

BÁRBARA FERNANDA DA SILVA

**FORRAGEIRAS E NITROGÊNIO INFLUENCIANDO A DINÂMICA DO FÓSFORO
EM SOLO CULTIVADO COM MILHO**

Botucatu

2019

BÁRBARA FERNANDA DA SILVA

**FORRAGEIRAS E NITROGÊNIO INFLUENCIANDO A DINÂMICA DO FÓSFORO
EM SOLO CULTIVADO COM MILHO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Juliano Carlos Calonego

Coorientador: Carlos Antonio Costa do Nascimento

Botucatu

2019

S586f

Silva, Bárbara Fernanda da

Forrageiras e nitrogênio influenciando a dinâmica do fósforo em solo cultivado com milho / Bárbara Fernanda da Silva. -- Botucatu, 2019

74 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Juliano Carlos Calonego

Coorientador: Carlos Antonio Costa do Nascimento

1. Fósforo - dinâmica no solo. 2. Nitrogênio. 3. Braquiária. 4. Difusão de P. 5. Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho. I.

Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

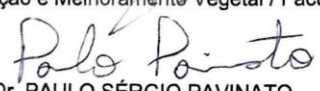
Título: **“FORRAGEIRAS E NITROGÊNIO INFLUENCIANDO A DINÂMICA DO P
EM SOLO CULTIVADO COM MILHO”**

AUTORA: BÁRBARA FERNANDA DA SILVA
ORIENTADOR: JULIANO CARLOS CALONEGO
COORIENTADOR: CARLOS ANTONIO COSTA DO NASCIMENTO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA
(AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Pós-Doutorando CARLOS ANTONIO COSTA DO NASCIMENTO
Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu


Prof. Dr. ROGÉRIO PERES SORATTO
Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu


Prof. Dr. PAULO SÉRGIO PAVINATO
Departamento de Ciência do Solo / ESALQ - USP - Piracicaba/SP

Botucatu, 02 de agosto de 2019.

*Dedico aos meus pais, Iolanda Iris da Silva e
Nivaldo Alves da Silva Filho, por sempre confiarem
em mim e me apoiarem em tudo. Amo vocês, sem vocês não
conseguiria completar mais essa etapa de minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

A Deus, em quem confio integralmente, pela orientação nas decisões, pelo conforto nas dificuldades e por atender minhas preces nos momentos de aflição e angústia.

Aos meus pais, Nivaldo Alves e Iolanda Iris, que venceram todas as dificuldades para que pudessem me proporcionar uma formação de qualidade; agradeço pelo amor e carinho que tanto me dedicam, amo muito vocês.

Ao meu irmão Pedro Henrique pelo amor, carinho e incentivo.

A todos os familiares, por todo amor, carinho e apoio em tudo o que faço, sem vocês nada seria possível. Principalmente à minha madrinha Cleonice e ao meu primo Antônio, que estavam sempre prontos a me confortar nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Juliano Carlos Calonego por toda a atenção, suporte e confiança em meu trabalho.

Ao Dr. Carlos Antonio Costa Nascimento, pela orientação, ensinamentos, paciência e confiança. Sem você nada seria possível.

Ao Prof. Dr. Ciro Rosolem por colaborar e me permitir compartilhar a área experimental para que eu pudesse realizar meu trabalho de mestrado.

Aos amigos: Marina, Brenda, Camila, Jordana, Iara, Larissa e Marília por terem me ajudado durante a minha jornada. Obrigada por tantos momentos divertidos e de aprendizado que vocês me proporcionaram, obrigada pelos conselhos e por cada sorriso que tenham dado nos momentos mais difíceis, vocês são como irmãs para mim.

Aos companheiros de apartamento, Lau, Pedro e Fernanda, por toda a paciência comigo, pela amizade, tanto nos momentos felizes como nos estressantes, pelo carinho, pelas risadas, pelas comidas (tudo muito bom!), e pela oportunidade de ter conhecido pessoas tão especiais que lembrarei para o resto de minha vida.

Aos amigos e companheiros da Unesp, em especial Gustavo, Camila G., João, Heitor e Hugo, pela ajuda nos trabalhos, pelas conversas, risadas e amizade.

Aos companheiros e amigos de Botucatu, Rai, Lais, Neto e Elinton, pela amizade, pelas conversas, pelas cervejas. Vocês foram mais que amigos, foram uma família, vou me lembrar de vocês por toda vida.

Aos companheiros e amigos do Laboratório Solo-Planta, pela convivência, apoio, amizade e ajuda nas análises.

A todos os professores da Unesp por contribuírem na minha formação e servirem de exemplos para a minha vida profissional.

Ao grupo de pesquisa Nucleus apoiado pela FAPESP— Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo [Processo 2015/50305-8].

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo nº 2018/05725-7), pela concessão de bolsa de estudo.

“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação. Mas se você não fizer nada,
não existirão resultados”.

(Mahatma Gandhi)

RESUMO

O fósforo (P) é um dos nutrientes que mais limitam a produção agrícola em solos tropicais. No solo ele é encontrado sob formas inorgânicas (P_i) e orgânicas (P_o), com diferentes labilidades. Formas menos lábeis de P_i e P_o poderão contribuir para nutrição das plantas, mas para isso precisam ser solubilizadas e mineralizadas, respectivamente. Plantas de cobertura contribuem para solubilização de compostos menos lábeis aumentando teor de P lábil no solo. Contudo, nem sempre a essa solubilização implica em reciclagem e absorção pelas plantas, levantando as principais hipóteses: a) as raízes das plantas de cobertura liberam ácidos orgânicos capazes de complexar P via ponte metálica, reduzindo o movimento do P no solo; b) as plantas de cobertura absorvem o P do solo e, após processo de decomposição, o devolvem, em sua maior parte, na forma de ácido fítico, não disponível para as plantas; c) a adubação nitrogenada pode influenciar na mineralização de compostos orgânicos do solo, aumentando a disponibilidade de P oriundo do P_o . Assim, foram conduzidos dois experimentos: o primeiro com o objetivo de avaliar o efeito das plantas de cobertura (*Urochloa ruziziensis*, *Urochloa brizantha* e *Panicum maximum*) e das doses de nitrogênio (N) (70, 140 e 210 kg ha⁻¹) na dinâmica de P do solo, bem como a sua relação com o acúmulo de P e a produtividade de plantas de milho em duas safras consecutivas; e o segundo objetivando avaliar a mobilidade do P em solo cultivado previamente com plantas de cobertura em casa de vegetação. No primeiro experimento verificou-se que cultivo de *U. ruziziensis* como planta de cobertura não alterou a dinâmica do P solo; no entanto a adubação nitrogenada alterou a dinâmica de P do solo. O acúmulo de P nas plantas de milho é influenciado pela adubação nitrogenada. No segundo experimento verificou-se que nos solos arenosos o P se difunde mais rapidamente que no argiloso e também que a aplicação de N contribuiu para aumentar a difusão do P. A *U. ruziziensis* reduziu a mobilidade do P no solo argiloso, embora esse efeito tenha sido minimizado pela aplicação de N.

Palavras-chave: *Zea mays*. Braquiária. Hedley. dinâmica de P.

ABSTRACT

Phosphorus (P) is one of the nutrients that most limit agricultural production in tropical soils. It is found in inorganic forms (P_i) and organic (P_o), with different weights in soil. Less labile forms of P_i and P_o may contribute to plant nutrition, but it is necessary to be solubilized and mineralized, respectively. Covering plants contribute to the solubilization of less labile compounds, increasing the P content in the soil, but this solubilization does not always imply recycling and absorption by the plants. Two main hypotheses are raised: a) the roots of the plants cover organic acids capable of complex P through metal bridge, reducing the movement of P in the soil; b) the cover plants absorb soil P and, after decomposition, return it for the most part in the form of phytic acid, not available to the plants. Nitrogen fertilization may influence the mineralization of organic compounds in the soil, increasing the availability of P from the P_o . Thus, two experiments were carried out, the first one evaluated the effect of the cover plants (*U. ruziziensis*, *U. brizantha* and *P. maximum*) and N nitrogen rates (70, 140 and 210 kg ha⁻¹) in the soil P_o dynamics, and its relation with P accumulation and yield by maize plants in two consecutive crops. The aiming of the second experiment was to evaluate the mobility of P in previously cultivated soil with cover crops under greenhouse conditions. The analyzed variables were fractions of P_i and P_o in the soil; phytic acid content in soil and cover crops, and accumulation of P in the shoot of the maize plants. In the first experiment, It was verified that cultivation of *U. ruziziensis* as cover crop did not influenced the soil organic P dynamics. However, the nitrogen fertilization changed the soil organic P behavior. The accumulation of P in maize plants was influenced by nitrogen fertilization. In the second experiment, it was verified that in the sandy soils, P diffuses faster than in the clay soils, besides that the application of N improved the P mobility in both soils.

Keywords: *Zea mays* L.. *Brachiaria*. Hedley. dynamic phosphorus.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	17
CAPÍTULO 1: EFEITO DE PLANTAS DE COBERTURA E ADUBAÇÃO NITROGENADA NAS FORMAS DE P DO SOLO.....	19
1.1 INTRODUÇÃO	21
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	22
1.2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	22
1.2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS	24
1.2.3 INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO	24
1.2.4 FRACIONAMENTO DE FÓSFORO NO SOLO	26
1.2.5 FORMAS DE P NA PLANTA DE COBERTURA	27
1.2.6 DETERMINAÇÃO DE ÁCIDO FÍTICO NA PLANTA	27
1.2.7 ACÚMULO DE P NA PLANTA DE MILHO	28
1.2.8 PRODUTIVIDADE DO MILHO	28
1.2.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA	29
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
1.3.1 FRACIONAMENTO DE P SOLO.....	29
1.3.2 FORMAS DE P NA PLANTA DE COBERTURA	35
1.3.3 ÁCIDO FÍTICO NA PLANTA	39
1.3.4 ACÚMULO DE P NA PLANTA DE MILHO	40
1.4 CONCLUSÕES.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
CAPÍTULO 2: NITROGÊNIO AFETA A DIFUSÃO DE P EM SOLO CULTIVADO COM PLANTAS COBERTURA.	54
2.1 INTRODUÇÃO	56
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	57
2.2.1 CULTIVO DAS PLANTAS DE COBERTURA	57
2.2.2 DETERMINAÇÃO DA ZONA DE DIFUSÃO DO P AO LONGO DO TEMPO	59
2.2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA	61
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
2.3.1 RAIO DE DIFUSÃO DE P AO LONGO DO TEMPO.....	61
2.3.2 DIFUSÃO DO P – ANALISE QUÍMICA P RESINA - FERTILIZANTE	64
2.4 CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
REFERÊNCIAS.....	71

INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é o terceiro maior produtor de milho (*Zea mays* L.) do mundo, com uma produção estimada em 87 milhões de toneladas do grão na safra 2017/2018 (CONAB, 2018). Grande parte da produção de milho do Brasil vem de áreas onde é adotado o sistema de semeadura direta (SSD), o qual é caracterizado pela permanência da palha sobre o solo, preservando suas características físicas, químicas e biológicas. O SSD proporciona aumento na produtividade e maior sustentabilidade econômica e ambiental no uso dos solos em comparação ao sistema de preparo convencional. A palha deixada sobre o solo constitui importante reserva de nutrientes, cuja disponibilidade depende da interação com os fatores edafoclimáticos (ROSOLEM et al., 2003; PARIZ et al., 2011).

Dentre os nutrientes mais exigidos pela cultura do milho, o fósforo (P) é um dos mais adicionados via adubação, em quantidade muito superior à extraída pelas plantas devido à baixa eficiência de recuperação por conta da capacidade de adsorção de P dos solos tropicais (DA SILVA et al., 2017). Nesse sentido, plantas de cobertura, principalmente as do gênero *Urochloa*, têm sido utilizadas não só para promover a cobertura vegetal, mas também para solubilizar fosfatos e aumentar disponibilidade de P à cultura de interesse (ALMEIDA et al., 2016). Entretanto, Almeida et al. (2018) observou que a *Urochloa ruziziensis* em rotação com a soja, embora tenha aumentado o P disponível, reduziu a produtividade de grãos quando comparado à soja cultivada após o pousio. Mesmo que os ácidos orgânicos liberados pelas raízes da *U. ruziziensis* promovam a solubilização dos fosfatos inorgânicos no solo, eles também podem formar ligações com o P através de pontes metálicas (JONES, 1998; ALMEIDA et al., 2018), reduzindo a mobilidade dos ânions fosfato e diminuindo seu contato com as raízes das plantas.

Depois de extrair e metabolizar o P inorgânico (P_i), as plantas de cobertura o devolvem sob formas orgânicas cuja recalcitrância dependerá, dentre outros fatores, da espécie utilizada. O P orgânico (P_o) constitui entre 5% e 80% do P total do solo, e pode constituir importante fonte para a nutrição fosfatada das plantas. Contudo, devido à complexidade dessas formas orgânicas, existem dúvidas sobre quando e como essas formas fornecerão P à cultura de interesse (MARTINAZZO et al., 2007). Uma vez que as plantas só podem assimilar P_i (RAGHOTHAMA, 2005), se faz necessária a mineralização do P_o , a qual se dá através da ação de enzimas fosfatases (CLARHOLM et al., 2015; RICHARDSON et al., 2005). O processo de

mineralização do P_o é controlado por reações biogeoquímicas semelhantes às de P_i , mas em alguns casos, como para o fitato, a força das reações pode ser ainda maior, devido à presença de múltiplos grupos de ortofosfato e uma maior densidade de carga aniônica (YAN et al., 2014).

A dinâmica do P_o no solo é ainda influenciada pelo fornecimento de nitrogênio (N), pois o N favorece o maior crescimento das plantas e consequentemente de suas raízes, aumentando, assim, a produção de exsudatos ácidos orgânicos, os quais estão intimamente ligados à ciclagem de P (PICCIN et al., 2017). A adubação nitrogenada ainda afeta a população e a atividade microbiana no solo, devido a alterações na relação C/N do solo e resíduos vegetais, que resulta num aumento da taxa de decomposição dos resíduos vegetais e altera a dinâmica de mineralização e disponibilização do P_o (CANTARELLA, 2007; KELLER et al., 2012). Yang et al. (2014) estudaram as alterações nas formas de P após nove anos de aplicações anuais de 100 kg ha^{-1} de N e observaram diminuição de formas orgânicas moderadamente lábeis de P em função do aumento na taxa de mineralização, bem como um aumento de formas inorgânicas moderadamente lábeis, devido à diminuição do pH do solo e ao aumento na quantidade de P absorvida pelas plantas.

Assim, o objetivo desta pesquisa foi verificar se há diferenças entre distintas plantas de cobertura com relação as formas de P do solo e se o efeito dessas plantas de cobertura é influenciado pela adubação nitrogenada.

CAPÍTULO 1: EFEITO DE PLANTAS DE COBERTURA E ADUBAÇÃO NITROGENADA NAS FORMAS DE P DO SOLO

RESUMO

O fósforo (P) no solo é encontrado sob formas inorgânicas (P_i) e orgânicas (P_o), com diferentes labilidades. Formas menos lábeis de P_i e P_o poderão contribuir para nutrição das plantas, mas para isso precisam ser solubilizadas e mineralizados, respectivamente. Plantas de cobertura contribuem para solubilização de compostos menos lábeis aumentando teor de P lábil no solo, contudo nem sempre a essa solubilização implica em reciclagem e absorção pelas plantas, sendo levantadas duas principais hipóteses: a) as raízes das plantas de cobertura liberam ácidos orgânicos capazes de complexar P via ponte metálica, reduzindo o movimento do P no solo; b) as plantas de cobertura absorvem o P do solo e, após processo de decomposição, o devolvem, em sua maior parte, na forma de ácido fítico, não disponível para as plantas. A adubação nitrogenada pode influenciar na mineralização de compostos orgânicos do solo, aumentando a disponibilidade de P oriundo do P_o . Assim, foi conduzido um experimento com o objetivo de avaliar o efeito das plantas de cobertura (*U. ruziziensis*, *U. brizantha* e *P. maximum*) e das doses de nitrogênio N (70, 140 e 210 kg ha⁻¹) no estoque de P_o do solo, e sua relação com o acúmulo de P e a produtividade de plantas de milho em duas safras consecutivas. Verificou-se que cultivo de *U. ruziziensis* como planta de cobertura não aumenta o estoque de P orgânico do solo, no entanto a adubação nitrogenada altera o estoque de P orgânico do solo. A espécie *P. maximum* acumula maior quantidade de fitato e, conseqüentemente, diminui a ciclagem de P orgânico no solo. O acúmulo de P nas plantas de milho é influenciado pela adubação nitrogenada.

Palavra-chave: *Zea mays* L.; Braquiária; Hedley; fósforo orgânico.

ABSTRACT

Phosphorus (P) is found in inorganic (Pi) and organic (Po) forms with varying abilities in soil. Less labile forms of Pi and Po may contribute to plant nutrition, but they need to be solubilized and mineralized, respectively. Covering crops contribute to the solubilization of less labile compounds by increasing labile P content in the soil, but this solubilization does not always imply recycling and absorption by the crops, and two main hypotheses are raised: a) complex P via metal bridge reducing the movement of P in the ground; b) mulching plants absorb P from the soil and after decomposition, return it mostly as phytic acid, not available to plants. Nitrogen fertilization can influence the mineralization of soil organic compounds, increasing the availability of P from Po. Thus, an experiment was carried out to evaluate the effect of cover crops (*U. ruziziensis*, *U. brizantha* and *P. maximum*) and nitrogen N rates (70, 140 and 210 kg ha⁻¹) on the cover stock. Soil powder, and its relationship with P accumulation and yield of corn plants in two consecutive harvests. Cultivation of *U. ruziziensis* as cover crop did not increase soil organic P stock, however, nitrogen fertilization alters soil organic P stock. The *P. maximum* species accumulates greater phytate and consequently decreases the organic P cycling in the soil. P accumulation in maize plants is influenced by nitrogen fertilization.

