

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

ELIALDO ALVES DE SOUZA

**APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE AMONÍACAL COMO ESTRATÉGIA PARA
MELHORAR A EFICIÊNCIA DE USO DO FÓSFORO EM MILHO**

Botucatu

2017

ELIALDO ALVES DE SOUZA

**APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE AMONÍACAL COMO ESTRATÉGIA PARA
MELHORAR A EFICIÊNCIA DE USO DO FÓSFORO EM MILHO**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP
Campus de Botucatu, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia
(Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Ciro Antônio
Rosolem

Botucatu

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP
- FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

S725a Souza, Elialdo Alves de, 1986-
Aplicação de fertilizante amoniacal como estratégia para melhorar a eficiência de uso do fósforo em milho / Elialdo Alves de Souza. - Botucatu : [s.n.], 2017
144 p. : il., color., grafs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2017
Orientador: Ciro Antônio Rosolem
Inclui bibliografia

1. Milho - Cultivo. 2. Plantas - Efeito do fosforo. 3. Amônio. 4. Nitratos. 5. Rizosfera. I. Rosolem, Ciro Antônio. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

Aos meus pais,
Maria Ferreira Calado e
Francisco Alves Sobrinho,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao Grande Mistério, por estar aqui.

Aos meus pais Maria Ferreira Calado e Francisco Alves Sobrinho pelo apoio e amor.

Aos meus sobrinhos Caio, Ramon e Karelly que tornam meus dias mais divertidos quando volto ao meu torrão natal.

Ao Prof. Dr. Ciro Antônio Rosolem, pela orientação, conselhos e todas as possibilidades de conhecimento e crescimento profissional. O ambiente oferecido de liberdade e curiosidade científica foi fundamental para o meu desenvolvimento.

Ao Prof. Dr. Philip J. White pelo acolhimento e supervisão no exterior. E a todos os que tornaram meu trabalho possível no The James Hutton Institute: Gladys Wright, Jacqueline Tompson, Paula Pongrac, Marta Maluk.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro, concedido por meio de bolsa de doutorado (Processo nº 2013/18870-1) e da bolsa de sanduiche (Processo nº 2015/12399-0).

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida no início do curso.

Aos amigos e companheiros de trabalho Natália Ferreira, Camila Grassman, Janaina Matias, Aline Sandim, Moniki Janegitz, pelo socorro e companhia em campo e laboratório, pelas boas risadas e planos para dominar o mundo.

Ao Dorival Pires de Arruda, pelo apoio metodológico e ensinamentos no Laboratório Solo-Planta.

Ao Célio Mariano, Casimiro Alves, e demais funcionários do departamento de Agricultura e Melhoramento Vegetal, pelo auxílio no campo e em casa de vegetação, sem os quais seria impossível a montagem dos experimentos.

À coordenação do curso de Pós-Graduação em Agricultura/Produção Vegetal.

À todos os professores e aos colegas de turma pelo compartilhamento de ideias.

À Maria Conceição Santos, Jamile Calado e Janaine Calado pelo espaço de estudo oferecido, combinado com boa comida, boas risadas, brigas de irmão, conselhos de mãe e cãezinhos sapecas.

À Lorena Carvalho e Daniela Abreu pelo acolhimento, boa comida, boa conversa, cãezinhos maravilhosos, espaço de estudo e suporte no momento mais difícil de minha jornada no doutorado.

Às maravilhosas amigas Júnia Naara e Gabriela Germino pelo apoio de sempre.

À Taiza Rossi e Natália Soares pelo abrigo, conversas gostosas e cafés da tarde no coração do Lageado.

À Marta Arruda pelos conselhos relacionados ao fracionamento químico do fósforo.

À Moacir Tuzzin pelo auxílio com o RootBox e ajuda em alguns trabalhos.

“Se você deseja a paz, cultive a justiça, mas ao mesmo tempo cultive os campos para produzir mais pão, caso contrário não haverá paz. ”

Norman Borlaug

1. RESUMO

A aplicação de amônio pode, em algumas condições, melhorar a eficiência de uso do fósforo (EUP) e o desenvolvimento do milho, especialmente em solos tropicais, normalmente ácidos e pobres em P disponível. O presente trabalho tem por objetivo estudar o efeito da adubação amoniacal sobre o aproveitamento do P, as condições bioquímicas da rizosfera, a morfologia radicular e o desenvolvimento da cultura do milho. Os dois experimentos iniciais foram conduzidos em casa de vegetação, o primeiro em vasos de 12 L e o segundo em *Plant Growth Containers* (PGCs), com solo previamente corrigido e adubado segundo os tratamentos: 3 (três formas de adubação nitrogenada - amoniacal, nítrica e mista) x cinco doses de fosfato (0, 40, 80, 120 e 160 mg P kg⁻¹ de solo). Aos 35 dias após a emergência as raízes foram removidas dos containers e vasos e as amostras de planta e solo foram coletadas para análises. O solo rizosférico no experimento I foi obtido por “agitação-lavagem” e no experimento II por “fatiamento em camadas”, de forma que quatro das oito repetições foram congeladas frescas (análises: amônio, nitrato, C orgânico e P microbiano) e quatro foram transformadas em TFSE (análises: fracionamento químico do P e pH). As amostras de planta foram submetidas a pesagem e análise nutricional. O experimento III foi conduzido em um sistema de scanners em solução nutritiva de acordo com os tratamentos: 2 (amônio ou nitrato) x (alta dose ou baixa dose de P), com 10 repetições. Imagens foram obtidas diariamente para avaliação do desenvolvimento radicular. Ao final dos ensaios foram obtidos peso fresco e seco, análises de P em tecidos e, com dados de diferentes parâmetros radiculares, foi feito o desenho da planta média no RootBox. Os tratamentos com amônio e nitrato + amônio, na dose mais alta de P no experimento I ou em todas as doses no experimento II, resultaram em maior produção de matéria seca, menor relação raiz: parte aérea, desenvolvimento de raiz mais adequado à absorção de P, maior recuperação de P, maior acúmulo de amônio, nitrato e N-mineral nas camadas mais próximas ao rizoplane, menor pH, maior mobilização de formas menos lábeis de P, maior consumo de P geoquímico e P biológico. Houve diferença entre solo rizosférico e solo não rizosférico e entre as diferentes camadas da rizosfera, para todos os parâmetros, entre as formas de nitrogênio. O amônio e nitrato + amônio resultaram em maior produção de C orgânico solúvel em água e maior dose de superfosfato triplo resultou em maior quantidade de P na fração microbiana. O amônio resultou desenvolvimento radicular mais ramificado e com maior número de raízes laterais. O amônio melhora a eficiência de uso do P, devido às mudanças químicas e biológicas na rizosfera, e às mudanças na arquitetura radicular, que favorecem a solubilidade, a mineralização e a absorção de fosfato e, conseqüentemente, aumenta a produção de matéria seca nos estádios iniciais da cultura do milho.

Palavras-chave: amônio, nitrato, eficiência de uso do fósforo, rizosfera

ABSTRACT

AMMONIUM-FERTILIZER APPLICATION INCREASES PHOSPHORUS USE EFFICIENCY IN MAIZE

Ammonium application can improve phosphorus use efficiency (PUE) and the development of maize plants, especially in tropical soils, usually acids and P-limiting. The aim of this study is evaluate how ammoniacal fertilization impacts the P use efficiency (PUE), the biochemical conditions of the rhizosphere, the root morphology and the development of maize plants. Two initial experiments were carried on greenhouse, the first one in pots of 20 L and the second one in *Plant Growth Containers* (PGCs), using soil after liming and fertilized according to the following treatments: 3 (nitrogen fertilization: ammonium only, nitrate only and both) x five doses of phosphate (0, 40, 80, 120 and 160 mg P kg⁻¹ of soil). At 35 days after emergence the roots were removed from the containers and pots and the plant and soil samples were collected for analysis. The rhizosphere soil in experiment I was obtained by "shaking-washing" and in the experiment II by "layer slicing". Four of the eight soil replicates were fresh frozen (analyzes: ammonium, nitrate, organic C and microbial P) and four of them were dried (analyzes: chemical fractionation of P and pH). Plant samples were weighed and analyzed for P content. The experiment III was carried on a system of nutrient solution scanners according to the treatments: 2 (ammonium or nitrate) x (high or low dose of P), with 10 replicates. Images were obtained in daily basis for the evaluation of root development. At the end of the tests, fresh and dry weights and P content were obtained. Data of different root traits were used to draw the average plant on the RootBox. The treatments with ammonium and nitrate + ammonium, plus the highest dose of P in the experiment I or at all doses in the experiment II, resulted in higher dry matter yield, lower root ratio: aerial part, root development adequate for P absorption, higher P recovering, higher ammonium, nitrate and N-mineral accumulation in the nearest layers to the rhizoplane, lower pH, greater mobilization of less labile P forms, higher mobilization of geochemical and biological P. There were differences between rhizospheric and bulk soils and between the different layers of the rhizosphere, for all parameters and treatments. Ammonium and nitrate + ammonium resulted in higher organic C water soluble organic C, and higher dose of triple superphosphate resulted in higher amount of P in the microbial fraction. Ammonium resulted in a branched root with a greater number of lateral roots. Ammonium improves the use efficiency, solubility, mineralization and uptake of P, due to chemical and biological changes in the rhizosphere and root architecture in the early stages of corn development.

Keywords: ammonium, nitrate, phosphorus use efficiency, rhizosphere

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Experimento I em casa de vegetação anteriormente ao desbaste.....	40
Figura 2 - Representação esquemática dos <i>Plant Growth Containers</i> PGCs).....	45
Figura 3 - PGCs em casa de vegetação.....	45
Figura 4 - Esquema de funcionamento do fatiador de solo em PGCs.....	46
Figura 5 - Montagem do sistema: A) Folha de papel de germinação fixada entre a placa preta Perspex e o scanner; B) Plântulas fixadas ao papel através de tiras de algodão grampeadas e umedecidas com água deionizada.....	50
Figura 6 - Processo de escaneamento automático: A) Imagem representativa de um sistema radicular com amônio como forma de nitrogênio; B) Imagem representativa de um sistema radicular cultivado com nitrato como forma de nitrogênio. Imagem obtida 15 dias após a semeadura.....	52
Figura 7 - Produção de matéria seca total (g) do milho em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	54
Figura 8 - Relação raiz: parte aérea do milho em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	55
Figura 9 - Matéria seca da raiz (g) do milho em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	56
Figura 10 - Matéria seca da parte aérea (g) do milho em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	57
Figura 11 - Teor de P (mg g^{-1}) do milho em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	58
Figura 12 - Total de P absorvido (mg) do milho em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	59
Figura 13 - Eficiência de recuperação do P (%) em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	60
Figura 14 - Eficiência fisiológica do P (mg mg^{-1}) em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	61
Figura 15 - pH (CaCl_2) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P	62

Figura 16 - Amônio (mg kg^{-1}) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	64
Figura 17 - Nitrato (mg kg^{-1}) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P	65
Figura 18 - N-mineral (mg kg^{-1}) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P	67
Figura 19 - Relação amônio:nitrato em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	68
Figura 20 - P lábil (mg kg^{-1}) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	70
Figura 21 - P moderadamente lábil (mg kg^{-1}) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	71
Figura 22 - P menos lábil (mg kg^{-1}) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	72
Figura 23 - P geoquímico (mg kg^{-1}) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	74
Figura 24 - P biológico (mg kg^{-1}) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	75
Figura 25 - P total (mg kg^{-1}) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P.....	76
Figura 26 - Arquitetura do sistema radicular das plantas ao final dos experimentos. A: amônio; N: nitrato; P: raiz primária; L: raízes laterais; S: raízes seminais; C: raízes da coroa.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matéria seca do milho em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P.....	78
Tabela 2 - Parâmetros de raiz do milho em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P.....	79
Tabela 3 - pH (CaCl ₂) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas.....	81
Tabela 4 - Amônio (mg kg ⁻¹) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas	83
Tabela 5 - Nitrato (mg kg ⁻¹) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas.....	84
Tabela 6 - N-mineral (mg kg ⁻¹) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas.....	85
Tabela 7 - Relação amônio: nitrato no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas.....	86
Tabela 8 - P lábil (mg kg ⁻¹) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas.....	88
Tabela 9 - P moderadamente lábil (mg kg ⁻¹) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas.....	89
Tabela 10 - P menos lábil (mg kg ⁻¹) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas.....	90
Tabela 11 - P geoquímico (mg kg ⁻¹) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas.....	92

Tabela 12 - P biológico (mg kg^{-1}) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas.....	93
Tabela 13 - C orgânico solúvel em água (mg kg^{-1}) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas.....	95
Tabela 14 - P microbiano (mg kg^{-1}) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas.....	96
Tabela 15 - Parâmetros de produção de matéria fresca em resposta às duas formas de aplicação de nitrogênio combinadas com dois níveis de P.....	98
Tabela 16 - Parâmetros de P em planta em resposta às duas formas de aplicação de nitrogênio combinadas com dois níveis de P.....	99
Tabela 17 - Parâmetros do sistema radicular analisado como um todo em resposta às duas formas de aplicação de nitrogênio combinadas com dois níveis de P.....	100
Tabela 18 - Dados do RootBox para as raízes primária e secundárias em resposta às duas formas de aplicação de nitrogênio combinadas com dois níveis de P.....	101
Tabela 19 - Dados do RootBox para as raízes seminais e da coroa em resposta às duas formas de aplicação de nitrogênio combinadas com dois níveis de P.....	102

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	21
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1.	Formas do fósforo no solo e seu estudo.....	23
2.1.1.	Considerações iniciais.....	23
2.1.2.	Fósforo inorgânico (Pi).....	24
2.1.3.	Fósforo orgânico (Po).....	25
2.1.4.	Estudo da dinâmica do fósforo no solo.....	26
2.2.	A baixa EUP em solos tropicais.....	27
2.2.1.	Considerações iniciais.....	27
2.2.2.	Os solos tropicais como dreno de P.....	28
2.2.3.	A forma do N afeta a EUP.....	30
2.2.4.	Uso de nitrogênio amoniacal e a EUP.....	32
2.3.	Rizosfera: métodos e dinâmica nutricional.....	33
2.3.1.	Considerações iniciais.....	33
2.3.2.	Dinâmica nutricional na rizosfera.....	34
2.3.3.	Métodos de amostragem rizosférica.....	35
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	38
3.1.	Experimento I	38
3.1.1.	Caracterização do local e do solo.....	38
3.1.2.	Correção do solo e definição dos tratamentos.....	39
3.1.3.	Cultivo do milho e coleta de material para análise.....	39
3.1.4.	Análises nas amostras de solo.....	40
3.1.5.	Análises nos tecidos vegetais.....	42
3.1.6.	Delineamento experimental e análise estatística.....	42
3.2.	Experimento II.....	43
3.2.1.	Caracterização do local e do solo.....	43
3.2.2.	Correção do solo e definição dos tratamentos.....	43
3.2.3.	Lavagem ácida da areia.....	44
3.2.4.	Montagem dos PGCs.....	44
3.2.5.	Cultivo do milho e coleta de material para análise.....	46
3.2.6.	Análises nas amostras de solo.....	47

3.2.7.	Análises nas raízes e nos tecidos vegetais.....	48
3.2.8.	Delineamento experimental e análise estatística.....	48
3.3.	Experimento III.....	49
3.3.1.	Local.....	49
3.3.2.	Sistema de scanners e soluções nutritivas.....	49
3.3.3.	Condução dos ensaios e coleta de material.....	51
3.3.4.	Escaneamento e modelagem dos sistemas radiculares.....	51
3.3.5.	P nos tecidos vegetais.....	53
3.3.6.	Análise estatística.....	53
4.	RESULTADOS.....	54
4.1.	Experimento I	54
4.1.1.	Matéria seca, P na planta e eficiência de uso do P.....	54
4.1.2.	pH e nitrogênio no solo.....	61
4.1.3.	Labilidade e compartimentos de P.....	69
4.2.	Experimento II.....	77
4.2.1.	Matéria seca e raiz.....	77
4.2.2.	pH e nitrogênio no solo.....	80
4.2.3.	Labilidade e compartimentos de P no solo.....	87
4.2.4.	Parâmetros biológicos.....	94
4.3.	Experimento III.....	97
4.3.1.	Produção de matéria seca e P em planta.....	97
4.3.2.	Raiz e arquitetura do sistema radicular.....	100
5.	DISCUSSÃO.....	104
5.1.	Produção de matéria seca.....	104
5.2.	Efeitos sobre o pH.....	105
5.3.	Eficiência de uso do nitrogênio.....	106
5.4.	Eficiência de uso do P.....	109
5.5.	Labilidade e compartimentos de P.....	111
5.6.	Parâmetros biológicos.....	112
5.7.	Arquitetura do sistema radicular.....	114
6.	CONCLUSÕES.....	116
7.	REFERÊNCIAS.....	117
	ANEXO I.....	132

1. INTRODUÇÃO

A deficiência de fósforo (P) é um dos fatores mais limitantes para a agricultura, especialmente nas regiões tropicais e subtropicais, com solos predominantemente ácidos, pois o P pode formar compostos de alta energia de ligação com óxidos e hidróxidos de Fe e Al, muito estáveis na fase sólida e dificilmente disponíveis aos vegetais (ARRAY e SPARKS, 2007; SCHRODER et al., 2011; SHEN et al., 2011). Por conta disso, a eficiência do uso do P (EUP) é extremamente baixa nessas condições e o solo-dreno passa a competir com as plantas pelo elemento, o que origina um grande desnível entre a necessidade real das culturas e a quantidade que deve ser aplicada para que o sistema forneça essa quantidade.

