a resina trocadora de ânion que corresponde ao fósforo inorgânco lábil. Em seguida com o extrator $NaHCO_3$ 0,5 mol L^{-1} é determinado fósforo orgânico/inorgânico lábil. O NaOH (0,1 e 0,5 mol L^{-1}) tem a capacidade de extrair o fósforo inorgânico ligado ao ferro e aluminio e fósforo orgânico considerados moderadamente lábil. Na sequência, o HCl 1,0 mol L^{-1} remove o fósforo inorganico ligado ao cálcio apontado como não lábil. Já a ultima fração é extraida pela digestão usando H_2SO_4 + H_2O_2 na qual determina-se o fósforo residual (orgânico e inorgânico), chamado também de P recalcitrante.

O método de fracionamento proposto por Hedley et al. (1982) passou por várias modificações, para facilitar a sua exequibilidade e para adequá-la aos aparelhos

laboratoriais disponíveis e necessários para sua realização. Dentre as modificações destacam-se as seguintes:

- Tiessen et al. (1984): Exclusão do P microbiano e dessa forma evita a necessidade de amostras em duplicata no inicio da metodologia.
- Condron e Goh (1989): Os autores propuseram a retirada do P microbiano e a troca da extração com NaOH 0,1 mol L^{-1} + ultrasonificação pela extração com NaOH 0,5 mol L^{-1}.

2.1.2 - Formas de fósforo no solo

O fósforo do solo é dividido em dois grandes grupos, orgânico e inorgânico, que contribuem em diferentes proporções para o fósforo disponível, dependendo da força de adsorção do composto na qual está ligado.

O fósforo orgânico (Po) tem como origem os resíduos vegetais, tecidos microbianos e de produtos da sua decomposição sendo que a principal forma de Po encontrada no solo é inositol, que representa até 50% de todo Po, seguido pelos fosfolipídios (3-5%), ácidos nucléicos (3%) e outras formas em concentrações menores (McLAREN et al., 2015).

Para as plantas utilizarem o fósforo que está na fração orgânica, é necessário que ocorra o processo de mineralização, que é realizado pela ação de enzimas fosfatases que são produzidas por microorganismos e exudatos radiculares, quando o solo está carente em fósforo (BÜNEMANN, 2015).

O P na solução do solo ocorre nas formas iônicas $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} e PO_4^{3-} e suas concentrações variam conforme o pH do solo, destacando o $H_2PO_4^-$ nas regiões ácidas, caracterizadas pelo alto intemperismo (CEROZI e FITZSIMMONS, 2016).

O fósforo inorgânico (Pi) é encontrado principalmente ligado aos compostos de ferro, alumínio e cálcio, sendo as formas originadas pela ligação aos hidróxidos de ferro e alumínio a estrengita e variscita, respectivamente e, para o cálcio são diversos compostos gerados: fosfato dicálcio, fostato tricálcico, fluorapatita e hidroxiapatita (SOUZA JUNIOR et al., 2012).

Os fosfatos de ferro, alumínio e cálcio são solúveis quando o solo apresenta pH acima de 6,5, já quando ocorre a adsorção entre os íons fosfato e hidróxidos de ferro e

alumínio sucede a troca por dois íons hidroxila (–OH e $–OH_2^+$), tendo como característica a forte ligação do P com esses metais (ROSA et al., 2016).

Nos solos altamente intemperizados do Brasil prevalece as formas de Pi ligadas à minerais, conhecido como fósforo adsorvido, e as formas estabilizadas de fósforo orgânico (SANTOS et al., 2008).

Ao estudar as frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho, Santos et al. (2008) observaram que nas formas inorgânicas a fração que predominou sobre o fósforo inorgânico (Pi) total foi a extraída com NaOH 0,5 mol L^{-1} quando a adubação foi realizada a lanço, que corresponde a fração de P ligada ao Fe e Al que estão no interior dos agregados do solo. Quando a adubação foi parcelada, observou-se comportamento inverso, pois ocorre maior contato dessa fonte com maior volume de solo, ocorrendo a conversão do P liberado do adubo para formas mais fortemente retidas.

Em ambos os grupos de P, orgânico e inorgânico, existe as formas lábeis e não lábeis, que podem variar de acordo com a interação mineral e a estabilidade dos compostos as quais estão ligados (ZHU et al., 2016).

Na revisão realizada por Hallama et al. (2019) sobre a função das plantas de cobertura na dinâmica do P do solo, os autores citam a importância da escolha de culturas com alta biomassa e elevada capacidade de absorver P do solo, pois essas características influenciam na taxa de mineralização de P, sendo esse efeito mais pronunciado em condições de sistema plantio direto.

Quando a fonte do fertilizante é a orgânica e de rápida decomposição, no início ocorre o acúmulo de fósforo na forma orgânica que, posteriormente, é transformada na forma inorgânica pela ação dos microorganismos no processo de mineralização, porém se o fertilizante adicionado ao solo for de baixa decomposição, o fósforo pode continuar em formas orgânicas (CERETTA et al., 2010).

Os Latossolos são conhecidos por serem altamente intemperizados sendo que a principal forma de fósforo encontrada está na forma inorgânica ligadas à fração mineral com alta adsorção e a fração orgânica está estabilizada tanto no caráter físico como no químico, ou seja, adsorvida nos colóides orgânicos e inorgânicos e retido de forma estrutural em minerais. Conforme o grau de estabilidade esses compostos, são denominados como fósforo lábil e não lábil. Quanto mais lábil o fósforo se apresenta, significa que tem maior capacidade de repor o fósforo da solução do solo que pode ter sido absorvido por plantas/microorganismos. Em razão disso, as formas com maior

labilidade são muito dependentes do nível de intemperismo do solo, da cultura instalada na área, entre outros fatores (RAIJ, 2011).

Na revisão feita por Hinsinger (2001), o autor descreve que os teores de P na solução do solo são determinadas conforme as formas de P no solo e suas respectivas labilidade s, onde são dependentes de três fatores: (i) pH, (ii) as concentrações de cátions metálicos como Ca, Fe e Al e (iii) as concentrações de ligantes competidores inorgânicos (especialmente bicarbonato e possivelmente sulfato) e orgânicos, tais como ânions carboxílicos.

A mobilidade da forma iônica $H_2PO_4^-$ na solução do solo é muito baixa por conta de características físico-químicas que o solo possui, fazendo com que esses íons se liguem aos colóides com energia muito forte (NASCIMENTO et al., 2018), porém sua mobilidade na planta é alta.

Avaliando a biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto, Gatiboni et al. (2007) observaram que com os cultivos em solo sem revolvimento ocorre o aumento de P inorgânico lábil em detrimento da fração orgânica lábil, indicando que a absorção de formas inorgânicas de P pelas plantas gera a mineralização de P orgânico, repondo a forma inorgânica.

Após vários anos de cultivo com uso de fertilizantes fosfatados, é possível observar acréscimo mínimo de fósforo na solução do solo em relação ao fósforo total, entretanto o uso de outras culturas pode levar a alterações positivas do fósforo lábil do solo, portanto o aumento da fração lábil (JANEGITZ et al., 2017).

Avaliando a disponibilidade de fósforo sob efeito de diversas espécies de *Brachiaria*, Janegitz et al. (2017) observaram o aumento de até 36% da fração de P extraído por resina trocadora de ânions (P-RTA) comparando os tratamentos que continham forrageiras com a testemunha. Os autores defendem a hipótese de que ocorre intensa renovação de tecidos radiculares e elevada atividade do sistema radicular com a liberação de exsudatos orgânicos, na qual servem como energia para a biomassa microbiana, e dessa forma resulta na imobilização do P disponível na solução do solo.

Em uma revisão Zhang et al. (2014) citam de forma generalizada as respostas das raízes em situações de estresse nutricional de P inorgânico, na qual possui seis etapas: 1) aumento da absorção, transporte e translocação de Pi; 2) mudanças na arquitetura do sistema radicular; 3) aumento na secreção de ácidos orgânicos e fosfatases ácidas; 4) mudanças nas rotas metabólicas; 5) remodelação lipídica; 6) estabelecimento de simbiose entre planta e micorrizas. A exsudação radicular de ácidos

orgânicos também é uma evolução das plantas leguminosas para sobreviver em meios que não possui quantidades suficientes de P, porém espécies como a soja não conseguem exsudar teores consideráveis de ácido orgânico.

A liberação do fósforo adsorvido aos minerais do solo é dependente de altas concentrações de ácido orgânico, em torno de 2,5 a 10 µmol por grama de solo, e também o tipo de ácido orgânico presente no solo, pois cada ácido orgânico tem capacidade diferente em relação à biodisponibilidade de P, capacidades diferentes em ocupar o mesmo sítio de adsorção de P, que seguem a seguinte ordem: citrato>oxalato>malato, sendo que o citrato é o ácido orgânico com maior capacidade de solubilizar o P ligado ao ferro e alumínio, justificando tal dado por conta do citrato ter maior afinidade pelos sítios de adsorção (KHADEMI et al., 2010; OBURGER et al., 2011).

Algumas culturas, por questões fisiológicas, demonstram capacidade reduzida em absorver as formas de fósforo de menor labilidade do solo. Uma alternativa seria o cultivo antecedente de espécies que possuem maior eficiência na absorção de P e, posteriormente o P estaria disponível no solo. Uma estratégia para impedir a estabilização de formas pouco lábeis de fósforo no solo é utilizar espécies com potencial maior de acúmulo de P na fitomassa, uma vez que há espécies de cobertura que são mais eficientes na solubilização das formas menos lábeis de fósforo, onde a ciclagem de nutrientes seria mais acentuada (MERLIN et al., 2016).

2.1.4 - Absorção de P pelas plantas

O fósforo (P) é um macronutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento de todos os organismos vivos, que possui várias funções como um elemento estrutural de ácidos nucléicos e fosfolipídios, no metabolismo de energia pela adenosina trifosfato (ATP), intermediário na ativação de metabólitos como um componente em sinais de cascatas de transdução e na regulação de enzimas (RAUSH e BUSHER, 2002).

A falta desse nutriente no solo ou indisponibilidade de fósforo à planta pode ocasionar atraso na maturação fisiológica, decréscimo da capacidade de florescimento, redução do vigor da semente e da produtividade, sendo que se ocorrer a deficiência do nutriente até mesmo no início do período vegetativo, a planta vai ter restrição no seu desenvolvimento, mesmo se ocorrer a oferta do nutriente após o evento de estresse nutricional (SHARMA et al., 2013).

Balemi e Negisho (2012) relatam quatro fatores principais que influenciam na capacidade da planta em absorver o P que está no solo:1-as necessidades totais de nutrientes; 2-a velocidade de crescimento da planta; 3-eficiência nutricional no metabolismo; 4-capacidade de absorção de nutrientes.

Visto que a planta absorve os nutrientes que estão na solução do solo, a própria planta se torna dependente do P que está na fase sólida do solo, que necessita liberar o nutriente pelo processo de dessorção em uma velocidade adequada para realizar a manutenção da concentração de P na solução do solo (CASALI et al., 2016).

Porém, nem sempre o solo possui essa capacidade tampão para repor os nutrientes, e para sobreviver em solos com baixas concentrações de P disponível, as plantas desenvolveram algumas habilidades como aumento do tamanho, densidade, diâmetro e pelos radiculares, associação a micorrizas arbusculares, capacidade de a planta manter normalmente o metabolismo em condições de estresse (PARENTONI et al., 2011). Outra estratégia que a planta possui é o aumento da síntese de fosfatase, que é liberado para a rizosfera, onde pode ocorrer a liberação de fósforo inorgânico de ésteres fosfatados por hidrólise (GIANFREDA, 2015).

Como as formas orgânicas e inorgânicas estão em transformação de forma dinâmica, a exsudação radicular de compostos orgânicos tende a realizar a solubilização do fósforo inorgânico e disponibilizando para as plantas, sendo que a falta desse nutriente pode até mesmo facilitar a entrada de patógenos por conta dos ácidos orgânicos liberados na falta de P serem estimulantes para alguns fungos (WANG et al., 2015).

Tal como citado anteriormente, outra forma de aumentar a absorção de P é a utilização de fungos micorrízicos, onde ocorre uma simbiose mutualista sendo que parte da produção pela planta de compostos que contenham carboidratos durante o processo fotossintético é utilizado pelo fungo. Em contrapartida proporciona para a planta parte dos nutrientes absorvidos do solo por conta do aumento da área de absorção, pois as hifas dos fungos micorrízicos acessam locais nos quais as raízes não alcançam, aumentando dessa forma a superfície específica radicular (HAMMER et al., 2014).

2.1.5 - Manejo do solo e modificações de fósforo

A dinâmica do fósforo no solo pode ser influenciada por diferentes tipos de uso e manejo do solo, alterando dessa forma os compartimentos do nutriente no solo,

podendo participar como fonte ou dreno do P disponível as frações orgânicas e inorgânicas (WANG et al., 2014; BHATTACHARYYA et al., 2015).

Analisando o tempo de cultivo e a influência do sistema plantio direto nas frações de fósforo do solo em experimento de longa duração, Rodrigues et al. (2016) observaram que o sistema plantio direto promove o acúmulo de P orgânico na superfície do solo e aumenta os teores das frações orgânicas e inorgânicas lábeis e moderadamente lábeis, devido ao aumento de restos culturais sobre o solo e o uso de fertilizante fosfatado solúvel entre 5-10 cm.

Estudando a distribuição de fósforo inorgânico em sistemas de manejo do solo (sistema plantio direto, sistema de plantio convencional, plantio mínimo) e rotação de culturas (trigo/soja/aveia/milho), Rheinheimer e Anghinoni (2001) observaram o aumento de 38% na fração inorgânica extraída com bicarbonato de sódio, em áreas sob Sistema Plantio Direto comparado com sistema convencional, em Latossolo Vermelho Distroférrico. O revolvimento do solo faz com que o fósforo passe para formas de menor labilidade devido ao maior contato do P com o solo.

Métodos de preparo de solo que não revolvem o solo ou que acumulem resíduos vegetais sobre o solo possuem várias características que trazem benefícios para o solo, e uma delas é o aumento do teor de matéria orgânica na camada superficial do solo com o transcorrer do tempo com a implantação do sistema. Em diversos tipos de solo em várias regiões do Brasil, foi constatado alta correlação entre a matéria orgânica do solo e o fósforo orgânico lábil (OLIVEIRA et al., 2014).

O uso do sistema de semeadura direta durante vários anos aumenta o fósforo orgânico da camada de 0-10 cm em solos caracterizados por serem arenosos com baixos teores de óxidos de ferro e alumínio. Em virtude do revolvimento do solo, ocorre a decomposição da matéria orgânica do solo, e com isso reduz os teores de fósforo orgânico lábil (RHEINHEIMER, 2000). Em contrapartida, quando observado o comportamento do P em solos argilosos e com altos teores de óxidos de ferro e alumínio, a mudança não é expressiva quando comparado o sistema de semeadura direta com o sistema convencional após vários anos.

O maior acúmulo de fósforo disponível em sistema de cultivo sem revolvimento do solo em relação aos métodos convencionais é devido à aplicação repetitiva de fertilizante fosfatado logo abaixo da linha de semeadura (5-10 cm), maior acúmulo de resíduos vegetais sobre o solo, que faz com que aumente os teores de matéria orgânica do solo, e com isso maior quantidade de fração orgânica de P e por final o menor

contato do elemento com componentes inorgânicos do solo, decorrente da ausência de revolvimento do solo (RHEINHEIMER, 2000; SANTOS e TOMM, 2003).