Key words: *Zea mays* L.; *Brachiaria*; Hedley; fósforo orgânico.

1.1 Introdução

Em situações de deficiência de P, as plantas podem desenvolver alterações morfofisiológicas no sistema radicular com o fim de maximizar a eficiência de absorção de P (BUCHER, 2007). Dentre essas alterações, pode-se destacar aquelas que maximizam a exploração do solo, as que aumentam a solubilidade de fosfato e as que envolvem simbiose ou interações com microrganismos (JONES, 1998). Sendo assim, na seleção de plantas de cobertura deve se levar em conta produção de fitomassa (CRUSCIOL et al., 2005), o uso eficiente de nutrientes, especialmente N e P (GAMA RODRIGUES et al., 2007), rusticidade, alta tolerância ao déficit hídrico, rápido crescimento inicial e estabelecimento, além de baixa taxa de decomposição (BOER et al., 2007; TORRES et al., 2008).

Espécies do gênero *Urochloa* têm sido utilizadas em estudos de sistemas de produção que almejam o aumento e disponibilização do fósforo no solo, pois apresentam diversas vantagens para solos tropicais, tais como baixa exigência em fertilidade, tolerância a solos ácidos e com baixo P disponível (MERLIN et al., 2013), além de possuírem boa relação parte aérea/raiz, morfologia e arquitetura radicular, além de produção de fosfatases e exsudação de ácidos orgânicos (BODDEY et al., 2006).

Há evidência de que plantas do gênero *Urochloa* podem solubilizar formas não lábeis de P (MERLIN et al., 2009), o que pode ser uma ferramenta importante no manejo de fertilizantes em sistemas com rotação de culturas, favorecendo a solubilização ou a diminuição da adsorção do P no solo (GEORGE et al., 2006). Almeida et al. (2016) observaram que o cultivo de *Urochloa ruziziensis* pode afetar a fertilidade do solo e a disponibilidade de P lábil do solo, resultando em benefícios para as safras seguintes. Entretanto, Almeida et al. (2018) observaram que o cultivo de *U. ruziziensis* a longo prazo resultou em aumento da quantidade de P na forma de fitato, não disponível para plantas, mas protegido contra adsorção na superfície das argilas do solo. Sendo assim, é de suma importância o estudo do efeito de plantas de cobertura na dinâmica do P no solo.

Sabe-se que a relação C/N dos resíduos no solo interfere nos processos de decomposição, mineralização e disponibilização de N para as plantas, e, indiretamente, na disponibilização de P no solo. Quando as relações C:N e C:P estiverem nas faixas 20-30 e 200-300, respectivamente, a imobilização e a

mineralização de N e P acontecerão em sincronia, por gerar um equilíbrio entre os processos sem alterar a disponibilidade dos nutrientes às plantas. A inclusão de fontes de N e C por meio de fertilizantes minerais e resíduos orgânicos de baixa relação C/N intensificam a atividade microbiana, acelerando a mineralização da matéria orgânica do solo e a liberação dos nutrientes (GUIMARÃES et al., 2015).

Alguns estudos avaliando efeito da adubação nitrogenada na produção de fitomassa, quantidade de nutrientes acumulados e relação C/N dos resíduos produzidos pela cultura da aveia-preta, constataram que com a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N-ureia, a quantidade de P ciclado pela fitomassa da aveia-preta foi de aproximadamente 11,5 kg ha⁻¹, o que significa 3,8 kg ha⁻¹ de P a mais em relação ao tratamento sem adubação nitrogenada, correspondendo a um incremento de 68% da ciclagem máxima obtida (SANTI et al., 2003). Assis et al. (2003) relataram que a aplicação de N sobre a palhada de sorgo, em área sob SPD por 4 anos, aumentou em 21% o processo de decomposição da palha. Isso indica que a adubação nitrogenada maximiza a disponibilização de nutrientes do resíduo e a absorção pelas plantas, melhorando a eficiência na ciclagem de nutrientes. Como o P encontra-se associado a compostos orgânicos no tecido vegetal, o processo de decomposição pelos microrganismos do solo é fundamental para sua mineralização e disponibilização (TURNER, 2008; KELLER et al., 2012). Além do efeito do N no processo de mineralização do P_o, plantas bem nutridas em N apresentam maior absorção de P, bem como fertilizantes que contém ambos os nutrientes tendem a favorecer a mobilidade do P no solo e o acúmulo de P nas plantas (MONTALVO et al., 2014; NASCIMENTO, 2016; NASCIMENTO et al., 2018).

Dessa forma o objetivo desse trabalho foi verificar o efeito de plantas de cobertura na dinâmica de P no solo e a relação da adubação nitrogenada com as frações de P no solo, bem como com o acúmulo de P pelas plantas de milho.

1.2 Material e Métodos

1.2.1 Caracterização da área

O experimento de campo foi conduzido na cidade de Botucatu, estado de São Paulo, Brasil, 22° 49' de Latitude Sul e 48° 25' de Longitude Oeste, com altitude

média de 770 metros e declividade de 3%. O solo da área é classificado como um LATOSSOLO VERMELHO argiloso (Embrapa, 2016), com 190, 196 e 614 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente, na profundidade de 0 a 0,20 m. A fração argila tem ~ 70% de caulinita, ~ 15% de gibsita e pequenas quantidades de vermiculita e ilita. O clima é do tipo Cwa, pela classificação de Köppen: subtropical úmido, com precipitação média anual de 1400 mm, temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e do mês mais frio entre 3 e 18 °C. Os dados climáticos obtidos durante o experimento foram registrados por meio de uma estação meteorológica localizada no campus da Faculdade de Ciências Agronômicas, próximo da área experimental.

Anteriormente a instalação do experimento na safra 2016/2017, foi realizada uma amostragem de solo na camada de 0,00-0,20 m de profundidade para caracterização química de rotina da área, cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização química do solo das áreas antes da semeadura das gramíneas forrageiras na camada de 0,00 – 0,20 m de profundidade

MO	pH	P-resina	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	H+Al	V	CMAP
g dm ⁻³	CaCl ₂	mg kg ⁻¹		mmol _c dm ⁻³			%	mg kg ⁻¹
19	5,2	18	1,8	40	17	35	63	1357

MO= Matéria orgânica; V= Saturação por bases; CMAP= Capacidade máxima de adsorção de fósforo no solo

O teor de matéria orgânica (MO) foi determinado de acordo com método descrito por Walkley e Black (1934) e o pH em solução de cloreto de cálcio 0,01 mol L⁻¹ (CaCl₂) foi determinado com auxílio de potenciômetro digital (RAIJ et al., 2001). A acidez potencial a pH 7,0 (H+Al) foi determinada de acordo com Raij et al. (2001). O fósforo (P), cálcio (Ca⁺²), magnésio (Mg⁺²) e potássio (K⁺) trocáveis foram extraídos com resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001). A concentração de P foi determinada em espectrofotômetro UVmini-1240 (Shimadzu Scientific Instruments, Kyoto, Japão) e os teores de Ca⁺², Mg⁺² e K⁺ foram determinados utilizando espectrômetro de absorção atômica modelo AAS7000 (Shimadzu Scientific

Instruments, Kyoto, Japão). Foi determinada também a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) do solo de acordo com Nair et al. (1984).

1.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi o em blocos ao acaso com parcelas subdivididas, em quatro repetições. Foram utilizadas três espécies de gramíneas forrageiras e quatro doses de N aplicadas na cultura em sucessão. As espécies utilizadas foram: braquiária ruziziensis (*Urochloa ruziziensis* cv. Comum), braquiária brizanta (*Urochloa brizantha* cv. Marandú) e capim colônia (*Panicum maximum* cv. Tanzânia). Para o cultivo das plantas de cobertura utilizou-se 10 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis, distribuídas em linhas espaçadas em 0,45 m, sem uso de fertilizante. Após o cultivo das gramíneas forrageiras foi realizado um cultivo de milho. No cultivo de milho foram aplicadas as doses de 0, 70, 140 e 210 kg ha⁻¹ de N, sendo 30 kg ha⁻¹ de N junto ao sulco de semeadura e o restante em cobertura, quando as plantas de milho estavam no estágio vegetativo com quatro folhas completamente expandidas, utilizando-se como fonte o sulfato de amônio. Cada parcela foi semeada com seis linhas de milho espaçadas em 0,75 m. Além da adubação nitrogenada, as plantas de milho foram adubadas sempre com 110 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O, utilizando-se as fontes superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente.

1.2.3 Instalação e condução do experimento

O experimento teve início no ano de 2014, quando as forrageiras foram cultivadas e permaneceram na área durante 14 meses, para então dar lugar ao milho para a safra 2015/2016, safra esta que não foi avaliada na presente pesquisa. Após a colheita do milho na safra 2015/2016, as forragens foram novamente semeadas no mês de março de 2016, com uma semeadora de fluxo contínuo da marca Semeato, modelo Personalle Drill 21. O espaçamento utilizado foi de 0,17 m entre fileiras. Nas parcelas com dimensões de 4,5 x 10,0 m, totalizando 45 m², tais plantas perduraram até início de dezembro de 2016, sendo que houve a necessidade de ressemeiar as forragens em outubro, devido ao seu baixo

desenvolvimento em função da ocorrência de baixas temperaturas e baixa precipitação entre abril e setembro. Anteriormente à semeadura do milho, a área do experimento foi dessecada com pulverização de $2,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de glifosato com 720 g kg^{-1} de ingrediente ativo (i.a.) no dia 09/12/2016. A semeadura do milho foi realizada em semeadura direta no dia 13/12/2016, utilizando o híbrido simples 2B587 PW da empresa Dow AgroSciences. O espaçamento utilizado foi $0,75 \text{ m}$ entre linhas e a população de plantas foi de $65.000 \text{ plantas ha}^{-1}$, conforme recomendada pelo obtentor.

Os tratos culturais referentes ao controle de plantas daninhas, pragas e doenças foram realizados mediante monitoramento. Aos nove dias após a semeadura (DAS) foi aplicado $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de glifosato (720 g kg^{-1} i.a.) para controle de plantas daninhas. Aos 15 DAS, foi aplicado $0,35 \text{ L ha}^{-1}$ de tiametoxam (141 g L^{-1} i.a.) + lambda-cialotrina (106 g L^{-1} i. a.) para o controle de percevejo-barriga-verde (*Dichelops furcatus*). No início de janeiro, 23 dias após a semeadura, aplicou-se $2,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de glifosato (720 g kg^{-1} i.a.) para controle de plantas daninhas. Aos 42 DAS foram aplicados $0,3 \text{ L ha}^{-1}$ de tiametoxam (141 g L^{-1} i.a.) + lambda-cialotrina (106 g L^{-1} i.a.) e $0,6 \text{ L ha}^{-1}$ de clorpirifós (480 g L^{-1} i.a.), visando o controle de percevejo-barriga verde e lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*), respectivamente. Todas as aplicações ocorreram juntamente com $0,6 \text{ L ha}^{-1}$ do produto agral, que é um adjuvante para melhorar a distribuição dos produtos. O volume de calda aplicada em todas as pulverizações foi de 200 L ha^{-1} , com auxílio de trator e pulverizador montado.

Já na safra 2017/2018, a semeadura do milho foi realizada em semeadura direta no dia 08/12/2017, utilizando o híbrido simples 2B587 PW da empresa Dow AgroSciences. O espaçamento utilizado foi $0,45 \text{ m}$ entre linhas e a população de plantas foi de $65.000 \text{ plantas ha}^{-1}$, conforme recomendada pelo obtentor.

Quanto aos tratos culturais referentes ao controle de plantas daninhas, pragas e doenças, estes também foram realizados conforme o monitoramento. Aos 12 DAS, foi aplicado $0,25 \text{ L ha}^{-1}$ de tiametoxam (110 g L^{-1} (11% m v⁻¹)) + cipermetrina (220 g L^{-1} (22% m v⁻¹)) para o controle de percevejo-barriga-verde. Após 27 DAS, aplicou-se $0,25 \text{ L ha}^{-1}$ de tiametoxam (141 g L^{-1} (14,1% m v⁻¹)) + lambda-cialotrina (106 g L^{-1} (10,6% m v⁻¹)) para o controle de lagartas-do-cartucho e percevejo-barriga-verde. Já aos 37 DAS, aplicou-se $0,6 \text{ L ha}^{-1}$ de clorpirifós (480 g L^{-1} (48% m v⁻¹)), $0,4 \text{ L ha}^{-1}$ de imidacloprido (250 g L^{-1} (25,0 % m v⁻¹)) + bifentrina (50 g L^{-1} (5,0 % m v⁻¹)) e $0,5 \text{ L}$

ha⁻¹ de piraclostrobina (133 g L⁻¹ (13,3% m v⁻¹)) + epoxiconazol (50 g L⁻¹ (5,0% m v⁻¹)) para o controle de lagarta-do-cartucho, percevejo-barriga-verde e cercosporiose (*Cercospora zea-maydis*), respectivamente. Também foi necessário o controle de plantas com folhas largas na área, e para isso, aplicou-se 2 kg de atrazina (500 g L⁻¹ (50,0% m v⁻¹)) aos 43 DAS. Houve ainda a necessidade da aplicação de 0,65 L ha⁻¹ de espinosade (480 g L⁻¹ (48,0% m v⁻¹)) para o controle de lagartas-do-cartucho e 0,3 L ha⁻¹ de tiametoxam (141 g L⁻¹ (14,1% m v⁻¹)) + lamba-cialotrina (106 g L⁻¹ (10,6% m v⁻¹)) para o controle de lagartas-do-cartucho e percevejo-barriga-verde, aos 53 e 65 DAS, respectivamente.

O volume de calda aplicada para as pulverizações foi conforme indicações das bulas de cada produto comercial, utilizando-se trator e pulverizador montado.

1.2.4 Fracionamento de fósforo no solo

O fracionamento de P no solo foi realizado em amostras coletadas na profundidade 0,00-0,10 m, antes da dessecação das plantas de cobertura em dezembro de 2016 e 2017. A extração sequencial ou fracionamento de fósforo no solo foi baseada no método proposto por Hedley, Stewart e Chauan (1982) com modificações de Codron, Goh e Newman (1985). Para realizar a extração sequencial de fósforo inorgânico e orgânico (P_i e P_o) foi utilizado 0,5 g de solo (seco em estufa a 65° C) no qual foi adicionado 10 mL de água deionizada no caso da extração com resina, ou as soluções extratoras no caso dos demais extratores, mantendo a proporção 1:20 (solo:solução). Os extratores em ordem sequencial de extração foram: resina trocadora de ânion (PRTA); NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ (Bic-P); NaOH 0,1 mol L⁻¹ (0,1-NaOH-P); HCl 1,0 mol L⁻¹ (P-HCl); NaOH 0,5 mol L⁻¹ (0,5-NaOH-P).

A primeira fração de P no solo obtida foi o fósforo inorgânico (P_i). Nos extratos alcalinos (Bic-P, 0,1-NaOH-P e 0,5-NaOH-P) foi determinado o P-total (P_t) por digestão com persulfato de sódio + ácido sulfúrico em bloco digestor (USEPA, 1978), com modificações de Nascimento et al. (2015) e adaptado de Dayton et al. (2017), sendo o fósforo orgânico (P_o) obtido pela diferença entre fósforo total (P_t) e fósforo inorgânico (P_i).

O P inorgânico dos extratos Bic-P, 0,1-NaOH-P e 0,5-NaOH-P foi determinado pelo método de Dick e Tabatabai (1977) modificado por He e Honeycutt (2005). O P dos extratos ácidos (Extrato P-resina e P-HCl), além das digestões totais

de Bic-P, 0,1-NaOH-P e 0,5-NaOH-P, foram determinados segundo a metodologia de Murphy e Riley (1962). Após estas extrações, o solo remanescente foi seco em estufa e submetido à digestão com $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{MgCl}_2$ saturado (BROOKES; POWSON, 1982) para determinação do fósforo residual (P residual).

Para melhor compreender os efeitos dos tratamentos, as frações de P foram agrupadas, sendo o P_i lábil a soma do Prta e Bic-P_i , o P_o lábil composto por Bic-P_o . O P_i moderadamente lábil é a soma do $\text{P}_i\text{-NaOH } 0,1$ e P-HCl , o P_o moderadamente lábil é composto por $\text{P}_o\text{-NaOH } 0,1$ e por fim o P total não lábil é composto pelo P residual, $\text{P}_i\text{-NaOH } 0,5$ e $\text{P}_o\text{-NaOH } 0,5$ (RODRIGUES et al., 2016).

1.2.5 Formas de P na planta de cobertura

As análises de P na parte aérea das plantas de cobertura foram realizadas em amostras coletadas imediatamente antes da dessecação para semeadura da cultura do milho em dezembro de 2016 e 2017. A parte aérea foi seca em estufa com circulação de ar forçada com temperatura de 65°C até massa constante, e em seguida foram moídas em moinho tipo Willey, peneiradas em malha de 2 mm e reservadas para a análise de formas de P. As amostras foram submetidas ao fracionamento químico de P, conforme metodologia proposta por Miyachi e Tamiya (1961), adaptado de Schimidt e Thannhauser (1945) e com adaptações realizadas por Casali et al. (2011). A determinação de todas as formas de P foram realizadas conforme Murphy e Riley (1962), em espectrofotômetro UV-visível.