Entre 60 e 90% do P aplicado é imediatamente fixado no solo e se torna indisponível, elevando o custo de produção (SYERS et al., 2008). Assim, desenvolver estratégias capazes de melhorar a eficiência do uso do fósforo (EUP) poderá aumentar a viabilidade econômica da agricultura e minimizar alguns problemas ambientais, como os riscos de eutrofização dos mananciais hídricos (KANT et al., 2011). Para isso, são necessárias pesquisas de melhoramento para o desenvolvimento de genótipos mais eficientes, mas também o desenvolvimento de práticas de manejo que garantam um ambiente mais favorável à absorção e ao uso do fosfato (ROBERTS et al., 2008). A rizosfera é fundamental nesse contexto, pois ela é o sítio mais ativo para os processos químicos e bioquímicos relacionados à absorção de nutrientes. Essa região especial, onde ocorre a interação solo-microrganismos-raiz, é construída e tem suas propriedades influenciadas pela planta, especialmente pela rizodeposição de compostos orgânicos e pela pressão da raiz sobre o solo (ZHANG et al., 2010). A sua intensa atividade transforma os nutrientes presentes no solo devido à presença de uma microbiota diversificada associada a ela, e que é estimulada pela exsudação de compostos de carbono (CHEN et al., 2002).

As principais estratégias para aumentar a absorção e o aproveitamento do P aplicado são aquelas que consideram o manejo do sistema solo-raiz-rizosfera e se dividem em três princípios: 1) Modulação da arquitetura da raiz (PÉRET et al., 2014); 2) Intensificação dos processos rizosféricos que favorecem a exsudação de carboxilatos, a adequação do pH e a mobilização de formas menos lábeis de P

(SHARMA et al., 2013); 3) Sincronização entre as necessidades da cultura e a disponibilização dos nutrientes no sistema (CHEN et al., 2011). A presença de amônio no solo e nos fertilizantes aparentemente atende a esses três princípios, prolongando a labilidade e favorecendo a solubilização-mineralização do P pelas plantas, o que implica em melhor aproveitamento desse nutriente (JING et al.; 2010; JING et al.; 2012). Esses fenômenos apontam para a necessidade de mais estudos que considerem a interação entre amônio e fosfato na EUP.

O objetivo desse trabalho é responder as seguintes perguntas: 1) A aplicação de nitrogênio amoniacal melhora a eficiência de uso do P na cultura do milho? 2) Quais são os efeitos do uso de diferentes formas de nitrogênio sobre as condições químicas da rizosfera, a dinâmica do P e sobre a arquitetura radicular e o desenvolvimento da cultura?

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Formas do fósforo no solo e seu estudo

2.1.1. Considerações iniciais

Os solos contêm quantidades significativas de P em diferentes formas orgânicas (Po), inorgânicas (Pi) e microbianas (Pm), o que significa que a dinâmica desse nutriente é controlada por vários processos químicos, diferindo enormemente de outros macronutrientes, tais como N e S, que assumem formas predominantemente orgânicas e o ciclo é controlado basicamente por processos biológicos e bioquímicos (NOVAIS e SMYTH, 1999; ZHAO et al. 1996; SCHIMEL e BENNETT, 2004). Essa divisão é meramente didática, pois esses dois grandes compartimentos funcionam como um só. A identificação das formas de P dentro desses dois grupos é difícil devido à infinidade de reações que o elemento pode sofrer, embora elas se diferenciem pelo grau de estabilidade ou solubilidade (SOUZA et al., 2007; CONDRON e NEWMAN, 2011).

O Pi é o menos móvel de todos os nutrientes no solo e suas concentrações variam enormemente, nas diferentes condições edafotclimáticas, entre 35 a 70% do fósforo total Pt (OELKERS e VALSAMI-JONES, 2008). O segundo grupo é o Po, de concentração também extremamente variada segundo as condições locais, podendo constituir de 5 a 80% do Pt do solo e, nos solos tropicais, desempenha papel fundamental na dinâmica e disponibilidade do elemento para as plantas (RICHARDSON et al., 1994; RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2002). A maioria dos trabalhos nas décadas anteriores focaram no ciclo do Pi, porém, atualmente há maior interesse pelo papel do Po e Pm na dinâmica dos agroecossistemas, uma vez que esse compartimento é de fundamental importância para as questões ambientais e para a eficiência de uso do P (EUP), especialmente em condições tropicais (CUNHA et al., 2007). Solos com grande aporte de fosfato na forma de fertilizantes repõem o P removido da solução a partir de formas orgânicas e inorgânicas. Porém, em sistemas naturais sem adubação, as formas orgânicas são as principais responsáveis pela reposição desse elemento (GATIBONI et al., 2007).

2.1.2. Fósforo inorgânico (Pi)

O Pi assume formas diversas no solo, como resultado das culturas cultivadas na área, do tipo de fertilização e do sistema de cultivo. Tiecher et al. (2012) conduziram um estudo em LATOSSOLO Vermelho-Escuro (EMBRAPA, 2006), que apresentou resultados típicos, nos quais o plantio direto (SPD), associado à adubação, aumenta os níveis de Pi recuperado pela maioria dos extratores (HEDLEY et al., 1982; RHEINHEIMER et al., 2000), quando comparado com o plantio convencional e a vegetação nativa, especialmente nas camadas mais superficiais do solo. Pôde-se observar, também, como a cultura tem impacto direto sobre as formas do Pi, pois *Lupinus angustifolius* (L.) e/ou *Avena strigosa* (Schreb.) sob SPD apresentaram maiores teores de Pi extraído por água destilada, resina (RTA), NaHCO_3 ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 8,5), NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e HCl ($1,0 \text{ mol L}^{-1}$), do que todas as outras quatro culturas de inverno estudadas. Em trabalho conduzido por Merlin et al. (2013), em um LATOSSOLO Vermelho distrófico, observou-se que fertilizantes de alta solubilidade e, também, fosfatos reativos, aumentam os níveis de Pi lábil (extraído por RTA e NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$), especialmente sob condições de cultivo da *Urochloa* sp.

As principais formas de Pi nos solos, em um contexto morfogênético, são: Minerais primários

Minerais apatita do tipo $\text{Ca}(\text{PO}_4)_3\text{X}$ (X: F^- , OH^- , Cl^-) comuns em rochas, liberados durante o processo de intemperismo e fonte primária de P nos sistemas naturais, de liberação lenta e incapaz de fornecer a quantidade requerida pelos sistemas de produção (LIMA et al., 2008; OELKERS e VALSAMI-JONES, 2008).

Quimisorvidos e Oclusos

São o resultado da estabilização termodinâmica dos minerais intemperizados, resultando na precipitação ou adsorção à fração mineral do solo. O P quimisorvido é classificado como de ligação: 1) Monodentada e bidentada: a adsorção de P aos oxihidróxidos de Fe e Al ocorre nos sítios ácidos de Lewis, onde os grupos OH^- e OH_2 ligados mono-coordenadamente ao metal são trocados com o fosfato, fenômeno conhecido como “troca de ligantes”. 2) Binucleada: com o passar do tempo ocorre um envelhecimento do cristal, e o íon fosfato passa a se interiorizar no mineral, formando complexos esféricos internos (PARFITT, 1989; SANTOS et al., 2008).

Pi livre

Trata-se do P prontamente disponível às plantas, chamado de fator intensidade (I), que estabelece um equilíbrio com o P ligado com baixa energia aos coloides, chamado de fator quantidade (Q). São os fosfatos livres ($\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} e $\text{PO}_4\text{-P}$) fracamente ligados à superfície dos coloides ou livres em solução (NOVAIS e SMYTH, 1999).

2.1.3. Fósforo orgânico (Po)

O Po é originário da decomposição dos resíduos vegetais adicionados ao solo e do tecido microbiano, sendo que mais da metade das suas ainda não foram identificadas devido à grande variedade dos compostos e às dificuldades metodológicas (RHEINHEIMER et al., 2000). Das formas conhecidas os inositois trifosfatos compõem entre 10 e 80% do fósforo orgânico total (Pot), e em seguida, vêm os fosfolipídios (0,5 a 7%), ácidos nucleicos (~3%) e outros ésteres-fosfato (>5%), cujas estabilidades dependem de sua natureza e de sua interação com a fração mineral, disponibilizando P ao sistema ao serem utilizados como fonte de C e elétrons pela microbiota (DALAL, 1977). A transformação do Po é o cerne da reciclagem e biodisponibilidade desse nutriente, sendo influenciada pela umidade do solo, temperatura, pH e potencial redox, dentre outros fatores (SHEN et al., 2011).

Os ésteres ortofosfatos são divididos em mono ou diésteres, de acordo com a quantidade de grupos ésteres ligados ao $\text{PO}_4\text{-P}$, sendo que os monoésteres formam o grupo mais abundante no solo, com açúcares-fosfato, as fosfoproteínas, os mononucleotídeos e os inositois fosfatos. Os diésteres, menos abundantes, incluem os ácidos nucléicos, os fosfolipídios, ácidos teicóicos e compostos aromáticos. Os fosfonatos formam um grupo de Po que contém ligações C-P e os grupos C-PO(OH)_2 ou C-PO(OR)_2 (R =alquila, arila). Os polifosfatos, por sua vez, são sais ou ésteres de oxi-ânions poliméricos formados pelo PO_4 tetraedral com as unidades estruturais conectadas através do compartilhamento de átomos de oxigênio; enquanto o Pm pode assumir qualquer uma das outras formas, pois o P na biomassa microbiana corresponde a um conceito abrangente de todo o P que compõe a microbiota (RHEINHEIMER et al., 1999; RHEINHEIMER et al., 2002).

2.1.4. Estudo da dinâmica do fósforo no solo

As principais metodologias disponíveis hoje para o estudo da dinâmica do P no solo são as técnicas de fracionamento, com o princípio em comum de extrair diferentes formas desse elemento no solo, de maneira sequencial, com o uso de extratores que mineralizem/solubilizem formas em ordem crescente de energia de ligação devido às diferentes interações com os coloides, no caso do P_i , ou devido à natureza do composto, no caso do P_o (YANG e POST, 2013). Os métodos variam entre si segundo os extratores usados e segundo a possibilidade de fracionar formas orgânicas, inorgânicas, microbiológicas ou diferentes combinações destas; porém, o método de Hedley et al. (1982) e as suas diferentes modificações, são as mais largamente utilizadas (GUPPY et al., 2000).

Durante o fracionamento, cada forma que o P assume no solo é extraída por um ou mais extratos, compondo determinada fração justamente com outras formas reais presentes no solo. Porém, um dos princípios do fracionamento é a possibilidade de correlacionar as formas reais presentes no solo com as formas metodológicas obtidas durante o processo laboratorial. Por exemplo, no caso de Hedley et al. (1982) adaptado por Gatiboni (2003): a resina trocadora de ânions (RTA) extrai formas de P_i prontamente disponíveis em solução; o $NaHCO_3$ extrai formas de P_i facilmente trocáveis com a solução do solo e formas facilmente mineralizáveis de P_o (como alguns fosfonatos e formas microbianas); o $NaOH$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ extrai formas moderadamente lábeis de P_i (P quimisorvido a oxi-hidróxidos de Fe e Al) e P_o (fosfonatos, polifosfatos e P_o em ligações diéster); o HCl 1 mol L^{-1} extrai o P_i contido nos fosfatos de Ca; o $NaOH$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ extrai o P_i e o P_o química e fisicamente protegidos nas superfícies internas dos microagregados; a digestão-oxidação do solo com H_2SO_4 , H_2O_2 e solução saturada de $MgCl_2$ extrai o P-residual ($P_i + P_o$), de natureza mais recalcitrante.

O conhecimento das formas de P em cada fração é determinado anteriormente, no momento de desenvolvimento da metodologia, por uma série de estudos que visam validar o novo esquema, como: 1) O uso de compostos sintéticos, que permitem o controle quantitativo das formas de P nas amostras fracionadas, o que permite a verificação da habilidade de determinado extrato extrair determinado *pool* (OLILA et al., 1995); 2) O uso da ressonância nuclear magnética (RNM), que distingue grupos de P presentes nos extratos com base em frequências

de ressonância específicas em relação a um campo magnético aplicado, e pode assim diferenciar entre ortofosfato, polifosfato, pirofosfato, monoésteres de ortofosfato, diésteres de ortofosfato e fosfonatos, pela comparação do seu desvio químico em relação ao padrão externo, o ácido fosfórico (H_3PO_4) (SILVERSTEIN et al., 1994); 3) A introdução de isótopos radiativos (^{32}P e ^{33}P) nos sistemas solo-planta para avaliar a dinâmica de transferência do P entre os diferentes *pools* e extratos no solo e na planta (DI et al., 1997); 4) Uso de raios-X emitidos por sincrotron, uma fonte de energia ajustável que tem como princípio o efeito fotoelétrico, que identifica e quantifica inúmeras formas de Pi (McLAREN et al., 2015).

Assim, o fracionamento químico permite a quantificação do P nos *pools* de diferentes labilidades e nos compartimentos de diferentes naturezas (biológico ou geoquímico) (CROSS e SCHLESINGER, 1995), o que nos permite avaliar como e se determinados processos estão alterando a dinâmica desse elemento nos sistemas estudados.

2.2. A baixa EUP em solos tropicais

2.2.1. Considerações iniciais

O conceito de “eficiência de uso de nutrientes” (EU) é complexo e tem como base a relação entre produtividade e a quantidade disponível do elemento mineral, sendo determinada pela eficiência de absorção (EA) (capacidade da planta em capturar o elemento no solo) e pela eficiência fisiológica (EF) (capacidade da cultura em utilizar o elemento absorvido para produzir matéria seca efetivamente) (ROBERTS, 2008). A EU é abrangente e influenciada por características específicas, genotípicas e pelas características edafoclimáticas dos ecossistemas e dos agrossistemas (MI et al., 2007). Por exemplo, as diferenças químicas, físicas e coloidais entre os solos tropicais e temperados determinam significativamente a eficiência de uso do fósforo (EUP) pelas culturas e pelas florestas nessas regiões. Da mesma forma, existe uma diferença significativa entre diferentes genótipos e espécies, pois as diferenças metabólicas determinam significativamente a eficiência interna (COLOMBO et al., 2016), da mesma maneira que as características edafoclimáticas e o manejo determinam a disponibilidade externa e,

consequentemente, parte significativa da eficiência de absorção (SCHRODER et al., 2011).

No caso do P, para a demanda agrícola por fertilizantes, a indústria promove a depleção média de 19 Mt por ano do elemento através da mineração de fosfatos de rocha, com uma ineficiência no processo que limita em até 90% o P_2O_5 que chega aos agricultores, devido às perdas ao longo da cadeia (CORDELL et al., 2009).