Nem sempre o fósforo presente nos restos culturais vai auxiliar nutricionalmente na cultura que será cultivada posteriormente, porém esse fósforo vai integrar o fósforo orgânico do solo na forma de reserva, e a disponibilidade do fósforo contido nos resíduos culturais é dependente das outras formas de P no solo, sendo que quanto menor o teor de P no solo, maior vai ser a disponibilidade (HORST et al., 2001).

Apesar de quase todas as formas de P auxiliar na nutrição de plantas, quando ocorre a extração de P dos solos pelas plantas e não é feito a reposição nutricional ao solo, verifica-se modificações na proporção das frações de fósforo. Desta forma as frações menos lábeis ocupam o lugar das mais lábeis e as formas orgânicas passam a ter maior participação ao longo do tempo (GATIBONI et al., 2007).

2.2 - Culturas de inverno e a dinâmica do P no solo

Para o fósforo, uma das vantagens de utilizar rotação de culturas é a capacidade de algumas espécies em promover o acúmulo e movimentação do P no perfil do solo. Porém essa movimentação ocorre de forma lenta e acumulativa com auxílio do crescimento das raízes das plantas e liberação de ácidos orgânicos, e varia de acordo com cada espécie (FRANCHINI et al., 2003).

Dentre os ácidos orgânicos mais ativos à disponibilização de P, estão: cítrico, oxálico, glucônico, lático e málico (GUPPY et al., 2005). O nabo forrageiro apresenta elevado efeito na disponibilidade de nutrientes no solo, devido à elevada presença de ácidos orgânicos no tecido dessa cultura, como o cítrico e o málico (AMARAL et al, 2004).

Costa e Lovato (2004) avaliaram plantas micorrízicas (aveia preta/ervilhaca) e não micorrízicas (nabo forrageiro/tremoço) na capacidade de liberarem fosfatases ácidas e alcalinas. Em condições de P baixo no solo, as plantas não micorrizicas liberaram maiores quantidades de fosfatases. Os autores indicam que a maior produção da fosfatase seria uma forma das plantas compensarem o efeito da ausência de benefícios na nutrição de P devido à micorrização.

As fosfatases ácidas e alcalinas são produzidas também por fungos conhecidos por serem solubilizadores de P. Carneiro et al. (2004) analisaram distintas culturas de

cobertura em um Latossolo Vermelho-Amarelo, e determinaram a população de fungos solubilizadores de fosfatos, chegando à conclusão que a cultura do nabo forrageiro estimula o aumento da população de fungos indicando associação entre a cultura e o fungo.

Ao usar nabo forrageiro no sistema de cultivo, Teles et al. (2017) observaram menor teor de P moderadamente lábil no solo, indicando a capacidade de absorção destas formas de P pela cultura.

Avaliando a produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes nos resíduos vegetais do nabo forrageiro e outras culturas, Marcelo et al. (2012) encontraram após a colheita teores entre 19-26 g kg^{-1} de N, 1,7-1,8 g kg^{-1} de P e 21-28 g kg^{-1} de K. Resultados semelhantes foram encontrados por Lima et al. (2007), e os autores ressaltam que pode acontecer melhoras nas características químicas e estruturais ao solo após a decomposição dos resíduos vegetais de nabo forrageiro.

O nabo forrageiro possui raízes grossas e profundas, sendo que 19% do P absorvido pela planta fica contido nas raízes do nabo forrageiro, onde a concentração de P na parte radicular é de 0,133% com a superfície específica de 320 cm^2 g^{-1}. (LIU et al., 2013).

O uso de plantas do gênero *Brachiaria*, podendo ser consorciada com o milho é uma opção de consórcio que aumenta os teores de P lábil no solo. Em experimento conduzido por Merlin et al. (2013), o uso de *Brachiaria* aumentou os teores de P extraído com resina trocadora de ânions e $NaHCO_3$ 0,5 mol L^{-1}, na qual são considerados P lábil.

As plantas de *Brachiaria* possuem sistema radicular volumoso e profundo, tendo alta capacidade de absorver e utilizar o P, sendo que existe relato que plantas do gênero *Brachiaria* apresentam a capacidade de solubilizar e absorver formas de P ligado ao ferro, alumínio e cálcio (ROSOLEM et al., 2014; MERLIN et al., 2016).

Plantas de *Brachiaria* associadas a fungos micorrizicos possuem maior absorção de fósforo fora da zona de esgotamento, absorvendo o P colocado através de fertilizantes até 8,0 cm de distância da superfície da raiz, pois, as hifas do fungo funcionam como extensão do sistema radicular (TORO et al., 2008; COSTA et al., 2012).

Existem poucos estudos para a cultura do crambe (*Crambe abyssinica*), sendo mais limitado quando a pesquisa é relacionada à fracionamento de P. Porém em estudo realizado por Janegitz et al. (2017b) o cultivo do crambe resultou no aumento do P

disponível no solo (fósforo extraído com resina trocadora de ânions), tendo a testemunha (área sem cultivo) a concentração de 52 mg dm^{-3} e a área cultivada com crambe 71 mg dm^{-3}. O crambe não possui ligação com fungos micorrízicos, sendo que a presença no solo altera de forma negativa a presença desses fungos.

Já a aveia é uma alternativa para entrar como cultura de inverno, pois tem alta capacidade de absorção de P por ser uma cultura micorrízica e aumentar a atividade da fosfatase ácida, promovendo a hidrólise do P orgânico (BORIE et al., 2002).

Avaliando os efeitos da rotação de culturas, Redel et al. (2007) observaram que a cultura da aveia proporcionou a redução do fósforo residual e aumento das frações moderadamente lábeis. Os autores citam que esses resultados são devido à presença de micorriza na cultura da aveia.

Para a cultura do níger (*Guizotia abyssinica*) assim como a cultura do crambe, não é encontrado pesquisas relacionadas à dinâmica de P no solo, porém em trabalho desenvolvido para melhor estudar o acúmulo de matéria seca e macronutrientes na cultura do níger, Mauad et al. (2015) asseguram que a oleaginosa é uma boa opção para o sistema de rotação de culturas, uma vez que auxiliaria também na ciclagem de nutrientes por sua capacidade de absorção. Além do mais, o níger tem a capacidade de absorver 46, 3,9 e 3,7 kg de N, P e K a cada tonelada de massa verde produzida, indicando que por ser uma cultura de ciclo curto e por apresentar estruturas reprodutivas de forma rápida é essencial o suporte adequado de nitrogênio e fósforo (MAUAD et al., 2015).

O trigo é uma cultura que tem características para se encaixar em um sistema de rotação de culturas por apresentar alta capacidade de produção de resíduos vegetais e elevado enraizamento, fazendo com que ocorra ciclagem de nutrientes. O trigo é capaz de extrair até 192, 28 e 162 kg ha^{-1} de nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente (SGOBI, 2016).

No estudo realizado por Takahashi e Anwar (2007), foi observado a capacidade da cultura do trigo em absorver formas de P menos disponíveis, como o P inorgânico ligado ao ferro e alumínio. Este tipo de comportamento auxilia no processo de ciclagem de nutrientes, disponibilizando P para a cultura seguinte.

Resultados semelhantes foram obtidos por Rose et al. (2009), onde ocorreu a absorção de P inorgânico extraído com NaOH 0,1 mol L^{-1} pela cultura do trigo e ocorreu a depleção do P residual. Os autores justificam o ocorrido pela capacidade do trigo em

aumentar o pH da rizosfera e dessa forma solubilizando o P inorgânico extraído com NaOH 0,1 mol L^{-1}, porem para a redução do P residual não foi encontrado respostas.

Li et al. (2008) encontraram resultados que evidenciam que o trigo nas condições do experimento reduziu 10% do teor de P da rizosfera (0,5 mm) extraído com NaOH 0,1 mol L^{-1}, demonstrando mais uma vez a capacidade do trigo em absorver essa forma de P.

3. MATERIAL e MÉTODOS

3.1 - Local, clima e solo

O experimento foi desenvolvido no município de Dourados, estado de Mato Grosso do Sul, na área da Fazenda Experimental da Universidade Federal da Grande Dourados, localizado na latitude de 22° 14’ S, longitude de 54° 49’ W a 458 metros de altitude.

O clima da região é tropical úmido, com chuvas no verão e com seca no inverno, classificado como tropical de monções (Aw) segundo a classificação de Köppen (1948), com temperatura média anual de 22°C e precipitação média anual de 1400 a 1500 mm (Figura 1).

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico (SANTOS et al., 2013), de textura argilosa (220 g kg^{-1} de areia, 249 g kg^{-1} de silte e 531 g kg^{-1} de argila), com relevo plano.

No ano de 2009 foi realizado calagem (4 ton ha^{-1}) e a aplicação de gesso (2 ton ha^{-1}) conforme necessidade baseado na análise de solo.

As características dos atributos químicos do solo durante o experimento encontram-se na Tabela 1 e na Tabela 2. Determinaram-se o pH ($CaCl_2$), teor de matéria orgânica, acidez potencial (H+Al), fósforo (P) extraído por Melihch 1, potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), soma de bases trocáveis (SB), e capacidade de troca de cátions (CTC), e saturação por bases (V%), conforme metodologia descrita por Claessen et al. (1997).

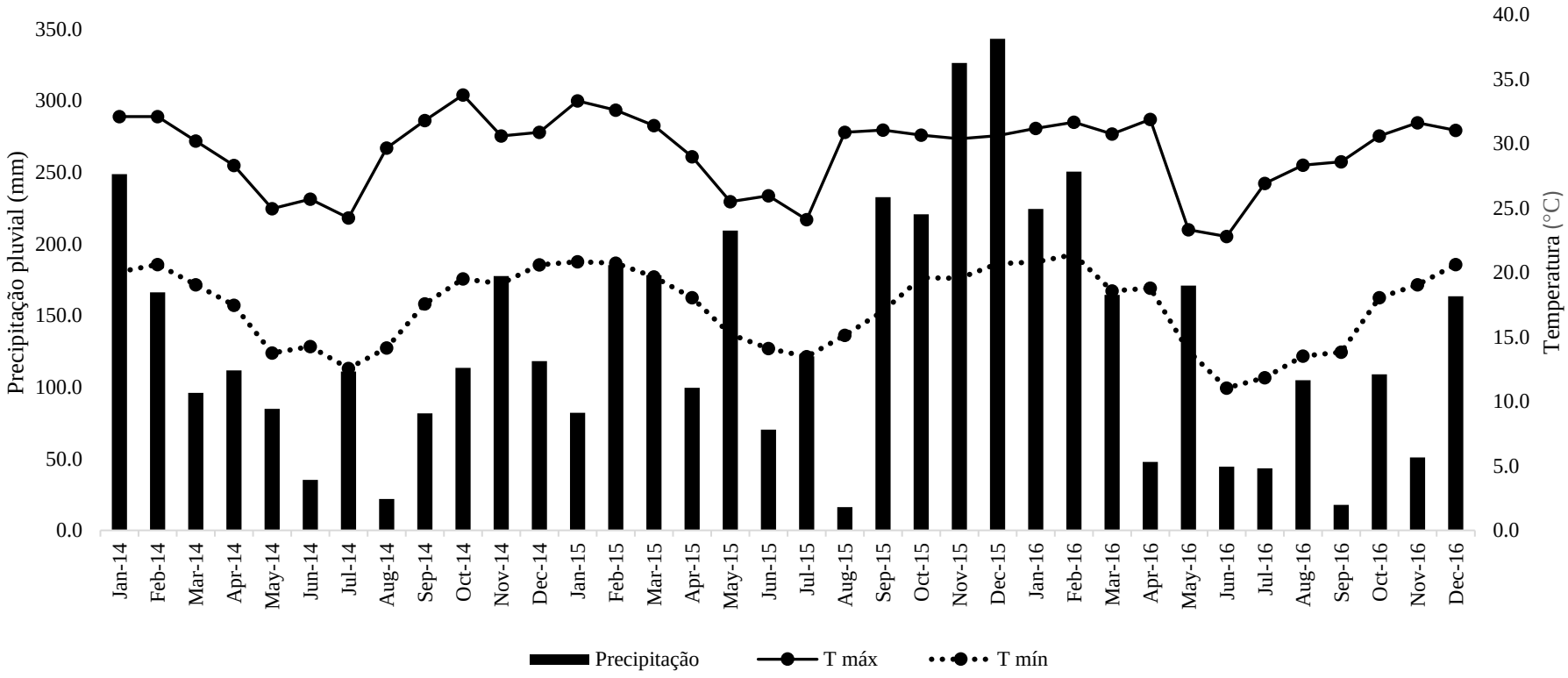

Figura 1. Precipitação pluvial e temperatura máxima e mínima no período de janeiro/2014 a dezembro/2016. Fonte: Embrapa, 2018.

Tabela 1 – Atributos químicos do solo após a colheita da soja na safra verão de 2014/2015, em quatro camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm.

	pH	MOS	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V%
Tratamento	-	g kg^{-1}	mg kg^{-1}	----------	----------	mmolc/dm^3	----------	----------	----------	----------	-
						0-5 cm					
1	6,0	22,4	18,6	3,8	48,1	14,3	0,0	35,1	66,1	101,2	65,3
2	5,9	29,2	26,4	4,6	46,9	18,0	0,0	34,4	69,6	103,9	66,9
3	5,6	22,2	19,7	4,0	41,6	15,4	0,0	43,0	61,0	103,9	58,7
4	5,4	24,9	12,6	3,6	35,9	12,4	0,0	47,3	51,8	99,1	52,3
5	5,2	24,9	7,5	1,9	41,5	13,2	0,0	56,6	56,5	113,2	50,0
6	5,5	27,2	24,7	2,6	47,3	15,6	0,0	45,8	65,5	111,3	58,8
7	5,5	29,4	24,1	2,9	48,9	18,2	0,0	48,3	70,0	118,3	59,2
						5-10 cm					
1	5,6	31,2	24,5	4,7	48,3	14,7	0,0	43,0	67,7	110,6	61,2
2	5,9	33,7	27,9	8,0	48,0	18,5	0,0	35,5	74,5	110,0	67,7
3	5,5	32,2	29,8	5,7	46,4	17,6	0,0	46,3	69,7	116,0	60,1
4	5,0	33,2	33,0	6,6	40,8	13,8	0,0	59,1	61,1	120,2	50,8
5	5,0	29,4	19,6	5,7	44,9	15,9	0,0	59,1	66,5	125,6	53,0
6	5,3	31,9	21,3	5,9	46,6	17,4	0,0	50,9	69,9	120,8	57,8
7	5,4	31,2	27,0	5,3	53,4	21,3	0,0	47,3	80,0	127,3	62,8
						10-20 cm					
1	4,8	19,6	4,7	1,4	33,4	13,5	1,2	65,7	48,2	114,0	42,3
2	5,6	18,6	6,7	1,4	33,2	12,9	0,0	39,9	47,5	87,3	54,3
3	5,5	20,1	4,7	1,4	27,6	11,0	0,0	43,4	39,9	83,3	47,9
4	5,5	18,9	5,4	1,4	34,7	11,8	0,0	44,4	47,9	92,3	51,9
5	4,8	20,4	4,4	2,3	36,4	14,3	0,0	69,3	53,0	122,3	43,4
6	5,0	18,4	5,3	1,6	34,4	15,0	0,0	56,6	51,1	107,7	47,4
7	5,2	17,9	5,1	1,8	38,3	12,3	0,0	52,6	52,4	104,9	49,9
						20-40 cm					
1	5,1	28,7	11,5	2,8	36,9	16,9	0,0	52,0	56,7	108,7	52,1
2	5,3	19,6	7,2	2,3	31,3	13,8	0,0	42,5	47,3	89,8	52,6
3	5,5	22,2	8,3	2,7	27,7	10,6	0,0	45,3	41,0	86,4	47,5
4	5,0	24,4	17,5	3,0	38,9	14,7	0,0	50,4	56,5	106,9	52,9
5	5,0	20,9	4,7	1,6	37,7	14,1	0,0	54,3	53,4	107,7	49,6
6	5,1	21,1	8,4	1,8	37,7	15,8	0,0	52,6	55,3	107,9	51,3
7	5,0	20,4	9,5	2,5	31,0	10,0	0,0	50,4	43,4	93,8	46,3

MOS: matéria orgânica do solo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V%: saturação por bases. Tratamentos (culturas do ano agrícola 2014/2015): 1- Pousio/Soja; 2- Milho/Soja; 3- Milho+*Brachiaria*/Soja; 4- Milho/Milho; 5- Cártamo/Milho; 6- Trigo/Milho; 7- Crambe/Milho.