1.2.6 Determinação de ácido fítico na planta

Nas mesmas amostras de planta mencionadas no item 2.2.5 foram realizadas determinações de teores de ácido fítico utilizando a metodologia de Gao et al. (2007). Foi utilizado para essa análise 0,5 g de tecido vegetal (seco em estufa a 65°C), no qual foi adicionado 10 mL da solução extratora de HCl 1 M a 2,4%. Em seguida a amostra foi agitada a 220 rpm por 16 horas e centrifugada a 10°C por 20 minutos. Após esses processos, os extratos foram transferidos para tubos Falcon de 14 mL contendo 1 g de NaCl, e agitados a 350 rpm durante 20 min para dissolver o sal e deixados para decantar a 4°C durante 60 min.

As amostras foram centrifugadas a 1000 rpm a 10°C durante 20 min, e então retirou-se uma aliquota de 1 mL do sobrenadante que foi diluída 25 vezes em um tubo Falcon de 50 mL misturado com 24 mL de água deionizada. Em seguida, em 3 mL desta amostra diluída foram adicionados 1 mL de Reagente de Wade modificado (0,03% de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 0,3% de ácido sulfosalicílico) em um tubo Falcon de 14 mL, e foi agitado e centrifugado a 1000 rpm a 10°C durante 10 min. Uma série de padrões de calibração contendo 0; 1,12; 2,24; 3,36; 5,6; 7,84 ou 11,2 mg L⁻¹ P-PA foram preparados a partir de fitato de sódio (Sigma, St.Louis, MO). Posteriormente as amostras foram encaminhadas para determinação de fitato por colorimetria, onde as amostras e os padrões foram lidos a 500 nm em um espectrofotômetro, e o cálculo do conteúdo da amostra P-PA seguiu o método descrito em Latta e Eskin (1980).

1.2.7 Acúmulo de P na planta de milho

Na cultura do milho, nas safras 2016/17 e 2017/18, foram amostradas no estádio R6, três plantas inteiras de milho por parcela para se estimar o acúmulo de P na parte aérea (folhas + caule + sabugo) e nos grãos (exportação), por meio do método de colorimetria do metavanadato (fósforo total). Este método baseia-se na reação do ânion H_2PO_4^- com molibdato (MoO_4^{2-}) e vanadato (VO_3^{2-}), em meio ácido, formando um complexo de coloração amarela que absorve a luz na região de 420nm (Malavolta et al.,1997).

1.2.8 Produtividade do milho

Para estimativa de produtividade do milho, nas safras 2016/17 e 2017/18, foram colhidas as espigas das três fileiras centrais de 6 m de comprimento de cada parcela, totalizando uma área de 13,5 m² de milho, utilizando colhedora de parcelas automotriz. As amostras foram para o laboratório onde foram pesadas e a produtividade foi calculada em kg ha⁻¹, corrigindo-se a umidade para 13%.

1.2.9 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à ANOVA utilizando-se o programa JMP (versão 14, SAS Institute Inc., Cary, NC, EUA). O experimento foi analisado como parcela subdivididas. Os fatores dose e plantas de cobertura foram considerados como de efeitos fixos. A comparação das médias dos efeitos principais ou interações significativas ($P \leq 0,05$) foi realizada usando o teste de diferença de significância de Fisher (LSD).

1.3 Resultados e discussões

1.3.1 Fracionamento de P solo

1.3.1.1 P_i lábil

O P inorgânico extraído pela resina trocadora de ânions e pelo bicarbonato de sódio são as primeiras formas de P obtidas no fracionamento de Hedley, Stewart e Chauhan (1982). Essas formas contribuem ativamente no suprimento do nutriente para as plantas, e por isso são consideradas as formas lábeis de P no solo (CROSS; SCHLESINGER, 1995; GATIBONI et al., 2007; GONÇALVES; MEURER, 2009; TOKURA et al., 2011).

Na safra 2016/2017, na fração do P_i lábil (Figura 1), o solo onde se cultivou *U. brizantha* apresentou maior disponibilidade de P independentemente da dose de N aplicada. Já nos tratamentos com *U. ruziziensis* e *P. maximum*, as doses 70 e 140 kg ha⁻¹ resultaram em menor disponibilidade de P. Sem adição N e com a dose de 210 kg ha⁻¹ ocorreu um aumento na disponibilidade de P_i lábil. Na ausência de N isso ocorreu provavelmente porque as plantas de cobertura tiveram um menor desenvolvimento e consequentemente consumiram menos P_i lábil, mantendo maior a concentração de P no solo. Já os maiores teores com a dose 210 Kg ha⁻¹ de N pode estar associado à maior atividade microbiana nas camadas superficiais do solo, característico do SPD, que é potencializada pela aplicação de N, resultando em maior taxa de decomposição dos resíduos vegetais deixados sobre o solo (LEE et al., 2004; TIECHER et al., 2012), e consequentemente com o aumento da taxa de mineralização dos compostos orgânicos fosfatados. Já na safra 2017/18 os maiores

teores de P_i lábil ocorreram com a aplicação de 140 kg ha^{-1} de N, seguindo a ordem nas plantas de cobertura: *U. ruziziensis* > *U. brizantha* > *P. maximum*. Para as demais doses, o comportamento na disponibilidade de fósforo foi semelhante entre as espécies de plantas de cobertura.

O cultivo de *U. ruziziensis* pode aumentar a disponibilidade de P no solo porque há uma tendência da espécie utilizar pouco P disponibilizado no solo, resultando em aumento do teor de P no solo e permitindo as próximas culturas de se beneficiarem com essa disponibilização de P (ALMEIDA et al., 2016). O cultivo das plantas de cobertura como as Urochloas em ambas as safras aumentaram a disponibilidade de P, possivelmente em função da liberação de ácidos orgânicos durante a decomposição do material vegetal pela população microbiana, uma vez que esses ácidos competem com os sítios de adsorção no solo, aumentando a disponibilidade dos fosfatos (JONES, 1998; PAVINATO et al., 2008). Os ácidos orgânicos liberados durante o processo de decomposição das plantas de cobertura e da decomposição da matéria orgânica do solo, constituída por resíduos de raízes ou exsudatos de fungos, promovem reações de troca com sesquióxidos, liberando moléculas de fosfato na solução do solo, que posteriormente podem ser utilizadas pelas plantas (HALL et al., 2010).

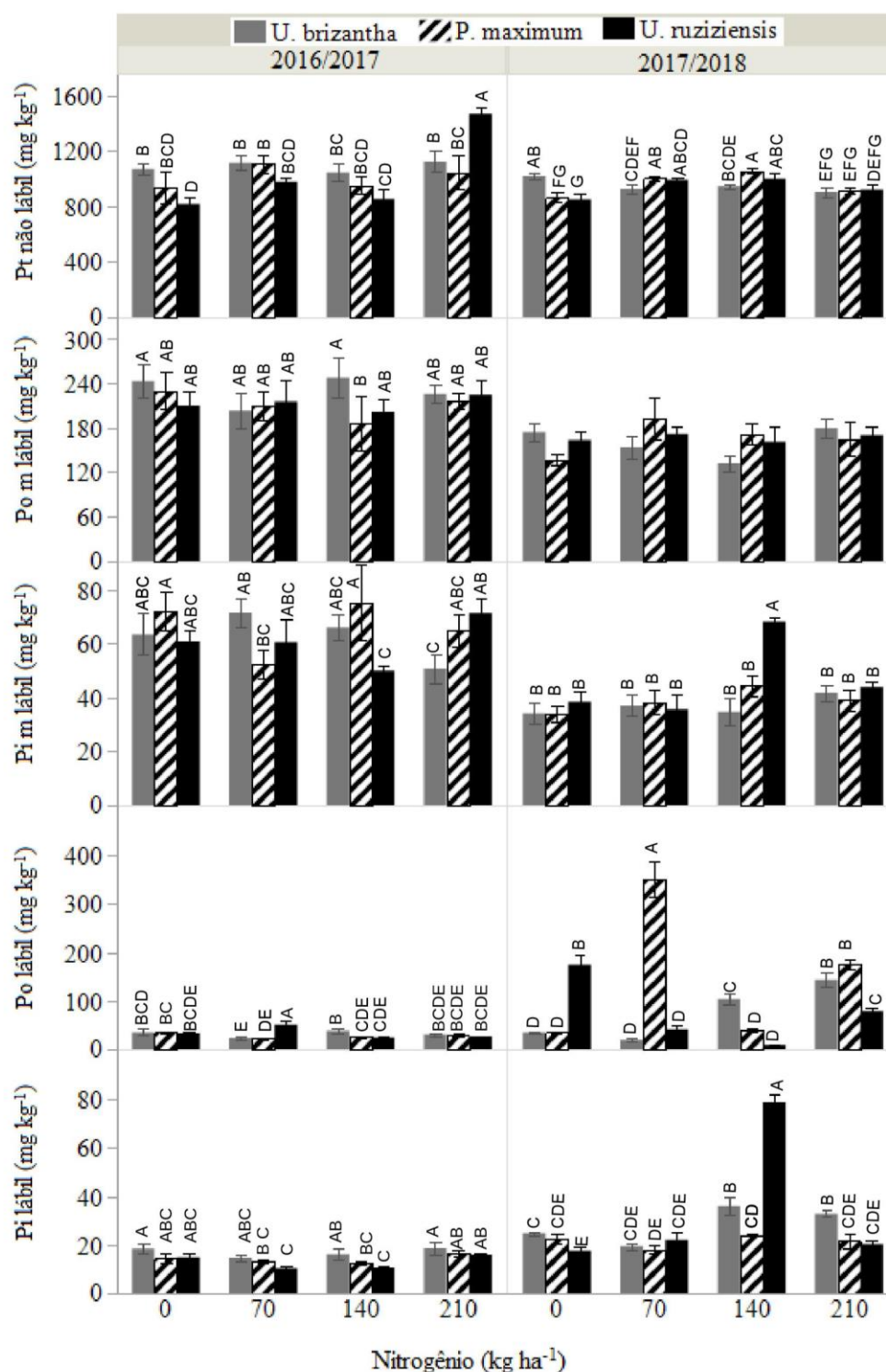


Figura 1: Fracionamento de P total do solo na camada de 0 – 10 cm em um LATOSSOLO VERMELHO argiloso, cultivado com milho, sob sistema de plantio direto e plantas de cobertura.

Oliveira (2015) avaliando o efeito de cinco plantas de cobertura verificou que maior teor de P extraído pela resina trocadora de ânions foi obtido apenas no solo sob vegetação espontânea. Isso provavelmente deve estar relacionado à rápida decomposição dos resíduos vegetais na superfície do solo e aos sistemas radiculares destas espécies explorarem uma pequena área de solo, se restringindo às camadas superficiais. Ainda devido ao sistema radicular destas espécies explorarem uma grande área de solo, acarretando em uma maior absorção de P no perfil do solo devido às diferentes estratégias de obtenção de P pelas plantas (TIECHER et al., 2012), consequentemente facilitando a reciclagem de P, o que pode ter contribuído para redução dos teores disponíveis, principalmente no solo cultivado com plantas de cobertura.

Resultados semelhantes foram relatados por Merlin (2008), que observou teores de 10 a 22 mg dm⁻³ com RTA em lâmina, assim como Leite et al. (2016) que encontrou valores entre 10 a 19 mg kg⁻¹ com RTA. Com relação às outras frações de P no solo, não foram observadas diferenças significativas. Embora a concentração de N seja diferente entre os tratamentos, essas diferenças não foram capazes de promover alterações nas demais frações de P.

1.3.1.2 P_o Lábil

O P_o lábil é a fração mais instável do P_o e acessível aos microrganismos (BOWMAN; COLE, 1978), que pode se tornar disponível para as plantas com maior facilidade (HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982). Por ser facilmente mineralizada, a fração P_o lábil é armazenada em pequenas quantidades no solo (ROSSI, 2013).

Na safra 2016/17, o maior teor de P_o lábil no solo foi resultado da combinação entre a *U. ruziziensis* e a dose 70 kg ha⁻¹ de N (Figura 1). Na dose 140 kg ha⁻¹ a *U. brizantha* favoreceu a disponibilidade de P quando comparada ao *P. maximum* e a *U. ruziziensis*. Já na ausência de N e na dose máxima aplicada de 210 kg ha⁻¹ a disponibilidade de fósforo nesta fração foi em média 34 mg kg⁻¹ e 29 mg kg⁻¹, respectivamente, e não foi influenciada pelas espécies de forrageiras.

Na safra 2017/18, *P. maximum* na dose 70 kg ha⁻¹ promoveu o maior teor P_o lábil (352 mg kg⁻¹). Na dose 0 e 210 kg ha⁻¹ de N houve também um aumento da disponibilidade de P, sendo 174 mg kg⁻¹, 175 mg kg⁻¹ e 143 mg kg⁻¹ pela *U. ruziziensis*, *P. maximum* e *U. brizantha*, respectivamente. Na ausência de N e com

dose de 140 kg ha⁻¹ o teor de P extraído foram baixos, apresentando um comportamento semelhante independente da espécie de planta de cobertura. Segundo Merlin (2008), o acúmulo de P_o lábil em superfície pode ser explicado pelo acúmulo de resíduos vegetais devido à rotação de culturas no sistema de plantio direto. O aumento nos teores de P_o lábil pode decorrer da migração de outras formas de P a frações instáveis de P_o que existem em equilíbrio com as frações de P_o moderadamente lábeis. Essas duas concentrações de P também são sensíveis à mudança devido à aplicação ou depleção de nutrientes, o que torna as transformações entre frações P dependentes do estágio do desenvolvimento do solo, tipo de fontes de fertilizantes e propriedades do solo (NEGASSA et al., 2009).

Além disso, a atividade microbiana (JACKOBSEN et al., 2005), absorção de P pelas plantas (KOVAR e CLASSEN, 2005), exsudação radicular e outros processos da rizosfera (JONES, 1998; HINSINGER, 2001) têm importância fundamental nas transformações do P no solo. O estímulo à atividade microbiana do solo, causado pela adubação nitrogenada, pode ter provocado a transformação de formas mais estáveis de P_o em formas orgânicas lábeis (GATIBONI et al., 2007).

1.3.1.3 P_i Moderadamente lábil

O fósforo inorgânico moderadamente lábil (P_i-M Lábil) é uma fração de P extraída com solução de NaOH 0,1 M + P_i HCl, em que P_i HCl extrai preferencialmente as formas de P ligadas ao cálcio (NEGASSA et al., 2009; NASCIMENTO, 2016; RODRIGUES et al., 2016). Já o NaOH 0,1 M extrai as formas de P associada aos colóides do solo, principalmente aos óxidos e caulinita, por ligações do tipo monodentado e bidentado (GATIBONI et al., 2007).

Na safra 2016/17 (Figura 1), de maneira geral, a não adição de N levou à maior quantidade de P na fração P_i-M lábil. O *P. maximum*, sem e com a aplicação de 140kg ha⁻¹ de N levou ao maior teor de P (72,16 e 75,22 mg kg⁻¹, respectivamente) quando comparado as doses 70 e 210 kg ha⁻¹. Já com a *U. brizantha*, a menor concentração de P (50,8 mg kg⁻¹) foi encontrada na dose 210 kg ha⁻¹, diferindo do *P. maximum* e *U. ruziziensis* (64,5 e 71,4 mg kg⁻¹, respectivamente). Essa fração foi a mais influenciada pelas doses de N, com efeito dependente da espécie de planta de cobertura ($p < 0,05$). Já na safra 2017/18, a maior concentração de P_i-M lábil foi encontrada com *U. ruziziensis* e dose 140kg ha⁻¹.

¹, sendo superior aos demais tratamentos ($p < 0,05$). A *U. brizantha* e o *P. maximum* apresentaram comportamento similar, independente da dose de N.

Maiores teores de P_i no compartimento moderadamente lábil também foram observados em outros solos (SANTOS et al., 2008; GONÇALVES e MEURER, 2009), nos quais a predominância do P_i -M lábil foi associada ao fato de serem as formas de P, orgânicas e inorgânicas, ligadas ao solo com alta energia.

1.3.1.4 P_o Moderadamente lábil

Na safra 2016/17, o maior acúmulo de P_o -M lábil foi observado com *U. brizantha* e 140 kg ha⁻¹ de N, enquanto que nos demais tratamentos foram semelhantes entre si ($p > 0,05$) (Figura 1). Já na safra 2017/18, observou-se que a dose de N e as diferentes plantas de cobertura utilizadas não alteraram a fração P_o -M lábil (Figura 1). O aumento do P_o -M lábil pode ser atribuído ao cultivo das plantas de cobertura que, em sistema de plantio direto, onde não há revolvimento do solo, aumenta o reservatório de P_o e, por mineralização, pode haver tamponamento das formas mais lábeis de P_i (NOVAIS et al., 2007). O P_o NaOH 0,1 pode estar nas formas de monoésteres, diésteres, fosfonatos e polifosfatos (TATE; NEWMAN, 1982). Os fosfatos monoésteres perfazem a maior parte do P_o em solos tropicais e são caracterizados pela alta interação com os colóides do solo e, portanto, de baixa acessibilidade ao ataque microbiano (LEITE, 2015).

1.3.1.5 P não lábil

A fração não lábil é constituída pela soma de P NaOH 0,5, que extrai as formas fisicamente protegidas no interior dos agregados, e de P Residual. De modo geral, essa fração tem participação expressiva no total do P em solos tropicais.