2.2.2. Os solos tropicais como dreno de P

A baixa eficiência do uso do P (EUP) nos solos tropicais é resultado de algumas das características que são marcantes nessas áreas: 1) Predomínio de oxi-hidróxidos de Fe e Al e argilas 1:1 (caulinitas), pois os processos pedogenéticos são mais acelerados devido às altas temperaturas, à ação mais intensa da água e à atividade microbiológica sobre os minerais primários. Assim, aumenta a proporção de minerais secundários, podendo originar solos argilosos com elevado conteúdo Fe (Al), que ocorrem sob diversos graus de cristalinidade (SIX et al., 2002); 2) Predomínio de condições de acidez, pois nessas regiões a precipitação é maior que a evapotranspiração, de forma tal que os elementos alcalinos, notadamente Ca^{2+} e Mg^{2+} , são lixiviados das camadas superiores pelas águas contendo CO_2 , sendo substituídos nos colóides pelos íons H^+ . Além disso, a mineralização química acelerada é geradora de acidez (DECHERT et al., 2005); 3) Balanço de cargas predominantemente menos eletronegativo, por conta da limitada substituição isomórfica (que permite a substituição de elementos de maior valência por outros de menor valência internamente nas argilas, criando saldo negativo) e da saturação dos sítios de troca e da solução do solo com H^+ (NEGASSA et al., 2008); 4) A coesão dos solos, resultante de repetidos ciclos de umedecimento e secagem, que reduz o volume do solo enraizável, em solos ricos em substâncias cimentantes como os aluminossilicatos no trópico úmido (MOURA et al., 2010).

Essas características comentadas acima aumentam enormemente a capacidade do fosfato, extremamente reativo por natureza, se ligar fortemente às argilas, pois os oxi-hidróxidos de Fe e Al e a maior eletropositividade atraem fortemente elementos de natureza aniônica. Dessa maneira, esses solos funcionam principalmente como drenos e competem com as plantas e a microbiota pelo

elemento (NOVAIS e SMYTH, 1999). O principal mecanismo de transporte do P no solo (a difusão) é extremamente prejudicado nessas condições de forte interação coloide-elemento (PARFITT E ATKINSON, 1976).

Inicialmente, a ligação entre o fosfato e as argilas é de natureza eletrostática, porém, com o “envelhecimento” da quimisorção, se estabelecem ligações covalentes mono e bidentadas, respectivamente, aumentando a força de retenção nos sítios ácidos de Lewis, onde os grupos OH e OH₂ ligados mono-coordenadamente ao metal são trocados com o fosfato, fenômeno conhecido como “troca de ligantes” (FINK et al.; 2016). Após essa fase inicial mais rápida da ligação do P com o solo, segue-se uma etapa mais lenta que transforma paulatinamente o P adsorvido em P não-lábil. Essa fase mais lenta é caracterizada pela penetração (difusão) do fosfato nas imperfeições dos cristais (difusão em fase sólida), nos nanoporos ou entre os microcristais, tornando-se cada vez menor seu equilíbrio com o P-solução (oclusão) (WALKER e SYERS, 1976).

2.2.3. Estratégias para melhorar a EUP

Para melhorar a EUP são necessárias algumas medidas, tais como: 1) Sistemas baseados em rotação de culturas, capazes de melhorar as condições físicas e favorecer a diversidade microbiológica solubilizado de P; 2) Uso de medidas preventivas contra a erosão, pois o escoamento superficial e a remoção de solo pode causar a perda anual de até 40 Mt. ha⁻¹ de P; 3) Manejo do ambiente de forma a favorecer a associação simbiótica da cultura com fungos micorrízicos vesículo-arbusculares (FMA), que permitem uma maior exploração do solo e conseguem interceptar o elemento nos menores espaços intersticiais; 4) Melhoria das condições físicas e biológicas do solo, para favorecer a enraizabilidade, pelo não revolvimento do solo e cobertura da superfície com matéria orgânica; 5) Melhoria das condições químicas do solo, via calagem, deixando o pH próximo à neutralidade nos solos tropicais, para evitar perdas por conta da precipitação dos ortofosfatos com Al⁺² em condições ácidas; 6) Escolha de genótipos mais eficientes no uso do P, ou seja, os que possuem sistema radicular mais vigoroso e/ou são capazes de exsudar compostos orgânicos capazes de solubilizar o fosfato em formas não disponíveis (SCHRODER et al., 2011; VERHEIJEN et al., 2009).

Janegitz et al. (2016) encontraram, por exemplo, que o cultivo de *Urochloa ruziziensis* (R. Germ. e Evrard.), em rotação com a soja em plantio direto, pode melhorar a disponibilidade e a eficiência de uso dos fertilizantes, sejam estes fosfatos reativos (Arad) ou fontes de alta solubilidade (superfosfato triplo-SFT), embora as fontes mais solúveis sejam fundamentais para a produtividade no estabelecimento do sistema.

Dhillon et al. (2017) conduziram um estudo amplo sobre a eficiência de uso do P na produção de grandes culturas em diferentes regiões do mundo, e destacaram a importância das variadas técnicas de controle da erosão para um melhor aproveitamento do P, segundo as necessidades de cada local: SPD, cultivo mínimo (CM), rotação de cultura, terraceamento, culturas de coberturas e quebra-ventos. Esse trabalho chama atenção, especialmente, para os dados que comparam o SPD e o sistema convencional (SC), uma vez que a cobertura do solo pode reduzir em até 22 vezes as perdas de solo e de fosfato.

Balota et al. (2012) encontraram que as plantas de milho que estabeleceram relações simbióticas com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) tiveram melhor desenvolvimento e maior produção de matéria seca que plantas não-inoculadas (com até 60% de diferença). As plantas em relação simbiótica também apresentaram maior concentração de P na raiz e na parte aérea.

Van de Wiele et al. (2016) destacaram uma série características e genes importantes para os estudos com melhoramento genético que visam a EUP. Esses genes estão relacionados a fatores de transcrição, a genes envolvidos na transdução de sinais e no status de P na planta, a vias hormonais, à sinalização no metabolismo de açúcar, às vias metabólicas alternativas envolvidas na economia de Pi, a transportadores de fosfato de alta e baixa afinidade, à atividade de ATPases, etc.

2.2.4. A forma do N afeta a EUP

A possibilidade de modular a arquitetura do sistema radicular pode ser utilizada para aumentar a EUP e, nesse caso, duas estratégias podem ser associadas: 1) Alguns trabalhos recentes mostram que aplicação de fertilizante amoniacal pode modular, via sinalização sistêmica, o desenvolvimento de um sistema radicular mais favorável à interceptação de elementos menos móveis

dependentes da difusão (LIMA et al., 2010); 2) A aplicação localizada de fertilizantes, que possui potencial para incrementar a proliferação dos pelos e as ramificações radiculares (JING et al., 2012).

Contrastando com o observado por Lima et al, (2010), Liu et al. (2016) encontraram que o amônio aumentou a liberação de prótons pelas raízes, em relação ao nitrato, mas não imprimiu mudanças significativas na morfologia ou na fisiologia radicular, em resposta a baixos níveis de P no cultivo de *Zea mays* L., *Lupinus albus* L. e *Vicia faba* L. Liu et al. (2016) destacam a importância do uso de fertilizantes à base de amônio pode facilitar a aquisição de P pelas leguminosas em solos não-ácidos com baixos níveis do nutriente, e a necessidade de mais estudos sobre o impacto da forma nitrogenada na aquisição de elementos em espécies fixadoras de N.

Estudos mais recentes (JING et al., 2010; ZENG et al., 2012) corroboraram os resultados mais antigos encontrados por Hoffmann et al. (1994). Nesse estudo, uma série de fenômenos na rizosfera do milho se mostraram mais importantes para o aumento da EUP que a diferença no pH entre os tratamentos com N-nitrato e N-amônio. O influxo de P foi até duas vezes superior nos tratamentos com N-amônio, pois os efeitos da fertilização incrementaram em até 53% e em até 72% a absorção de P por unidade de comprimento radicular nos tratamentos com N-nitrato e N-amônio, respectivamente, em baixa disponibilidade do elemento. Esses resultados indicaram a possibilidade de que outros fenômenos, além do aumento na extrusão de prótons, estavam por trás da relação entre EUP e adubação amoniacal, como o aumento da eficiência interna e da eficiência de absorção do elemento.

A aplicação de amônio pode modificar os processos rizosféricos de forma a favorecer a EUP, porém, os mecanismos por trás dessa interação não são inteiramente conhecidos para condições não limitantes em P, embora, em casos de baixa disponibilidade de fosfato alguns estudos mostrem que a fertilização amoniacal aumenta a extrusão de H^+ pelas raízes, o que resulta em alteração do pH e pode explicar, em partes, o estímulo à proliferação radicular e o incremento na absorção de certos nutrientes (JING et al., 2010). A extrusão de H^+ é o resultado do mecanismo de manutenção do equilíbrio de carga na planta e funciona como resposta à assimilação de amônio (NH_4^+), podendo aumentar a atividade dos transportadores de fosfato, que funcionam como simportadores do tipo $H^+/H_2PO_4^-$ e que dependem de um gradiente de prótons através da membrana plasmática e mais

especificamente, dependem da atividade da PM-H⁺ ATPase, uma bomba eletrogênica que usa ATP como energia para bombear prótons através do apoplasto (ZHANG et al., 2010; ZHU et al., 2001; ZENG et al., 2012).

Weligama et al. (2008) encontraram que a aplicação combinada de fontes de nitrato e P tem um efeito oposto ao observado para as aplicações de amônio e P, alcalinizando o solo, mas, principalmente, a rizosfera, em relação a toda a área adubada. Em outro trabalho, conduzido por Jing et al. (2012) foi demonstrado que combinar fontes nítricas, amoniacais e fosfóricas tornam os incrementos em produtividade e EUP ainda maiores. Esse mesmo estudo mostrou que fontes amoniacais isoladas são mais interessantes que as fontes nítricas aplicadas sozinhas, pois o amônio consegue saturar os sítios de troca e estimular a extrusão de H⁺, o que causa uma diferença de duas unidades entre o pH rizosférico e o pH do solo; enquanto o nitrato, por conta da sua carga negativa, fica em solução, tende a ser lixiviado e não exige a extrusão do H⁺, essencial aos transportadores de P.

A técnica de aplicar de maneira localizada P e amônio, porém, exige o uso de inibidores de nitrificação para funcionar corretamente em solos não esterilizados, pois essa é a forma de manter o nitrogênio (N) na forma amoniacal, devido à inibição da atividade das *Nitrosomonas* (JING et al., 2012). Os inibidores são usados frequentemente na agricultura com o objetivo de melhorar a eficiência do uso dos nutrientes aplicados via fertilização mineral, pois impedem a oxidação inicial do amônio para nitrito a partir da ação das bactérias especialistas quimioautotróficas abundantes no solo (KLEINEIDAM et al., 2011). Os mais eficientes inibidores de nitrificação são, em sua maioria, compostos heterocíclicos (piridina, pirazole, triazole, benzotriazole, imidazole, etc.) cujos modos de ação não são bem conhecidos (PRO et al., 2012). Um inibidor ideal é aquele que possui as seguintes características: 1) não é tóxico para animais e humanos; 2) é eficiente em baixas concentrações; 3) se mantém estável quando adicionado a fertilizantes e formulações de adubos; 4) se mantém por um período mais ou menos longo no solo; e 5) tem preço acessível. Dentre os mais conhecidos inibidores temos a nitrapirina e a dicianodiamida, sendo que a nitrapirina é a substância mais eficiente nesse caso (YANG et al., 2013).

Práticas inibidoras da nitrificação são consideradas benéficas à produção agrícola, pois, podem aumentar a eficiência do uso do nitrogênio ao reduzir as perdas associadas aos processos de lixiviação e desnitrificação, com inúmeros benefícios ecológicos e econômicos (SCHMIDT, 1982). Esses compostos afetam a

ação da enzima amônia monoxigenase (AMO), uma proteína que fica na membrana das *Nitrosomonas*, da seguinte maneira: o NH_3 não se liga mais ao sítio ativo da enzima para sofrer oxidação a hidroxalamina, pois os inibidores têm afinidade pelo mesmo sítio ativo da enzima, e se ligam a este mais eficientemente, inibindo o processo por mais ou menos tempo, dependendo da estabilidade do composto (McCARTY, 1999).

2.3. Rizosfera: métodos e dinâmica nutricional

2.3.1. Considerações iniciais

O conceito geral de rizosfera (*rhizo* = raiz e *sphera* = zona de influência), estabelecido por Hiltner (1904) diz que é a zona de influência das raízes que vai desde a sua superfície até 1-3 mm de distância. Outros autores falam em 5 mm, e alguns mencionam 20 mm, pois uma série de substratos orgânicos, microrganismos, pH, O_2 , CO_2 e H_2O podem estender sua influência para zonas bem distantes das superfícies radiculares (HINSINGER et al., 2001). De qualquer maneira, a extensão da rizosfera não pode ser precisamente definida, pois isso depende da sensibilidade do sistema às substâncias solúveis ou voláteis oriundas da raiz. Além disso, a extensão do efeito rizosférico dentro do solo dependerá da difusão de uma série de substâncias liberadas pelas raízes, das suas características de difusão e do *status* de água no solo. Quando consideramos um nutriente extremamente móvel como o nitrato, por exemplo, o efeito rizosférico pode se estender por muitos milímetros a partir da raiz; porém, para nutrientes de baixa mobilidade como o P, a extensão do efeito rizosférico pode ser menor que 1 mm (RUAN et al., 2000).

A rizosfera é dividida, para fins didáticos, em: ECTORRIZOSFERA - compreende a área externa das raízes, com 20 μm a partir da superfície radicular; ENDORRIZOSFERA - compreende dos tecidos corticais até o rizoplane, com cerca de 10 μm ; RIZOPLANO - superfície limítrofe entre a raiz e solo, com cerca de 1 μm ; INTERFACE SOLO-PLANTA - a junção das duas áreas rizosféricas (OBURGER e SCHMIDT, 2016). Resumidamente, rizosfera é o efeito das raízes ao seu redor e a zona adjacente às raízes onde as espécies, tipos, números e atividades dos microrganismos diferem do observado no solo fora da zona de influência vegetal, ou

seja, uma zona no solo com características químicas, físicas e biológicas totalmente distintas (BARILLOT et al., 2013).

As propriedades da rizosfera têm elevada estabilidade, e o suprimento constante de substratos orgânicos e fatores de crescimento favorecem ainda mais a atividade microbiana e o tempo de geração microbiano, o que determina as propriedades e as mudanças desse sítio de fundamental importância na nutrição de plantas, de forma que todos os seus aspectos desse, em maior ou menor grau, dependem da exsudação de compostos e da pressão da raiz sobre o solo (NGUYEN, 2003; BADRI et al., 2009).

2.3.2. Dinâmica nutricional na rizosfera

A distribuição espacial de recursos no solo é muito heterogênea e limita a mobilidade da microbiota a zonas ricas em nutrientes, O_2 e outros recursos; por isso, inúmeras estratégias evolutivas foram desenvolvidas para a manipulação dessa disponibilidade e, nesse sentido, a espécie vegetal é tão ou mais importante que os fatores abióticos. A planta é ela quem distribui a deposição de C, fundamental para os seres heterotróficos nesse sítio, direcionando a competição para os nutrientes minerais, especialmente P e Fe, normalmente mais escassos, e que determinam estrutura da comunidade biológica ao favorecer os organismos mais eficientes em mobilizá-los (AERTS, 1999; LYNCH e BROWN, 2001; LAMONT, 2003; HAMMOND e WHITE, 2008).

A transferência de nutrientes ocorre na rizosfera via fluxo de massa e/ou difusão, em função da solução do solo. Assim, quando abundantes, os nutrientes acumulam na rizosfera, pois o suprimento supera a demanda (para Ca, Mg, N e K, principalmente), podendo inclusive ocorrer precipitação; porém, quando o fluxo é menor do que a demanda, a concentração se reduz na rizosfera e cria um gradiente de difusão radial (para P, micronutrientes, N e K, principalmente) (HINSINGER e GILKES, 1996; HINSINGER et al., 2005). A zona de depleção/acumulação pode se estender até 2 mm para elementos menos móveis, ou muito mais para elementos de maior mobilidade. Para fosfato essa zona de depleção não é maior que 1-2 mm; porém, na presença de fungos micorrízicos essa zona pode se estender por vários mm a mais (SCHACHTMAN et al., 1998).