Tabela 2 – Atributos químicos do solo após a colheita da soja na safra verão de 2015/2016, em quatro camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm.

	pH	MOS	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V%
Tratamento	-	g kg^{-1}	mg kg^{-1}	----------	----------	----------	mmolc/dm^3	----------	----------	----------	-
						0-5 cm					
1	5,3	22,9	18,0	4,0	44,7	13,2	0,0	48,8	61,9	110,7	55,9
2	5,2	29,7	16,9	4,6	40,6	16,4	0,0	47,8	61,5	109,3	56,3
3	5,4	36,7	22,4	5,9	43,4	18,5	0,0	45,3	67,8	113,1	59,9
4	5,2	27,2	23,2	6,5	41,8	15,6	0,0	52,6	63,9	116,5	54,9
5	4,9	34,4	32,0	6,6	33,4	12,9	1,3	64,3	52,9	117,2	45,1
6	5,0	31,9	32,0	5,0	44,3	17,2	0,0	65,0	66,5	131,5	50,6
7	4,9	32,7	37,5	6,3	43,5	17,9	0,0	64,3	67,7	132,0	51,3
						5-10 cm					
1	5,5	30,7	31,6	5,4	54,6	16,7	0,0	44,8	76,6	121,4	63,1
2	5,4	23,9	14,4	2,8	49,0	18,2	0,0	44,8	70,1	114,9	61,0
3	5,6	28,7	18,7	2,5	55,4	18,7	0,0	38,6	76,5	115,2	66,5
4	5,4	25,2	29,9	4,7	48,5	15,9	0,0	47,3	69,0	116,3	59,3
5	4,9	28,9	20,2	3,9	40,3	13,9	1,8	62,3	58,2	120,5	48,3
6	5,3	31,2	24,5	3,5	52,9	17,5	0,0	49,3	73,9	123,2	60,0
7	5,1	26,9	26,2	4,2	52,6	17,8	0,0	57,2	74,6	131,8	56,6
						10-20 cm					
1	5,1	19,6	10,5	2,3	36,6	11,2	0,0	48,8	50,1	98,9	50,6
2	5,3	21,1	7,8	1,8	42,6	14,9	0,0	46,3	59,2	105,5	56,1
3	5,4	24,4	9,5	1,8	50,9	16,2	0,0	41,6	68,9	110,5	62,3
4	4,8	22,7	14,5	2,7	40,8	12,6	1,6	61,7	56,1	117,8	47,6
5	4,9	23,4	12,3	3,0	38,7	12,8	2,5	61,7	54,5	116,2	46,9
6	5,1	23,2	15,0	2,8	46,7	15,2	0,0	53,7	64,7	118,4	54,6
7	5,0	23,7	13,7	3,5	29,7	14,6	0,0	59,1	47,7	106,8	44,7
						20-40 cm					
1	4,9	15,4	2,8	1,1	27,6	10,0	3,3	50,4	38,7	89,1	43,4
2	5,0	19,1	2,0	0,7	29,9	11,9	1,5	48,3	42,6	90,8	46,8
3	5,1	67,7	3,3	1,2	34,6	11,9	0,0	48,3	47,7	96,0	49,7
4	4,8	18,1	2,8	1,0	29,9	10,6	2,7	57,9	41,5	99,3	41,7
5	4,9	17,9	4,2	1,8	29,3	11,1	2,0	50,9	42,2	93,1	45,3
6	5,0	18,1	3,8	1,3	35,2	12,8	1,9	53,1	49,3	102,4	48,1
7	5,0	19,9	3,4	1,4	39,9	13,6	0,0	49,9	54,8	104,7	52,4

MOS: matéria orgânica do solo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V%: saturação por bases. Tratamentos (culturas do ano agrícola 2015/2016): 1- Pousio/Soja; 2- Milho/Soja; 3- Milho+*Brachiaria*/Soja; 4- Milho/Milho; 5- Nabo forrageiro/Soja; 6- Níger/Soja; 7- Trigo/Soja.

3.2 - Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados com três repetições e composto por 7 tratamentos (Tabela 3), representado por 7 sistemas de

produção, onde cada parcela teve a dimensão de 35 m de comprimentos por 15 m de largura (525 m^2).

Tabela 3 - Disposição dos tratamentos nas safras agrícolas 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016. Dourados, MS, 2019.

Tratamento	2013/2014	2014	2014/2015	2015	2015/2016	2016
	Verão	Outono/inverno	Verão	Outono/inverno	Verão	Outono/inverno
1	Soja	Pousio	Soja	Pousio	Soja	Pousio
2	Soja	Milho	Soja	Milho	Soja	Milho
3	Soja	Milho +*Brachiaria*	Soja	Milho + *Brachiaria*	Soja	Milho + *Brachiaria*
4	Milho	Milho	Milho	Milho	Soja	Aveia
5	Soja	Cártamo	Milho	Nabo forrageiro	Soja	Trigo
6	Soja	Trigo	Milho	Níger	Soja	Crambe
7	Soja	Crambe	Milho	Trigo	Soja	Níger

Os tratamentos foram constituídos das combinações de monocultura, sucessão e rotação de culturas. Em todos os tratamentos as culturas principais de verão foram soja e/ou milho, sendo que no período de outono-inverno, foram implantadas as demais culturas ou pousio (vegetação espontânea), para simular condições que representam a real situação do panorama agrícola do estado do Mato Grosso do Sul neste período.

Para semeadura da soja na safra verão de 2014/2015 e 2015/2016 utilizou-se a M6410IPRO, semeada no mês de outubro de cada ano, com a semeadora-adubadora, modelo pneumático Jumil com sete linhas, espaçadas entre si a 0,45 m; na densidade de semeadura 16 sementes m^{-1}. As sementes foram tratadas com 80 mL/ha de carbendazim + thiram, 200 mL/ha de imidacloprid + thiodicarb e 100 mL/ha do produto comercial Masterfix®. O fertilizante depositado abaixo da linha de semeadura foi 300 kg ha^{-1} do formulado NPK 07-20-20 + 0,3% de B + 0,3% de Zn. O controle fitossanitario foi realizado com 1110 g ha^{-1} de glifosato (i.a.) para controle de plantas daninhas e o uso do inseticida Tiametoxam + Lambda-Cialotrina, na dose de 200 mL ha^{-1}.

A semeadura do milho na safra verão de 2014/2015 e 2015/2016 foi realizada em outubro de cada ano, utilizando-se o híbrido DKB 390 VT PRO, com a semeadora adubadora modelo pneumático marca Jumil com sete linhas, espaçadas entre si a 0,9 m. A adubação no sulco de plantio foi com 300 kg ha^{-1} do formulado NPK 07-20-20 + 0,3% de B + 0,3% de Zn e a adubação de cobertura foi realizada quando as plantas de milho estavam no estádio V6 com 60 kg ha^{-1} de N, utilizando ureia como fonte de nitrogênio.

A semeadura das culturas da safra de outono/inverno dos anos 2014 e 2015 ocorreram no mês de março utilizando uma semeadora-adubadora com oito linhas, espaçadas entre si em 0,40 m. A densidade de semeadura para a cultura do trigo e aveia foi de 60 sementes m^{-1} e 25 sementes m^{-1} para as demais culturas. Foi aplicado no sulco de plantio 250 kg ha^{-1} do formulado NPK 07-20-20 + 0,3% B + 0,3% Zn.

3.3 - Amostragem de solo

Em cada parcela, após a colheita da cultura da safra de verão 2014/2015 e 2015/2016, com auxílio de trado coletor tipo sonda foram coletadas as amostras de solo em quatro camadas (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm), coletando-se 10 subamostras para a formação de uma amostra composta, sendo feito a amostragem na entrelinha de semeadura. As amostras foram secas ao ar e peneiradas em peneira de malha de 2 mm e acondicionados em sacos plásticos identificados e encaminhados ao Laboratório de Solos da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), para as análises químicas e fracionamento de fósforo, segundo metodologia proposta por Hedley et al. (1982).

3.4 - Variáveis analisadas

3.4.1 - Fracionamento de P

O fracionamento do fósforo do solo foi realizado segundo a metodologia proposta por Hedley et al. (1982) com as modificações propostas por Condron e Goh (1989).

Foi retirado uma alíquota de 0,5 g de solo, que foram postos em tubos de centrífuga tipo *Falcon*. A fração de P extraído com resina de troca aniônica (P-RTA) é a primeira fração a ser quantificada, sendo esse tipo de fósforo classificado como lábil e, assim sendo, prontamente disponível às plantas.

A fração de P extraída com bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$) 0,5 mol L^{-1} com pH 8,5 extrai o fósforo orgânico e inorgânico correspondente a uma fração lábil do solo, assim como a fração P-RTA (HEDLEY et al. 1982), a qual pode sofrer várias alterações no solo devido a absorção pelas plantas.

O fósforo extraído com hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol L^{-1} extrai formas orgânicas e inorgânicas de fósforo, onde a forma orgânica é considerada moderadamente lábil e inclui frações orgânicas não liberadas pelo bicarbonato de sódio quantificadas pela hidrólise parcial de compostos orgânicos que sofrem hidrólise com a

ação do ânion OH^- (DALAL, 1977), podendo ser das formas monoéster, diéster, fosfonatos e polifosfatos (TATE e NEWMAN, 1982) e a forma inorgânica é considerada moderadamente lábil, inclui o fósforo inorgânico que não foi liberado nas extrações anteriores da metodologia de fracionamento de Hedley et al. (1982), sendo composta principalmente de fosfatos ligados aos oxi-hidróxidos de ferro e alumínio do solo (CROSS e SCHLESINGER, 1995).

O ácido clorídrico (HCl) 1 mol L^{-1} extrai a fração de fósforo ligado ao cálcio no solo, formando fosfato de cálcio.

O extrator hidróxido de sódio (NaOH) 0,5 mol L^{-1} extrai formas orgânicas e inorgânicas de fósforo, formas essas iguais às extraídas pelo NaOH 0,1 mol L^{-1}, entretanto as mesmas não foram extraídas com o NaOH 0,1 mol L^{-1} pelo fato de estarem protegidas dentro dos microagregados do solo (CROSS e SCHLESINGER, 1995).

E, por fim, o fósforo residual (P-Residual) que foi determinado por digestão com H_2SO_4 concentrado e H_2O_2 , sendo composto tanto por frações orgânicas como inorgânicas, onde são consideradas altamente recalcitrantes, não participando diretamente da disponibilidade de fósforo para as plantas (STEWART e SHARPLEY, 1987), sendo a última fração obtida pelo fracionamento de Hedley et al. (1982), podendo indicar alto grau de intemperismo pelas altas proporções desta fração.

Em todos os extratos de solo, o fósforo foi determinado por colorimetria, segundo Murphy e Riley (1962). O P orgânico foi obtido através da diferença entre o P total e o P inorgânico para cada extrato.

3.4.2 – Cultura da soja – safra 2015/2016

O estado nutricional da soja na safra 2015/2016 foi determinado pela análise foliar do terceiro trifólio com pecíolo, quando a cultura estava em florescimento pleno (R2 – 40 dias após emergência), de acordo com a metodologia descrita por Malavolta et al. (1997), na qual foi avaliado as concentrações de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio na planta.

A produtividade foi determinada após a maturação fisiológica das plantas de soja (R8) da safra de verão 2015/2016, amostrando-se uma área de 4,5 m^2, dentro de cada parcela e repetição. Após a trilha das plantas em trilhadeira estacionária e limpeza dos grãos, os mesmos foram pesados em balança digital, corrigindo-se o grau de umidade para 13%, com os valores expressos em kg ha^{-1}, em três repetições.

3.5 - Análise estatística

Os dados de todas as variáveis avaliadas foram submetidos à análise de variância. As comparações das médias foram realizadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, utilizando-se o programa computacional Sisvar (FERREIRA, 2000).

Análises de correlações simples foram realizadas entre os teores das frações de fósforo do solo coletadas após a safra verão 2015/2016 e produtividade de soja da safra 2015/2016 e também entre as frações de fósforo do solo coletadas após a safra verão 2015/2016 e análise foliar de soja, utilizando o programa computacional IBM SPSS Statics 23.

4. RESULTADOS e DISCUSSÃO

4.1 – Análise de variância (ANOVA)

O resumo da análise de variância é apresentada na Tabela 4, onde os tratamentos apresentaram diferenças ($p \leq 0,05$) para todas as frações de P, exceto para P – moderadamente lábil e P – não lábil.

Tabela 4 - Resumo da análise de variância (ANOVA) referente a safra 2014/2015. Dourados, UFGD, 2019.