Na safra 2016/17, observa-se que a maior concentração de P na fração não lábil, se deu com *U. ruziziensis* na ausência de N e na dose de 210 kg ha⁻¹. Para a *U. brizantha* e *P. maximum*, a dose de N utilizada não alterou a quantidade de P, apresentando comportamento semelhantes entre si. Nas frações menos lábeis, o solo cultivado com *U. ruziziensis* apresentou um aumento de P, desde que haja adubação nitrogenada, provavelmente porque a adição de N aumenta a adição de resíduos ao solo e consequentemente a ciclagem de P.

Na safra seguinte (2017/2018), para fração P não lábil, a dose de 140kg ha^{-1} de N tendeu a favorecer um aumento de P, sendo a maior quantidade observada para o *P. maximum*, seguidas pelas *U. ruziziensis* e *U. brizantha* (Figura 1). Observa-se também que nessa fração mais recalcitrante a ausência de N e a dose máxima não contribuem para alterar a quantidade de P, exceto para *U. brizantha* em que a ausência de N contribuiu para aumentar a concentração P no solo.

O P não lábil é uma fração recalcitrante, de difícil acesso pelos extratores químicos seletivos usados nos esquemas de fracionamento, e que pode contribuir para a nutrição das plantas apenas em situações de extrema carência do nutriente no solo (GATIBONI et al., 2013).

1.3.2 Formas de P na planta de cobertura

O fósforo inorgânico solúvel (PSI) e o fósforo total solúvel (PTS) representam as formas de fósforo mais lábeis do tecido vegetal. As formas inorgânicas são liberadas do tecido vegetal sem a necessidade de mineralização, enquanto que as formas orgânicas solúveis necessitam da ação de enzimas (CASALI et al., 2011). A concentração de PSI do tecido das plantas de cobertura na safra 2016/17 variou de 1763 a 1166 mg kg^{-1} (Tabela 2), enquanto que na safra 2017/18, essa variação foi de 2050 a 3093 mg kg^{-1} (Tabela 3). A concentração de PSI na safra 2016/17 somente diferiu para a dose 140 kg ha^{-1} para a *U. brizantha*, indicando que não ocorre grande variação no acúmulo dessa forma de P entre as espécies e entre as doses de N. Já na segunda safra não foram observados efeitos de doses e plantas de cobertura nas concentrações de PSI. O PSI é constituído, principalmente, por ortofosfato presente no citoplasma das células e vacúolo (MIYACHI; TAMIYA, 1961; MARSCHNER, 1995). Essa fração de fósforo inorgânica do tecido vegetal é prontamente disponível às plantas cultivadas em sucessão devido à alta solubilidade dos resíduos vegetais. No entanto, a fração orgânica necessita ser mineralizada para posterior absorção; dessa forma o elevado teor de PSI pode explicar a maior disponibilidade de fósforo na fração do Pi lábil (Figura 1), já baixos teores de PSI, indicam que a liberação de P depende da mineralização do tecido (CASALI et al., 2011).

Tabela 2. Modificações (mg kg^{-1}) nas formas de fósforo no tecido vegetal de plantas de *U. brizantha*, *U. ruziziensis* e *P. maximum*, cultivadas sob semeadura direto, safra 2016/2017.

Plantas de cobertura	Doses de N	PSI ¹	PST ²	PLIP ³	PRNA ⁴	PRES ⁵
	Kg ha^{-1}	mg kg^{-1}				
<i>U. brizantha</i>	0	1380 B	1646 C	149 BC	158 E	95 BC
	70	1347 B	3122 AB	143 BC	351 B	113 B
	140	1763 A	3415 AB	180 AB	268 CD	109 B
	210	1166 B	2987 B	151 BC	215 DE	92 BC
<i>P. maximum</i>	0	1179 B	2201 C	175 AB	226 D	106 B
	70	1238 B	3027 AB	192 A	250 CD	99 B
	140	1438 B	2261 C	179 AB	502 A	92 BC
	210	1205 B	3780 A	156 AB	297 BC	144 A
<i>U. ruziziensis</i>	0	1298 B	3291 AB	95 D	215 DE	76 C
	70	1244 B	3289 AB	176 AB	258 CD	100 B
	140	1269 B	1877 C	170 AB	267 CD	110 B
	210	1348 B	3359 AB	117 CD	270 CD	90 BC

¹ Fósforo inorgânico solúvel (PSI); ²Fósforo total solúvel (PST); ³Fósforo lipídico (PLIP); ⁴Fósforo associado ao RNA (PRNA); ⁵Fósforo residual (PRES). Médias seguidas das mesmas letras nas colunas, não diferem entre pelo teste LSD a 5%.

O aumento do teor de PSI se deve ao aumento na disponibilidade de P no sistema, pois a elevação das formas solúveis de P do tecido das plantas se dá, principalmente, em ambientes onde o P não é limitante. Conforme Hoghe et al. (1970), a variação do conteúdo de P_i no tecido vegetal pode expressar a situação nutricional da planta, já que seu aumento se daria apenas quando os requerimentos de crescimento fossem atingidos. O PST do tecido das plantas foi maior que o PSI, indicando que grande parte do fósforo presente nos tecidos vegetais são acumulados em formas orgânicas e necessitam da ação de microrganismos para serem disponibilizados.

Observa-se que na safra 2016/17 (Tabela 2), a concentração do PST ficou entre 1646 e 3780 mg kg^{-1} , sendo que o *P. maximum* apresentou o maior teor de PST quando sob dose 210 kg ha^{-1} , seguido *U. brizantha* que apresentou o menor teor para a dose 0 kg ha^{-1} . Para safra 2017/18 (Tabela 3), a concentração do PST variou de 4445 a 2371 mg kg^{-1} , sendo os maiores valores encontrados na espécie de *P. maximum* e os menores para *U. ruziziensis*. Adicionalmente, o teor de PST, em

geral foi maior na ausência de N e, como não houve diferenças para o PSI, essa diferença no PST foi dirigida pelo aumento de P solúvel orgânico, provavelmente pela formação de compostos orgânicos mais estáveis na ausência de nitrogênio ou simplesmente por um efeito de diluição, já que as plantas melhor nutridas em N cresceram mais. Contudo, não há diferenças marcantes entre as doses de N (70,140 e 210).

Tabela 3. Modificações (mg kg^{-1}) nas formas de fósforo no tecido vegetal de plantas de *U. brizantha*, *U. ruziziensis* e *P. maximum*, cultivadas sob plantio direto, safra 2017/2018.

Plantas de cobertura	Doses de N Kg ha^{-1}	PSI ¹ mg kg^{-1}	PST ²	PLIP ³	PRNA ⁴	PRES ⁵
<i>U. brizantha</i>	0	2773	4378 A	193 CD	290 BCD	1889 AB
	70	2539	3960 AB	244 B	249 DE	1541 CD
	140	2050	2772 DE	174 CD	396 A	1663 BC
	210	2637	3315 CD	157 D	242 DE	1508 CD
<i>P. maximum</i>	0	3094	4445 A	297 A	355 AB	1240 DE
	70	2586	4048 A	208 BC	245 DE	710 G
	140	2181	3256 CD	253 AB	270 DE	1409 CDE
	210	2417	3411 BC	178 CD	187 E	647 G
<i>U. ruziziensis</i>	0	2175	3340 CD	172 CD	245 DE	2109 A
	70	2550	3975 AB	242 B	187 E	908 FG
	140	2357	2371 E	191 CD	323 BC	1121 EF
	210	2268	2882 CDE	160 CD	348 AB	1105 EF

¹ Fósforo inorgânico solúvel (PSI); ²Fósforo total solúvel (PST); ³Fósforo lipídico (PLIP); ⁴Fósforo associado ao RNA (PRNA); ⁵Fósforo residual (PRES). Médias seguidas das mesmas letras nas colunas, não diferem entre pelo teste LSD a 5%.

O fósforo lipídico (PLIP) do tecido das plantas variou de 94,39 a 192,34 mg kg^{-1} P na primeira safra e, para a segunda, de 156,59 a 297,29 mg kg^{-1} P. A maior concentração foi observada em *P. maximum* nas doses 70 e 0 kg ha^{-1} , para primeira e segunda safra, respectivamente, sendo a *U. ruziziensis* e *U. brizantha* as espécies com menor acúmulo de PLIP no tecido. Para o PLIP, a amplitude foi pequena, indicando que é uma forma de fósforo com menor sensibilidade em relação às alterações do conteúdo total de P. Os maiores acúmulos de PLIP foram observados

nas doses mais baixas de N provavelmente pela formação de compostos orgânicos mais estáveis.

Chapin et al. (1982) verificaram que, em duas espécies de poáceas, as formas orgânicas de P do tecido, dentre elas o PLIP, não variaram em função de alterações do aumento no teor de P do ambiente, sugerindo que essas formas de P mais recalcitrantes não seriam bons indicadores do *status* de P da planta. Contudo, a maior estabilidade do PLIP pode servir de critério de seleção de espécies mais tolerantes à deficiência de P (CHISHOLM e BLAIR, 1988). Da mesma forma, elevados teores de PLIP, proporcionalmente ao P total, indicam que a planta tem uma boa eficiência de uso do P absorvido, pois o converte em constituintes bioquímicos estáveis (CASALI, 2011).

O fósforo ligado ao RNA (PRNA) do tecido das plantas variou de 158,11 a 502,08 mg kg⁻¹ na primeira safra, sendo representadas respectivamente por *U. brizantha* e o *P. maximum*, e de 186,85 a 396,05 mg kg⁻¹ na segunda safra, observadas respectivamente para *U. ruziziensis* e *U. brizantha*. Essa fração é representada pelo P associado às estruturas de RNA da planta, que apresentam grande estabilidade e elevada recalcitrância, de modo que o P dessa fração somente será solubilizado se ocorrer a destruição da referida estrutura (CASALI, 2011).

Na safra 2016/17, o fósforo residual (PRES) variou de 143,76 a 76,23 mg kg⁻¹, correspondendo ao *P. maximum* e a *U. ruziziensis*, respectivamente. Na safra 2017/18, esta fração variou de 646,65 a 2109,55 mg kg⁻¹, sendo o menor valor observado para o *P. maximum* e o maior para *U. ruziziensis*. Observa-se também que as maiores concentrações de PRES foram encontradas na ausência de N. Nessa fração de P, são encontradas fosfoproteínas e P DNA, consideradas formas de P altamente recalcitrantes (MIYACHI; TAMIYA, 1961). Na safra 2016/17, a baixa concentração de P como PRES se deve ao menor desenvolvimento das plantas de cobertura nessa safra.

De maneira geral, os teores de PLIP, PRNA e PRES não variaram entre as plantas de cobertura, indicando que são formas de P menos sensíveis às variações na disponibilidade de P no ambiente. Independente da espécie de planta, o PST foi a forma predominante de P no tecido, o que corrobora com os resultados obtidos por Fabres et al. (1987), Pereira et al. (2008), Marsola (2008) e Casali (2011), que verificaram que a maior parte do P do tecido das plantas encontrava-se em formas

solúveis. Observa-se então que as plantas acumulam fósforo em diversas formas no tecido vegetal, o que pode interferir na dinâmica de liberação do elemento.

1.3.3 Ácido fítico na planta

Analisando os resultados da concentração de fitato (Figura 2) no tecido vegetal, pode-se observar de maneira geral que em ambas as safras a espécie *P. maximum* apresentou a maior concentração de fitato (87 e 88 g kg⁻¹) independente da dose de N aplicado, enquanto que *U. ruziziensis* apresentou, de maneira geral, os menores valores de concentração de fitato (70,15 e 67,06 g kg⁻¹). A síntese do ácido fítico começa quando o suprimento de P excede as necessidades do metabolismo básico das plantas (RABOY et al., 2003).

A concentração de P nos resíduos de plantas é o fator principal que determina se o P será mineralizado rapidamente. Dessa forma, a absorção de P pelas plantas de cobertura está relacionada com as formas de P_o no solo. Portanto, a forma como o P se encontra armazenado no tecido vegetal influenciará na dinâmica do P no solo durante a sua mineralização, sendo assim plantas que acumulam P em formas mais recalcitrantes, potencialmente fitatos, os quais possuem baixa disponibilidade e solubilidade (BERG e JOERN, 2006; GIAVENO et al., 2010), tendem a mineralizar maior quantidade de P_o recalcitrante, provavelmente fitatos protegidos pelos sesquióxidos, afetando a dessorção (ALMEIDA et al., 2018b).

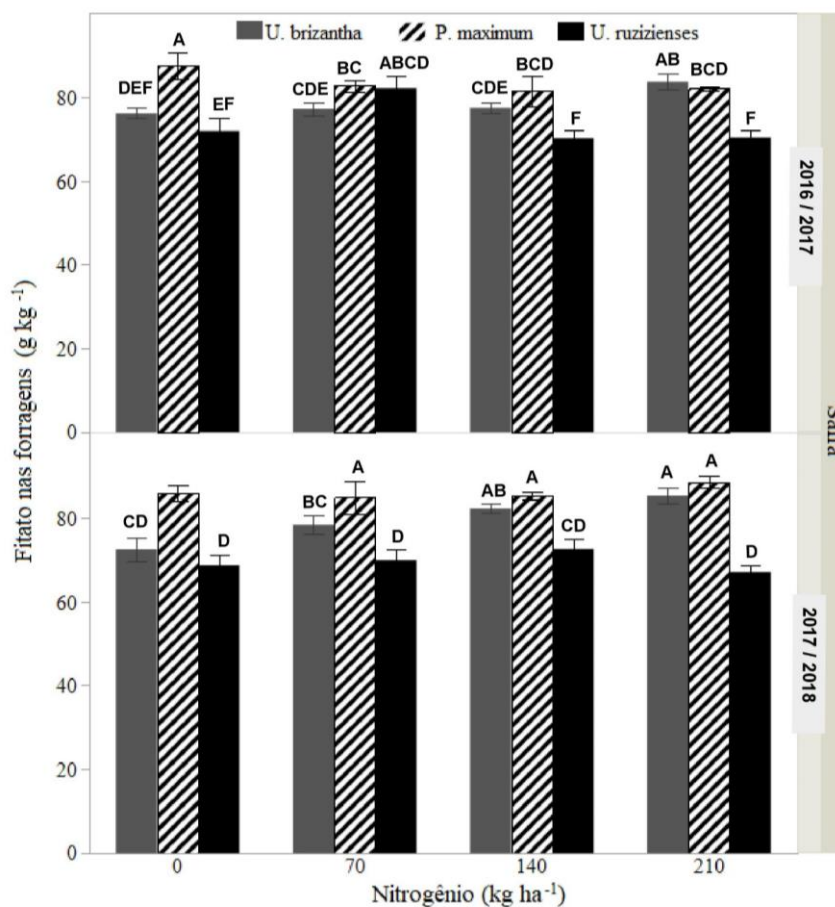


Figura2. Média da concentração de ácido fitico em plantas de cobertura, nas safras 2016/2017 e 2017/2018. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada ano safra, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de LSD.

1.3.4 Acúmulo de P na planta de milho

Avaliando o acúmulo de P nos diferentes compartimentos (colmo, folha, grão e sabugo), não foram observadas diferenças entre os tratamentos. De acordo com Aita et al. (2014), a inclusão de plantas de cobertura em sistemas de produção é fundamental, pois participam ativamente da ciclagem de nutrientes e melhoria da qualidade do solo. O acúmulo de P sob o efeito de diferentes plantas de cobertura (Figura 3), na safra 2016/17, não apresentou diferenças, com acúmulo médio de 24,53 kg ha⁻¹ de P na parte aérea do milho. Já na safra 2017/18, a plantas de milho cultivadas sob a palhada de *U. brizantha* apresentaram o maior acúmulo de P, com 26,03 kg ha⁻¹, e as cultivadas sob *U. ruziziensis*, o menor acúmulo (19,53 kg ha⁻¹). Pode-se inferir que o uso de plantas de cobertura no sistema de produção é

vantajoso, pois demonstra ser eficiente em absorver o P do solo, diminuindo a possibilidade desse P ficar adsorvido nos colóides do solo.

Segundo Silva et al. (2014a), espécies que possuem capacidade de explorar o solo podem extrair nutrientes menos solúveis e depositá-los na camada superior do solo, tornando-os acessíveis a cultura em sucessão. De acordo com Leite et al. (2016), o uso de plantas de cobertura em sistema plantio direto favorece a manutenção de maior quantidade de P em formas disponíveis. Almeida et al. (2018b) observaram efeitos semelhantes quanto ao aumento do acúmulo de P nos grãos de soja após o cultivo de braquiária. Casali (2012) verificou grande diferença na capacidade de acúmulo de P pelas plantas de cobertura de solo, que variou de 11 a 16 kg ha⁻¹, em função da diferença na produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) e do teor de P no tecido vegetal, sendo que este último oscilou de 1,6 a 4,4 g kg⁻¹ entre as plantas de cobertura de solo.