Além dos processos citados, os microrganismos também alteram a disponibilidade de nutrientes através de uma série de processos químicos e bioquímicos: sideróforos, fosfatases ácidas, ácidos orgânicos, prótons, fixação biológica de N_2 , etc. (LARSEN et al., 2015). Para o P, especialmente, uma série de fenômenos ocorrem: as formas de P variam em concentração ao longo da raiz, por exemplo, pois algumas tendem a aumentar enquanto outras tendem a diminuir com a distância, por conta dos processos de remobilização e reposição entre os compartimentos (HINSINGER et al., 2001). Nesse contexto a arquitetura do sistema radicular é mais importante para elementos de baixa mobilidade, como P; porém, a plasticidade radicular é mais responsiva à heterogeneidade de distribuição e formas de nitrogênio, embora este seja um elemento móvel no solo (AERTS, 1999; LYNCH e BROWN, 2001; BADRI et al., 2009).

2.3.3. Métodos de amostragem rizosférica

Os métodos de amostragem de solo rizosférico para estudos nutricionais e biológicos variam enormemente em vantagens e desvantagens, sendo de fundamental importância na pesquisa a escolha do mais adequado para cada trabalho em particular. De maneira geral, quando não se pretende interferir de maneira nenhuma no desenvolvimento vegetal recomenda-se o cultivo em campo ou em vasos, seguido dos seguintes métodos de amostragem: 1) Escavação ou arranque manual de plantas crescendo livremente no solo; 2) Instalação de caixas preenchida com o solo, e livres de raízes, abaixo do local de estabelecimento das plantas, de forma que elas colonizem essa região e possam ser removidas juntamente com o compartimento (MAKKONEN e HELMISAARI, 1999; DANJON e REUBENS, 2008). Esses métodos permitem o acesso às informações de produção de biomassa, comprimento, tipos de raízes, morfologia e arquitetura; porém, é trabalhoso, consome muito tempo e só permite a separação do solo em rizosférico (àquele imediatamente aderido à raiz) e não-rizosférico (o solo mais distante da região radicular), através de “agitação-lavagem” (NEUMANN et al., 2009). Consequentemente, não é possível o estudo da dinâmica do nutriente ao longo das diferentes zonas rizosféricas, sendo possível acessar apenas diferenças muito bruscas entre as duas porções de solo, com baixa resolução espacial e desuniformidade na quantidade obtida de amostras. Além disso, se os solos têm

texturas e umidades diferentes, existe maior tendência de perda para os solos mais arenosos e secos (LUSTER et al., 2009; BARILOTT et al., 2013).

Para aumentar a resolução espacial são utilizados, em condições de laboratório, estratégias como: 1) *Rhizoboxes* associados à obtenção periódica de imagens, uma vez que a raiz se desenvolve ao longo de uma superfície vertical transparente; 2) *Rhizotones*, que possuem o mesmo princípio, mas são mais adequados para estudos prolongados, com uma maior *root-window* (POLOMSKI e KUHN, 2002; NEUMANN, 2006). Porém, esses métodos exigem equipamentos caros e sofisticados para obtenção das imagens e modificam drasticamente o desenvolvimento da cultura e o estabelecimento de uma arquitetura normal da raiz, com impactos diretos nos processos rizosféricos (NEUMANN et al., 2009). Uma maneira mais simples e barata de ampliar a resolução espacial é o uso de sistemas compartimentados, dos quais o mais conhecido é o desenvolvido por Kuchenbuch e Jung (1982) e que permite a formação de um tapete de raiz sobre uma rede forte o suficiente para resistir à pressão radicular, mas suficientemente permeável para permitir o fluxo de elementos, gases e água. Nesse caso, temos um compartimento superior com a planta, e um compartimento inferior com a porção de solo onde serão feitas as análises posteriores, seja em solo rizosférico inteiro, como recomendado por Chaignon e Hinsinger (2003) para espessuras de até 3 mm, seja em diferentes zonas depois do “fatiamento em camadas” com o auxílio de fatiadores especialmente desenvolvidos para esses estudos, como recomendado por Hinsinger e Gilkes (1996) para espessuras maiores que 3 mm. A compartimentação do solo, porém, limita o desenvolvimento vegetal normal e não permite o estabelecimento de uma arquitetura radicular.

O método de “agitação-lavagem” é adequado para estudos de campo e em vasos tradicionais (SMILEY, 1974), tendo sido descrito a primeira vez por Starkey (1931), e desde então, constantemente empregado para estudos sobre diferenças químicas e nutricionais entre o solo sobre influência da raiz e o solo sem influência radicular (RILEY e BARBER, 1971). As vantagens observadas desse método são: 1) Simples execução; 2) Não restringe o crescimento da raiz; 3) Não exige equipamentos sofisticados ou a fabricação de containers especiais. Porém, as suas desvantagens são comumente comentadas na literatura: 1) Baixa resolução espacial, sendo capaz de identificar apenas diferenças bruscas entre solo rizosférico e não-rizosférico; 2) A quantidade removida de solo rizosférico depende

enormemente da granulometria do solo e da umidade, pois quantidade maior do material imediatamente aderido à raiz é perdida no processo de separação raiz-solo circundante para solos mais arenosos e mais secos; 3) Os processos de aquisição de nutrientes ocorrem muito próximos à raiz, de forma que esse método não é particularmente importante nos casos que exigem uma melhor resolução espacial (LUSTER et al., 2009; BARILOTT et al., 2013). Muitos autores propõem que a coleta de solo rizosférico seja feita após a secagem do material (TURPAULT, 2006), porém, a etapa de lavagem-remoção é mais universalmente empregada depois de sugerido por Tedla e Stanghellini (1992), especialmente em estudos que também envolvam parâmetros biológicos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Esse estudo foi dividido em três experimentos, sendo os dois primeiros conduzidos em casa de vegetação e o último em sala de cultivo sob condições totalmente controladas. Com o primeiro experimento, avaliou-se os efeitos dos tratamentos sobre a produção da matéria seca e as características radiculares e, também, as diferenças entre solo rizosférico e não-rizosférico para algumas variáveis químicas e biológicas, especialmente para as formas do fósforo (P). Com o segundo experimento, ampliou-se a resolução espacial para avaliação da dinâmica dessas características químicas e biológicas ao longo das diferentes camadas da rizosfera, e as variáveis de desenvolvimento também foram consideradas, levando-se em consideração o impacto da compartimentalização sobre o crescimento das plantas. Finalmente, com o terceiro experimento avaliou-se os efeitos dos tratamentos sobre o desenvolvimento, as características radiculares e como elas podem afetar a absorção e o uso do P, excluindo-se o efeito rizosférico.

3.1. Experimento I

3.1.1. Caracterização do local e do solo

O ensaio foi conduzido em casa de vegetação, na Faculdade de Ciências Agrônomicas (UNESP-FCA), Botucatu-SP (22°51' S, 48°26' W, altitude 840 m). A temperatura e umidade do local foram monitoradas durante o cultivo, entre 03 de novembro de 2013 e 13 de dezembro de 2013, com datalogger modelo CR10 Campbell Scientific (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT), e mostraram o seguinte padrão: temperaturas noturnas de 19±5°C, diurnas de 35±6°C, UR noturnas de 80±10% e diurnas de 30±5%.

O solo foi coletado a 0-20 cm de profundidade e classificado como LATOSSOLO Vermelho distroférrico (Lvd) (EMBRAPA, 2006), com as seguintes características granulométricas: 670 g kg⁻¹ de areia, 210 g kg⁻¹ de argila e 20 g kg⁻¹ de silte, tratando-se de um solo franco-argilo-arenoso. As características químicas iniciais do solo foram: pH 4,1 (CaCl₂); 16 g dm⁻³ de matéria orgânica (MOS); 7 mg dm⁻³ de P (resina); 1 mmol_c dm⁻³ de K; 16 mmol_c dm⁻³ de Ca; 5 mmol_c dm⁻³ de Mg; SB de 22 mmol_c dm⁻³; CTC de 92 mmol_c dm⁻³ e V de 24%.

3.1.2. Correção do solo e definição dos tratamentos

O solo recebeu a aplicação de calcário dolomítico (PRNT = 96%) para elevar a saturação de bases (V%) para 70% (equivalente a 4,4 t ha⁻¹) e, então, permaneceu incubado em umidade próxima à capacidade máxima de retenção. Em seguida, a fertilização foi conduzida de acordo com 15 tratamentos: 240 mg nitrogênio kg⁻¹ de solo em três formas diferentes (fonte amoniacal como sulfato de amônio, fonte nítrica como nitrato de cálcio e a aplicação conjunta das duas de forma que cada uma fornecesse 50% do nitrogênio requerido) combinadas com cinco doses de P (0, 40, 80, 120 e 160 mg P kg⁻¹ de solo) aplicadas na forma de superfosfato triplo (SFT). Todas as unidades experimentais também receberam 125 mg kg⁻¹ de K como cloreto de potássio. As unidades experimentais com amônio apenas (A) ou nitrato+amônio (NA) receberam 25 mg kg⁻¹ de dicianodiamida (DCD) como inibidor de nitrificação (IN).

3.1.3. Cultivo do milho e coleta de material para análise

A cultura utilizada foi o milho (*Zea mays* L.), e o genótipo foi o 2B587 da Down AgroScience, de alto potencial produtivo. O milho foi semeado em 03 de novembro de 2013 com quatro sementes por vaso, mas apenas duas permaneceram depois do desbaste uma semana após a emergência. Irrigações diárias mantiveram a umidade do solo em 70% da capacidade máxima de retenção (Figura 1).



Figura 1 - Experimento I em casa de vegetação anteriormente ao desbaste

Um mês após a emergência (11 de dezembro de 2013) as plantas foram cortadas ao nível do solo e as raízes foram cuidadosamente separadas do solo circundante. A parte aérea e as raízes foram acondicionadas em sacos de papel e secas a 65°C por 72 horas. O solo imediatamente aderido à raiz, considerado como solo rizosférico, foi coletado através de agitação e de jatos de água destilada em pisseta. A porção de solo mais distante da raiz, considerada como solo não-rizosférico, foi coletada manualmente com o uso de estiletes e luvas cirúrgicas. Das oito amostras de solo obtidas para cada tratamento, quatro foram acondicionadas em sacos de papel e secas a 45°C por 72 horas para obtenção de terra fina seca em estufa ar (TFSE), e quatro guardadas frescas em saquinhos bromatológicos de 5x5 cm envoltos em papel alumínio e acondicionadas a -80°C.

3.1.4. Análises nas amostras de solo

As amostras congeladas de solo foram utilizadas para determinação dos teores de amônio e nitrato como descrito por Keeney e Nelson (1982), e a partir

desses valores, pela soma e pela razão, foram determinados N-mineral e a relação amônio: nitrato, respectivamente. As amostras de TFSA foram usadas para determinação do pH (CaCl_2) segundo Raij et al. (2001) e para o fracionamento de P segundo Hedley et al. (1982) modificado por Condon e Goh (1989).

Para o fracionamento químico de P, amostras de 0,5 g de solo foram acondicionadas em tubos plásticos (15 mL) de centrífuga e submetidas à extração, segundo a capacidade de solubilização crescente dos extratos: 1) Pi-RTA: resina de troca aniônica (RTA) 204SZRA - 88091668 (GE Water & Process Technologies, Trevose, PA, USA); 2) Pi-bic e Po-bic: bicarbonato de sódio (NaHCO_3) 0,5 mol L^{-1} em pH 8,5; 3) Pi-hid01 e Po-hid01: hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol L^{-1} ; 4) Pi-hcl: ácido clorídrico (HCl) 1 mol L^{-1} ; 5) Pi-hid05 e Pohid05: hidróxido de sódio (NaOH) 0,5 mol L^{-1} (NaOH); 6) P-residual: digestão-oxidação com ácido sulfúrico (H_2SO_4) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) concentrados, associados com solução saturada de cloreto de magnésio (MgCl_2), como descrito por Brookes e Powlson (1982). O acúmulo de resíduo entre um extrator e outra foi evitado centrifugando-se o solo com solução de cloreto de sódio (NaCl) 0,5 mol L^{-1} entre as etapas por cinco minutos, como recomendado por Gatiboni et al. (2013). Adicionou-se 10 mL de cada extrato, e o período de agitação foi de 16 horas.

Nos extratos ácidos, o fósforo inorgânico (Pi) foi determinado segundo o método de reação fosfato-molibdato na presença de ácido ascórbico em meio ácido descrito por Murphy e Riley (1962). Os extratos alcalinos foram separados em duas alíquotas: 1) alíquota para determinação do Pi logo após a extração, segundo Dick e Tabatabai (1977), na presença de arsenito-citrato; 2) alíquota submetida à digestão com persulfato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) 7,5% (m/v) e ácido sulfúrico (H_2SO_4) 1:1 em autoclave (USEPA, 1971) para determinação do P total (Pt) nos extratos. A diferença entre o Pt e Pi corresponde ao fósforo orgânico (Po).

As formas de P obtidas no fracionamento químico foram agrupadas, de acordo com a labilidade ou a natureza, dentro dos seguintes compartimentos: P lábil (Pi-RTA + Pi-bic + Po-bic); P moderadamente lábil (Pi-hid01 + Po-hid01 + Pi-hid05 + Po-hid05); P menos lábil (Pi-hcl + P-residual), P geoquímico (Pi-RTA + Pi-bic + Pi-hid01 + Pi-hid05 + Pi-hcl + P-residual) e P biológico (Po-bic + Po-hid01 + Po-hid05) (CROSS e SCHLESINGER, 1995). A soma de todas as formas de P corresponde ao P total (Pt).

3.1.5. Análises nos tecidos vegetais

Após seco, o material vegetal foi pesado e moído para passar em peneira de 1 mm e, então, após digestão nitro-perclórica ($\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$), foram determinados os teores de P, segundo a metodologia descrita por Malavolta et al. (1997). A partir desses dados foram determinados os totais de P absorvido e acumulado em cada tratamento, relação raiz/parte aérea, eficiência fisiológica e eficiência de absorção como recomendado por Roberts (2008):

$$\text{ERP} = \frac{(P_{ii} - P_i)}{Q} \times 100, \quad (\text{Equação 1})$$

onde ERP (%) é a eficiência de recuperação do P; P_{ii} (mg) é o total de P absorvido no tratamento com certa dose de P aplicada; P_i (mg) é o total de P absorvido a 0 mg P kg^{-1} de solo; Q é a quantidade total de P aplicada na forma de superfosfato triplo.

$$\text{EFP} = \frac{(MST_{ii} - MST_i)}{(P_{ii} - P_i)}, \quad (\text{Equação 2})$$

onde EFP (mg mg^{-1}) é a eficiência fisiológica do P; MST_{ii} (mg) é matéria seca total produzida no tratamento com certa dose de P aplicada; MST_i (mg) é a matéria seca total produzida a 0 mg P kg^{-1} de solo; P_{ii} (mg) é o total de P absorvido no tratamento com certa dose de P aplicada; P_i (mg) é o total de P absorvido a 0 mg P kg^{-1} de solo.

3.1.6. Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento experimental foi um fatorial 3x5 (forma de nitrogênio x doses de P), inteiramente ao acaso, com oito repetições. Os dados qualitativos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Os efeitos das doses foram analisados por meio de regressão e os modelos foram escolhidos com base no teste F, com significância de $p < 0,01$ e $p < 0,05$, e nos seus coeficientes de determinação. O software utilizado foi o R (R CORE TEAM, 2016) e seus pacotes Agricolae (FELIPE DE MENDIBURU, 2016), Lattice (SARKAR e DEEPAYAN, 2008) e Plyr (HADLEY WICKHAM, 2011). Os gráficos foram construídos no SIGMAPLOT (2011).

3.2. Experimento II

3.2.1. Caracterização do local e do solo

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, na Faculdade de Ciências Agronômicas (UNESP-FCA), Botucatu-SP (22°51' S, 48°26' W, altitude 840 m). A temperatura e umidade foram controladas durante o cultivo do milho (06 de março de 2014 – 19 de abril de 2014), utilizando-se datalogger modelo CR10 Campbell Scientific (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT), e mostraram o seguinte padrão: temperaturas noturnas $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ e diurnas de $35 \pm 5^{\circ}\text{C}$, combinadas com UR noturnas de $75 \pm 5\%$ e diurnas de $35 \pm 5\%$. Amostras de um LATOSSOLO Vermelho distroférrico (Lvd) (EMBRAPA, 2006), com textura franco-argilo-arenosas (670 g kg^{-1} de areia, 210 g kg^{-1} de argila e 20 g kg^{-1} de silte), foram coletadas a 0-20 cm de profundidade. Quimicamente, é um solo com as principais características resumidas a seguir: pH 4,1 (CaCl_2); 16 g dm^{-3} de matéria orgânica; 7 mg dm^{-3} de P (resina); $1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K; $16 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca; $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Mg; SB de $22 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; CTC de $92 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e V de 24%.