F.V.	P-RTA	Po-Bic	Pi-Bic	Po-0,1	Pi-0,1	P-HCl	Po-0,5	Pi-0,5	P-Residual	P-Lábil	P-ModLábil	P-NãoLábil
							F calculado					
							0-5 cm					
Bloco	1,29^{ns}	3,58^{ns}	1,88^{ns}	2,94^{ns}	1,08^{ns}	1,14^{ns}	1,02^{ns}	4,54^{ns}	0,29^{ns}	1,28^{ns}	0,81^{ns}	0,23^{ns}
Tratamento	9,98*	1,09^{ns}	9,36*	3,76*	0,88^{ns}	0,72^{ns}	2,11^{ns}	3,58*	0,59^{ns}	6,49*	0,88^{ns}	0,36^{ns}
C.V. (%)	20,69	31,70	17,16	9,67	33,90	30,02	28,18	4,88	10,39	18,05	9,08	11,56
							5-10 cm					
Bloco	0,05^{ns}	7,20^{ns}	1,08^{ns}	3,47^{ns}	1,83^{ns}	0,18^{ns}	1,52^{ns}	1,82^{ns}	0,29^{ns}	0,37^{ns}	1,32^{ns}	0,29^{ns}
Tratamento	2,05^{ns}	1,84^{ns}	0,80^{ns}	0,82^{ns}	2,06^{ns}	0,85^{ns}	1,49^{ns}	2,27^{ns}	2,72*	0,42^{ns}	0,82^{ns}	1,48^{ns}
C.V. (%)	32,09	31,87	26,59	13,76	44,34	21,04	29,29	5,55	13,31	30,55	15,04	15,36
							10-20 cm					
Bloco	1,43^{ns}	3,84^{ns}	1,43^{ns}	0,63^{ns}	3,12^{ns}	0,49^{ns}	5,16^{ns}	1,02^{ns}	4,27^{ns}	0,82^{ns}	2,70^{ns}	2,39^{ns}
Tratamento	2,25^{ns}	1,38^{ns}	1,79^{ns}	0,66^{ns}	0,22^{ns}	0,56^{ns}	2,10^{ns}	0,81^{ns}	0,60^{ns}	0,34^{ns}	0,09^{ns}	0,32^{ns}
C.V. (%)	33,32	50,83	19,67	12,12	33,44	24,20	3,38	41,07	19,68	23,79	10,62	22,77
							20-40 cm					
Bloco	1,91^{ns}	6,05^{ns}	1,97^{ns}	2,92^{ns}	3,06^{ns}	0,11^{ns}	1,31^{ns}	1,76^{ns}	1,95^{ns}	0,53^{ns}	4,18^{ns}	2,08^{ns}
Tratamento	2,95*	1,15^{ns}	2,46^{ns}	2,26^{ns}	0,67^{ns}	0,74^{ns}	2,80*	4,73*	2,75*	0,80^{ns}	0,81^{ns}	1,41^{ns}
C.V. (%)	36,37	56,00	35,34	14,13	35,64	50,21	27,60	6,06	14,07	26,40	11,18	16,65

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. P-RTA - P extraído pela resina de troca aniônica; Po-Bic – P orgânico extraído com $NaHCO_3$; Pi-Bic - P inorgânico extraído com $NaHCO_3$; Po-0,1 - P orgânico extraído com NaOH 0,1 mol L^{-1}; Pi-0,1 - P inorgânico extraído com NaOH 0,1 mol L^{-1}, P-HCl – P extraído com HCl 1 mol L^{-1}, Po-0,5 - P orgânico extraído com NaOH 0,5 mol L^{-1}; Pi-0,5 - P inorgânico extraído com NaOH 0,5 mol L^{-1}; PModLábil – P moderadamente lábil.

Tabela 5 - Resumo da análise de variância (ANOVA) referente a safra 2015/2016. Dourados, UFGD, 2019.

F.V.	P-RTA	Po-Bic	Pi-Bic	Po-0,1	Pi-0,1	P-HCl	Po-0,5	Pi-0,5	P-Residual	P-Lábil	P-ModLábil	P-NãoLábil
							F calculado					
							0-5 cm					
Bloco	1,98^{ns}	0,49^{ns}	2,01^{ns}	1,07^{ns}	8,53^{ns}	0,94^{ns}	1,76^{ns}	1,73^{ns}	3,77^{ns}	1,86^{ns}	1,12^{ns}	1,64^{ns}
Tratamento	1,37^{ns}	2,15^{ns}	2,42^{ns}	1,16^{ns}	4,08*	0,84^{ns}	1,47^{ns}	3,23*	3,37*	3,00*	1,94^{ns}	1,78^{ns}
C.V. (%)	20,42	26,06	28,15	9,01	18,30	18,45	4,74	15,97	2,69	13,65	5,01	3,13
							5-10 cm					
Bloco	2,68^{ns}	0,55^{ns}	2,38^{ns}	1,70^{ns}	5,33^{ns}	1,39^{ns}	2,92^{ns}	1,77^{ns}	2,51^{ns}	0,21^{ns}	1,35^{ns}	0,09^{ns}
Tratamento	0,49^{ns}	1,70^{ns}	2,43^{ns}	1,34^{ns}	1,34^{ns}	1,38^{ns}	3,76*	2,66*	0,39^{ns}	2,41*	2,84^{ns}	2,14^{ns}
C.V. (%)	32,35	33,22	43,59	8,30	13,88	27,98	5,93	7,04	4,97	25,82	4,27	6,44
							10-20 cm					
Bloco	2,21^{ns}	2,80^{ns}	1,33^{ns}	0,31^{ns}	1,58^{ns}	1,76^{ns}	1,49^{ns}	0,21^{ns}	0,84^{ns}	1,28^{ns}	0,18^{ns}	3,82^{ns}
Tratamento	1,80^{ns}	5,68*	1,50^{ns}	1,68^{ns}	1,86^{ns}	2,04^{ns}	1,24^{ns}	0,53^{ns}	0,73^{ns}	3,31*	0,05^{ns}	0,40^{ns}
C.V. (%)	26,36	33,5	69,91	10,96	23,39	38,16	6,11	9,41	4,33	24,29	10,59	5,05
							20-40 cm					
Bloco	1,03^{ns}	0,54^{ns}	0,47ns	0,33^{ns}	0,30^{ns}	1,50^{ns}	1,29^{ns}	0,52^{ns}	1,38^{ns}	1,14^{ns}	2,76^{ns}	1,10^{ns}
Tratamento	0,57^{ns}	3,58*	2,99*	2,40^{ns}	3,42*	1,63^{ns}	1,31^{ns}	0,61^{ns}	1,55^{ns}	1,45^{ns}	2,25^{ns}	0,81^{ns}
C.V. (%)	45,8	46,61	20,51	20,62	13,22	16,13	6,95	7,94	4,44	18,1	6,79	5,41

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. P-RTA - P extraído pela resina de troca aniônica; Po-Bic – P orgânico extraído com $NaHCO_3$; Pi-Bic - P inorgânico extraído com $NaHCO_3$; Po-0,1 - P orgânico extraído com NaOH 0,1 mol L^{-1}; Pi-0,1 - P inorgânico extraído com NaOH 0,1 mol L^{-1}, P-HCl – P extraído com HCl 1 mol L^{-1}, Po-0,5 - P orgânico extraído com NaOH 0,5 mol L^{-1}; Pi-0,5 - P inorgânico extraído com NaOH 0,5 mol L^{-1}; PModLábil – P moderadamente lábil.

4.2 - Fracionamento de P

4.2.1 - Resina trocadora de ânions (P-RTA)

A fração de fósforo extraído pela resina trocadora de ânions (P-RTA) é a primeira fração quantificada, sendo esse tipo de fósforo classificado como lábil, e assim sendo, prontamente disponível às plantas.

Verificou-se diferença significativa referente a coleta de solo do ano agrícola 2014/2015 apenas para as camadas de 0-5 cm e 20-40 cm (Tabela 4). Já para a coleta no ano agrícola 2015/2016 não ocorreu em nenhuma camada de solo diferença significativa ($p>0,05$) para a fração de fósforo extraída com Resina Trocadora de Ânions (Tabela 6).

É possível encontrar na camada de 0-5 cm da primeira coleta maiores teores da fração lábil nos tratamentos em que houve rotação de cultura para a safra de outono/inverno, demonstrando que quando utilizado os sistemas de rotação de cultura (tratamentos 5, 6 e 7) ocorreu aumento dos teores de P-RTA nas camadas superficiais.

Tabela 6 - Teores médios de P no solo extraído com resina trocadora de ânions (P-RTA) em mg kg^{-1}, em função dos sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas, em duas profundidades. Dourados, UFGD, 2019.

Camada (cm)	**Tratamento**						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
	P-RTA (mg kg^{-1})						
	Safra 2014/2015						
0-5	42,53 b	43,68 b	38,14 b	30,45 b	69,56 a	71,34 a	66,89 a
20-40	5,14 b	6,28 a	3,59 b	2,54 b	5,81 a	6,75 a	4,13 b

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada profundidade, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. ^{ns}: não significativo; **Safra 2014/2015 (2013/2014 – 2014 – 2014/2015)** - Tratamentos: 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Milho; 5- Soja/Cártamo/Milho; 6- Soja/Trigo/Milho; 7- Soja/Crambe/Milho.

No estudo realizado na mesma área que o presente trabalho, Secretti (2017) e Piletti (2016) observaram nos tratamentos que utilizaram rotação de culturas (5, 6 e 7) relação C/N baixa. Quanto menor for a relação C/N, menor vai ser a permanência do resíduo sobre o solo, portanto mais rápida será a mineralização do P, sendo de forma lábil.

O aumento dessa fração deve-se a qualidade da palhada aliado às condições climáticas do período, ou seja, o baixo tempo de permanência sobre o solo, além dos benefícios oriundo do sistema de rotação de culturas. Apesar da cultura do milho e o

consórcio entre milho e *Brachiaria* terem valores altos de massa seca, sua relação C/N é alta, e não alterou as frações de P-RTA, na camada de 0-5 cm, logo após o ano agrícola 2014/2015.

Pode-se dizer ainda que o cártamo e o trigo, que fazem parte dos sistemas de rotação de cultura, são caracterizados por possuírem sistema radicular de crescimento rápido que podem desenvolver mais profundamente (20-40 cm) no perfil do solo do que as raízes das culturas de soja e milho, além de ter alta capacidade de desenvolvimento radicular em climas secos (LI e MÜNDEL, 1997). A alta capacidade de desenvolvimento radicular unido à elevada habilidade em absorver fósforo (30 g kg^{-1} de MS), faz com que essas duas culturas reciclem o fósforo em profundidades e disponibilizando P-lábil em superfície (0-5 cm) (ABBADI e GERENDÁS, 2015), tal como observado neste estudo.

Na camada de 20-40 cm da coleta 2014/2015 é observou-se os maiores valores nos tratamentos onde foram utilizados na safra de inverno as culturas de milho na forma de sucessão após a soja e sistemas de rotação de culturas que usam o cártamo e trigo como cultura na safra de outono/inverno.

Segundo Franchini et al. (2003) a vantagem do uso de rotação de culturas é a eficiência de algumas espécies em acumular e movimentar o P no perfil do solo, porém esse processo é realizado de forma lenta. Apesar da área onde foi realizado o experimento estar em sistema de semeadura direta desde 2009, o tempo não foi necessário para todos os sistemas de rotação de culturas (5, 6 e 7) se destacarem dos demais.

4.2.2 - P orgânico bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-$NaHCO_3$)

O fósforo orgânico extraído por $NaHCO_3$, corresponde a frações de fósforo orgânico que é disponível, sendo considerado como uma fração lábil de fósforo no solo.

Houve efeito significativo sobre a fração de fósforo orgânico extraído com $NaHCO_3$ somente na 2ª coleta de solo e nas duas últimas camadas de solo avaliadas, 10-20 e 20-40 cm (Tabela 7).

Dentre os tratamentos que tiveram as maiores diferenças estatísticas nas camadas de 10-20 e 20-40 cm, destaca-se o tratamento 5 na qual dentro do sistema de rotação, uma das culturas foi o nabo forrageiro como opção para a cultura de

outono/inverno, assim como o tratamento 4 representando a monocultura de milho na safra 2015/2016 (Tabela 7).

O nabo forrageiro possui grande capacidade de absorver fósforo do solo, armazenando em suas estruturas alta quantidade de P solúvel inclusive nas raízes, sendo a forma prontamente disponível de P para a cultura seguinte (MARSOLA, 2008).

O sistema de rotação de culturas representado pelo tratamento 5 aumentou a fração de Po $NaHCO_3$ em 112,19% e 54,89% nas camadas de 10-20 e 20-40 cm, respectivamente, em relação ao ano agrícola anterior no mesmo tratamento, comprovando ser uma espécie que tem capacidade de aumentar os teores de P lábil do solo (Tabela 7).

Na camada de 20-40 cm, comparando os sistemas que possuem milho solteiro (tratamento 2) e milho + *Brachiaria* (tratamento 3) notou-se tendência de aumento da fração de P extraído com $NaHCO_3$ quando o milho está em consorcio com a forrageira, demonstrando a capacidade das raízes da *Brachiaria* em solubilizar e aumentar os teores de P orgânico lábil no solo.

Tabela 7 - Teores médios de P orgânico no solo extraído com bicarbonato de sódio (Po-$NaHCO_3$) em mg kg^{-1}, em função dos sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas, em duas profundidades. Dourados, UFGD, 2019.

Camada (cm)	**Tratamento**						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
	Po-$NaHCO_3$ (mg kg^{-1})						
	Safra 2015/2016						
10-20	3,75 c	3,17 c	5,92 b	8,72 a	8,30 a	5,92 a	3,64 a
20-40	1,54 b	2,06 b	4,86 a	4,33 a	4,97 Aa	3,17 b	2,00 b

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada profundidade, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. ^{ns}: não significativo; **Safra 2015/2016 (2014/2015 – 2015 – 2015/2016)** - 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Soja; 5- Milho/ Nabo forrageiro /Soja; 6- Milho/Níger/Soja; 7- Milho/Trigo/Soja.

No estudo realizado por Silva et al. (1997) os autores afirmaram que a *Brachiaria* reduz a capacidade máxima de adsorção do P no solo, sendo menor somente no solo sob vegetação nativa do Cerrado, entretanto no presente estudo a adsorção máxima foi encontrada em solo mantido sem cultivo. Provavelmente, a redução da adsorção de P no solo deve-se às profundas raízes da forrageira, juntamente com a liberação de ácidos orgânicos, onde ocorre também a conservação do P de maior labilidade.

4.2.3 - P inorgânico bicarbonato de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-$NaHCO_3$)

O fósforo inorgânico extraído por $NaHCO_3$, corresponde a uma fração lábil do solo, assim como a fração P-RTA, a qual pode passar por várias alterações no solo devido a absorção pelas plantas, por ser uma forma inorgânica e lábil.

Houve efeito significativo dos tratamentos na camada de 0-5 cm na safra 2014/2015 e nas camadas de 5-10 e 20-40 cm na safra 2015/2016 (Tabelas 4 e 5).

Na camada de 0-5 cm de solo da safra 2014/2015, observou-se os mesmos efeitos que foram vistos para o P RTA, causados nas frações de fósforo inorgânico lábil pelo o uso de rotação de culturas, na qual as culturas que compõe o sistema de rotação de culturas possuem relação C/N baixa, disponibilizando de forma rápida o P inorgânico lábil para o solo.

Entretanto, na camada de 5-10 cm da safra 2015/2016, os resultados encontrados foram o oposto. Com exceção da área em pousio e com vegetação espontânea, as culturas utilizadas em sucessão e monocultura representados pelos tratamentos 2, 3 e 4, possuem elevada relação C/N (SECRETTI, 2016), portanto a degradação da palhada e a disponibilidade dos nutrientes ocorreu de forma mais lenta.

Tabela 8 - Teores médios de P inorgânico no solo extraído com bicarbonato de sódio (Pi-$NaHCO_3$) em mg kg^{-1}, em função dos sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas, em três profundidades. Dourados, UFGD, 2019.

Camada (cm)	**Tratamento**						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
	Pi-$NaHCO_3$ (mg kg^{-1})						
	Safra 2014/2015						
0-5	119,28 b	89,06b	86,58 b	93,62 b	141,26 a	156,21 a	158,59 a
	Safra 2015/2016						
5-10	42,17 a	41,21 a	44,20 a	44,71 a	36,52 b	22,44 b	14,40 b
20-40	45,79 b	42,62 b	56,78 a	36,77 b	44,27 b	57,62 a	38,86 a

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada profundidade, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. ^{ns}: não significativo; **Safra 2014/2015 (2013/2014 – 2014 – 2014/2015)** - Tratamentos: 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Milho; 5- Soja/Cártamo/Milho; 6- Soja/Trigo/Milho; 7- Soja/Crambe/Milho. **Safra 2015/2016 (2014/2015 – 2015 – 2015/2016)** - 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Soja; 5- Milho/ Nabo forrageiro /Soja; 6- Milho/Níger/Soja; 7- Milho/Trigo/Soja.