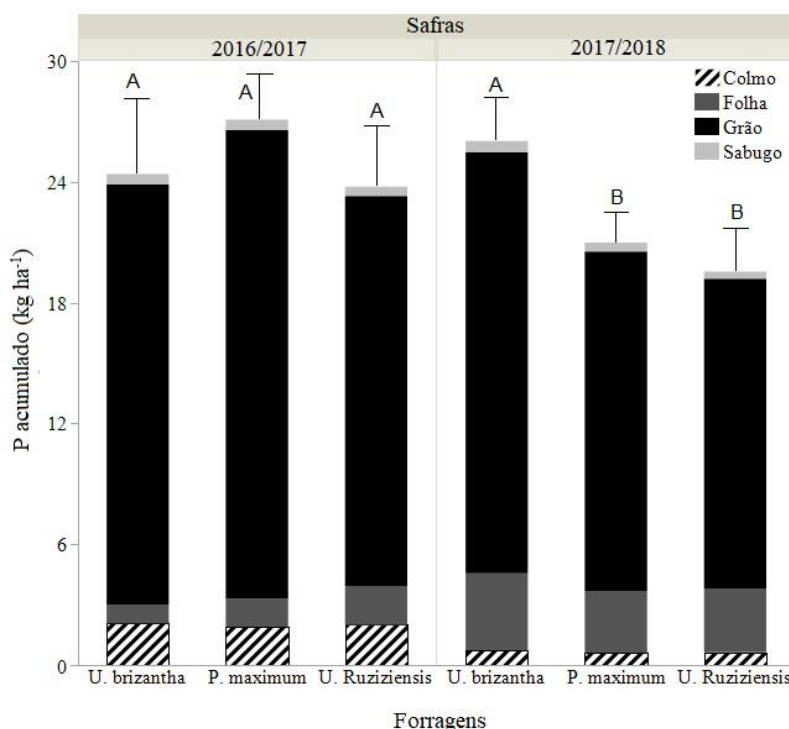


Figura 3. Média do acúmulo de P no milho em função das plantas de cobertura nas safras 2016/17 e 2017/18. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada ano safra, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de LSD.

O maior acúmulo de P no milho (Figura 4) foi encontrado com a doses de 140 e 70 kg ha⁻¹ de N, para a safra de 2016/17. Já para a safra 2017/18, o maior

acúmulo foi verificado para dose 210 kg ha⁻¹, provavelmente em função de um maior crescimento das plantas devido às condições ambientais. No entanto, o efeito da adubação nitrogenada vai além do aumento na produção de biomassa vegetal. O N é um dos principais reguladores da população e da atividade microbiana do solo e pode aumentar a taxa de decomposição dos resíduos de plantas (LEITE et al., 2016). Como parte do P que compõe os tecidos vegetais está em compostos orgânicos, a adubação nitrogenada pode ter acelerado a disponibilização de P e dessa forma deixado disponível para assimilação do milho.

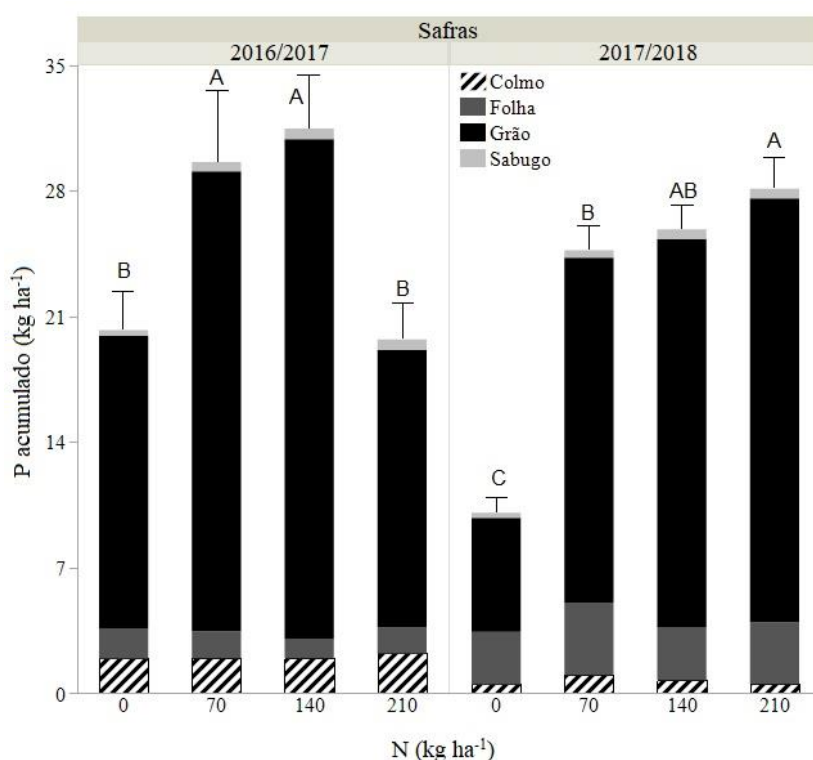


Figura 4. Média do acúmulo de P no milho em função do de N aplicado nas safras 2016/17 e 2017/18. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada ano safra, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de LSD.

2.3.5 Produtividade do milho

Observa-se que nas duas safras, a *U. brizantha* associada à dose de 70 kg ha⁻¹ de N, resultou numa produtividade de grãos superior quando comparado aos outros tratamentos (8825 kg ha⁻¹ e 7174 kg ha⁻¹, respectivamente) (Figura 5), corroborando com dados encontrados por De Carvalho et al. (2015) que obtiveram produtividade de grãos em torno de 7740 kg ha⁻¹ após o cultivo de *U. brizantha*.

Segundo Momesso et al. (2019), a *U. brizantha* como planta antecessora proporcionou maior produtividade de grãos em relação a *U. ruziziensis*, com incremento da ordem de 11%, corroborando os dados obtidos nesse trabalho. Verificou-se também que o *P. maximum* associada à dose de 140 kg ha⁻¹ de N proporcionou a maior produtividade dentre as plantas de cobertura, seguido pela *U. brizantha* e *U. ruziziensis*. Já para o tratamento controle e a dose máxima, verificou-se o mesmo comportamento, sendo a área com *U. ruziziensis* como planta de cobertura representando a maior produtividade, seguida pela *P. maximum* e *U. brizantha*.

Segundo Vilela et al. (2011), as plantas de cobertura do gênero *Urochloa* apresentam decomposição mais acelerada de seus resíduos vegetais e podem promover maiores produtividades de grãos de milho em função da maior eficiência na ciclagem de nutrientes. Efeitos das braquiárias sobre a produtividade de culturas, como milho e soja, já vêm sendo comprovados em sistemas integrados de lavoura-pecuária. As plantas de cobertura braquiária *ruziziensis* (*Urochloa ruziziensis*) e crotalária juncea (*Crotalaria juncea*), cultivadas no final da estação chuvosa, exercem efeitos positivos sobre a produtividade de grãos de milho, cultivado em sucessão e em sistema plantio direto (DE CARVALHO et al., 2015).

A média geral de produtividade obtida neste ensaio foi superior à produtividade média obtida por Damasceno (2019). Oliveira Júnior et al. (2017), avaliando a produtividade de milho no Amazonas em dois sistemas de cultivo, plantio convencional e plantio direto, observaram uma maior produção quando cultivado no sistema de plantio direto sob a palhada de *U. brizantha*; entretanto sua média de produtividade foi inferior a deste trabalho. Segundo Rocha (2017), a *U. ruziziensis* resulta em menor produtividade de grãos de milho em relação a *U. brizantha* e *P. maximum* devido a deficiência de N, dada a alta relação C/N da *U. ruziziensis*.

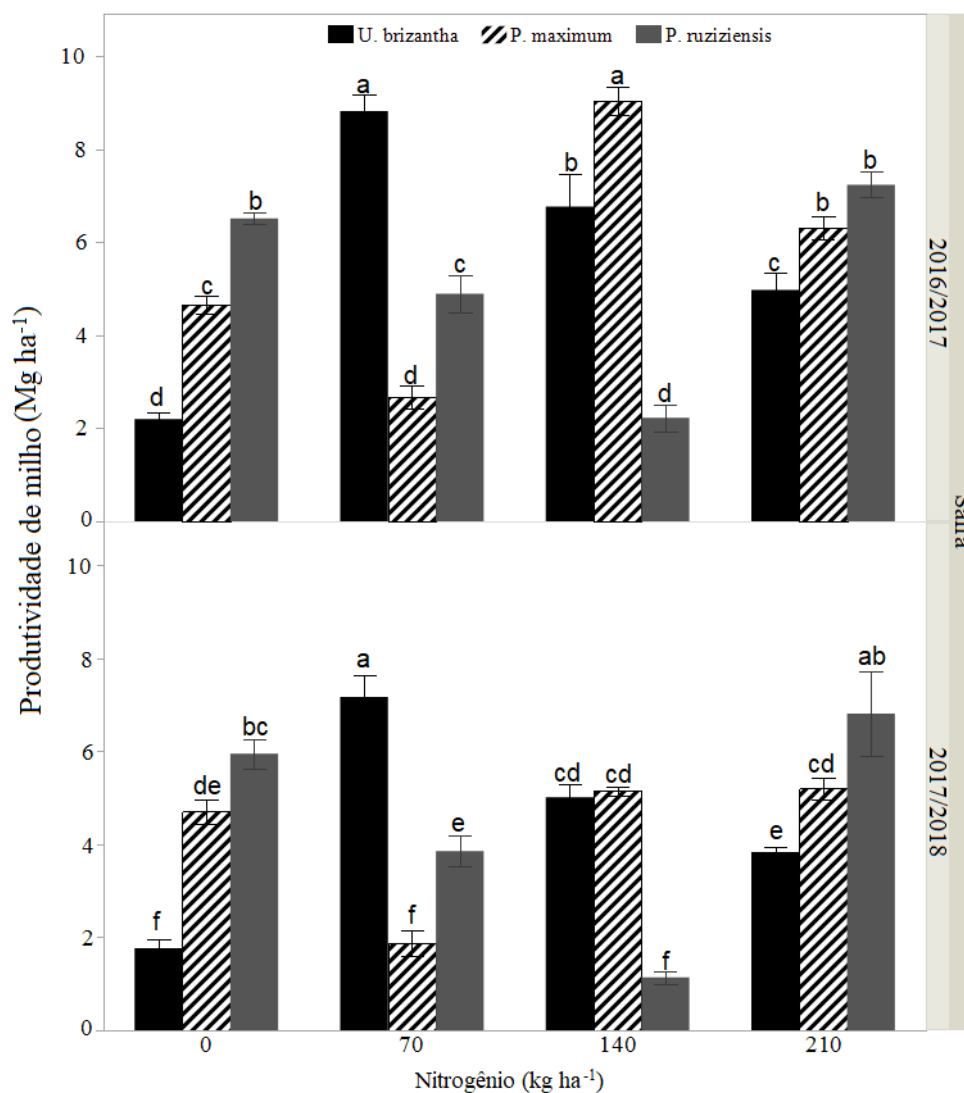


Figura 5. Produtividade de grão de milho cultivado após *U. brizantha*, *P. maximum* e *U. ruziziensis* com a aplicação de 0, 70, 140 e 210 kg ha⁻¹, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de LSD.

1.4 Conclusões

O cultivo de *U. ruziziensis* como planta de cobertura não aumenta o estoque de P orgânico do solo em relação ao cultivo das demais plantas de cobertura.

A adubação nitrogenada altera a concentração de P orgânico do solo.

A espécie *P. maximum* acumula maior quantidade de fitato, que é uma forma P mais recalcitrante que possuem baixa disponibilidade e solubilidade, e consequentemente desacelera a ciclagem de P orgânico no solo.

O acúmulo de P nas plantas de milho, de maneira geral, não variou em função da espécie planta de cobertura na safra 2016/2018, já na safra 2017/2018 o

acumulo maior foi sob solo cultivado com *U. brizantha*. Entretanto, as doses de N contribuíram significativamente para o aumento do P acumulado nas plantas de milho.

Referências bibliográficas

- AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; CERETTA, C. A. **Decomposição e liberação de nutrientes dos resíduos culturais de adubos verdes**. In: LIMA FILHO, O. F. de; AMBROSANO, E. J.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. (Ed.). Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática. Brasília, DF: Embrapa, 2014. v. 1 p. 224-264.
- ALMEIDA, D. S.; ROSOLEM, C. A. Ruzigrass Grown in Rotation with Soybean Increases Soil Labile Phosphorus. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 6, p. 2444-2452, 2016.
- ALMEIDA, D. S.; PENN, C. J.; ROSOLEM, C. A. Assessment of phosphorus availability in soil cultivated with ruzigrass. **Geoderma**, v. 312, p. 64-73, 2018.
- ALMEIDA, D. S. et al. Soil phosphorus bioavailability and soybean grain yield impaired by ruzigrass. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 2, p. 1-10, 2018b.
- ALAMGIR, M.; MCNEILL, A.; TANG, C.; MARSCHNER, P. Changes in soil P pools during legume residue decomposition. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 49, p. 70–77, 2012.
- ASSIS, E. P. M.; CORDEIRO, M. A. S.; PAULINO, H. B.; CARNEIRO, M. A. C. Efeito da aplicação de nitrogênio na atividade microbiana e na decomposição da palhada de sorgo em solo de cerrado sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.33, p.107-112, 2003.
- BODDEY, R. et al. **Nutrient cycling and environmental impact of Brachiaria pastures**. In: MILES, J. et al. (Eds.), Brachiaria: Biology, Agronomy and Improvement. Cali/Brasília: CIAT/EMBRAPA, p. 72-86, 2006.
- BERG, A. S.; JOERN, B. C. Sorption dynamics of organic and inorganic phosphorus compounds in soil. **Journal of Environmental Quality**, v. 35, n. 5, p. 1855-1862, 2006.
- BOER, C. A.; ASSIS, R. L.; SILVA, G. P.; BRAZ, A. J. B. P.; BARROSO, A. L. L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; PIRES, F. R. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, p.1269-1276, 2007.
- BOWMAN, R. A.; COLE, C. V. Transformation of organic phosphorus substrates in soil as evaluated by NaHCO₃ extraction. **Soil Science**, Baltimore, v.125, p.95-101, 1978.

BUCHER, M. Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces. **New Phytologist**, Oxford, v. 173, p. 11–26, 2007.

CANTARELLA, H. **Nitrogênio**. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H.; BRARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTI, R.B.; NEVES, J.C.L. 1. ed. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 7, p. 375-470.

CASALI, C.A.; KAMINSKI, J.; SANTOS, D.; CALEGARI, A.; PICCIN, R.; GEBERT, F.H.; BELLINASSO R.J.S.; ROSSATO, L.F.R. **Formas de fósforo no tecido de plantas anuais de inverno cultivadas em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo de solo**. 2012, September.

CASALI, C. A.; KAMINSKI, J.; PICCIN, R.; ARBUGERI, F. E.; DONEDA, A. Mineralização das formas de fósforo do tecido de plantas de cobertura. **Informações Agronômicas**, v. 135, p. 21-24, 2011.

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. 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** [recurso eletrônico]. Cap. 2, p. 23-33, 2016.

CHAPIN, F.S.; FOLLETT, J.M.; O'CONNOR, K.F. Growth, Phosphate Absorption, and Phosphorus Chemical Fractions in Two *Chionochloa* Species. **Journal of Ecology**, v. 70, p. 305-321, 1982.

CHISHOLM, R.H.; BLAIR, G.J. Phosphorus efficiency in pasture species. II. Differences in the utilization of P between major chemical fractions. **Australian Journal of Agricultural research**, v. 39, p.817-826, 1988.

CLARHOLM, M.; SKYLLBERG, U.; ROSLING, A. Organic acid induced release of nutrients from metal-stabilized soil organic matter -the unbutton model. **Soil Biol Biochem** 84:168–176, 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Perspectivas para a agropecuária / Safra 2017/2018 – v.5, n.6 – Brasília: **Conab**, 2018- v5. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso: 16 de Março de 2018.

CONDRON, L.M.; GOH, K.M. & NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, Oxford, 36:199- 207, 1985.

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**, Amsterdam, v. 64, n. 3/4, p. 197-214, 1995.

CRUSCIOL, C. A. C.; COTTICA, R. L. L.; LIMA E. V.; ANDREOTTI, M.; MORO, E.; MARCON, E. Persistência de palhada e liberação de nutrientes do nabo forrageiro no plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, p.161-168, 2005.

DAMASCENO, L. A. "**Produtividade do milho em sucessão a plantas de cobertura de solo.**" Tese (Doutorado em Agronomia Tropical) – Universidade Federal do Amazonas, 2019.

DA SILVA, G. F.; DE OLIVEIRA, F. H. T.; PEREIRA, R. G.; DIÓGENES, T. B. A.; JÚNIOR, J. N.; DE SOUZA FILHO, A. L. Doses de nitrogênio e de fósforo recomendadas para produção econômica de milho verde em Mossoró-RN. **MAGISTRA**, v. 26, n. 4, p. 467-481, 2017.

DE CARVALHO, A.M.; COSER, T.R.; REIN, T.A.; DE ARAUJO DANTAS, R.; SILVA, R.R.; SOUZA, K.W. Manejo de plantas de cobertura na floração e na maturação fisiológica e seu efeito na produtividade do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 7, p. 551-561, 2015.

DICK, W.A.; TABATABAI, M.A. An Alkaline Oxidation Method for Determination of Total Phosphorus in Soils 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, n. 3, p. 511-514, 1977.

FABRES, A. S.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F.; CORDEIRO, A. T. Níveis críticos de diferentes frações de P em plantas de alface cultivadas em diferentes solos. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, v. 11, p. 51-57, 1987.

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**, Viçosa, v. 31, 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.; RHEINHEIMER, D. S.; FLORES, A. F. C.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J.; LIMA, M. A. S. Phosphorus forms and availability assessed by ³¹P-NMR in successive cropped soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.36, p.2625-2640, 2005.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas.** Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J. **Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações.** **Tópicos em ciência do solo**, 8, pp.141-187, 2013.

GIAVENO, C.; CELI, L.; RICHARDSON, A. E.; SIMPSON, R. J.; BARBERIS, E. Interaction of phytases with minerals and availability of substrate affect the hydrolysis

of inositol phosphates. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 3, p. 491-498, 2010.

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

GAO, Y.; SHANG, C.; MAROOF, M. A.; BIYASHEV, R. M.; GRABAU, E. A.; KWANYUEN, P.; BUSS, G. R. A modified colorimetric method for phytic acid analysis in soybean. **Crop science**, 2007, 47.5: 1797-1803.