3.2.2. Correção do solo e definição dos tratamentos

Aplicou-se o equivalente a $4,4 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário dolomítico (PRNT = 96%) para elevar a saturação de bases (V%) para 70%, sendo o solo posteriormente incubado na capacidade máxima de retenção de água por 30 dias. Como no experimento anterior, a fertilização foi conduzida de acordo com 15 tratamentos: $240 \text{ mg nitrogênio kg}^{-1}$ de solo em três arranjos diferentes (fonte amoniacal como sulfato de amônio, fonte nítrica como nitrato de cálcio e a aplicação conjunta das duas de forma que cada uma oferecesse 50% do nitrogênio requerido) combinadas com cinco doses de P (0, 40, 80, 120 e 160 mg P kg^{-1} de solo) aplicadas na forma de SFT. Todas as unidades experimentais receberam potássio (K) (125 mg K kg^{-1} de solo) na forma de cloreto de potássio, e o inibidor de nitrificação (IN), na forma de dicianodiamida ($25 \text{ mg DCD kg}^{-1}$ de solo), foi aplicado nos tratamentos com amônio apenas (A) ou amônio + nitrato (NA).

3.2.3. Lavagem ácida da areia

Para garantir a isenção de elementos tóxicos, especialmente manganês (Mn), a areia grossa foi previamente lavada de acordo com os seguintes passos: 1) Inicialmente 10 L de areia peneirada (2,4 mm) foram adicionados a uma caixa de armazenamento de água com solução de ácido clorídrico (HCl) 5%, de forma que a fase líquida da mistura cobrisse totalmente a fase sólida; 2) A mistura ficou 24 horas em repouso; 3) A mistura foi agitada três vezes em betoneira, por 10 minutos cada, com substituição da solução ácida a cada nova etapa; 4) A areia foi lavada quatro vezes, duas vezes com água da torneira e duas vezes com água destilada, com agitações de 10 minutos; 5) A areia foi separada através de filtração em tecido e secou em casa de vegetação.

3.2.4. Montagem dos PGCs

Os *Plant Growth Container* (PGCs) foram montados a partir de dois segmentos de cano de PVC com 10 cm de diâmetro, separados por duas telas de tecido, com design semelhante ao sugerido por Kuchenbuch e Jungk (1982) e modificado por Chen et al. (2002). O compartimento superior com 7 cm de altura foi preenchido com areia lavada e abrigou o tapete de raízes sobre uma tela que delimitou as duas partes, impedindo o crescimento das raízes no solo acondicionado no compartimento inferior. O compartimento inferior, com as mesmas dimensões do superior, foi preenchido com as amostras de solo adubadas segundo os tratamentos e, em seguida, fechado com uma tela dupla de tecido na extremidade inferior, para impedir a perda de solo e, ao mesmo tempo, permitir a ascensão da água, aplicada regularmente, por capilaridade (Figuras 3 e 4).

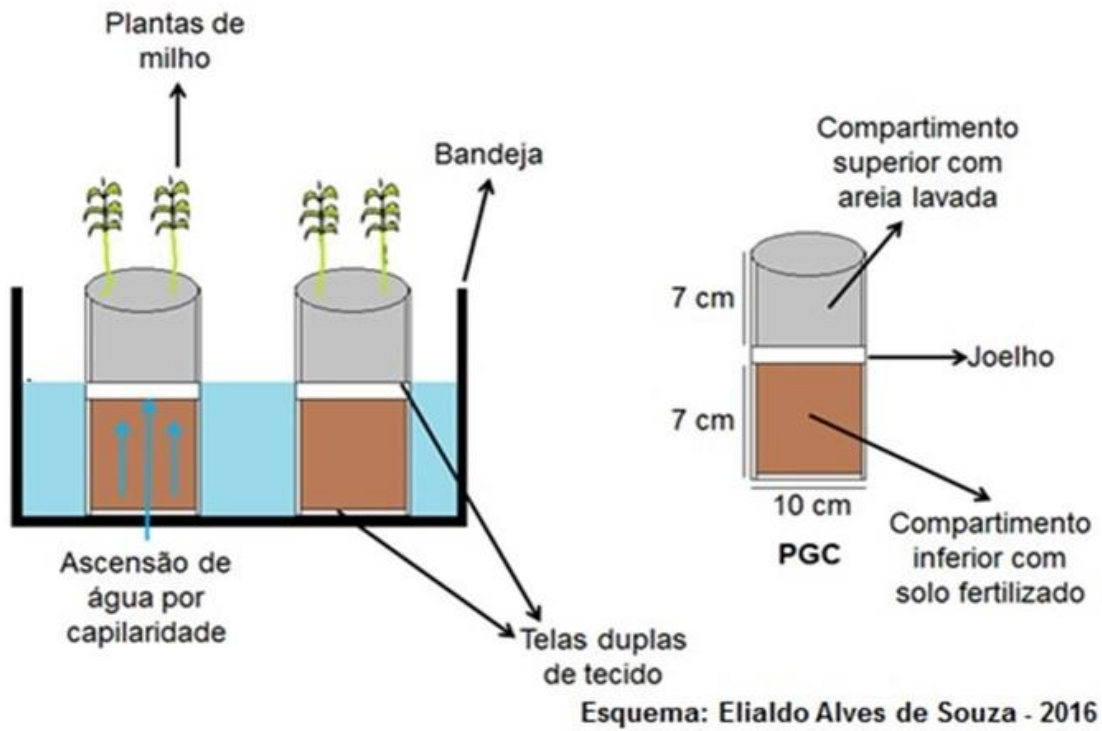


Figura 2 - Representação esquemática dos *Plant Growth Containers* (PGCs)



Figura 2 - PGCs em casa de vegetação

3.2.5. Cultivo do milho e coleta de material para análise

A cultura utilizada foi o milho (*Zea mays* L.), híbrido precoce 2B587 da Down AgroScienc, semeado em 06 de março de 2014, com quatro sementes por vaso, restando duas depois do desbaste realizado uma semana após a emergência. (Figura 3). Após 35 da emergência, em 19 de abril de 2014, as plantas foram cortadas ao nível do solo e as raízes foram cuidadosamente separadas da porção de areia. A parte aérea e as raízes foram acondicionadas em sacos de papel e secas a 65°C por 72 horas. Das oito repetições correspondentes a cada tratamento, em todos os solos dos compartimentos inferiores dos PGCs foram fatiados em camadas finas, nas profundidades de 0-0,5, 0,5-1,0, 1,0-2,0, 2,0-3,0, 3,0-4,0, 4,0-5,0, e 5,0-10,0 mm, com o auxílio de um fatiador de solo especialmente desenhado para esse tipo de estudo (Figura 5). Quatro amostras foram acondicionadas em sacos de papel e secas a 45°C por 72 horas para obtenção de TFSA e as quatro restantes foram guardadas em saquinhos bromatológicos de 5x5 cm envoltos em papel alumínio e acondicionadas a -80°C.

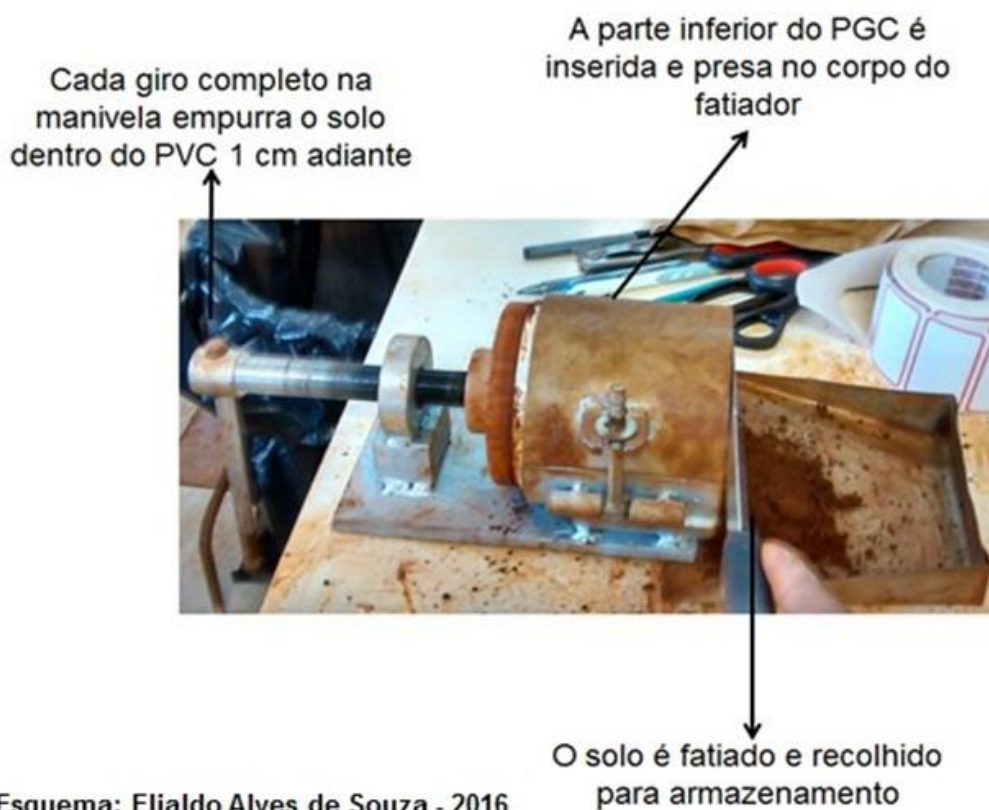


Figura 5 - Esquema de funcionamento do fatiador de solo em PGCs

3.2.6. Análises nas amostras de solo

As amostras congeladas de solo foram utilizadas para determinação dos teores de amônio e nitrato como descrito por Keeney e Nelson (1982), e a partir desses valores, N-mineral (amônio + nitrato) e a relação amônio: nitrato. Essas amostras foram usadas para determinação do carbono orgânico solúvel em água (COSA) (BARTLETT e ROSS, 1988) e, também, para determinação do P na biomassa microbiana (PBM) (HEDLEY e STEWART, 1982; RHEINHEIMER, 2000), um método que extrai o Pi disponível com resina antes do processo de fumigação-extração com clorofórmio (NaHCO_3) e promove o ajuste na capacidade do solo em absorver Pi.

As amostras de TFSA foram usadas para determinação do pH (CaCl_2) segundo Raij et al. (2001) e para o fracionamento de P segundo Hedley et al. (1982) modificado por Condon e Goh (1989). Amostras de 0,5 g de solo foram acondicionadas em tubos plásticos (15 mL) de centrífuga e submetidas à extração, segundo a capacidade de solubilização crescente dos extratos: 1) Pi-RTA: resina de troca aniônica (RTA) 204SZRA - 88091668 (GE Water & Process Technologies, Trevose, PA, USA); 2) Pi-bic e Po-bic: bicarbonato de sódio (NaHCO_3) $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ em pH 8,5; 3) Pi-hid01 e Po-hid01: hidróxido de sódio (NaOH) $0,1 \text{ mol L}^{-1}$; 4) Pi-hcl: ácido clorídrico (HCl) 1 mol L^{-1} ; 5) Pi-hid05 e Pohid05: hidróxido de sódio (NaOH) $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (NaOH); 6) P-residual: digestão-oxidação com ácido sulfúrico (H_2SO_4) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) concentrados, associados com solução saturada de cloreto de magnésio (MgCl_2), como descrito por Brookes e Powlson (1982). Entre uma extração e outra as amostras foram centrifugadas com solução de cloreto de sódio (NaCl) $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ por cinco minutos (Gatiboni et al., 2013). Utilizou-se 10 mL de cada solução extratora, em um período de 16 h de agitação.

O fósforo inorgânico (Pi) foi determinado segundo o método de reação fosfato-molibdato na presença de ácido ascórbico em meio ácido descrito por Murphy e Riley (1962), para os extratos ácidos e, para os extratos alcalinos, segundo Dick e Tabatabai (1977), na presença de arsenito-citrato. Uma segunda alíquota dos extratos alcalinos foi submetida à digestão com persulfato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) 7,5% (m/v) e ácido sulfúrico (H_2SO_4) 1:1 em autoclave (USEPA, 1971), acidificando-se e permitindo a determinação do P total (Pt) nos extratos como um

extrato ácido, por Murphy e Riley (1962), de forma que diferença entre o Pt e Pi determinasse o teor de fósforo orgânico (Po).

As formas de P obtidas foram agrupadas da seguinte maneira: P lábil (Pi-RTA + Pi-bic + Po-bic); P moderadamente lábil (Pi-hid01 + Po-hid01 + Pi-hid05 + Po-hid05); P menos lábil (Pihcl + P-residual), P geoquímico (Pi-RTA + Pi-bic + Pi-hid01 + Pi-hid05 + Pi-hcl + P-residual) e P biológico (Po-bic + Po-hid01 + Po-hid05) (CROSS e SCHLESINGER, 1995).

3.2.7. Análises nas raízes e nos tecidos vegetais

Após a lavagem, as raízes foram submetidas a um scanner de leitura ótica e analisadas com o programa WinRhizo versão 3.8-b (Regent Instrument Inc.), para determinar o comprimento e área superficial radicular, segundo os critérios do método de Tennat (1975). O material vegetal seco foi pesado e moído para passar em peneira de 1 mm e, então, as concentrações de P foram determinadas segundo a metodologia descrita por Malavolta et al. (1997). A partir desses dados foram determinados os totais de P absorvido em cada tratamento.

3.2.8. Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento experimental foi um fatorial 3x5 (forma de nitrogênio x doses de P) inteiramente ao acaso com oito repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$), para as formas de nitrogênio (dentro da mesma dose de P e da mesma distância rizosférica) e para as diferentes distâncias rizosféricas (na mesma forma de nitrogênio associada à mesma dose de P). Os efeitos das doses foram analisados por meio de regressão e os modelos foram escolhidos com base no teste F, com significância de $p < 0,01$ e $p < 0,05$, e nos seus coeficientes de determinação. Os pacotes do software R (R CORE TEAM, 2016) utilizados foram: Agricolae (FELIPE DE MENDIBURU, 2016), Lattice (SARKAR e DEEPAYAN, 2008) e Plyr (HADLEY WICKHAM, 2011).

3.3. Experimento III

3.3.1. Local

O experimento foi conduzido no The James Hutton Institute, unidade de Dundee, na Escócia, em uma sala fechada com condições totalmente controladas de temperatura, umidade e período de luz.

3.3.2. Sistema de scanners e soluções nutritivas

Plantas de milho (*Zea mays* L.) do híbrido 2B587 da DOW AgroScience, cresceram no sistema de scanners descrito por Adu et al. (2015). As sementes foram colocadas sobre folhas de germinação de 12x12 cm (Anchor Paper, Saint Paul, MN, EUA) acondicionados no fundo de placas de Petri quadradas, pulverizadas com água deionizada e colocadas verticalmente em uma incubadora Sanyo MIR153 a 25°C para germinar. Dois dias após a semeadura (DAS), as plântulas com comprimento de radícula semelhante (entre 1,5 e 2,0 cm) foram transferidas para folhas de germinação com dimensões de 20x30 cm anexadas a scanners de mesa por uma placa preta Perspex de 20x32 cm (Figura 6A). Cada plântula foi coberta por tiras de algodão com 2,0 a 2,5 cm, anexada ao papel de germinação de tamanho maior por grampeagem e umedecidas com água deionizada antes do fechamento definitivo do scanner para evitar dessecação (Figura 6B). Duas plântulas foram transferidas para cada scanner fixado em posição levemente inclinada 5 cm acima de 20 L de solução nutritiva contida em tanques de plástico polivinílico opaco, cada um nutrindo 10 plantas distribuídas em cinco scanners, similarmente ao descrito por Adu et al. (2014). Aproximadamente 10 cm do papel de germinação foram submersos na solução nutritiva para garantir a ascensão por capilaridade da água e dos nutrientes.