Adicionalmente à lenta e gradual liberação de nutrientes pela palhada ocasionado pela alta relação C/N, ocorreu maior volume de raízes da cultura de milho na camada de 5-10 cm (SILVA et al., 2000). Portanto, os maiores teores de Pi-$NaHCO_3$, possivelmente, têm origem da decomposição e liberação de P da parte radicular do milho e o fertilizante depositado abaixo da linha de semeadura.

Já na camada de 20-40 cm, os maiores resultados foram obtidos na presença das culturas de inverno milho consorciado com *Brachiaria* e o sistema de rotação representado pelo tratamento 6 que possui o níger como cultura da safra outono/inverno. Plantas do gênero *Brachiaria* têm capacidade de absorver formas pouco disponíveis de P e alto potencial para ciclar nutrientes e, dessa forma o cultivo desse gênero aumenta os teores de P inorgânico lábil no solo (MERLIN et al., 2013).

De forma semelhante, a cultura do níger tem alta capacidade de aumentar os teores de P inorgânico lábil em profundidade, pois disponibiliza P através de seus resíduos e de forma indireta pelo aumento da atividade microbiana no solo, o que faz com que o fósforo seja transformado para a forma lábil (CARNEIRO et al., 2008). A definição de espécies de cobertura com o intuito de produzir fitomassa podem influenciar a estrutura física, química e biológica do solo devido aos resíduos vegetais, e dessa forma facilitaria a escolha de estratégias visando o manejo sustentável do solo.

4.2.4 – P orgânico hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (Po-NaOH 0,1 mol L^{-1})

A fração de fósforo orgânico extraída por NaOH 0,1 mol L^{-1} é considerada moderadamente lábil e inclui frações orgânicas não liberadas pelo bicarbonato de sódio quantificadas pela hidrólise parcial de compostos orgânicos pela ação do ânion OH^- podendo ser das formas monoéster, diéster, fosfonatos e polifosfatos

Houve diferenças significativas para as médias de teor de P orgânico extraído com NaOH na concentração 0,1 mol L^{-1} na camada de 0-5 cm de solo referente à coleta da safra 2014/2015 (Tabela 4). Já para os dados referentes a coleta da safra 2015/2016, é observou-se diferenças significativas apenas na camada de 20-40 cm de solo analisada (Tabela 5).

Na camada de solo de 0-5 cm, da safra 2014/2015 é notou-se menores valores nos tratamentos que utilizaram milho, *Brachiaria* e o sistema de rotação de culturas representado pelo tratamento 6, que possui o trigo como cultura da safra outono/inverno (Tabela 9).

Tabela 9 - Teores médios de P orgânico no solo extraído com hidróxido de sódio na concentração 0,1 mol L^{-1} (Po-NaOH 0,1 mol L^{-1}) em mg kg^{-1}, em função dos sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas, em duas profundidades. Dourados, UFGD, 2019.

Camada (cm)	**Tratamento**						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
	Po-NaOH 0,1 (mg kg^{-1})						
	Safra 2014/2015						
0-5	41,62 b	41,57 b	43,00 b	42,20 b	50,51 a	43,84 b	51,30 a
	Safra 2015/2016						
20-40	27,92 a	19,83 b	21,15 b	21,15 b	22,21 b	19,88 b	16,76 b

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada profundidade, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. ^{ns}: não significativo; **Safra 2014/2015 (2013/2014 – 2014 – 2014/2015)** - Tratamentos: 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Milho; 5- Soja/Cártamo/Milho; 6- Soja/Trigo/Milho; 7- Soja/Crambe/Milho. **Safra 2015/2016 (2014/2015 – 2015 – 2015/2016)** - 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Soja; 5- Milho/ Nabo forrageiro /Soja; 6- Milho/Níger/Soja; 7- Milho/Trigo/Soja.

Observando a camada de 20-40 cm, o tratamento que tem a ausência de cultivo na safra de outono/inverno de 2015/2016 apresentou os maiores teores de Po extraído com hidróxido de sódio na concentração 0,1 mol L^{-1} (Tabela 9).

No pousio ocorreu o aumento da adsorção do fósforo do solo, pois a ausência de vegetação proporciona redução nos teores de matéria orgânica do solo (Tabela 2). A matéria orgânica possui um papel importante na fração de fósforo ligado ao ferro/alumínio, uma vez que contribui na redução da fixação do P aos sesquióxidos de ferro e alumínio, por conta da competição nestes sítios de adsorção (FERNANDES et al., 2015; GATIBONI et al., 2008). Portanto, a redução da MOS está estreitamente ligada ao aumento da fração Po-NaOH 0,1 mol L^{-1} na camada de 20-40 cm quando tem a ausência de cultura ou somente vegetação espontânea.

Outra teoria para explicação do fato citado, é a questão das plantas exsudarem ácidos orgânicos que favorecem a disponibilidade de P (PAVINATO e ROSOLEM, 2008; MERLIN et al., 2013), pois o sistema plantio direto altera a dinâmica do P no solo, devido ao nutriente concentrar-se nas camadas superiores e podendo aumentar as frações orgânicas, em consequência da ausência de mobilização e pela produção de ácidos orgânicos radiculares em todo perfil do solo, que competem pelos mesmos sítios de adsorção. Sendo que na ausência de culturas no inverno impossibilitaria tal fato citado neste parágrafo, aumentando dessa forma os teores de Po-NaOH 0,1 mol L^{-1} na camada de 20-40 cm.

4.2.5 - P inorgânico hidróxido de sódio 0,1 mol L^{-1} (NaOH 0,1 mol L^{-1})

A fração inorgânica de P extraída por NaOH 0,1 mol L^{-1}, que é considerada moderadamente lábil, inclui o fósforo inorgânico que não foi liberado nas extrações anteriores da metodologia de fracionamento de Hedley et al. (1982), sendo composta principalmente de fosfatos ligados aos oxi-hidroxidos de ferro e alumínio do solo. Observou-se diferença estatística apenas na primeira e última camada, 0-5 e 20-40 cm, da safra 2015/2016 (Tabela 5).

Conforme observou-se na Tabela 10, o único tratamento que teve menor valor e diferença estatística na camada de 0-5 cm refere-se ao que utiliza o pousio na safra outono/inverno. Como a área fica em pousio e vegetação espontânea, não é utilizado fertilizante mineral na linha de semeadura como nos demais tratamentos deste experimento. Segundo Carneiro et al. (2011b) ocorre aumento linear das frações de P-NaOH 0,1 mol L^{-1} de forma linear ao aumento das doses de fertilizante fosfatado, porém a percentagem de P adsorvido diminui com o incremento das doses de P em decorrência do histórico de adubação fosfatada.

Na camada avaliada de 20-40 cm da coleta da safra 2015/2016 o tratamento 5, sendo rotação de cultura com o nabo forrageiro entre as espécies utilizadas, obteve diferença estatística dos demais tratamentos e aumento de 25,79% dessa fração em relação ao ano anterior.

Tabela 10 - Teores médios de P inorgânico no solo extraído com hidróxido de sódio na concentração 0,1 mol L^{-1} (Pi-NaOH 0,1 mol L^{-1}) em mg kg^{-1}, em função dos sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas, em duas profundidades. Dourados, UFGD, 2019.

Camada (cm)	**Tratamento**						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
	Pi-NaOH 0,1 (mg kg^{-1})						
	Safra 2015/2016						
0-5	60,80 b	101,50 a	117,30 a	91,24 a	87,76 a	90,00 a	94,87 a
20-40	77,85 b	84,18 b	81,83 b	79,61 b	95,27 a	78,84 b	62,25 b

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada profundidade, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. ^{ns}: não significativo; **Safra 2015/2016 (2014/2015 – 2015 – 2015/2016)** - 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Soja; 5- Milho/ Nabo forrageiro /Soja; 6- Milho/Níger/Soja; 7- Milho/Trigo/Soja.

Ao observar a Tabela 2, o tratamento 5 possuiu o menor teor de MOS em relação aos demais, alcançando diferença de até 36%. Assim como citado na fração P-NaOH 0,1 mol L^{-1}, a matéria orgânica do solo possui papel fundamental na redução da adsorção de P aos oxihidróxidos de ferro e alumínio, pois acontece a competição pelos sítios de adsorção e a complexação do ferro e alumínio disponível no solo (FERNANDES et al., 2015; GATIBONI et al., 2008). Desta forma ocorreu maiores teores da fração P-NaOH 0,1 mol L^{-1} por conta da tendência de baixo teor de MOS na camada de 20-40 cm.

4.2.6 - P-HCl 1,0 mol L^{-1} (P-HCl)

A fração de fósforo extraída com HCl 1,0 mol L^{-1} é considerada a parte do fósforo ligado ao cálcio no solo, formando fosfato de cálcio, sendo considerado não disponível, ou seja, não lábil.

Tabela 11 - Teores médios de P no solo extraído com ácido clorídrico na concentração 1,0 mol L^{-1} (P-HCl) em mg kg^{-1}, em função dos sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas, em uma profundidade. Dourados, UFGD, 2019.

Camada (cm)	**Tratamento**						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
	P-HCl (mg kg^{-1})						
Safra 2015/2016							
10-20	15,65 b	17,07 b	18,18 b	18,95 b	31,76 a	18,49 b	18,34 b

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada profundidade, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. ^{ns}: não significativo; **Safra 2015/2016 (2014/2015 – 2015 – 2015/2016)** - 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Soja; 5- Milho/ Nabo forrageiro /Soja; 6- Milho/Níger/Soja; 7- Milho/Trigo/Soja.

Houve diferença estatística apenas na camada de 10-20 cm referente a coleta de solo na safra 2015/2016 para a fração de fósforo extraído com HCl na concentração de 1,0 mol L^{-1} (Tabela 5).

Notou-se na Tabela 11 que o tratamento que obteve o maior resultado na camada de 10-20 cm foi o que utilizou nabo forrageiro como cultura no período de outono/inverno. Houve aumento dos teores deste tratamento de 58,78% dessa fração em relação à safra 2014/2015.

4.2.7 - P orgânico hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Po-NaOH 0,5 mol L^{-1})

As formas orgânicas de P extraído com hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} apresentou diferenças significativas apenas para a camada de solo de 20-40 cm, na coleta de solo realizada na safra 2014/2015 (Tabela 4).

Tabela 12 - Teores médios de P orgânico no solo extraído com hidróxido de sódio na concentração 0,5 mol L^{-1} (Po-NaOH 0,5 mol L^{-1}) em mg kg^{-1}, em função dos sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas, em uma profundidade. Dourados, UFGD, 2019.

Camada (cm)	**Tratamento**						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
	Po-NaOH 0,5 (mg kg^{-1})						
	Safra 2014/2015						
20-40	24,84 a	39,93 a	29,35 b	39,54 a	29,47 b	30,79 b	47,45 a

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada profundidade, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. ^{ns}: não significativo; **Safra 2014/2015 (2013/2014 – 2014 – 2014/2015)** - Tratamentos: 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Milho; 5- Soja/Cártamo/Milho; 6- Soja/Trigo/Milho; 7- Soja/Crambe/Milho.

Os maiores resultados da coleta realizada na safra 2014/2015 foram obtidos nos tratamentos em que é cultivado o milho de forma isolada em sucessão ou monocultura e no tratamento em que se utilizou crambe como última cultura de inverno em sistema de rotação de cultura, ou seja, nos tratamentos 2, 4 e 7, respectivamente, obtiveram-se os maiores teores de Po moderadamente lábil (Tabela 11).

Observando os sistemas de cultivo que utilizaram milho como cultura de inverno, o milho consorciado com *Brachiaria* obteve a menor média comparado com os sistemas que utilizaram milho solteiro, demonstrando dessa forma a capacidade da *Brachiaria* em exsudar enzimas fosfatase para mineralizar e absorver o P que se encontra em formas mais estáveis (MERLIN et al., 2013; SIQUEIRA et al., 2004).

Analisando os sistemas de cultivo que utilizaram rotação de cultura, tratamentos 5, 6 e 7, observa-se o sistema que utilizou crambe não solubilizou ou absorveu a forma de P extraído com NaOH 0,5 mol L^{-1}.

Observando os resultados encontrados na fração P-RTA na camada de 20-40 cm da coleta de solo realizada na safra 2014/2015, o tratamento 7 não se comportou de forma semelhante aos tratamentos que estão em rotação de culturas (tratamentos 5 e 6). Apesar da área onde foi realizado o experimento estar em sistema de semeadura direta

desde 2009, o tempo não foi necessário para todos os sistemas de rotação de culturas (5, 6 e 7) se comportassem de forma semelhante, ou seja, maiores teores de P lábil e menores teores de P de menor labilidade .

4.2.8 - P inorgânico hidróxido de sódio 0,5 mol L^{-1} (Pi-NaOH 0,5 mol L^{-1})

A fração de fósforo inorgânico extraído por NaOH 0,5 mol L^{-1} é constituído por formas de fósforo iguais as extraídas pelo NaOH 0,1 mol L^{-1}, entretanto as mesmas não foram estimadas pelo fato de estarem protegidas dentro dos microagregados do solo, complementando dessa forma a fração anteriormente citada.

Para o fósforo inorgânico extraído com NaOH 0,5 mol L^{-1}, houve diferença estatística entre os tratamentos somente para a camada de 20-40 cm da coleta de solo na safra 2014/2015 e na camada de 5-10 cm da coleta de solo da safra 2015/2016 (Tabelas 4 e 5).

Na camada de 20-40 cm da coleta de solo realizada na safra 2014/2015 a maior média observada foi no tratamento 3 que é constituído do consórcio entre milho e *Brachiaria*. Esse resultado não era esperado devido a capacidade da forrageira solubilizar e absorver formas de P mais estáveis.

Estudando os resultados do uso da *Brachiaria* sobre as frações de P no solo, Silva et al. (1997), Rosolem et al. (2015), Janegitz et al. (2013) e Merlin et al. (2013) observaram resultados contrários, menores teores de Pi-NaOH, ao visto na Tabela 13.

Já na segunda camada de solo avaliada, 5-10 cm, safra 2015/2016, somente os tratamentos em que foi realizado a rotação de culturas proporcionaram maiores teores da fração Pi NaOH 0,5 mol L^{-1}. Observando a Tabela 8, verificou-se os menores teores da fração Pi-$NaHCO_3$ nos tratamentos 5, 6 e 7 que representa rotação de culturas.

Tabela 13 - Teores médios de P inorgânico no solo extraído com hidróxido de sódio na concentração 0,5 mol L^{-1} (Pi-NaOH 0,5 mol L^{-1}) em mg kg^{-1}, em função dos sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas, em duas profundidades. Dourados, UFGD, 2019.

Camada (cm)	**Tratamento**						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
	Pi-NaOH 0,5 (mg kg^{-1})						
	Safra 2014/2015						
20-40	233,06 b	227,30 b	257,40 a	234,45 b	209,56 b	223,07 b	218,81 b
	Safra 2015/2016						
5-10	320,75 b	303,45 b	309,01 b	299,18 b	341,66 a	332,56 a	344,79 a

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada profundidade, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. ^{ns}: não significativo; **Safra 2014/2015 (2013/2014 – 2014 – 2014/2015)** - Tratamentos: 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Milho; 5- Soja/Cártamo/Milho; 6- Soja/Trigo/Milho; 7- Soja/Crambe/Milho. **Safra 2015/2016 (2014/2015 – 2015 – 2015/2016)** - 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Soja; 5- Milho/ Nabo forrageiro /Soja; 6- Milho/Níger/Soja; 7- Milho/Trigo/Soja.