GUIMARÃES, M. M. H. J.; BARROS SOARES, E. M.; RIBEIRO DA SILVA, I.; LIMA NEVES, J. C.; OLIVEIRA GUIMARÃES SILVA, L. Decomposição de resíduos de culturas e mineralização de nutrientes em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, 2015.

GREEN E.S.; ZANGERL A.R.; BERENBAUM M.R. Effects of phytic acid and xanthotoxin on growth and detoxification in caterpillars. **Journal of chemical ecology**, v. 27, n. 9, p. 1763-1773, 2001.

HALL, H.; LI, Y.; COMERFORD, N.; GARDINI, E.A.; CERNADES, L.Z.; BALIGAR, V.; POPENOE, H. Cover crops alter phosphorus soil fractions and organic matter accumulation in a Peruvian cacao agroforestry system. **Agroforestry Systems**, v. 80, n. 3, p. 447–455, 2010.

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

HE, Z.; HONEYCUTT, C.W. A modified molybdenum blue method for orthophosphate determination suitable for investigating enzymatic hydrolysis of organic phosphates. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 36, n. 9-10, p. 1373-1383, 2005.

HOBBIE, S.E.; EDDY, W.C.; BUYARSKI, C.R.; ADAIR, E.C.; OGDahl, M.L.; WEISENHORN, P. Response of decomposing litter and its microbial community to multiple forms of nitrogen enrichment. **Ecological Monograph**, v.82, p. 389-405, 2012.

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

ROCHA, K. F. **Dinâmica do nitrogênio em rotações de forrageiras com milho**. Tese (Doutorado em Agronomia - Agricultura) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2017.

KELLER, M.; OBERSON, A.; KATHRIN E. A.; TAMBURINI, F.; MÄDER, P.; MAYER, J.; FROSSARD, E.; BÜNEMANN, E. K. Phosphorus forms and enzymatic

hydrolyzability of organic phosphorus in soils after 30 years of organic and conventional farming. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Göttingen, v.175, p.385-393, 2012.

LATTA, M.; ESKIN, M. A simple and rapid colorimetric method for phytate determination. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 1980, 28.6: 1313-1315.

LEE, C. H.; PARK, C. Y.; PARK, K. D.; JEON, W. T.; KIM, P. J. Long-term effects of fertilization on the forms and availability of soil phosphorus in rice paddy. **Chemosphere**, Amsterdam, v.56, p.299-304, 2004.

LEE Y.-S.; MULUGU S.; YORK J.D.; O'SHEA E.K Regulation of a cyclin-CDK-CDK inhibitor complex by inositol pyrophosphates. **Science**, v. 316, n. 5821, p. 109-112, 2007.

LEITE, J. N. F.; CRUZ, M. C. P. D.; FERREIRA, M. E.; ANDRIOLI, I.; BRAOS, L. B.. Organic and inorganic P forms in soil as affected by cover crops and nitrogen fertilization. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 11, p. 1880-1889, 2016.

LEITE, Jacqueline Nayara Ferraça. "**Formas orgânicas e inorgânicas de fósforo no solo em função de plantas de cobertura e de adubação nitrogenada.**" Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, 2015.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A.D. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 1997.

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

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

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. **Academic Press**. San Diego, 1995. 889 p.

MERLIN, A. **Disponibilidade de fósforo para a soja cultivada sobre braquiária.** 2008, 95 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, 2008.

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

MIYACHI, S.; TAMIYA, T. Distribution and turnover of phosphate compounds in growing chlorella cells. **Plant & Cell Physiol**, 2:405-414, 1961.

MONTALVO, D., F.; DEGRYSE, M.J.; MCLAUGHLIN. 2014. Fluid fertilizers improve phosphorus diffusion but not lability in Andisols and Oxisols. **Soil Science Society of American Journal**, 78:214–224.

MOMESSO, L.; CRUSCIOL, C. A.; SORATTO, R. P.; VYN, T. J.; TANAKA, K. S.; COSTA, C. H.; CANTARELLA, H. Impacts of Nitrogen Management on No-Till Maize Production Following Forage Cover Crops. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 2, p. 639-649, 2019.

MURPHY, J.A.M.E.S. and RILEY, J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica chimica acta**, 27, pp.31-36.

NASCIMENTO, Carlos Antonio Costa do. **Frações de fósforo no solo e aproveitamento de fosfatos pela cana-de-açúcar**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2016.

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 American Journal**, 82, 2018.

NAGY R., GROB H., WEDER B., GREEN P., KLEIN M., FRELET BARRAND A., SCHJOERRING J.K., BREARLEY C., MARTINOIA E. The Arabidopsis ATP-binding cassette protein AtMRP5/AtABCC5 is a high affinity inositol hexakisphosphate transporter involved in guard cell signaling and phytate storage. **Journal of Biological Chemistry**, 284, 33614–33622, 2009.

NEGASSA, Wakene; LEINWEBER, Peter. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 3, p. 305-325, 2009.

NOVAIS, R. F. **Fertilidade do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

OLIVEIRA, R. A. "**Decomposição de plantas de cobertura e efeito no rendimento da cebola e na biodisponibilidade de fósforo em sistema de plantio direto**". Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Florianópolis, 2015.

OLIVEIRA, I. J.; ATROCH, A. L.; DIAS, M. C.; GUIMARÊS, L. J.; GUIMARÃES, P. E. de O. Seleção de cultivares de milho quanto à produtividade, estabilidade e adaptabilidade no Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.52, n.6, p.455-463, jun. 2017

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.

PARIZ, C.M; ANDREOTTI, M; BUZETTI, S; BERGAMASCHINE, A.F; ULIAN, N.A; FURLAN, L.C; MEIRELLES, P.R.L. CAVASANO FA. Straw decomposition of nitrogen-fertilized grasses intercropped with irrigated maize in an integrated crop-livestock system. **R Bras Ci Solo**. 35:2029-37, 2011.

PEREIRA, J. M. et al. Efeito do alumínio sobre a absorção, o acúmulo e o fracionamento do fósforo em sorgo. **Bragantia**, v. 67, p. 961-967, 2008.

RAGHOTHAMA, K.G. Phosphorus and plant nutrition: an overview. In: Sims JT, Sharpley AN (eds) Phosphorus: agriculture and the environment. vol phosphorusagric. **American Society of Agronomy**, pp 355-378, 2005.

RABOY V. Myo-Inositol-1,2,3,4,5,6-hexakisphosphate. *Phytochemistry*, 64, 1033–1043, 2003.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. & CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.589-597, 2000.

RHEINHEIMER, D.S; ANGHINONI, I. "Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo." **Pesq. agropec. bras.**, Brasília 36, no. 1 (2001): 151-160.

RICHARDSON, A.E.; GEORGE, T.S.; HENS, M.; SIMPSON, R.J. **Utilization of soil organic phosphorus by higher plants**. In: Turner BL, Frossard E, Baldwin DS (eds) Organic phosphorus in the environment. CABI, Wallingford, pp 165–184, 2005.

ROSOLEM, C.A; CALONEGO, J.C; FOLONI, J.S.S. Lixiviação de potássio da palhada de espécies de cobertura de solo de acordo com a quantidade de chuva aplicada. **R Bras Ci Solo**. 2003;27:355-62.

ROSSI, C. Q. **Matéria orgânica do solo e fósforo orgânico em Cronosseguência de cana-de-açúcar cultivada no cerrado**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SANTI, A.; AMADO, T. J. C.; ACOSTA, J. A. A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I - Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.1075-1083, 2003.

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.

SCHMITT, D. E. **Disponibilidade de fósforo de fontes orgânicas às plantas em solos com diferentes teores iniciais de fósforo**. Tese (doutorado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Lages, 2016.

SCHMIDT, G.; THANNHAUSER, S. J. A method for the determination of desoxyribonucleic acid, ribonucleic acid, and phosphoproteins in animal tissues. **J. Biol. Chem.**, 161, 83-89. 1945.

SCHACHTMAN D.P., REID R.J., AYLING S.M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. **Plant physiology**, v. 116, n. 2, p. 447-453, 1998.

SILVA, E. C.; AMBROSANO, E. J.; SCIVITTARO, W. B.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; CARVALHO, A. M. **Adubação verde como fontes de nutrientes às culturas**. In: LIMA FILHO, O. F. L.; AMBROSANO, E. J.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. (Ed.) *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e práticas*. Brasília: Embrapa, 2014^a. p. 265-305.(fitato)

TATE, K. R. **The biological transformation of P in soil**. **Plant and Soil**, v. 76, p. 245-256, 1984.

TATE, K.R.; NEWMAN, R.K. Phosphorus fractions of a climosequence of soils in New Zealand tussock grassland. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.14, p.91-196, 1982.

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

TIESSEN, H.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid Northeastern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v.38, p.139-151, 1992.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; FABIAN, A. J. Produção de matéria seca por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, p.421-428, 2008.

TOKURA, A. M.; FURTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; CURI, N.; SANTOS, J. Z. L.; ALOVISI, A. A. Dinâmica das formas de fósforo em solos de textura e mineralogia contrastantes cultivados com arroz. **Acta Scientiarum. Agronomy, Maringá**, v.33, p.171-179, 2011.

TURNER, B. L. Resource partitioning for soil phosphorus: a hypothesis. **Journal of Ecology**, London, v.96, p.698–702, 2008.

VILELA, L.; MARTHA JUNIOR, G.B.; MACEDO, M.C.M.; MARCHÃO, R.L.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; PULROLNIK, K.; MACIEL, G.A. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1127-1138, 2011. DOI: 10.1590/ S0100-204X2011001000003

WINKLER, U.; ZOTZ, G. Highly efficient uptake of phosphorus in epiphytic bromeliads. **Annals of botany**, v. 103, n. 3, p. 477-484, 2008.

YAN Y, Li. W.; YANG, J.; ZHENG, A.; LIU, F.; FENG, X.; SPARKS, D.L. Mechanism of myo-inositol hexakisphosphate sorption on amorphous aluminum hydroxide:

spectroscopic evidence for rapid surface precipitation. **Environmental science & technology**, v. 48, n. 12, p. 6735-6742, 2014.

YANG, K.; ZHU, J.; GU, L. Y.; WANG, Z. Changes in soil phosphorus fractions after 9 years of continuous nitrogen addition in a *Larix gmelinii* plantation. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v.71, p.1-8, 2014.

CAPÍTULO 2: NITROGÊNIO AFETA A DIFUSÃO DE P EM SOLO CULTIVADO COM PLANTAS COBERTURA.

RESUMO

A baixa mobilidade e o baixo teor de P nos solos tropicais é resultado da interação do P com os componentes do solo. No entanto, fertilizantes que contêm nitrogênio e fósforo tendem a favorecer a mobilidade do P no solo e o acúmulo de P nas plantas. Desta forma, o conhecimento da dinâmica da interação N×P no sistema solo-planta é de fundamental importância para o manejo eficiente do uso simultâneo destes nutrientes na adubação. Nesse sentido o presente trabalho teve por objetivo avaliar a mobilidade de P em solo previamente cultivado com plantas de cobertura, na presença e ausência de N. O experimento foi realizado em duas etapas. Na primeira etapa foram cultivadas três espécies de planta de cobertura em vasos de oito litros por cerca nove meses; em seguida, esses vasos foram desmontados e então o solo foi armazenado para incubação em placas de petri. Na segunda etapa, foi realizado a incubação do solo (com N e sem N) com grânulos do fertilizante fosfatado (superfosfato triplo), que foram depositados ao centro de placas de Petri, e incubadas com temperatura e umidade controladas. O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, com quatro repetições, três plantas de cobertura e um tratamento controle (sem planta), na presença ou ausência de N e para dois solos. Ao final do período de incubação foi realizada a amostragem das placas de petri, na forma de anéis concêntricos, a partir do ponto de aplicação do fertilizante, para avaliar os efeitos dos tratamentos na difusão e a disponibilidade de P. Verificou-se que em solo arenoso, o P se difunde mais rapidamente que em argiloso. A aplicação de N contribui para aumentar a difusão do P no solo. A *U. ruziziensis* reduz a mobilidade do P no solo argiloso, no entanto, esse efeito foi minimizado com a aplicação de N.

Palavras-chave: Difusão de P; Braquiária; Superfosfato triplo; Nitrogênio.

ABSTRACT

The low mobility and P concentration in tropical soils is the result of the interaction between P and soil components. Due the interactions with soil colloids, P exhibits mobility. However, fertilizers containing nitrogen and phosphorus tend to favor soil mobility rather than P soil in plants. Thus, knowledge of the dynamics of N $\times$ P interaction in the soil-plant system is of fundamental importance for the efficient management of the simultaneous use of its nutrients in fertilization. Therefore, the present work aims to evaluate the mobility of a soil previously cultivated with 3 species of cover crops. The experiment was carried out in two stages, in the first stage they were grown in three 8L pot cover plants for about 9 months, then the pots were disassembled and then the soil was placed for incubation in the petri dishes. In the second stage, the soil was incubated with phosphate fertilizers, triple superphosphate, which were deposited in the center of Petri dishes and incubated at temperature and water filter. The experimental design was completely randomized, with 3 cover plants and 1 control (without crop), presence or absence of N, 2 soils and 4 replications. The incubation end date was the sampling of petri dishes, in the form of concentric rings, from the fertilizer application point, being possible to evaluate the effects on P e availability. In sandy soil, P diffuses faster than in clayey soils and also that application of n contributed to increase P diffusion in the soil. U. ruziziensis reduced the mobility in clay soil, however, this effect was minimized by N application.

Keywords: P diffusion; Brachiaria; Triple superphosphate; Nitrogen

2.1 Introdução

O baixo teor de P na solução e sua baixa mobilidade no solo é resultado da interação do P com os componentes do solo. Na fração sólida do solo o P pode ser encontrado em ligações químicas com metais de cálcio, ferro e alumínio, sendo também ligados nas argilas silicatadas de baixa atividade e ainda adsorvidos aos oxihidróxidos de ferro e alumínio e também à matéria orgânica (GATIBONI et al., 2007). Devido às suas interações com os colóides do solo, o P apresenta mobilidade bastante restrita no solo, deslocando apenas poucos milímetros por dia após ser aplicado no solo (BARBER, 1995; PICOLLI, 2017).

O solo sob influência do sistema radicular tem propriedades químicas, físicas e biológicas que são diferentes do restante do solo. Os principais fatores que influenciam na absorção de P pelas plantas são: morfologia da raiz, presença de associação micorrízicas, exsudatos radiculares, pH do solo, tipo de solo, fonte de P utilizado, etc. (WANG et al., 2010).

As plantas de cobertura podem aumentar a disponibilidade de P em duas circunstâncias: durante o seu crescimento, em razão da modificação das propriedades do solo e da mobilização do P; e depois de sua decomposição, quando o P orgânico da planta se torna acessível para cultura sucessora (JONES et al., 1998; REDEL et al., 2007). A relação C/N determinará o processo de decomposição, mineralização e disponibilidade de nitrogênio para as plantas, assim como também disponibilizará, indiretamente P ao sistema. A inclusão de fontes de N e C como fertilizantes minerais, resíduos orgânicos de baixa relação C/N e presença de plantas (rizodeposição), intensificam a atividade microbiana. Isso indica que a adubação nitrogenada maximiza a disponibilização de nutrientes pelo resíduo e a absorção pelas plantas, melhorando a eficiência na ciclagem de nutrientes. Como o P encontra-se associado a compostos orgânicos no tecido vegetal, o processo de decomposição pelos microrganismos do solo é fundamental para sua mineralização e disponibilização (TURNER, 2008; KELLER et al., 2012).

Além do efeito do N no processo de mineralização do P_o, plantas bem nutridas em N apresentam maior absorção de P. Fertilizantes que contem ambos nutrientes tendem a favorecer a mobilidade do P no solo e o acúmulo de P nas plantas (MONTALVO et al. 2014; NASCIMENTO, 2016; NASCIMENTO et al., 2018).

A presença de ácidos orgânicos de baixo peso molecular (AO) liberados pelas plantas de cobertura antes e durante sua decomposição, como os ácidos cítrico e málico, podem competir pelos sítios de adsorção com o P, o que deixa o nutriente mais disponível na solução do solo para a absorção pelas plantas (GUPPY et al., 2005). Nesse sentido alguns estudos demonstram que exsudados de guandu liberam ácidos orgânicos (oxálico, malônico e piscídico) que são capazes de deslocar o P associado ao Fe e Al do solo de baixa solubilidade. A quantidade de P que as plantas de cobertura podem extrair do solo depende da espécie, da quantidade disponível do nutriente e do comprimento e das características morfológicas e fisiológicas das raízes (GAMA RODRIGUES et al., 2007; CRUSCIOL et al., 2005).