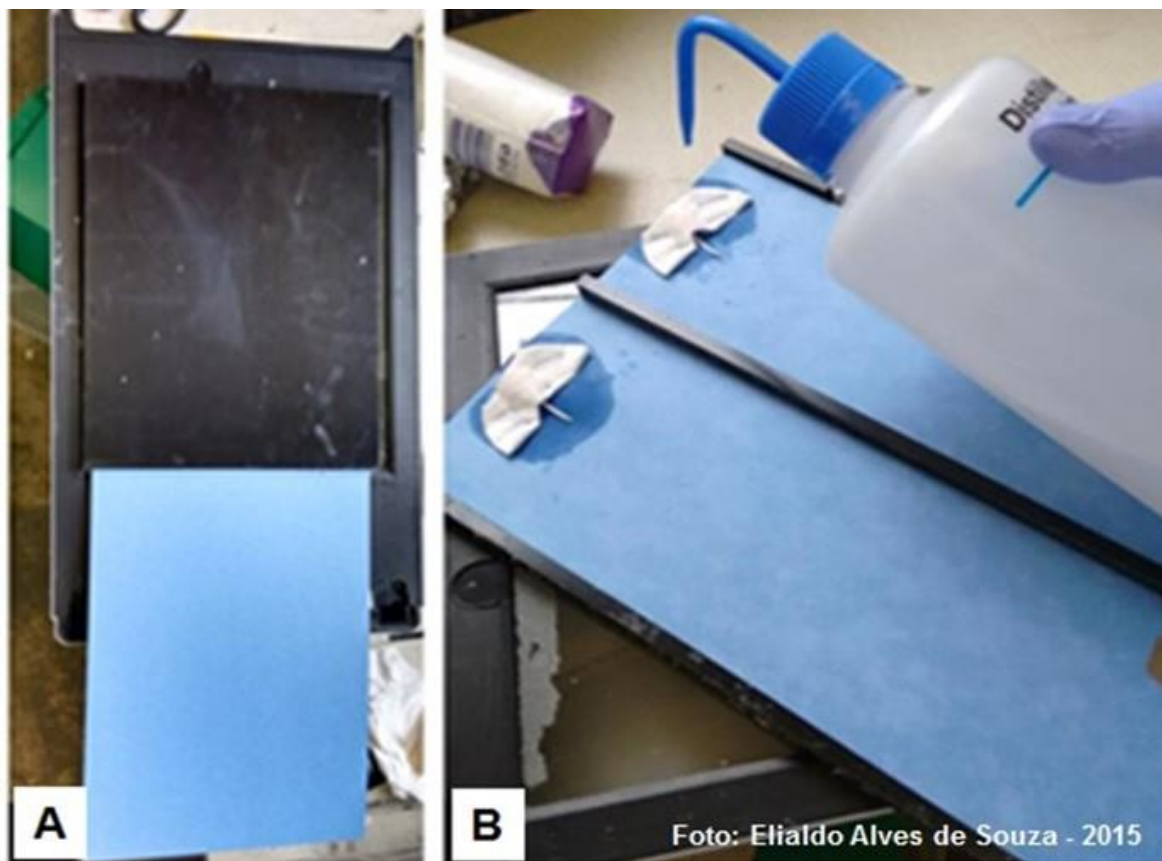


Figura 5 - Montagem do sistema: A) Folha de papel de germinação fixada entre a placa preta Perspex e o scanner; B) Plântulas fixadas ao papel através de tiras de algodão grampeadas e umedecidas com água deionizada

Todas as soluções nutritivas foram preparadas com água deionizada e continham: 0,71 mM de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 0,64 mM de KOH; 0,6 mM de FeNaEDTA; 33,35 μM de H_3BO_3 ; 0,62 μM de $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 1,25 μM de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 16,5 μM de $\text{MnSO}_4 \cdot 1\text{H}_2\text{O}$ e 3,75 μM $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Essas soluções diferiam entre si devido à concentração de alguns nutrientes, como descrito abaixo:

Solução A: 10 mM de NH_4Cl como fonte de amônio; 0,32 mM de KH_2PO_4 (100% de P) como fonte de fosfato e 2,53 mM de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Solução B: 10 mM de NH_4Cl como fonte amônio; 0,16 mM de KH_2PO_4 (50% de P) como fonte de fosfato e 2,53 mM de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Solução C: 5,92 mM de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ como fonte de nitrato; 0,32 mM de KH_2PO_4 (100% de P) como fonte de fosfato e 26,88 μM de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Solução D: 5,92 mM de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ como fonte de nitrato; 0,16 mM de KH_2PO_4 (50% de P) como fonte de fosfato e 26,88 μM de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

3.3.3. Condução dos ensaios e coleta de material

O experimento, conduzido com múltiplas soluções nutritivas, foi realizado em quatro etapas, em um esquema fatorial 2x2, sendo o primeiro fator a forma de nitrogênio (amônio ou nitrato) e o segundo o nível de fosfato na solução (100% ou 50%). Os dados dos parâmetros estudados foram coletados em 40 plantas para cada ensaio. As soluções nutritivas foram ajustadas para pH 6,0 no início de cada ensaio com soluções de H₂SO₄ (10%) e HCl (10%). As plantas foram cultivadas sob um ciclo luz/escuro de 16/8h (25°C/20°C). A intensidade da luz foi mantida a 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ à altura da planta e a umidade relativa do ar foi mantida a 60%. As plantas foram removidas dos scanners em 15 DAS e separadas em raízes, partes aéreas e sementes, para registro dos pesos fresco. Os materiais vegetais foram secos a 65°C durante 72 h para registro do peso seco.

3.3.4. Escaneamento e modelagem dos sistemas radiculares

As imagens foram recolhidas diariamente entre três e 15 DAS pelos scanners, como descrito por Adu et al. (2015). Neste estudo foram utilizados 20 scanners A4 CanoScan 5600F (Canon UK, Reigate, Reino Unido) e 40 plantas foram escaneadas simultaneamente (Figura 8). A frequência de aquisição das imagens, resolução de digitalização e formato de arquivo foram controlados por computadores através do software interno ArchiScan (<http://www.archiroot.org.uk>) programado em Python e empregando o módulo TWAIN (<http://twainmodule.sourceforge.net/>) para comunicação entre computadores e scanners. As características do sistema radicular em cada imagem-momento foram analisadas no software WinRHIZO™ (http://regent.qc.ca/assets/winrhizo_about.html), para: 1) Características da raiz na última imagem obtida: SISTEMA RADICULAR TOTAL (comprimento, volume, área, diâmetro médio); 2) TAXA DE CRESCIMENTO DA RAIZ: analisando o comprimento ao longo do tempo de todas as imagens para cada scanner.

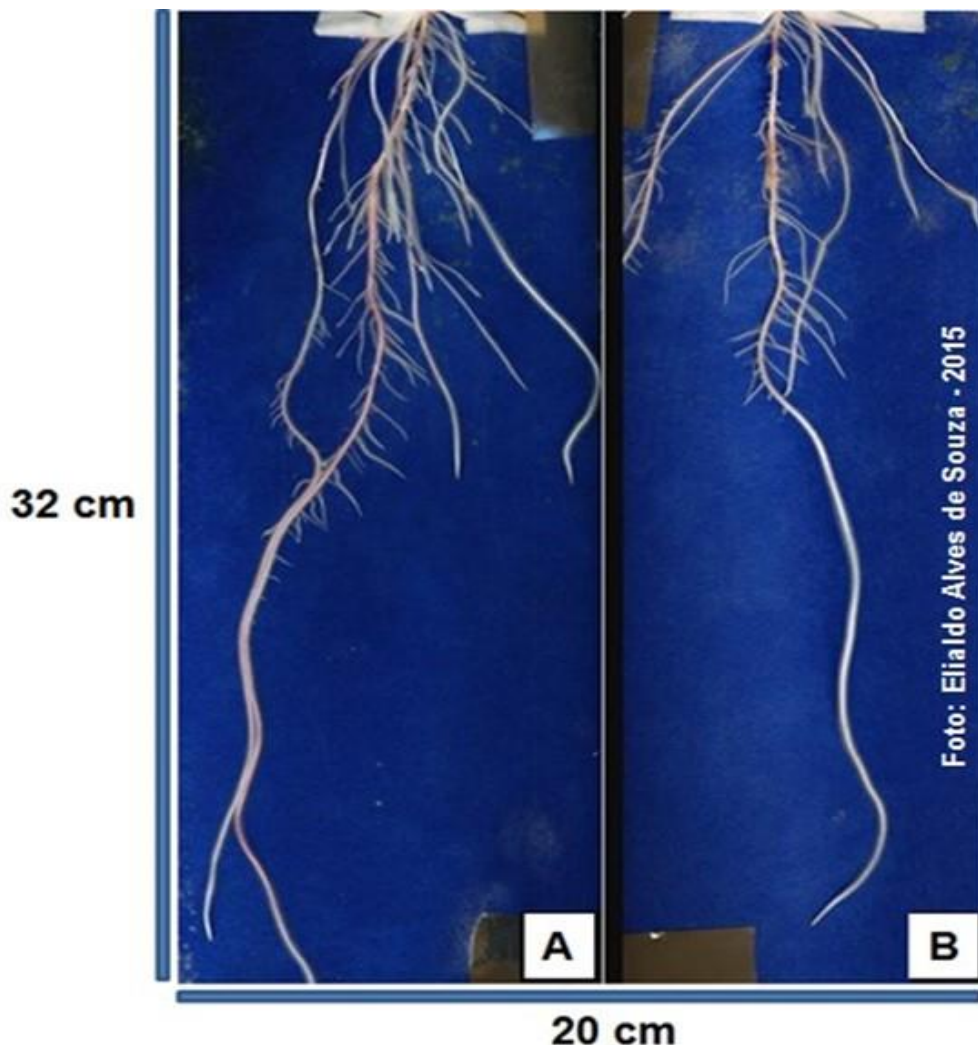


Figura 6 - Processo de escaneamento automático: A) Imagem representativa de um sistema radicular com amônio como forma de nitrogênio; B) Imagem representativa de um sistema radicular cultivado com nitrato como forma de nitrogênio. Imagem obtida 15 dias após a semeadura

RootBox é um pacote do Matlab desenvolvido para desenhar modelos de geometrias ramificadas dependentes em sistemas de raízes em crescimento (LEITNER et al., 2010). Os dados necessários para utilização dessa ferramenta foram as médias dos resultados observados nos scanners para: RAIZ PRIMÁRIA (comprimento total, diâmetro médio, comprimento da zona basal, comprimento da zona apical), RAÍZES SECUNDÁRIAS (número, comprimento, diâmetro, distância entre elas), RAÍZES SEMINAIS (número máximo, comprimento, diâmetro), RAÍZES DA COROA (número máximo, comprimento, diâmetro). Depois de obtidos, os dados foram inseridos no pacote RootBox para simular a "planta média", uma representação esquemática geral da arquitetura do sistema radicular sob determinadas condições (<https://www.csc.univie.ac.at/index.php?page=rootbox>).

3.3.5. P nos tecidos vegetais

As concentrações totais de P na raiz e na parte aérea foram determinadas pelo método de ensaio de fosfato MG (VAN VELDHoven e MANNAERTS, 1987). As concentrações de P nas sementes foram determinadas em ICP-MS (ICP-MS, ELAN DRC-e, PerkinElmerSCIEX, Massachusetts, EUA).

3.3.6. Análise estatística

O número de repetições do experimento foi calculado segundo método desenvolvido por Eng (2003) e adaptado por Adu et al. (2014), para garantir que as diferenças observadas fossem realmente efeito dos tratamentos, e não dos scanners ou do genótipo. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). O software utilizado foi o programa R versão 3.0.2 para Windows (R CORE TEAM, 2013), com os seguintes pacotes: Agricolae (FELIPE DE MENDIBURU, 2016), Lattice (SARKAR e DEEPAYAN, 2008) e Plyr (HADLEY WICKHAM, 2011).

4. RESULTADOS

4.1. Experimento I

4.1.1. Matéria seca, P na planta e eficiência de uso do P

Nas doses 0 e 80 mg P kg⁻¹ de solo não houve diferença na produção de matéria seca total entre as formas de nitrogênio. Porém, a 40 mg P kg⁻¹ a combinação das fontes amoniacal + nítrica (NA) resultou em menor produção de matéria seca total que as outras. Nas doses mais altas de P as fontes amoniacal (A) e NA foram superiores à fonte nítrica (N). Os valores de matéria seca total tiveram crescimento linear a 0,01 de significância para as três formas de adubação nitrogenada (Figura 7).

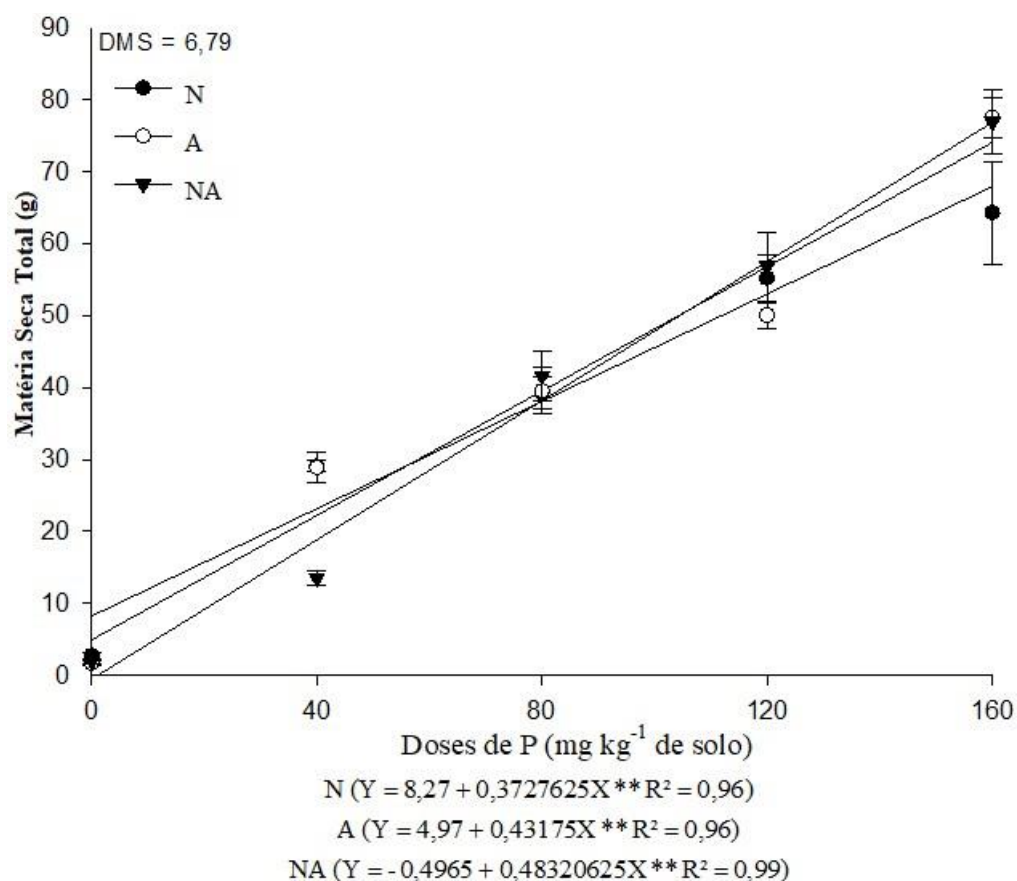


Figura 7 - Produção de matéria seca total (g) do milho em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrato; A: amônio; NA: nitrato+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X² (efeito quadrático); NS (não significativo); * (p<0,05); ** (p<0,01). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

Em todas as doses de P, N resultou em maior relação raiz: parte aérea (Figura 8) e em maior produção de matéria seca da raiz (Figura 9), enquanto NA e A resultaram em valores intermediários e/ou menores. Os valores de relação raiz/parte aérea tiveram comportamento linear decrescente a 0,01 de significância para as três formas de adubação nitrogenada (Figura 8); porém, os dados de matéria seca da raiz tiveram comportamento quadrático, com picos a 120 mg P kg⁻¹ de solo para N e NA, e a 40 mg P kg⁻¹ de solo para A. Os tratamentos A e NA resultaram em maior produção de matéria seca na parte aérea nas maiores doses de P e, além disso, todas as formas de adubação nitrogenada tiveram crescimento linear a 0,01 de significância para esse parâmetro (Figura 9).