Afirma-se então que o P inorgânico da fração lábil (P-$NaHCO_3$) foi adsorvida aos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, aumentando dessa forma os teores da fração inorgânica moderadamente lábil (P-NaOH 0,5 mol L^{-1}).

Como citado no item de Pi-NaOH 0,5 mol L^{-1}, as culturas utilizadas nos tratamentos 5, 6 e 7 possuem C/N baixa (Tabela 5), disponibilizando de forma rápida o P inorgânico lábil para o solo que é adsorvido aos oxihidróxidos de ferro e alumínio.

4.2.9 - P Residual

O P residual é uma importante fração de fósforo, pois seus valores chegam a ser maiores que a soma das frações citadas anteriormente, porém não são disponíveis às plantas e participando de forma mínima na reposição de P na solução do solo (SANTOS et al., 2008).

Para o fósforo residual ocorreu diferença estatística entre os tratamentos nas camadas de 5-10 e 20-40 cm da coleta de solo na safra 2014/2015 e na camada de 0-5 cm da coleta de solo da safra 2015/2016 (Tabelas 4 e 5).

Tabela 14 - Teores médios de P residual no solo em mg kg^{-1}, em função dos sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas, em três profundidades. Dourados, UFGD, 2019.

Camada (cm)	**Tratamento**						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
	P-Residual (mg kg^{-1})						
	Safra 2014/2015						
5-10	697,48 a	693,49 a	507,99 b	650,68 a	592,46 b	650,11 a	701,75 a
20-40	668,37 a	617,00 a	647,26 a	546,23 b	626,71 a	493,94 b	701,06 a
	Safra 2015/2016						
0-5	792,88 b	831,89 a	843,37 a	792,88 b	828,09 a	809,98 b	802,03 b

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada profundidade, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. ^{ns}: não significativo; **Safra 2014/2015 (2013/2014 – 2014 – 2014/2015)** - Tratamentos: 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Milho; 5- Soja/Cártamo/Milho; 6- Soja/Trigo/Milho; 7- Soja/Crambe/Milho. **Safra 2015/2016 (2014/2015 – 2015 – 2015/2016)** - 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Soja; 5- Milho/ Nabo forrageiro /Soja; 6- Milho/Níger/Soja; 7- Milho/Trigo/Soja.

Na segunda camada pesquisada, 5-10 cm, da safra 2014/2015 notou-se os menores valores quando empregado o milho+*Brachiaria* e o sistema de rotação de culturas que possui o cártamo como espécie da safra outono/inverno (Tabela 14). A menor média de P residual no solo na qual foi cultivado de forma consorciada o milho e *Brachiaria* pode ser resultado da maior disponibilidade de P causada pela *Brachiaria*, reduzindo os teores de P que, posteriormente, passaram pelo processo de adsorção para forma não lábil.

Como citado nas frações anteriores, a *Brachiaria* tem elevada capacidade de exsudar enzimas fosfatase para mineralizar e absorver o P que se encontra em formas mais estáveis (SIQUEIRA et al., 2004; MERLIN et al., 2013).

Já no tratamento 5 que é um sistema de rotação de culturas e composto pela cultura do cártamo, em relação à safra 2014/2015, existem duas possíveis explicações para o fato observado na camada de 5-10 cm. A cultura do cártamo produziu mais fitomassa e com maior qualidade (C/N: 30) comparando com os demais tratamentos com rotação de culturas. O maior volume de palhada aliado com a C/N 30 fez com que a palhada permanecesse por mais tempo sobre o solo e acarretasse a liberação lenta do fósforo para o solo. Dessa forma reduziu o teor de P altamente adsorvido.

Guo e Yost (1998) realizaram a determinação de fracionamento de P durante o período de 14 cultivos continuo da sucessão milho/soja em 8 tipos de solos

intemperizados, e observaram que a cultura da soja e milho absorvem apenas as formas lábeis de P, não alteram as frações moderadamente lábeis e na presença da sucessão soja/milho ocorre o acúmulo de P na fração residual, evidenciando deste modo a baixa eficiência dessas espécies em aproveitar o P adicionado no solo.

Na camada de 20-40 cm, na safra 2014/2015, os menores valores com diferença estatística foram visualizados na presença das culturas milho e no sistema de rotação que tem o trigo na safra outono/inverno (Tabela 14). Esses resultados indicam, possivelmente, melhor eficiência no uso de fósforo pela cultura do trigo ou até mesmo pelas culturas anteriores.

Resultado semelhante foi encontrado por Rose et al. (2010) em estudo realizado com três tipos de solo coletado em área de mata nativa, onde ocorreu a absorção de P inorgânico extraído com NaOH 0,1 mol L^{-1} pela cultura do trigo e ocorreu a depleção do P residual, porém os autores não justificaram o comportamento do P residual.

Na camada de 0-5 cm de solo coletado na safra 2015/2016 os menores teores de P residual são observados com o tratamento 1, 4, 6 e 7 (Tabela 14). A cultura do trigo foi cultivado nos tratamentos 6 e 7 nas safras 2014 e 2015 respectivamente. Como citado anteriormente, com o uso da cultura do trigo em sistema de rotação de cultura ocorre a depleção dos teores de P residual.

Outro tratamento que está entre os menores valores na camada de 0-5 cm é o que se utiliza do pousio durante a safra de outono/inverno. A ausência de adubação fosfatada, ou seja, o não incremento de P ao solo na forma mineral reduz o teor de P residual.

4.2.10 - Fósforo Lábil (P-Lábil)

O P-Lábil corresponde a soma das frações extraídas com Resina Trocadora de Ânions (P-RTA) e bicarbonato de sódio (P-$NaHCO_3$). Verificou-se diferença significativa ($p > 0,05$) entre os tratamentos testados sobre os teores de P-Lábil do solo (Tabelas 4 e 5), na safra 2014/2015 na camada de 0-5 cm (Tabela 15), e na safra 2015/2016 nas camadas de 0-5, 5-10 e 20-40 cm (Tabela 16).

Na camada de 0-5 cm da coleta de solo na safra de outono/inverno de 2014/2015, notou-se maiores teores nos tratamentos 5, 6 e 7, que correspondem a três distintos sistemas de rotação de culturas.

Figura 15 - Teores médios de P-lábil no solo em função dos sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas, em uma profundidade na safra 2014/2015. Dourados, UFGD, 2019.

Tratamento	**Camada (cm)**
	0-5
1	173,61 b
2	144,43 b
3	135,25 b
4	132,12 b
5	221,09 a
6	237,34 a
7	241,63 a

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada profundidade, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. ^{ns}: não significativo; **Safra 2014/2015 (2013/2014 – 2014 – 2014/2015)** - Tratamentos: 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Milho; 5- Soja/Cártamo/Milho; 6- Soja/Trigo/Milho; 7- Soja/Crambe/Milho.

Através do uso de rotação de culturas é possível observar a ciclagem de nutrientes devido às culturas possuírem sistema radicular diferenciado, e com isso ocorre a exploração de diferentes regiões e camadas do solo.

Avaliando o fósforo em Nitossolo típico, Rosolem e Calonego (2013) descrevem que o sistema de rotação de culturas não evita a fixação total do P, porém ocorre redução da adsorção e uso mais eficiente dos fertilizantes fosfatados.

No estudo realizado por Lukowiak et al. (2016), os autores demonstraram através do balanço liquido de fósforo total que o uso de rotação de culturas aumentou o a eficiência no uso de fertilizantes fosfatados, portanto ocorreu aumento da disponibilidade de P quando utilizado a rotação de culturas.

A adoção de sistemas de manejo, como a rotação de culturas, que proporcionam a adição de matéria orgânica do solo pode ocasionar a redução da adsorção de P em razão da formação de complexos que bloqueiam os sítios de adsorção na superfície dos óxidos de ferro e de alumínio (TIRLONI et al., 2009). Desta forma a redução da adsorção de P incrementam os teores de P lábil.

De acordo com Redin et al. (2016), o favorecimento à ciclagem do P, processo que envolve a passagem do elemento da forma inorgânica para orgânica, sofre grande influência do acúmulo de resíduos sobre a superfície do solo.

Determinando a relação C/N das culturas utilizadas no presente trabalho, Secretti (2017) e Piletti (2016) observaram nos tratamentos que utilizam rotação de culturas (5, 6 e 7) relação C/N baixa. Quanto menor for a relação C/N, menor vai ser a permanência

do resíduo sobre o solo, portanto mais rápida será a mineralização do P, sendo de forma lábil.

O aumento dessa fração deve-se à qualidade da palhada aliado às condições climáticas do período, ou seja, o baixo tempo de permanência sobre o solo, além dos benefícios oriundo do sistema de rotação de culturas.

Apesar de a cultura do milho e o consórcio entre milho e *Brachiaria* terem valores altos de massa seca, sua relação C/N é alta, e não alterou as frações de P-RTA na camada de 0-5 cm logo após o ano agrícola 2014/2015.

Já no ano agrícola 2015/2016 o efeito da rotação de culturas foi observado nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm (Tabela 16).

Figura 16 - Teores médios de P-lábil no solo em função dos sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas, em uma profundidade na safra 2015/2016. Dourados, UFGD, 2019.

Tratamento	**Camada (cm)**		
	0-5	**5-10**	**10-20**
1	90,29 b	53,31 b	32,92 b
2	73,03 b	62,82 b	38,15 b
3	91,73 b	69,29 b	37,96 b
4	87,44 b	70,98 b	43,45 b
5	98,40 a	57,15 b	58,22 a
6	106,98 a	74,00 a	57,94 a
7	111,42 a	80,57 a	55,86 a

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada profundidade, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. ^{ns}: não significativo; **Safra 2015/2016 (2014/2015 – 2015 – 2015/2016)** - 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Soja; 5- Milho/ Nabo forrageiro /Soja; 6- Milho/Níger/Soja; 7- Milho/Trigo/Soja.

Os resultados na camada de 0-5 cm foram semelhantes aos encontrados no ano anterior (safra 2014/2015), onde os restos culturais e a ciclagem de nutrientes favorecidas pela rotação de culturas propiciaram o aumento do teor de P-lábil na camada superficial.

Nas camadas de 5-10 e 10-20 cm, os resultados se assemelham aos observados na camada de 0-5 cm, com exceção da rotação de culturas representado pelo tratamento 5 na camada de 5-10 cm.

Para Franchini et al. (2004), uma das vantagens de utilizar rotação de culturas é a capacidade de algumas espécies em promover o acúmulo e movimentação do P no perfil do solo. Porém essa movimentação ocorre de forma lenta e acumulativa com

auxílio do crescimento das raízes das plantas e liberação de ácidos orgânicos, e, varia de acordo com cada espécie.

Outro ponto a ser citado é a pluviosidade anormal entre o período de setembro/2015 e março/2016, onde a precipitação foi de 1762 mm sendo que no mesmo período do ano anterior a precipitação foi de 936 mm, cerca de 88% a mais de chuva.

Dentro dos sistemas de rotação de culturas que estão presentes nos tratamentos 5, 6 e 7, cita-se o níger, cártamo, trigo e crambe que na presença de umidade ocorre maior colonização micorrízica, e com esse fato a tendência é o aumento dos benefícios da simbiose mutualística (MAIA et al., 2015). Além disso, os autores constataram aumento dos teores de P disponível em períodos com maior pluviosidade, pois quando ocorre o aumento da umidade do solo o filme de água próximo às partículas do solo fica mais espessas diminuindo a interação entre P e colóide e, desta forma, pode ocorrer o favorecimento da disponibilização de P.

4.3 - Cultura da Soja - safra 2015/2016

A produtividade de soja na safra de 2015/2016 foi influenciada pelo sistema de cultivo (Tabela 17), sendo as maiores médias de produtividade ocorreram quando empregado o uso de trigo em rotação de cultura e a sistema de sucessão de soja com o consórcio de milho e *Brachiaria* como cultura no período de outono/inverno. De forma oposta, a menor média de produtividade foi obtida quando não foi utilizado nenhuma cultura na safra outono/inverno, ou seja, quando a área ficou pousio.

Para o consórcio entre milho e *Brachiaria* observou-se histórico de elevada quantidade de palhada além de possuir a maior relação C/N entre os tratamentos (SECRETTI, 2017). Quanto maior a relação C/N, maior será sua permanecia sobre o solo e com isso vem os benefícios mais pronunciados da cobertura vegetal sobre o solo: reduzem a temperatura do solo e, consequentemente, retém por maior período de tempo a umidade do solo (BORTOLUZZI e ELTZ , 2000).

Outro ponto a ser destacado é a correlação positiva e significativa entre produtividade e a fração Pi NaOH 0,1 mol L^{-1} (Tabela 18). Ao observar a Tabela 8, apesar de não possuir diferença estatística, possui a tendência de maior teor de Pi NaOH 0,1 mol L^{-1} que está presente no tratamento 3, correspondente ao consórcio milho e *Brachiaria*.

Resíduos vegetais sobre o solo também tem efeito de barreira física contra algumas espécies de plantas daninhas, de tal modo que a alta quantidade de "palhada" inibe o seu crescimento. Desta forma não ocorre competição durante o estabelecimento da cultura da soja e, assim, aumenta a produtividade em relação aos outros métodos de manejo, inclusive inibe a presença de plantas daninhas de difícil controle como a buva (*Conyza bonariensis*) e capim-amargoso (*Digitaria insularis*) quando utilizado o consórcio milho e *brachiaria* (MECHI et al., 2018).

Tabela 17 - Produtividade de soja na safra 2015/2016, em função dos sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas. Dourados, UFGD, 2019.

Tratamento	**Produtividade (kg ha^{-1})**
1	4259,66 f
2	4938,33 b
3	5314,33 a
4	4656,00 d
5	4510,33 e
6	4818,66 c
7	5310,66 a
C.V. (%)	8,41

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada profundidade, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. ^{ns}: não significativo; **Safra 2015/2016 (2014/2015 – 2015 – 2015/2016)** - 1- Soja/Pousio/Soja; 2- Soja/Milho/Soja; 3- Soja/Milho+ *Brachiaria* /Soja; 4- Milho/Milho/Soja; 5- Milho/ Nabo forrageiro /Soja; 6- Milho/Níger/Soja; 7- Milho/Trigo/Soja.

Assim como o consórcio entre milho e *Brachiaria*, a soja também teve maior produtividade quando cultivada após no sistema de rotação de culturas que possui trigo (Tabela 17). Os resultados de produtividade de soja após o sistema de rotação representado pelo tratamento 7, indica que esta cultura pode ser incluída em um sistema de rotação de culturas, assim como os resultados encontrados por Kubo et al. (2007), onde os autores relatam maior produtividade de soja após o cultivo de trigo comparado com outras culturas devido a ciclagem de nutrientes.

É possível que o uso de trigo junto a outras culturas de inverno no sistema de rotação culturas tenha influenciado no aumento da população microbiana do solo, melhorando o ambiente solo nas fases físicas, químicas e biológicas, resultando no incremento da produção de grãos de soja e matéria orgânica do solo (LISBOA et al., 2012).

Outro ponto a ser citado é o maior teor de P foliar na cultura da soja após o cultivo do trigo (Tabela 20), que pode ter influenciado na produtividade de soja. Vieira et al. (2010) relatam que é possível realizar a estimativa de produtividade de soja baseado no teor foliar de P.