Desta forma, o conhecimento da dinâmica da interação N×P no sistema solo-planta é de fundamental importância para o manejo eficiente do uso simultâneo destes nutrientes na adubação e para o desenvolvimento de novas tecnologias de fertilizantes com base no princípio da sustentabilidade. Nesse sentido o presente trabalho teve por objetivo avaliar a mobilidade de P em solo previamente cultivado com plantas de cobertura, na presença e ausência de N.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Cultivo das plantas de cobertura

O ensaio foi conduzido em casa de vegetação na FCA/UNESP (Botucatu-SP) em delineamento inteiramente casualizado, com três espécies vegetais e um tratamento controle (sem planta), em dois solos com texturas distintas e quatro repetições, como descrito na tabela 4. Para instalação do ensaio, foi coletado solo (0-20 cm) de áreas contendo solos de textura argilosa e arenosa (Tabela 5). O solo foi seco ao ar e passado em peneira com malha de 2 mm para montagem dos vasos de 8 kg, para posterior semeadura das plantas de cobertura (*U. ruziziensis*, *U. brizantha* e *P. maximum*). Posteriormente à secagem, foi realizada a calagem desses solos a fim de elevar a saturação por bases a 60%, deixando incubados por 45 dias. Em seguida realizou-se a adubação com 100 mg kg⁻¹ de N, 40 mg kg⁻¹ de P e 120 mg kg⁻¹ de K (CASTOLDI et al., 2014). Também se aplicaram micronutrientes nas seguintes doses: 1,5 mg kg⁻¹ de B; 2,5 mg kg⁻¹ de Cu; 2,0 mg kg⁻¹ Zn e 0,25 mg

kg⁻¹ de Mo (De Bona et al., 2008). Foram utilizadas 15 sementes por vaso, fazendo-se o desbaste aos 10 dias após a emergência para manter 10 plantas por vaso. A alta densidade de plantas teve como finalidade a produção de uma grande quantidade de raízes para ocupar o máximo de volume possível, de forma que todo solo contido no vaso pode ser considerado solo rizosférico. A umidade do solo foi mantida no mínimo a 60% da capacidade máxima de retenção de água. Foram conduzidas quatro repetições para cada solo sem o cultivo de plantas, a fim de verificar o movimento de P sem a influência do cultivo prévio das plantas de cobertura.

Tabela 4. Descrição dos pré-tratamentos do solo para estudo da difusão do fósforo no solo

Tratamento	Cobertura	Argila (%)	Classe de Solo
1	<i>U. Brizanta</i>	61	Nitossolo Vermelho Distroférrico
2	<i>U. Ruziziensis</i>		
3	<i>P. Maximum</i>		
4	Controle		
5	<i>U. Brizanta</i>	16	Mistura de Argissolo Vermelho-Amarelo + Neossolo Litólico
6	<i>U. Ruziziensis</i>		
7	<i>P. Maximum</i>		
8	Controle		

Antes da instalação do experimento foram retiradas amostras dos solos para caracterização de fertilidade (Tabela 5) (RAIJ et al., 2001) e determinação das quantidades de areia, silte e argila (EMBRAPA, 1997). O teor de matéria orgânica (MO) foi determinado de acordo com método descrito por Walkley e Black (1934) e o pH em solução de cloreto de cálcio 0,01 mol L⁻¹ (CaCl₂) foi determinado com auxílio de potenciômetro digital. A acidez potencial a pH 7,0 (H+Al) foi determinada utilizando solução tampão SMP. O teor de fósforo (P), cálcio (Ca⁺²), magnésio (Mg⁺²) e potássio (K⁺) trocáveis foram extraídas com resina trocadora de íons. A concentração de P foi determinada em espectrofotômetro UVmini-1240 (Shimadzu Scientific Instruments, Kyoto, Japão) e os teores de Ca⁺², Mg⁺² e K⁺ foram determinados utilizando espectrômetro de absorção atômica modelo AAS7000 (Shimadzu Scientific Instruments, Kyoto, Japão). Foi determinada também a

capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) do solo de acordo com Nair et al. (1984).

Tabela 5. Caracterização química do solo coletado na camada de 0,00 – 0,20 m de profundidade para montagem dos vasos.

Solo	pH CaCl ₂	M.O g kg ⁻¹	P- Resina mg kg ⁻¹	K 6,6	Ca 36	Mg 13	H+Al 31	V 64	CMAP mg kg ⁻¹	Argila 61	Areia 20	Silte 19
				-----mmol _c kg ⁻¹ -----				%		-----%-----		
Argiloso	5,5	23	11	6,6	36	13	31	64	1357	61	20	19
Arenoso	3,9	4,6	2,8	0,8	2,3	0,8	45,7	8	382	17	68	15

MO= Matéria orgânica; V= Saturação por bases; CMAP= Capacidade de adsorção de fósforo

2.2.2 Determinação da zona de difusão do P ao longo do tempo

As plantas de cobertura foram cultivadas por cerca de oito meses em casa de vegetação com controle ambiental automatizado. Ao final do período de cultivo das plantas de cobertura, o solo foi destorroado e peneirado a < 2 mm, afim de se obter solo para confecção das placas de petri para realizar a determinação da zona de difusão de P.

Para determinação e visualização da zona de difusão de P ao longo do tempo foi utilizado o método não destrutivo, proposto por Degryse e McLaughlin (2014). O método baseia-se no princípio que o P do fluxo difusivo seja capturado por um papel filtro (Whatman No. 1) embebido em solução de óxido de Fe disposto sobre a superfície do solo. Após o surgimento da coloração indicando a zona de difusão é possível calcular a área do círculo formado pela reação do P com o óxido de Fe (DEGRYSE e MCLAUGHLIN, 2014).

Para realizar a incubação das placas de petri, o experimento seguiu a metodologia proposta por Lombi et al. (2005). As placas de petri utilizadas apresentavam as seguintes especificações: 8,6 cm de diâmetro e 1,1 cm de altura. Foram adicionados para cada placa uma quantidade de solo para atingir a densidade de 1,2 g cm⁻³ (CÉSAR, 2016). Posteriormente, com o auxílio de uma seringa, foi adicionado a quantidade de água necessária para atingir 60% da capacidade máxima de retenção. As placas de petri foram tampadas e vedadas com

“parafilm”, recobertas com papel alumínio e pré-incubadas por 24 horas com temperatura controlada em 25°C.

Após a pré-incubação, as placas foram abertas e um grânulo de superfosfato triplo foi adicionado exatamente no centro da placa de petri. Os grânulos foram selecionados por peso, objetivando colocar 8 mg P por placa de petri. As placas contendo o grânulo de fertilizantes fosfatado foram conduzidas com e sem adição de N na forma de sulfato de amônio. A quantidade de N adicionada foi calculada com base no fornecimento de N em semeadura (30 kg ha⁻¹). Em seguida, as placas foram tampadas e recobertas com parafilm e papel alumínio e mantidas incubadas em temperatura controlada (25°C) durante todo o período experimental.

A avaliação do raio de difusão foi conduzida aos um, oito, 15, 29 e 43 dias após a incubação das placas de petri com o fertilizante. Em cada época de avaliação, as placas de petri foram abertas e os papéis de filtro foram adicionados sobre o solo, ficando 5 minutos em contato para primeira leitura, 15 minutos para a segunda e para terceira avaliação e 30 minutos em contato com o solo nas duas últimas leituras. Após serem removidos da superfície do solo, os papéis filtro foram passados em água deionizada, para retirar as partículas de solo retidas ao papel, e colocados por 30 minutos em uma solução de molibdato de amônio [(NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O] 8,1 mmol L⁻¹.

Em seguida, os discos foram transferidos para uma solução de (NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O (10g L⁻¹) + HNO₃ (1 mol L⁻¹) por 15 minutos, para depois serem dispostos em uma bandeja, tomando-se o cuidado para manter a superfície que ficou em contato com o solo voltada para cima. Então foi pipetado sobre os papéis 1,5 mL de uma solução de verde de malaquita (4 g L⁻¹ em 1 mol L⁻¹ HCl), deixando reagir por 15 minutos. Posteriormente, os papéis foram lavados com água deionizada e transferidos para uma solução de H₂SO₄ (1mol L⁻¹) por cerca de 15 minutos, para logo na sequência serem transferidos para uma solução de água deionizada, para remover o excesso de ácido, e colocados para secar.

Por fim, os papéis de filtro foram escaneados e analisados utilizando software GNU image Manipulation Program v.2.8.14 (Free Software Foundation, Boston, MA). As imagens digitalizadas foram convertidas em imagens binárias preto-branco,

usando um valor de cor limiar (por exemplo, 120 na escala 0-255) e a área da zona P foi quantificada usando o comando do histograma.

Ao final do período de incubação, as placas de petri foram abertas e o solo amostrado na forma de anéis concêntricos, retirados em torno do ponto de aplicação do granulo, com auxílio de uma série de cilindros. As secções foram amostradas nos raios de 7,75 mm, 13,5 mm, 25,5 mm e 43 mm. As amostras foram secas em estufa a 40°C, pesadas e acondicionadas para posterior determinação de P extraível com resina trocadora de ânions.

2.2.3 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à ANOVA utilizando-se o programa JMP (versão 2014, SAS Institute Inc., Cary, NC, EUA). Os fatores planta de cobertura e presença de N foram tratados como efeitos fixo. As médias dos efeitos principais bem como de suas interações foram separadas pelo teste LSD a 5% de probabilidade.

2.3 Resultados e Discussões

2.3.1 Raio de Difusão de P ao longo do tempo.

Foi observado que a difusão ocorreu de forma mais rápida quando na presença de nitrogênio, e também que a presença das plantas de cobertura influenciou na difusão de P (Figura 6). A difusão do P foi maior no solo arenoso, devido a sua baixa capacidade de adsorção, sendo que, ao final do período de incubação, variou de 14,32 a 15,82 mm de raio entre os tratamentos. Por outro lado, no argiloso, a variação foi de 10,83 a 12,49 mm.

Observou-se também que em ambos os solos, na presença ou ausência de N, a *U. ruziziensis* apresentou o mesmo comportamento, impedindo de certa maneira a difusão de P. Os efeitos do *P. maximum* e da *U. brizantha* foram similares.

Na análise realizada após um dia de incubação, a difusão ocorreu de forma rápida, verificando-se que a zona da difusão para o solo arenoso já havia atingido cerca de 70 a 80 % do máximo, que foi atingido aos 43 dias, na ausência e presença de N. Para o solo argiloso, após um dia de incubação a zona de difusão de P atingiu

cerca de 50 a 60% da difusão máxima, que também ocorreu aos 43 dias de incubação tanto na ausência como na presença de N. Após o contato do fertilizante com o solo, a água move-se rapidamente para o interior no grânulo, com isso grande parte dos compostos solúveis se movimentam-se para fora do grânulo na primeira semana após a aplicação do fertilizante (WILLIAMS, 1971). Lawton e Vomocil (1954) verificaram que 50 a 80% do P do SFT (superfosfato triplo) moveram-se para fora do grânulo em apenas 24 horas após a aplicação. César (2016) verificou que cerca 70 a 80% do P do fertilizante também se moveu após um dia de incubação, em solos de baixa e alta adsorção, respectivamente.

O fertilizante SFT apresenta difusão um pouco mais lenta que o MAP, provavelmente devido a mudanças nas propriedades do solo associado ao cátion que acompanha o fertilizante MAP, que ajuda a aumentar a mobilidade do P (NASCIMENTO et al., 2018). Porém, observou-se nesse estudo que a presença de N facilitou a difusão de P, embora as diferenças foram menos acentuadas no solo de alta adsorção. Isso pode ser atribuído ao fato de que o N é um elemento muito dinâmico no solo e, com isso, quando ambos os fertilizantes entram em contato com o solo cria-se uma zona de saturação ao redor dos grânulos, alterando pH, a concentração e a atividade de elementos que contribuem para o processo de difusão (BOLAN e HEDLEY, 1990).

As plantas de cobertura cultivadas previamente também podem ter influenciado na promoção do raio de difusão, pois elas exsudam ácidos orgânicos que atuam na nutrição das plantas, principalmente na disponibilização de P em solos ácidos (HU et al., 2005). Esses ácidos orgânicos são capazes de competir pelos sítios de adsorção dos compostos de Ca, Fe, Al presentes no solo, e então reduzir a adsorção de P pela formação de complexos com esses metais e pela competição desses ácidos com os sítios de adsorção de P na superfície dos óxidos de Fe e Al através de reações de troca de ligantes (JONES et al., 1998, GUPPY et al., 2005).

No entanto, observou-se que em solo cultivado com *U.ruziziensis* o raio de difusão foi menor quando comparado ao das outras espécies, demonstrando que apesar de ser uma espécie que exsuda grandes quantidade de ácidos orgânicos (WENZL et al., 2001), esses não foram suficientes para favorecer a difusão de P. O que pode justificar este resultado é que um dos efeitos que a matéria orgânica pode ter na disponibilidade de P é o aumento da formação de pontes de ligações metálicas, incrementando a adsorção (PAVINATO et al., 2008).

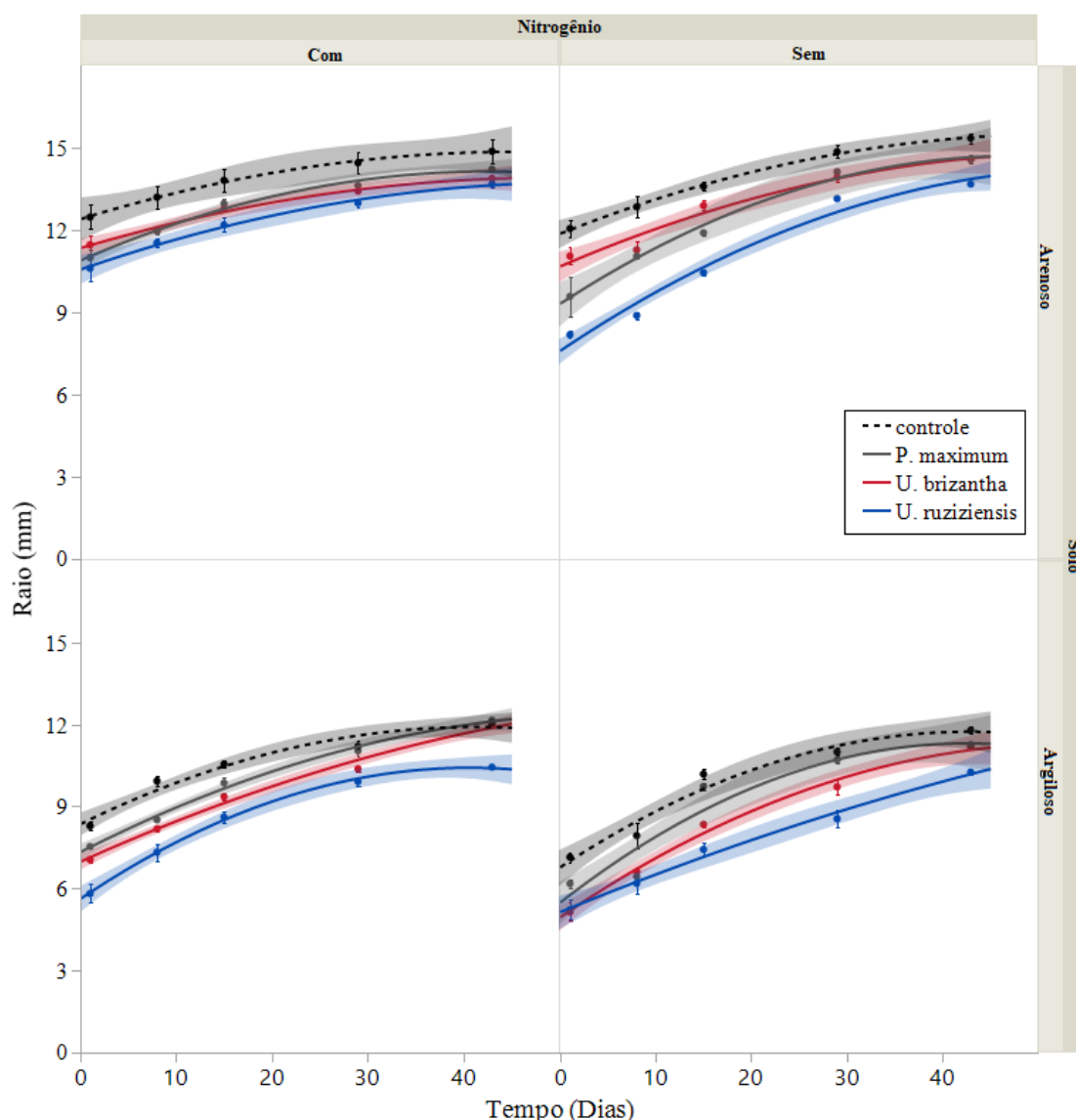


Figura 6: Raio da zona de difusão do P aos 1, 8, 15, 29, 43 dias, após a adição do fertilizante no centro da placa de petri nos solos Arenoso e Argiloso, com e sem nitrogênio, após o cultivo de plantas de cobertura.

Degryse et al. (2014) observaram que, em função do tempo de incubação, as maiores concentrações de P foram encontradas em regiões mais distantes da localização de deposição do grânulo, em tratamentos com conteúdo volumétrico de água maior, o que, corroborando com os dados apresentados nesse ensaio, demonstra que a medida que o grânulo de fertilizante entra em contato com o solo o P se movimenta e aumenta seu teor nas regiões mais distantes. Os principais fatores que afetam o fluxo difusivo do P, juntamente ao teor de água, são a capacidade do solo de adsorvê-lo e a quantidade de P lábil adicionada via

fertilizante. A concentração em volta do grânulo de fertilizante, por ser inicialmente muito alta, afeta as reações de adsorção e precipitação (BOLLAND e GILKES, 1998). Altas concentrações de P no entorno do grânulo do fertilizante podem induzir reações de precipitação, que podem ser diminuídas na presença de altas umidades por diminuírem a saturação da solução, disponibilizando assim mais P (DEGRYSE et al., 2014).