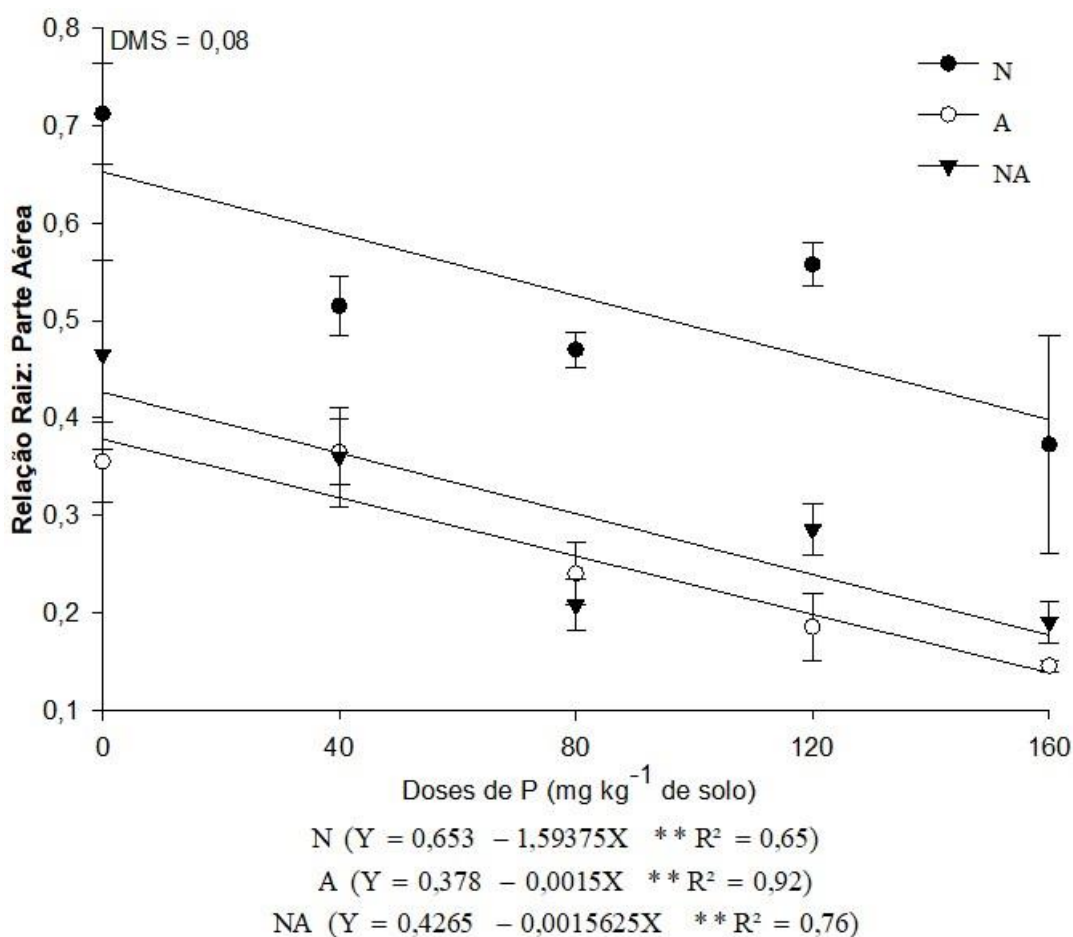
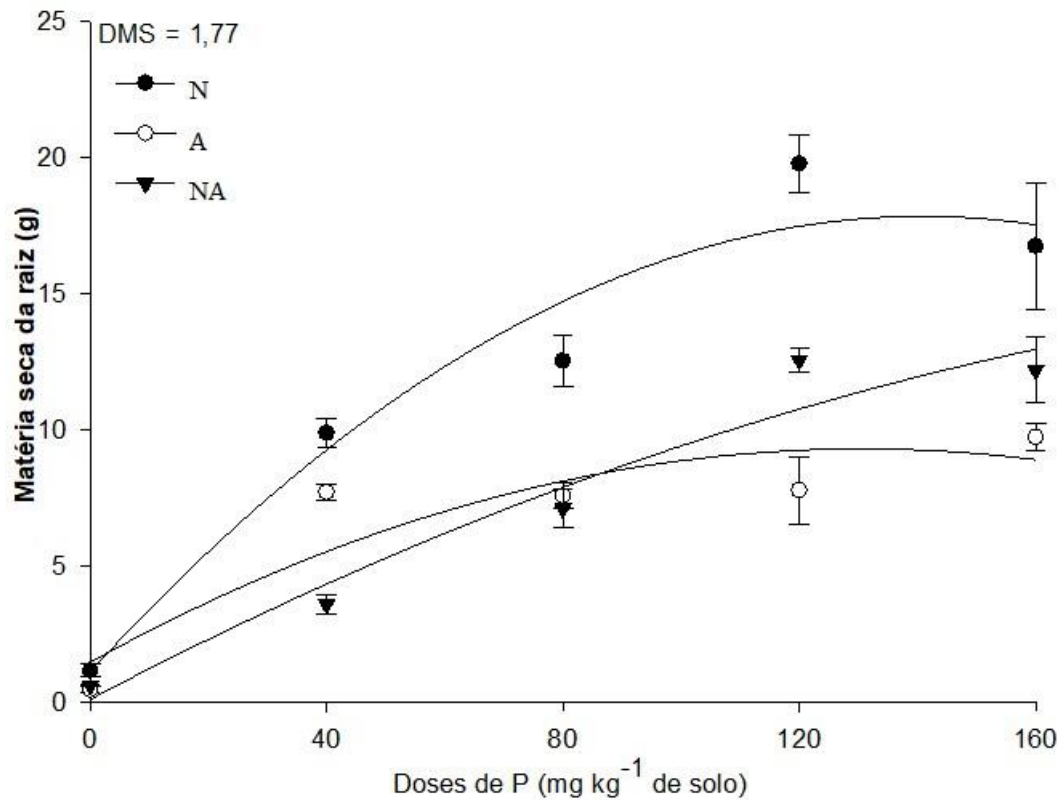


Figura 8 - Relação raiz: parte aérea do milho em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrato; A: amônio; NA: nitrato+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X² (efeito quadrático); NS (não significativo); * (p<0,05); ** (p<0,01). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias



$$N (Y = 1,095 + 0,2377X + 0,0008438X^2 \text{ ** } R^2 = 0,95)$$

$$A (Y = 1,452 + 0,1200X + 0,0004587X^2 \text{ ** } R^2 = 0,83)$$

$$NA (Y = 0,0891 + 0,1144X + -0,0002126X^2 \text{ ** } R^2 = 0,95)$$

Figura 9 - Matéria seca da raiz (g) do milho em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrato; A: amônio; NA: nitrato+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X² (efeito quadrático); NS (não significativo); * (p<0,05); ** (p<0,01). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

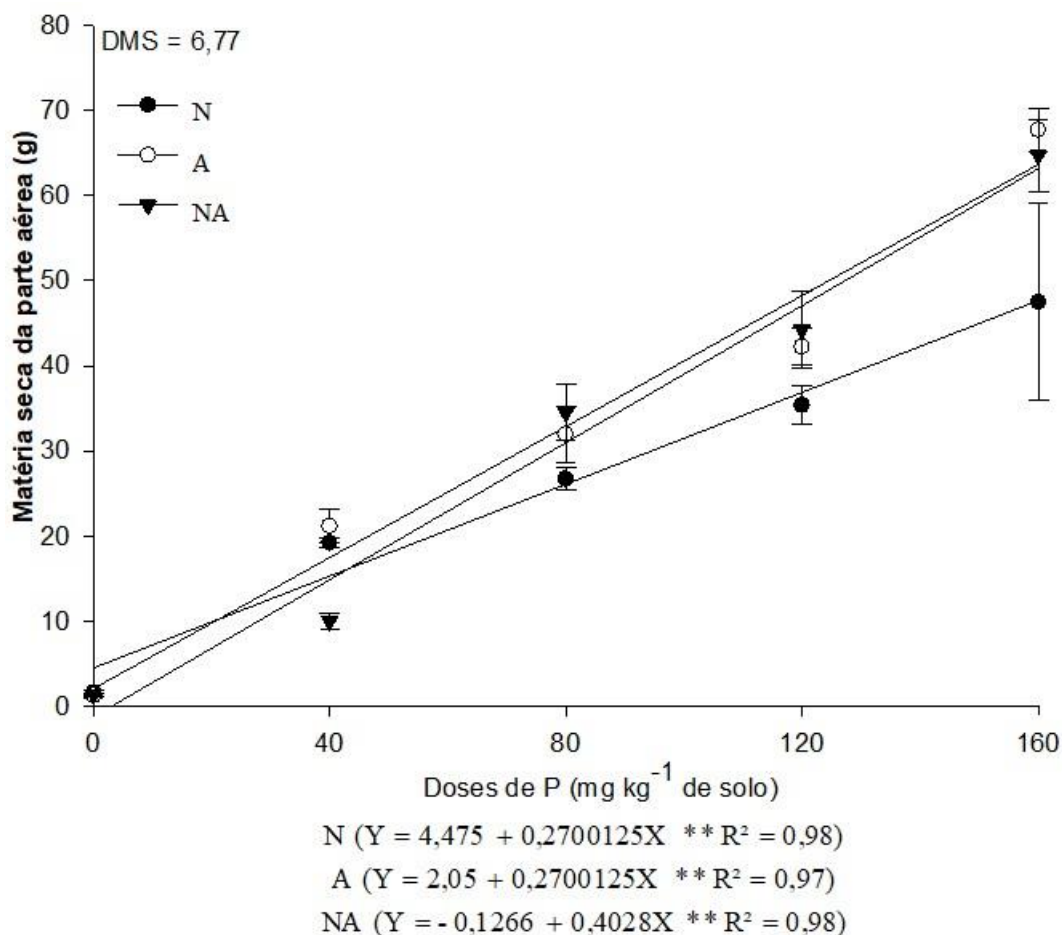
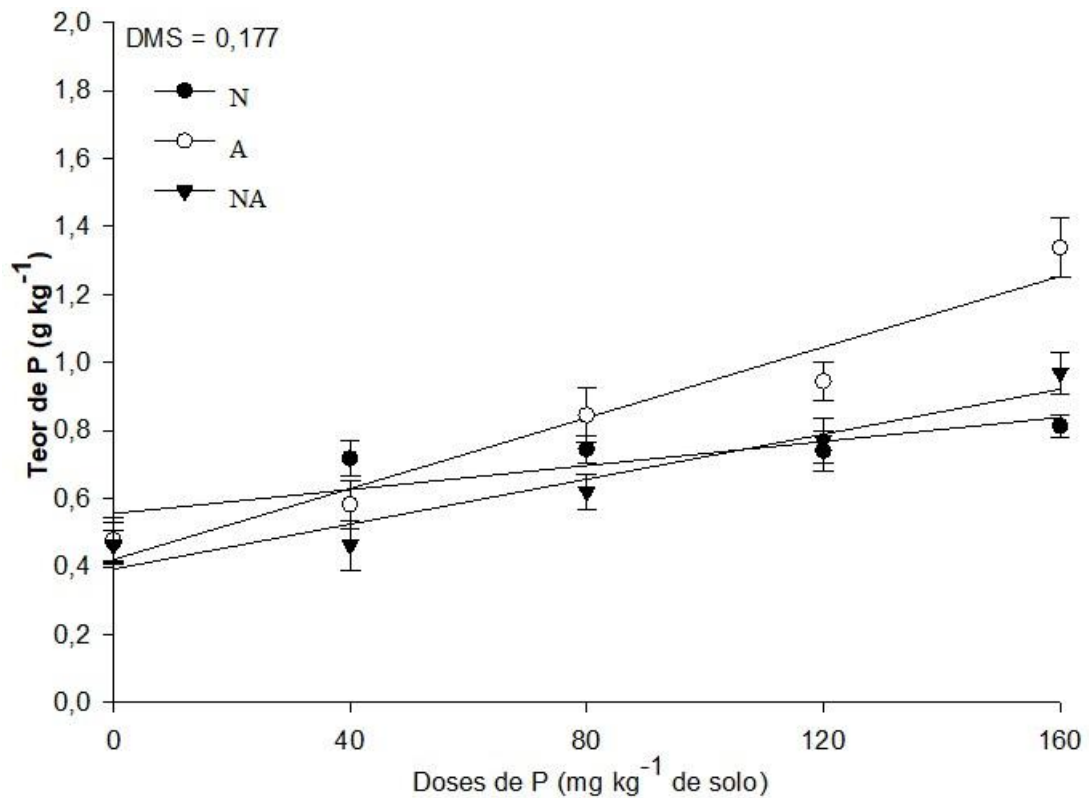


Figura 10 - Matéria seca da parte aérea (g) do milho em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. $DMS_{0,05}$ é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrato; A: amônio; NA: nitrato+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X^2 (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

Na ausência de superfosfato triplo ($SFT = 0 \text{ mg P kg}^{-1}$ de solo) não houve diferença entre as formas de nitrogênio para o teor de P em planta, mas a 40 mg P kg^{-1} de solo o valor de N foi superior e, finalmente, nas três maiores doses de SFT, A resultou em maiores teores. Todas as formas de adubação nitrogenada tiveram crescimento linear a 0,01 de significância para o teor de P em planta (Figura 13). N foi superior às outras formas de adubação a 160 mg P kg^{-1} de solo para o total de P absorvido (Figura 14). Os dados de total de P absorvido tiveram comportamento quadrático para A e NA, com picos a 160 mg P kg^{-1} de solo, e comportamento linear para N a 0,01 de probabilidade.



$$N (Y = 0,555500 + 0,0017691X^{**} R^2 = 0,72)$$

$$A (Y = 0,421000 + 0,005205X^{**} R^2 = 0,95)$$

$$NA (Y = 0,392500 + 0,003606X^{**} R^2 = 0,93)$$

Figura 13 - Teor de P (mg g⁻¹) do milho em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrato; A: amônio; NA: nitrato+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X² (efeito quadrático); NS (não significativo); * (p<0,05); ** (p<0,01). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