Ao realizar a correlação entre as variáveis frações de fósforo e produtividade, é possível observar correlação significativa e positiva da fração Pi NaOH 0,1 mol L^{-1} na camada de 0-5 cm (Tabela 19). A deposição de fertilizantes nessa camada faz aumentar a quantidade de P inorgânico ligado ao ferro e alumínio. A correlação entre produtividade e Pi NaOH 0,1 mol L^{-1} pode ser explicado pelo fato da soja liberar compostos orgânicos na rizosfera e solubilizar e absorver o P moderadamente lábil, e com isso elevar a produtividade de grãos (Tabela 17).

Tabela 18 - Coeficientes de correlação entre as formas de P, obtidas pelo fracionamento sequêncial de Hedley et al. (1982), com a produtividade de grãos de soja na safra de verão 2015/2016. Dourados, UFGD, 2019.

Frações de P	**Produtividade**			
	Camada (cm)			
	0-5	**5-10**	**10-20**	**20-40**
P-RTA	-0,150 ns	0,263 ns	-0,177 ns	-0,333 ns
Po-NaHCO3	-0,339 ns	-0,016 ns	-0,159 ns	0,068 ns
Pi-NaHCO3	0,254 ns	-0,137 ns	-0,183 ns	-0,008 ns
Po NaOH 0,1	-0,023 ns	0,114 ns	-0,103 ns	**-0,519***
Pi NaOH 0,1	**0,503***	-0,118 ns	0,198 ns	-0,332 ns
P-HCl	0,021 ns	0,041 ns	-0,199 ns	0,029 ns
Po NaOH 0,5	0,139 ns	-0,014 ns	-0,202 ns	-0,370 ns
Pi NaOH 0,5	-0,060 ns	-0,054 ns	-0,112 ns	-0,115 ns
P Residual	0,210 ns	0,027 ns	-0,122 ns	0,208 ns

*: significativo a 5% pelo teste t; ns: não significativo.

Segundo Carneiro et al. (2011) a presença de micorriza e bactérias solubilizadoras de P tanto nas culturas de outono/inverno como na cultura da soja auxiliam na solubilização dos fosfatos de ferro e alumínio, sendo que ocorreu a redução desta fração comparando os teores entre a safra 2014/2015 e 2015/2016.

Já na camada de 20-40 cm é possível observar correlação significativa e negativa entre produtividade e a fração de P orgânico extraído com NaOH 0,1 mol L^{-1} (Tabela 18). Isso indica que quanto maior é o teor de P ligado a compostos orgânicos que contêm alumínio e ferro, menor será a produtividade de soja.

Ao analisar a Tabela 18, ocorreu a correlação negativa entre a fração P inorgânico NaOH 0,1 mol L^{-1} e teor de P foliar na cultura da soja. Portanto, quanto maior for o teor desta fração na camada de 20-40 cm, menor vai ser a absorção de P pelas plantas e resultará na depleção de produtividade.

Tabela 19 - Coeficientes de correlação entre as formas de P, obtidas pelo fracionamento sequêncial de Hedley et al. (1982), com o teor de P foliar de soja na safra de verão 2015/2016. Dourados, UFGD, 2019.

Frações de P	**Teor P foliar**			
	Camada (cm)			
	0-5	**5-10**	**10-20**	**20-40**
P-RTA	0,271^{ns}	0,369^{ns}	-0,098^{ns}	-0,203^{ns}
Po-NaHCO3	0,003^{ns}	-0,180^{ns}	-0,050^{ns}	-0,120^{ns}
Pi-NaHCO$_3$	**0,688***	-0,279^{ns}	-0,296^{ns}	0,158^{ns}
Po NaOH 0,1	0,216^{ns}	0,019^{ns}	-0,244^{ns}	**-0,537***
Pi NaOH 0,1	0,140^{ns}	-0,288^{ns}	-0,217^{ns}	**-0,441***
P-HCl	0,144^{ns}	**0,575***	**0,456***	0,092^{ns}
Po NaOH 0,5	0,154^{ns}	**0,551***	0,056^{ns}	0,024^{ns}
Pi NaOH 0,5	0,224^{ns}	**0,472***	0,122^{ns}	0,038^{ns}
P Residual	0,095^{ns}	-0,028^{ns}	-0,108^{ns}	-0,105^{ns}

*: significativo a 5% pelo teste t; ns: não significativo.

Para a camada de 5-10 cm ocorreu correlação positiva e significativa entre as frações P-HCl, P orgânico e inorgânico NaOH 0,5 mol L^{-1} (Tabela 19). Como citado anteriormente esse fato pode ser explicado pela capacidade de a soja liberar compostos orgânicos na rizosfera e solubilizar e absorver o P moderadamente lábil, contribuindo com a nutrição fosfatada na cultura da soja.

Os teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P) e magnésio (Mg) na cultura da soja da safra 2015/2016 foram afetados pelos sistemas de cultivo, apresentando desta forma diferenças significativas (Tabela 20).

Observando a Tabela 20, os teores de nutrientes nas folhas de soja estão em níveis considerados adequados para a cultura (MALAVOLTA et al., 1997).

Para o nutriente nitrogênio (N), os tratamentos que favoreceram a absorção de N pela cultura da soja são os tratamentos 3 e 5, representados pelo nabo forrageiro e o consórcio entre milho e *Brachiaria*.

A elevada relação C/N faz com que a palhada permaneça por longo período de tempo, onde o N é liberado de forma lenta (GAMA-RODRIGUES et al., 2007), e com

isso não ocorre a perda por lixiviação do N mineralizado, como é o caso da palhada proveniente do consórcio entre milho e *Brachiaria*.

Tabela 20 - Teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) da soja na safra 2015/2016 em função dos sistemas de monocultura, sucessão e rotação de culturas. Dourados, UFGD, 2019.

Tratamento	**N**	**P**	**K**	**Ca**	**Mg**
	----------**g kg^{-1}**----------				
1	45,92 c	3,60 c	23,66^{ns}	13,42 a	4,25 a
2	50,96 b	3,73 c	23,16^{ns}	13,11 a	4,02 a
3	56,84 a	3,72 c	24,83^{ns}	12,45 a	3,82 b
4	52,05 b	3,84 b	24,16^{ns}	12,81 a	3,83 b
5	55,23 a	3,90 b	23,16^{ns}	12,62 a	3,81 b
6	53,15 b	3,96 b	24,00^{ns}	12,75 a	4,07 a
7	53,73 b	4,08 a	24,33^{ns}	12,82 a	4,09 a
C.V. (%)	2,89	2,60	5,12	3,00	4,06

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. ^{ns}: não significativo; Tratamentos: 1- Pousio/Soja/Pousio/Soja; 2- Milho/Soja/Milho/Soja; 3- Milho+*Brachiaria*/Soja/ Milho+*Brachiaria*/Soja; 4- Milho/Milho/Milho/Milho; 5- Cártamo/Milho/Nabo forrageiro/Soja; 6- Trigo/Milho/Níger/Soja; 7- Crambe/Milho/Trigo/Soja.

A cultura do nabo forrageiro possui relação C/N 22 (SECRETTI, 2017), sendo que quando a relação C/N está entre 20 e 30 resulta em equilíbrio entre os processos de mineralização e imobilização de nitrogênio, e quando a relação C/N é superior a 30 ocorre mais imobilização do que mineralização. A imobilização não reflete em uma perda irreversível de nitrogênio para a cultura seguinte, e dessa forma ocorre liberação gradual desse nutriente quando o carbono facilmente oxidável começa a desaparecer do solo (MEDRADO et al., 2011).

No tratamento 5 a qual tem o nabo forrageiro no sistema de rotação de culturas antecedendo a cultura da soja, observa-se junto ao tratamento 3 os maiores teores de N foliar na soja (Tabela 20). Heinz et al. (2011) observaram que ocorre a liberação de 30% e 60% do N total aos 15 e 30 dias após a presença dos resíduos vegetais de nabo forrageiro sobre o solo.

A soja apresentou maior teor foliar de P após a cultura do trigo no sistema de rotação de culturas representado pelo tratamento 7 na safra de outono/inverno dentro do sistema de rotação de culturas representado pelo tratamento 7 (Tabela 20). O trigo tem a capacidade de extrair 28 kg ha^{-1} de P (SGOBI, 2016) e segundo Kozelinski (2009) em

30 dias a palhada do trigo tem a eficiência em liberar 35% de P contido nos restos culturais mantidos sobre o solo.

Possivelmente a quantidade de P liberado pelos restos culturais do trigo ao longo da safra de verão com soja, juntamente com alterações físicas e biológicas ocasionadas pelo uso de trigo e as culturas anteriores proporcionaram maior absorção de P.

Fato importante a ser ressaltado são os menores teores foliares de N e P quando empregado a monocultura soja/milho ou soja/pousio. Para o magnésio, é evidente os menores teores para os tratamentos 3, 4 e 5 (Tabela 20). Na Tabela 1 e 2 é possível observar maiores teores de cálcio para os mesmos tratamentos citados anteriormente. É importante salientar que os nutrientes cálcio e magnésio competem pelos mesmos sítios de adsorção no solo e, consequentemente, isso reflete na absorção de ambos pelas plantas (MOREIRA et al., 2005). Relações de Ca/Mg do solo maiores que 3,0 influenciam a absorção de magnésio, e consequentemente seu teor foliar cultura da soja (SALVADOR et al., 2011). Apesar de não estar em níveis considerado deficiente, ocorre um desbalanço nutricional entre os dois nutrientes (KURIHARA et al., 2015), afetando a absorção de Mg pela cultura da soja.

5. CONCLUSÕES

1. Na camada de 5-10 cm ocorre a redução de labilidade de P inorgânico, passando da fração lábil ($NaHCO_3$) para a fração moderadamente lábil (NaOH 0,5 mol L^{-1}) com o uso de sistemas de rotação de cultura.
2. O sistema de rotação crambe/milho/trigo/soja e o uso do consórcio entre milho e *Brachiaria* promovem o aumento da produtividade de soja como cultura subsequente.
3. O sistema de rotação crambe/milho/trigo/soja proporciona maior absorção de P pela cultura da soja.
4. Os sistemas de rotação de cultura comparado a sucessão soja/milho aumenta os teores de fósforo lábil na camada de 0-5 cm.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBADI, J.; GERENDÁS, J. Phosphorus use efficiency of safflower (Carthamus tinctorius L.) and sunflower (Helianthus annuus L.). **Journal of Plant Nutrition**, v. 38, n. 7, p. 1121-1142, 2015.

AMARAL, A. S. D.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F. C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v. 28, n. 1, p. 115-123**,** 2004.

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, n. 3, p. 547-562, 2012.

BHATTACHARYYA, Pratap et al. Effects of 42-year long-term fertilizer management on soil phosphorus availábility, fractionation, adsorption–desorption isotherm and plant uptake in flooded tropical rice. **The Crop Journal**, v. 3, n. 5, p. 387-395, 2015.

BORIE, F.; REDEL, Y.; RUBIO, R.; ROUANET, J.; BAREA, J. Interactions between crop residues application and mycorrhizal developments and some soil-root interface properties and mineral acquisition by plants in an acidic soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 36, n. 2, p. 151-160, 2002.

BORTOLUZZI, E. C.; ELTZ, F. L. F. Efeito do manejo mecânico da palhada de aveia preta sobre a cobertura, temperatura, teor de água no solo e emergência da soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p. 449-457, 2000.

BÜNEMANN, Else Katrin. Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus–A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 89, p. 82-98, 2015.

CARNEIRO, L. F.; VILELA, Á.; FURTINI NETO, A. E.; SANTOS, J. Z.; CURI, N.; REIS, T. H.; VALLE, L. A. Frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um Latossolo com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 483-491, 2011b.

CARNEIRO, M. A. C.; CORDEIRO, M. A. S.; ASSIS, P. C. R.; MORAES, E. S.; PEREIRA, H. S.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D. Produção de fitomassa de diferentes espécies de cobertura e suas alterações na atividade microbiana de solo de cerrado. **Bragantia**, v. 67, n. 2, 455-462, 2008.

CARNEIRO, R. F. V.; MARTINS, M. A.; ARAÚJO, A. S. F.; NUNES, L. A. P. L. Inoculação micorrízica arbuscular e adubação fosfatada no cultivo de forrageiras consorciadas. **Archivos de Zootecnia**, v. 60, n. 232, p. 1191-1202, 2011.

CARNEIRO, R. G.; MENDES, I. C.; LOVATO, P. E.; CARVALHO, A. M.; VIVALDI, L. J Indicadores biológicos associados ao ciclo do fósforo em solos de Cerrado sob plantio direto e plantio convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 7, p. 661-669, 2004.

CASALI, C. A.; TIECHER, T.; KAMINSKI, J.; SANTOS, D. R. D.; CALEGARI, A.; PICCIN, R. Benefícios do uso de plantas de cobertura de solo na ciclagem de fósforo, in.: Tiecher, T. (ed.) **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água.** Porto Alegre, UFRGS, 2016. 186p.

CERETTA, C. A.; LORENSINI, F.; BRUNETTO, G.; GIROTTO, E.; GATIBONI, L. C.; LOURENZI, C. R.; TIECHER, T. L.; DE CONTI, L.; TRENTIN, G.; MIOTTO, A. Frações de fósforo no solo após sucessivas aplicações de dejetos de suínos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 6, p. 593-602, 2010.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, v. 84, n. 2, p. 133-144, 1957.

CLAESSEN, M. E. C.; BARRETO, W. D. O.; PAULA, J. D.; DUARTE, M. N. **Manual de métodos de análise de solo.** 1997.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M. Effects of long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zealand. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 40, p. 383-395, 1989.

CONDRON, L. M.; NEWMAN, S. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, n. 5, p. 830-840, 2011.

COSTA, M. D.; LOVATO, P. E. Fosfatases na dinâmica do fósforo do solo sob culturas de cobertura com espécies micorrízicas e não micorrízicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 6, p. 603-605, 2004.

COSTA, N. D. L.; PAULINO, V. T.; COSTA, R. S. C.; PEREIRA, R. G. D. A.; TOWNSEND, C. R.; MAGALHÁES, J. A. Efeito de micorrizas arbusculares sobre o crescimento e nutrição mineral de Brachiaria brizantha cv. Marandu. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 13, n. 4, p. 406-411, 2012.

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**, v.64, p. 197-214,1995.

CEROZI, B.; FITZSIMMONS, K. The effect of pH on phosphorus availábility and speciation in an aquaponics nutrient solution. **Bioresource Technology**, v. 219, p. 778-781, 2016.

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

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Banco de Dados.** Disponível em: https://clima.cpao.embrapa.br/?lc=site/banco-dados/base_dados. Acesso em 04 ago. 2018.

FERNANDES, D. M.; GROHSKOPF, M. A.; GOMES, E. R.; FERREIRA, N. R.; BÜLL, L. T. Fósforo na solução do solo em resposta à aplicação de fertilizantes fluidos mineral e organomineral. **Irriga**, v.1, p.14-27, 2015.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. **Reunião anual da região brasileira da sociedade internacional de biometria**, v. 45, n. 2000, p. 235, 2000.

FRANCHINI, J. C.; HOFFMAN-CAMPO, C. B.; TORRES, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Organic composition of green manure during growth and its effects on cation mobilization in an acid Oxisol. **Soil Science and Plant Analysis**, v.34, p.2045-2058, 2003.