2.3.2 Difusão do P – Análise química P resina - fertilizante

A difusão do fósforo está relacionada com as reações de adsorção e precipitação que ocorrem logo que o grânulo do fertilizante entra em contato com solo (MCLAUGHLIN et al., 2011). Essas reações são influenciadas por fatores como fertilizantes, teor de argila, teor de Fe, Al e Ca e o pH do solo (GATIBONI, 2007). A primeira zona é o grânulo residual e sua interface com o solo, incluindo os compostos insolúveis presentes no grânulo original e os precipitados na solução saturada (SILVA, 2013). A segunda região é descrita como a região saturada de P imediatamente próxima ao fertilizante, onde a capacidade de adsorção do solo foi excedida e precipitados se formam pela reação dos íons liberados e materiais orgânicos (BENBI e GILKES, 1987). Já a zona insaturada em P é a terceira região descrita por Benbi e Gilkes (1987), que é a região onde a capacidade máxima de adsorção não é atingida. Desta região em diante, o P está mais sujeito aos processos de adsorção do que precipitação, uma vez que as soluções não estão com concentrações tão elevadas como anteriormente.

Com relação à quantidade de P, no solo arenoso verificou-se que a maior quantidade na secção 0-7,75 mm foi observada para o tratamento com *P. maximum* na ausência de nitrogênio, enquanto o menor foi com *U. brizantha* e *U. ruziziensis*. Já na presença de N não se verificou diferença entre os tratamentos. Na secção 7,76 – 13,5 mm o teor de P com a *U. brizantha* foi superior à *U. ruziziensis* e ao *P. maximum* na ausência de N; no entanto, na presença de N todos os tratamentos apresentaram o mesmo comportamento, não diferindo entre si. Na secção 13,6 – 25,5 mm a quantidade de P apresenta um comportamento similar à secção anterior, tanto na presença quanto na ausência de N. Na última secção, quando na ausência de N, observou-se que o *P. maximum* apresenta o maior teor de P, enquanto a *U.*

ruzizensis o menor. Já na presença de N, o controle apresenta uma maior mobilidade de P, enquanto os demais tratamentos não se diferem.

No solo argiloso, observou-se que na primeira secção, tanto na presença quanto na ausência de N, não ocorreram diferenças entre o P resina -fertilizante. Na secção 7,76-13,5 mm e 13,6-25,5 mm, quando na ausência de N, o tratamento controle foi o que apresentou maior teor de P, sendo esse comportamento similar quando na presença de N. Na última secção, na ausência de N, os tratamentos não diferem entre si. No entanto, pôde-se observar que no tratamento controle o P se movimentou a uma maior distância.

De forma geral observou-se que houve maior recuperação do P-resina fertilizante na ausência de N em ambos os solos, uma vez que a presença do N facilita a difusão do P, diluindo a concentração de P em um maior volume de solo, o que ficou comprovado com a menor recuperação de P resina-fertilizante nas placas que receberam o N. A dinâmica do P muda com a adubação nitrogenada, que contribui para o aumento da adição de resíduos orgânicos ao solo e, consequentemente, interfere na ciclagem de P. Além disso, fontes amoniacais conseguem saturar os sítios de troca e estimular a extrusão de H^+ , o que causa uma diferença no pH do solo, promovendo melhorias na mobilidade de P (NASCIMENTO et al., 2018). No entanto apesar do N contribuir para difusão de P, esse estímulo à extrusão de H^+ , acidifica o solo e consequentemente favorece o fenômeno de adsorção de P aos óxidos-hidroxidos de ferro e alumínio (SATO et al., 2005).

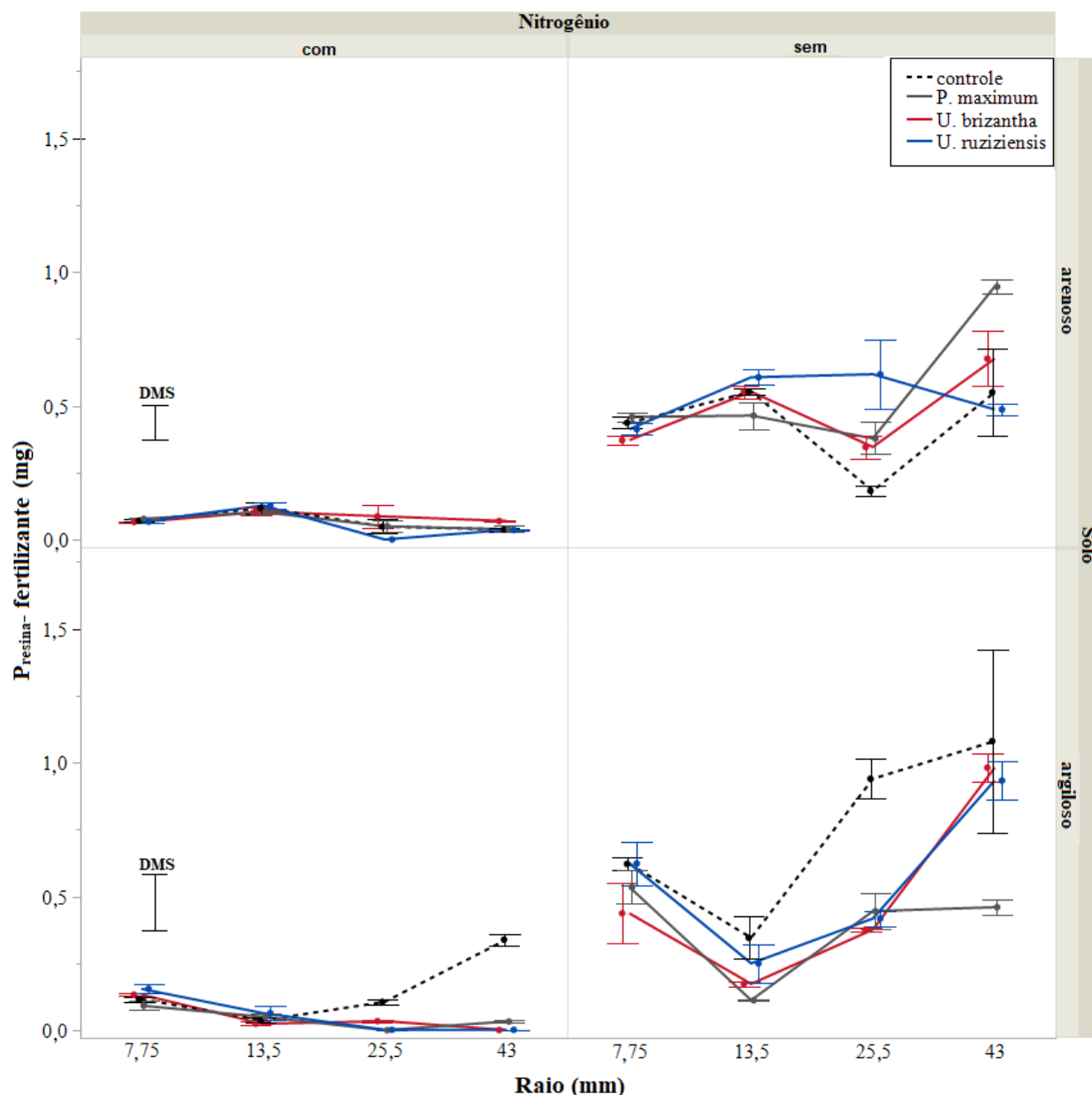


Figura 8: Efeito do tempo de incubação no teor de P resina – fertilizante em solos Arenoso e Argiloso, com e sem nitrogênio, após o cultivo de plantas de cobertura.

2.4 Conclusão

A adição de N influencia positivamente a mobilidade de P por difusão.

Em solos arenosos o P se difunde mais rapidamente que em solos argilosos e a aplicação de N contribui para aumentar a difusão do P no solo.

O cultivo de *U. ruziziensis* reduz a mobilidade do P no solo argiloso, efeito que foi minimizado com a aplicação de N.

Referências bibliográficas

- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach**. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, p.330-338, 1995.
- BENBI, D. K.; GILKES, R. J. The movement into soil of P from superphosphate grains and its availability to plants. **Fertilizer research**, v. 12, n. 1, p. 21-36, 1987.
- BOLAN, N. S.; WHITE, R. E.; HEDLEY, M. J. A review of the use of phosphate rocks as fertilizers for direct application in Australia and New Zealand. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 30, n. 2, p. 297-313, 1990.
- BOLLAND, M.D.A; GILKES, R.J. The chemistry and agronomic effectiveness of phosphate fertilizers. **Journal of Crop Production**, v. 1, n. 2, p. 139-163, 1998.
- CASTOLDI, G.; LAÉRCIO A. P.; CIRO A. R. Nitrogen budget in a soil-plant system after brachiaria grass desiccation. **Soil science and plant nutrition**, v. 60, n. 2, p. 162-172, 2014.
- CÉSAR, Fábio Ricardo Coutinho Fontes. **Eficiência agronômica de misturas no mesmo grânulo de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e enxofre elementar**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- CRUSCIOL, C. A. C.; COTTICA, R. L. L.; LIMA E. V.; ANDREOTTI, M.; MORO, E.; MARCON, E. Persistência de palhada e liberação de nutrientes do nabo forrageiro no plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, p.161-168, 2005.
- DE BONA, Fabiano Daniel. **Nitrogênio e enxofre para gramínea forrageira: atributos do solo e aspectos metabólicos, nutricionais e produtivos da planta**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- DEGRYSE, F.; MCLAUGHLIN, M.J. Phosphorus diffusion from fertilizer: visualization, chemical measurements, and modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 3, p. 832-842, 2014.
- 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, p. 1421-1428, 2007.
- GATIBONI, L.C., KAMINSKI, J., RHEINHEIMER, D. S., FLORES, J. P. C. 2007. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 31, 691-699, 2007.
- GILKES, R.J.; LIM-NUNEZ, R. Poorly soluble phosphates in Australian superphosphate - their nature and availability to plants. **Australian Journal of Soil Research**, Armidale, v. 18, n. 1, p.85-95, 1980.

GUPPY, C. N.; MENZIES, N. W.; MOODY, P. W.; BLAMEY, F. P. C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review.

Australian Journal of Soil Research, Collingwood, v. 43, p. 189-202, 2005.

HU, H. Q.; TANG, C. X.; RENGEL, Z. Role of phenolics and organic acids in phosphorus mobilization in calcareous and acidic soils. **Journal of Plant Nutrition, Philadelphia**, v. 28, p. 1427–1439, 2005.

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

LAWTON, K.; VOMOCIL, J. A. The Dissolution and Migration of Phosphorus from Granular Superphosphate in Some Michigan Soils 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 18, n. 1, p. 26-32, 1954.

LOMBI, E., MCLAUGHLIN, M. J., JOHNSTON, C., ARMSTRONG, R. D., & HOLLOWAY, R. E. Mobility, solubility and lability of fluid and granular forms of P fertiliser in calcareous and non-calcareous soils under laboratory conditions. **Plant and soil**, 2005, 269.1-2: 25-34.

MCLAUGHLIN, M.J.; McBEATH, T.M.; SMERNIK, R.; STACEY, S.P.; AJIBOYE, B.; GUPPY, C. The chemical nature of P accumulation in agricultural soils—implications for fertiliser management and design: an Australian perspective. **Plant and Soil**, v. 349, n. 1-2, p. 69-87, 2011.

MONTALVO, D., F. DEGRYSE, and M.J. MCLAUGHLIN. 2014. Fluid fertilizers improve phosphorus diffusion but not lability in Andisols and Oxisols. **Soil Science Society of American Journal**, 78:214–224.

NASCIMENTO, C. A. C. **Frações de fósforo no solo e aproveitamento de fosfatos pela cana-de-açúcar**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

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 American Journal**, 82-xx, 2018.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Ed. UFV, Viçosa, p.399, 1999.

NAIR, P.S.; LOGAN, T.J.; SHARPLEY, A.N.; SOMMERS, L.E.; TABATABAI, M.A.; YUAN, T.L. Interlaboratory Comparison of a Standardized Phosphorus Adsorption Procedure 1. **Journal of Environmental Quality**, v. 13, n. 4, p. 591-595, 1984.

PAVINATO, Paulo Sérgio; ROSOLEM, Ciro Antonio. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, p. 911-920, 2008.

PICOLI, Lais Bília. "**Disponibilidade de fósforo em função do revestimento do fertilizante por substâncias húmicas.**" (2017). Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

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

SATO, S.; COMERFORD, N. B. **Influence of soil pH on inorganic phosphorus sorption and desorption in a humid Brazilian Ultisol.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 29, n. 5, p. 685-694, 2005.

Silva, Rodrigo Coqui da. "**Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados com solubilidade variada.**" 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

TURNER, B. L.; ENGELBRECHT, B. M. J. Soil organic phosphorus in lowland tropical rain forests. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v.103, p.297-315, 2011.

WANG, J.; LIU, W. Z.; MU, H. F.; DANG, T. H. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-years superphosphate application. **Pedosphere**, Oxford, v.20, p.304-310, 2010.

WELIGAMA, C.; TANG, C.; SALE, P. W. G.; CONYERS, M. K.; LIU, D. L. Localised nitrate and phosphate applications enhances root proliferation by wheat and maximizes rhizosphere alkalization in acid subsoil. **Plant and Soil**, v.312, p.101-115,2008.

WENZL, P.; PATINO, G. M.; CHAVES, A. L.; MAYER, J. E.; RAO, I. M. The high level of aluminum resistance in signalgrass is not associated with known mechanisms of external aluminum detoxification in root apices. **Plant Physiology, Rockville**, v. 125, p. 1473–1484, 2001.

WILLIAMS, C. H. Reaction of surface-applied superphosphate with soil. I. The fertilizer solution and its initial reaction with soil. **Soil Research**, v. 9, n. 2, p. 83-94, 1971.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa pesquisa demonstra que tanto o solo quanto as características do fertilizante e a presença de diferentes plantas de cobertura influenciam na dinâmica de P no solo. O cultivo de *U. ruziziensis* como planta de cobertura reduz a difusão de P no solo e não favorece o acúmulo P orgânico do solo. O N exerce influência na disponibilidade de P, pois plantas bem nutridas em N apresentaram maior absorção de P, e fertilizantes que contém ambos nutrientes tendem a favorecer a mobilidade do P no solo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. S.; ROSOLEM, C. A. Ruzigrass grown in rotation with soybean increases soil labile phosphorus. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 6, p. 2444-2452, 2016.
- ALMEIDA, D. S.; PENN, C. J.; ROSOLEM, C. A. Assessment of phosphorus availability in soil cultivated with ruzigrass. **Geoderma**, v. 312, p. 64-73, 2018.
- CANTARELLA, H. **Nitrogênio**. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H.; BRARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTI, R.B.; NEVES, J.C.L. 1. ed. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 7, p. 375-470.
- CLARHOLM, M.; SKYLLBERG, U.; ROSLING, A. Organic acid induced release of nutrients from metal-stabilized soil organic matter -the unbutton model. **Soil Biol Biochem** 84:168–176, 2015.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Perspectivas para a agropecuária / Safra 2017/2018 – v.5, n.6 – Brasília: **Conab**, 2018- v5. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso: 16 de Março de 2018.
- DA SILVA, G. F.; DE OLIVEIRA, F. H. T.; PEREIRA, R. G.; DIÓGENES, T. B. A.; JÚNIOR, J. N.; DE SOUZA FILHO, A. L. Doses de nitrogênio e de fósforo recomendadas para produção econômica de milho verde em Mossoró-RN. **MAGISTRA**, v. 26, n. 4, p. 467-481, 2017.
- JONES, D. L. Organic acids in the rhizosphere: a critical review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 205, p. 25–44, 1998.
- KELLER, M.; OBERSON, A.; KATHRIN E. A.; TAMBURINI, F.; MÄDER, P.; MAYER, J.; FROSSARD, E.; BÜNEMANN, E. K.. Phosphorus forms and enzymatic hydrolyzability of organic phosphorus in soils after 30 years of organic and conventional farming. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Göttingen, v.175, p.385-393, 2012.
- MARTINAZZO, R.; RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.563-570, 2007.
- PARIZ, C.M; ANDREOTTI, M; BUZETTI, S; BERGAMASCHINE, A.F; ULIAN, N.A; FURLAN, L.C; MEIRELLES, P.R.L. CAVASANO FA. Straw decomposition of nitrogen-fertilized grasses intercropped with irrigated maize in an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 35:2029-37, 2011.
- RAGHOTHAMA, K.G. Phosphorus and plant nutrition: an overview. In: Sims JT, Sharpley AN (eds) Phosphorus: agriculture and the environment. vol phosphorusagric. **American Society of Agronomy**, pp 355-378, 2005.

RICHARDSON, .AE.; GEORGE, T.S.; HENS, M.; SIMPSON, R.J. Utilization of soil organic phosphorus by higher plants. In: Turner BL, Frossard E, Baldwin DS (eds) Organic phosphorus in the environment. CABI, Wallingford, pp 165–184, 2005.

RICHARDSON, A. E.; HADOBAS, P. A.; HAYES, J. E.; O'HARA, C. P.; SIMPSON, R. J. Utilization of phosphorus by pasture plants supplied with myo-inositol hexaphosphate is enhanced by the presence of soil micro-organisms. **Plant and Soil**, [S.l.], v. 229, n. 1, p. 47–56, 2001.

ROSOLEM, C.A; CALONEGO, J.C; FOLONI, J.S.S. Lixiviação de potássio da palhada de espécies de cobertura de solo de acordo com a quantidade de chuva aplicada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2003;27:355-62.

YAN Y, Li. W.; YANG, J.; ZHENG, A.; LIU, F.; FENG, X.; SPARKS, D.L. Mechanism of Myo-inositol Hexakisphosphate sorption on amorphous aluminum hydroxide: spectroscopic evidence for rapid surface precipitation. **Environ Sci Technol**. 48:6735–6742, 2014.

YANG, K.; ZHU, J.; GU, L. Y.; WANG, Z. Changes in soil phosphorus fractions after 9 years of continuous nitrogen addition in a *Larix gmelinii* plantation. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v.71, p.1-8, 2014.