FRAPS, G. S. Availábility of phosphoric acid of the soil. **Journal of the American Chemical Society**, v. 28, n. 7, p. 823-834, 1906.

GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; BRITO, E. C. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos culturais de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho-Amarelo na região Noroeste Fluminense (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p.1421-1428, 2007.

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**, Campinas, v.31, n.4, p.691-699, 2007.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; CERETTA, C. A.; BASSO, C. J. Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejeto de suíno em pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 1753-1761, 2008.

GIANFREDA, L. Enzymes of importance to rhizosphere processes. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 15, n. 2, p. 283-306, 2015.

GUO, F.; YOST, R. S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availábility. **Soil Science**, v. 163, p. 822-833, 1998.

GUPPY, C. N.; MENZIES, N. W.; MOODY, P. W.; BLAMEY, F. P. C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Soil Research**, v. 43, n. 2, p. 189-202, 2005.

HALLAMA, M.; PEKRUN, C.; LAMBERS, H.; KANDELER, E. Hidden miners–the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. **Plant and Soil**, v. 434, n. 1-2, p. 7-45, 2019.

HAMMER, E. C.; BALOGH-BRUNSTAD, Z.; JAKOBSEN, I.; OLSSON, P. A.; STIPP, S. L.; RILLIG, M. C. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 77, p. 252-260, 2014.

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

HEINZ, R.; GARBIATE, M. V.; VIEGAS NETO, A. L.; SOUSA MOTA, L. H. D.; PEREIRA CORREIA, A. M.; VITORINO, A. C. T. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos culturais de crambe e nabo forrageiro. **Ciência Rural**, v. 41, n. 9, p.1549-1555, 2011.

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

HORST, W. J.; KAMH, M.; JIBRIN, J. M.; CHUDE, V. O. Agronomic measures for increasing P availábility to crops. **Plant and Soil**, v. 237, n. 2, p. 211-223, 2001.

JANEGITZ, M. C.; INOUE, B. S.; ROSOLEM, C. A.. Soil phosphorus pools as affected by brachiaria and white lupin. **Ciência Rural**, v. 43, n. 8, p. 1381-1386, 2013.

JANEGITZ, M. C.; MARTINS, A. R. H.; ROSOLEM, C. A. Cover Crops and Soil Phosphorus Availábility. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 10, p. 1240-1246, 2017b.

JANEGITZ, M. C.; ROSOLEM, C. A.; FERREIRA-ELOY, N. R. Espécies de Urochloa afetam diferencialmente a disponibilidade de fósforo no solo. **Colloquium Agrariae**.v. 13, n. 2, p.34-40, 2017.

KHADEMI, Z.; JONES, D. L.; MALAKOUTI, M. J.; ASADI, F. Organic acids differ in enhancing phosphorus uptake by Triticum aestivum L.—effects of rhizosphere concentration and counterion. **Plant and Soil**, v. 334, n. 1-2, p. 151-159, 2010.

KÖPPEN, W. **Climatologia**: con un estudio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Económica, 478p. 1948.

KOZELINSKI, S. M. **Produção de trigo duplo propósito e ciclagem de nutrientes em sistema de integração lavoura pecuária**. 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

KUBO, C. T.; MATA, J. D. D.; SILVA, M. A. G.; SENGIK, É.; MUNIZ, A. S.; NEIRO, E. S. Produtividade de soja em plantio direto em sucessão ao trigo, aveia branca, aveia preta com e sem adubação nitrogenada. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 2, p. 235-24, 2007.

KURIHARA, C. H.; VENEGAS, V. H. A.; NEVES, J. C. L.; DE NOVAIS, R. F.;STAUT, L. A. Faixas de suficiência para teores foliares de nutrientes em algodão e em soja, definidas em função de índices DRIS. **Ceres**, v. 60, n. 3, p. 412-419, 2013.

LI, D.; MÜNDEL, H. H. Safflower. Carthamus tinctorius L. Promoting the Conservation and Use of Underutilized and Neglected Crops. 7. Rome: Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben. **International Plant Genetic Resources Institute**, p. 83, 1997.

LI, H.; SHEN, J.; ZHANG, F.; CLAIROTTE, M.; DREVON, J. J.; LE CADRE, E.; HINSINGER, P. Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (Phaseolus vulgaris L.) and durum wheat (Triticum turgidum durum L.) grown in monocropping and intercropping systems. **Plant and Soil**, v. 312, n. 1-2, p. 139-150, 2008.

LIMA, J.D.; ALDRIGHI, M.; SAKAI, R.K.; SOLIMAN, E.P.; MORAES, W. da S. Comportamento do nabo forrageiro (Raphanus sativus L.) e da nabiça (Raphanus raphanistrum L.) como adubo verde. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.37, n.1, p.60-63. 2007.

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; SILVEIRA, A. D. O.; MARTINS, A. F.; SELBACH, P. A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** Vol. 36, n. 1, p. 33-44, 2012.

LIU, J.; KHALAF, R.; ULÉN, B.; BERGKVIST, G. Potential phosphorus release from catch crop shoots and roots after freezing-thawing. **Plant and Soil**, v. 371, n. 1-2, p. 543-557, 2013.

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

MAIA, R.S.;VASCONCELOS, S.S.;CARVALHO, C.J.R. Frações de fósforo e simbiose micorrízica em floresta secundária em resposta a disponibilidade de água e nutrientes na Amazônia oriental. **Acta Amazônica**. v.45, n.3, pp. 255 –264, 2015.

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

MARCELO, A. V.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Sequências de culturas em sistema de semeadura direta. I-produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1553-1567, 2012.

MARSOLA, T. **Mineralização de fósforo do adubo verde e sua absorção por plantas de arroz.** 2008. 112 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008

MAUAD, M.; GARCIA, R., MUSSURY, R. M.F.S.; FREIRE, T. A.; SCHROEDER, I. M.; KNUDSEN, C. H.; QUARESMA, E. V. Produção de matéria seca e acúmulo de macronutrientes na parte aérea das plantas de Niger. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 533-540, 2015.

MCLAREN, Timothy I. et al. Complex forms of soil organic phosphorus–a major component of soil phosphorus. **Environmental Science & Technology**, v. 49, n. 22, p. 13238-13245, 2015.

MECHI, I. A.; SANTOS, A. L. F.; RIBEIRO, L. M.; CECCON, G. Infestação de plantas daninhas de difícil controle em função de anos de consórcio milho-braquiária. **Journal of Neotropical Agriculture**, v. 5, n. 3, p. 49-54, 2018.

MEDRADO, R. D.; ESTER DE MOURA, R. I. O. S.; LOPES, É. C. P.; FACCIO CARVALHO, P. C.; MORAES, A.; LANG, C. R. Decomposição de resíduos culturais e liberação de nitrogênio para a cultura do milho. **Scientia Agraria**, v. 12, n. 2, p. 97-107, 2011.

MERLIN, A.; HE, Z. L.; ROSOLEM, C. A.. Ruzigrass affecting soil-phosphorus availábility. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 12, p. 1583-1588, 2013.

MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A.; HE, Z. L. Non-lábile phosphorus acquisition by Brachiaria. **Journal of Plant Nutrition**, v. 39, n. 9, p. 1319-1327, 2016.

MOREIRA, A.; DE CARVALHO, J. G.; EVANGELISTA, A. R. Calcium and magnesium ratio in the fertility of a dystrophic dark red latosol cultivated with alfalfa. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 4, p. 786-794, 2005.

MURPHY, L.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determrnation of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 13-36, 1962.

NASCIMENTO, C. A. C.; PAGLIARI, P. H.; FARIA, L. A.; VITTI, G. C. Phosphorus mobility and behavior in Soils Treated with Calcium, Ammonium, and Magnesium Phosphates. **Soil Science Society of America Journal**, 2018.

OBURGER, E.; JONES, D. L.; WENZEL, W. W. Phosphorus saturation and pH differentially regulate the efficiency of organic acid anion-mediated P solubilization mechanisms in soil. **Plant and Soil**, v. 341, n. 1-2, p. 363-382, 2011.

OLIVEIRA, R. I. D., GAMA-RODRIGUES, A. C., GAMA-RODRIGUES, E. F., ZAIA, F. C., PEREIRA, M. G., FONTANA, A. Organic phosphorus in diagnostic surface horizons of different Brazilian soil orders. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1411-1420, 2014.

PARENTONI, S. N.; MENDES, F. F.; GUIMARÃES, L. J. M. Melhoramento para eficiência no uso de P. In: **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos.** Visconde do Rio Branco: Suprema, p. 250-255, 2011.

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

PILETTI, L. M. M. S. **Desempenho agrônomico de milho e soja em diferentes sistemas de rotação de culturas. Dourados, 2016. 76p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal).** Faculdade de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Grande Dourados.

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

RAUSCH, C.; BUCHER, M. Molecular mechanisms of phosphate transport in plants. **Planta**, v. 216, n. 1, p. 23-37, 2002.

REDEL, Y. D.; RUBIO, R.; ROUANET, J. L.; BORIE, F. Phosphorus bioavailábility affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. **Geoderma**, Amsterdam, 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: **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil:** práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água. Porto Alegre: UFRGS, 2016. p. 7-22.

RHEINHEIMER, D. S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos.** 2000. 210f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p. 345–354, 2000.

RHEINHEIMER, D.S; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** v. 36, n. 1, p. 151-160, 2001.

RODRIGUES, Marcos et al. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Science of the Total Environment**, v. 542, p. 1050-1061, 2016.

ROSA, Anderson; CAPONI, Luiz Henrique; JÚNIOR, Luiz Antônio Zanão. Disponibilidade de fósforo em um Latossolo Vermelho em função do pH do solo. **Acta Iguazu**, v. 5, n. 5, p. 108-115, 2016.

ROSE, T. J.; HARDIPUTRA, B.; RENGEL, Z. Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics. **Plant and Soil**, v. 326, n. 1-2, p. 159-170, 2010.

ROSOLEM, C. A.; MERLIN, A.; BULL, J. C. L. Soil phosphorus dynamics as affected by congo grass and P fertilizer. **Scientia Agricola**, v. 71, p.309-15, 2014.

ROSOLEM, C. A.; MERLIN, A.; HE, Z. Non-lábile phosphorus acquisition by Brachiarias. **Journal of Plant Nutrition**, v.39, n.9, p.1319-27, 2015.

ROSOLEM, C.A.; CALONEGO, J. C. Phosphorus and potassium budget in the soil–plant system in crop rotations under no-till. **Soil and Tillage Research**, v. 126, p. 127-133, 2013.

SALVADOR, J. T.; CARVALHO, T. C.; LUCCHESI, L. A. C. Relações cálcio e magnésio presentes no solo e teores foliares de macronutrientes. **Revista Acadêmica: Ciência Animal**, v. 9, n. 1, p. 27-32, 2011.

SANTOS, H. P.; TOMM, G. O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função de sistemas de cultivo e de manejo de solo. **Ciência Rural**, v. 33, n. 3, p. 477-486, 2003.

SANTOS, H.G., JACOMINE, P.K.T., ANJOS, L.H.C., OLIVEIRA, V.A., LUBRERAS, J.F., COELHO, M.R., ALMEIDA, J.A., CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. (ed.). 2013. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. edição revisada e ampliada. Brasília: Embrapa, 353 p.

SANTOS, J. Z. L.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, Á.V.; CURI, N.; CARNEIRO, L. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.705-714, 2008.

SECRETTI, M. L. **Aporte de carbono no solo em sistemas com culturas diversificadas em mato grosso do sul. Dourados, 2017. 87p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal).** Faculdade de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Grande Dourados.

SGOBI, M.A. **Acúmulo de matéria seca, extração e exportação de nutrientes de cultivares de trigo inoculados com Azospirillum brasilense.** 2016. 88f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção) - Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2016.

SHARMA, S. B.; SAYYED, R. Z.; TRIVEDI, M. H.; GOBI, T. A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **SpringerPlus**, v. 2, n. 1, p. 587, 2013.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BLANCANEAUX, P.; LIMA, J. M.; CARVALHO, A. M. Rotação adubo verde - milho e adsorção de fósforo em Latossolo vermelho-escuro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, p. 649-654, 1997.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 1, p. 191-199, 2000.

SIQUEIRA, J. O.; ANDRADE, A. T.; FAQUIM, V. O papel dos microrganismos na disponibilização e aquisição de fósforo pelas plantas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Eds.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p.117-149.

SOUZA JUNIOR, R. F.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, H. C.; FREIRE, F. J.; ARRUDA, J. A. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 159-169, 2012.

STEWART, J. W. B.; SHARPLEY, A.N. Controls on Dynamics of Soil and Fertilizer Phosphorus and Sulfur. In: FOLLETT, R. F.; STEWART, J. W. B.; COLE, C. V. **Soil Fertility and Organic Matter as Critical Components of Production Systems**. SSSA, p. 101–121, 1987.

TAKAHASHI, S.; ANWAR, M. R. Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. **Field Crops Research**, v. 101, n. 2, p. 160-171, 2007.

TATE, K. R. NEWMAN, R. K. Phosphorus fractions of a climosequence of soils in New Zeland tussock gassland.. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v 14, p. 191-196, 1982.

TELES, A. P. B.; RODRIGUES, M.; BEJARANO HERRERA, W. F.; SOLTANGHEISI, A.; SARTOR, L. R.; WITHERS, P. J. A.; PAVINATO, P. S. Do cover crops change the lábility of phosphorus in a clayey subtropical soil under different phosphate fertilizers? **Soil Use and Management**, v. 33, n. 1, p. 34-44, 2017.

TIESSEN, H. J. W. B.; STEWART, J. W. B.; COLE, C. V. Pathways of Phosphorus Transformations in Soils of Differing Pedogenesis 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 4, p. 853-858, 1984.

TIRLONI, C.; VITORINO, A.C.T.; NOVELINO, J.O.; TIRLONI, D.; COIMBRA, D.S. Disponibilidade de fósforo em função das adições de calagem e de um bioativador do solo. **Ciência e Agrotecnologia**, v.33, p.977-984, 2009.

TORO, M.; BAZÓ, I.; LÓPEZ, M. Micorrizas arbusculares y bactérias promotoras de crecimiento vegetal, biofertilizantes nativos de sistemas agrícolas bajo manejo conservacionista. **Agronomía Tropical**, v.58, n.3, p.215-221, 2008.

VIEIRA, S. R.; GUEDES FILHO, O.; CHIBA, M.K.; MELLIS, E.V.; DECHEN, S. C.F.; MARIA, I. Variabilidade espacial dos teores foliares de nutrientes e da produtividade da soja em dois anos de cultivo em um latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1503-1514, 2010.

WANG, Tao; CAMPS-ARBESTAIN, Marta; HEDLEY, Mike. The fate of phosphorus of ash-rich biochars in a soil-plant system. **Plant and Soil**, v. 375, n. 1-2, p. 61-74, 2014.

WANG, Yan-Liang et al. Contrasting responses of root morphology and root-exuded organic acids to low phosphorus availábility in three important food crops with divergent root traits. **AoB Plants**, v. 7, 2015.

ZHANG, Z.; LIAO, Hong; L., W. J. Molecular mechanisms underlying phosphate sensing, signaling, and adaptation in plants. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 56, n. 3, p. 192-220, 2014.

ZHU, Yuanrong et al. Interaction of alkaline phosphatase with minerals and sediments: activities, kinetics and hydrolysis of organic phosphorus. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 495, p. 46-53, 2016.