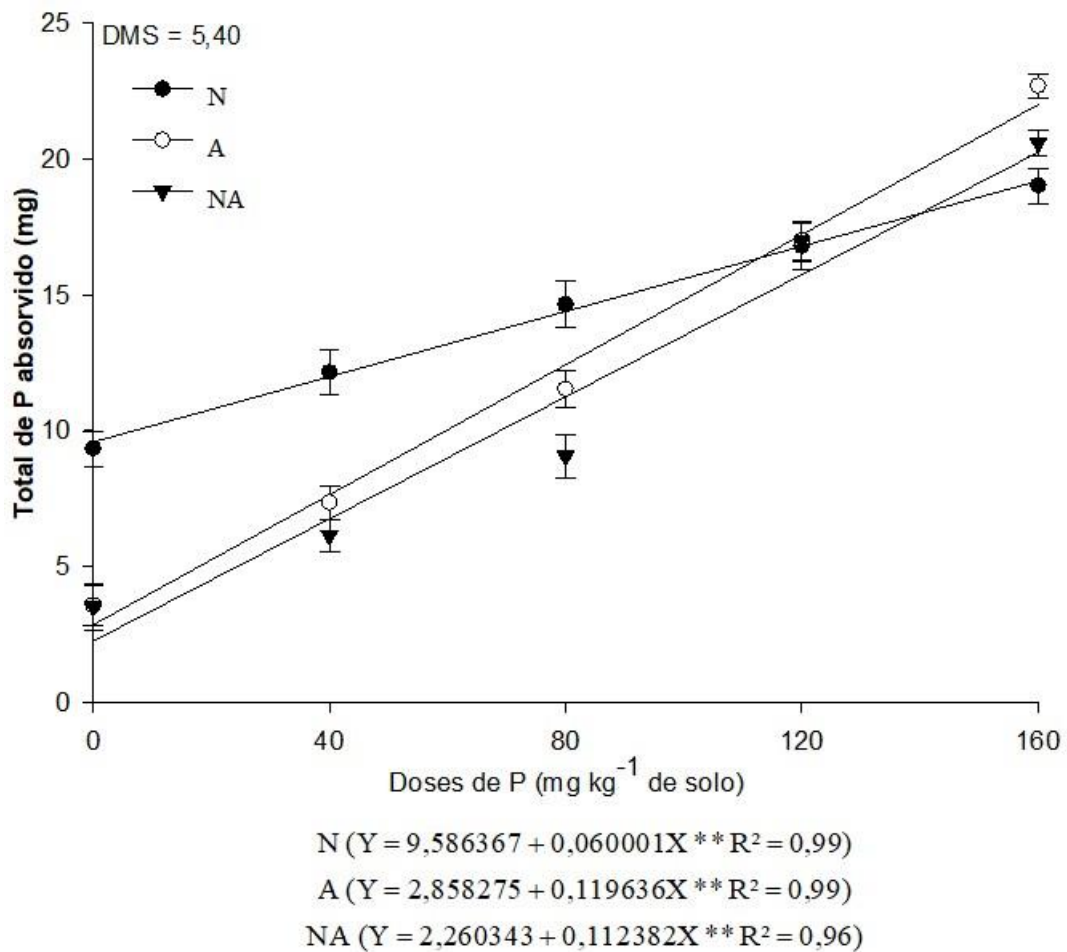
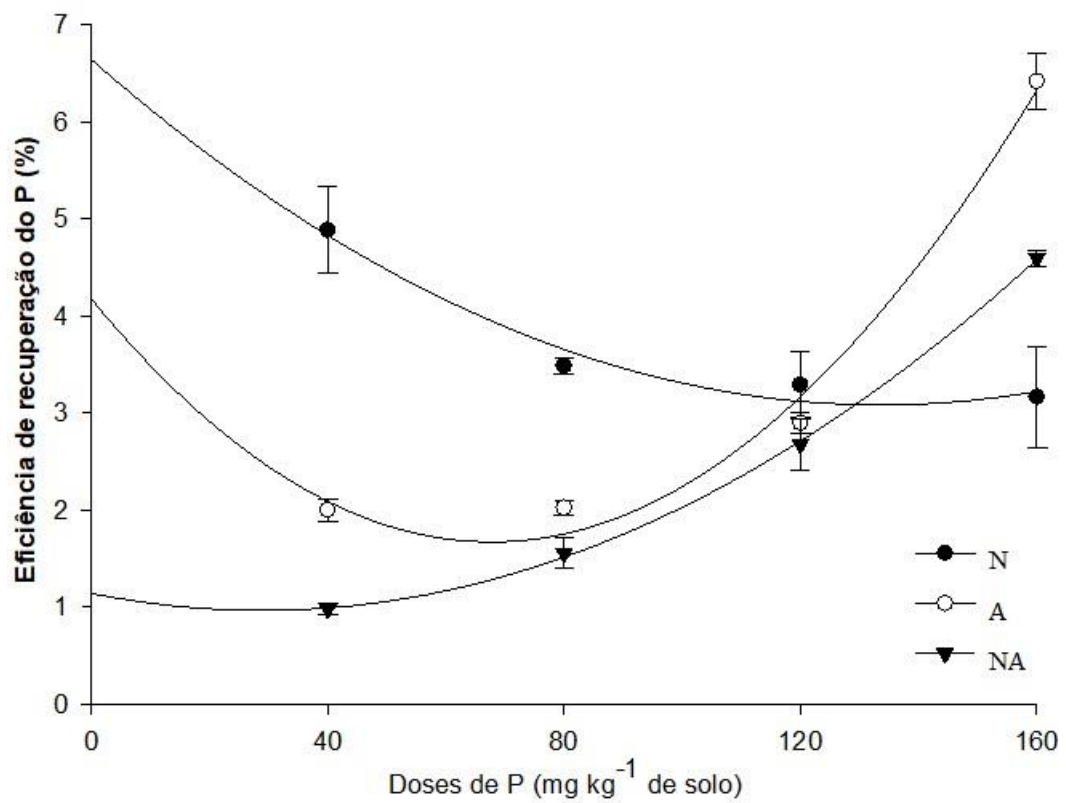


Figura 12 - Total de P absorvido (mg) do milho em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrato; A: amônio; NA: nitrato+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X² (efeito quadrático); NS (não significativo); * (p<0,05); ** (p<0,01). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

Os dados de eficiência de recuperação apresentaram comportamento quadrático, com picos a 40 mg P kg⁻¹ para N e a 160 mg P kg⁻¹ para NA e A. N resultou em maior eficiência de recuperação do P nas duas doses mais baixas de SFT, enquanto A e NA, respectivamente, resultaram em maior eficiência de recuperação na dose mais alta de SFT (Figura 13). Os dados de eficiência fisiológica do P apresentaram comportamento linear decrescente a 0,01 de significância para A e NA, enquanto N não resultou em mudança brusca com o aumento da aplicação de SFT. NA resultou em melhor eficiência fisiológica nas duas doses mais baixas e A resultou em melhor eficiência fisiológica na dose mais alta (Figura 14).



$$N (Y = 6,640283 - 0,053257X + 0,000199X^2 \text{ ** } R^2 = 0,97)$$

$$A (Y = 4,1736016 - 0,073934X + 0,00054618 \text{ } 26X^2 \text{ ** } R^2 = 0,99)$$

$$NA (Y = 1,1426445 - 0,012165X + 0,000210X^2 \text{ ** } R^2 = 0,99)$$

Figura 13 - Eficiência de recuperação do P (%) em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrito; A: amônio; NA: nitrito+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X² (efeito quadrático); NS (não significativo); * (p<0,05); ** (p<0,01). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

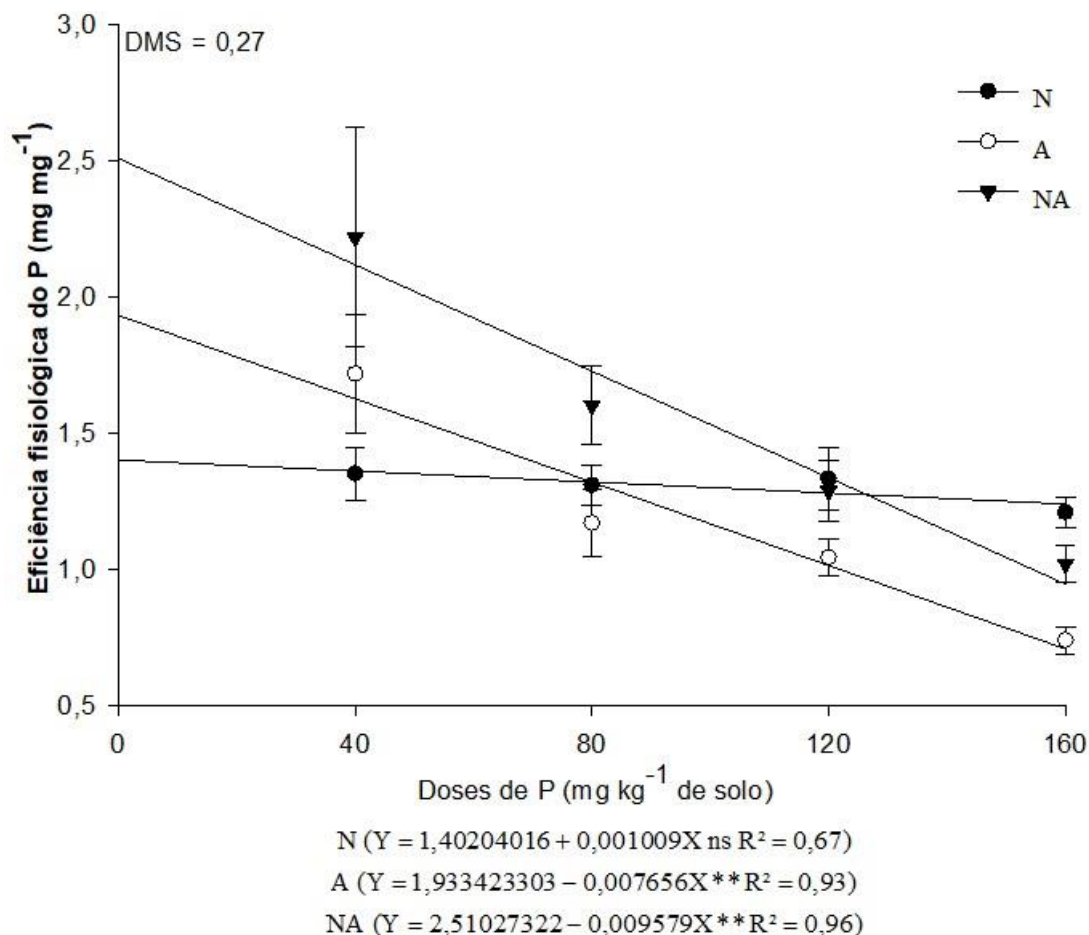


Figura 14 - Eficiência fisiológica do P (mg mg⁻¹) em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrato; A: amônio; NA: nitrato+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X² (efeito quadrático); NS (não significativo); * (p<0,05); ** (p<0,01). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

4.1.2. pH e nitrogênio no solo

Nos tratamentos N, o pH apresentou crescimento linear crescente, enquanto A e NA apresentaram comportamento linear decrescente, todos a 0,01 de significância. Os tratamentos A e NA resultaram em solo rizosférico relativamente mais ácido que o solo não-rizosférico, com os valores de pH nos tratamentos NA geralmente menos ácidos que A. N, por sua vez, resultou em pH mais alto para solo rizosférico que para o solo não-rizosférico. De maneira geral, não houve diferença, ou esse foi mínima, entre as formas de nitrogênio no solo não-rizosférico (Figura 15).

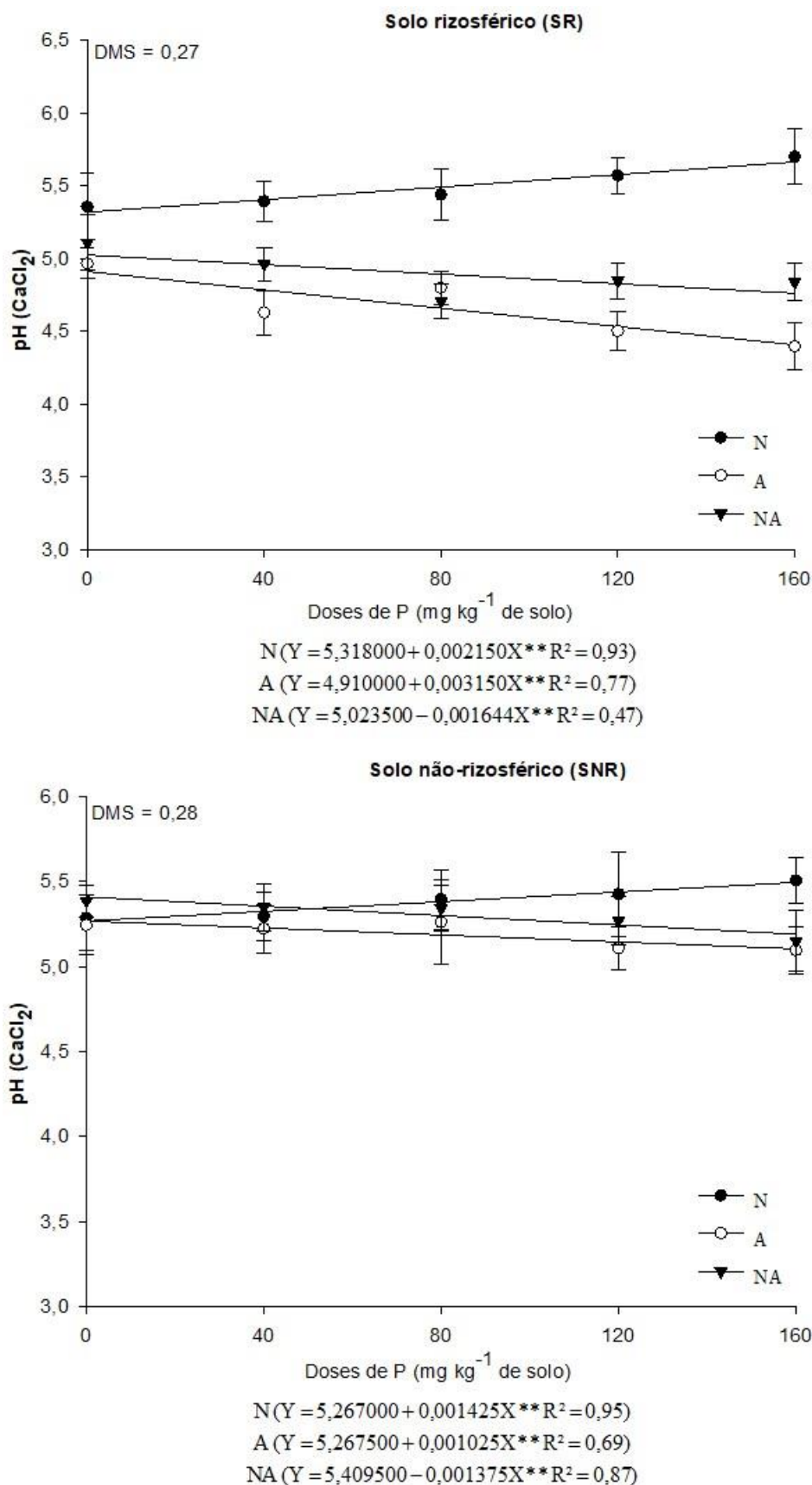


Figura 15 - pH (CaCl₂) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrato; A: amônio; NA: nitrato+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X² (efeito quadrático); NS (não significativo); * (p<0,05); ** (p<0,01). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

No solo rizosférico, A resultou nos maiores teores de NH_4^+ em todas as doses de P, com pico a 0 mg de P kg^{-1} de solo para o comportamento quadrático apresentado. NA e N resultaram no mesmo padrão, porém em uma proporção bem menor, se igualando nas duas doses mais altas, mesmo com NA começando com metade do nitrogênio amoniacal (Figura 16). De maneira geral, N e NA resultaram nos maiores teores de NO_3^- nas diferentes doses de P, porém, N resultou em valores mais altos na maior fosfatagem. A resultou em menores teores de NO_3^- em todas as doses no solo rizosférico (Figura 17).

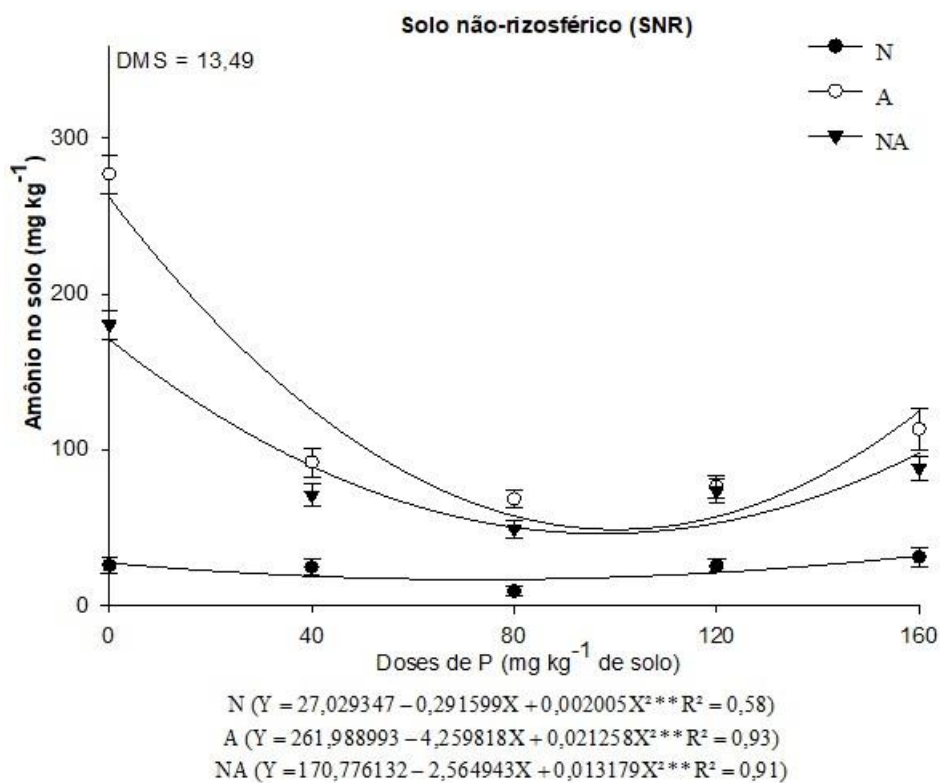
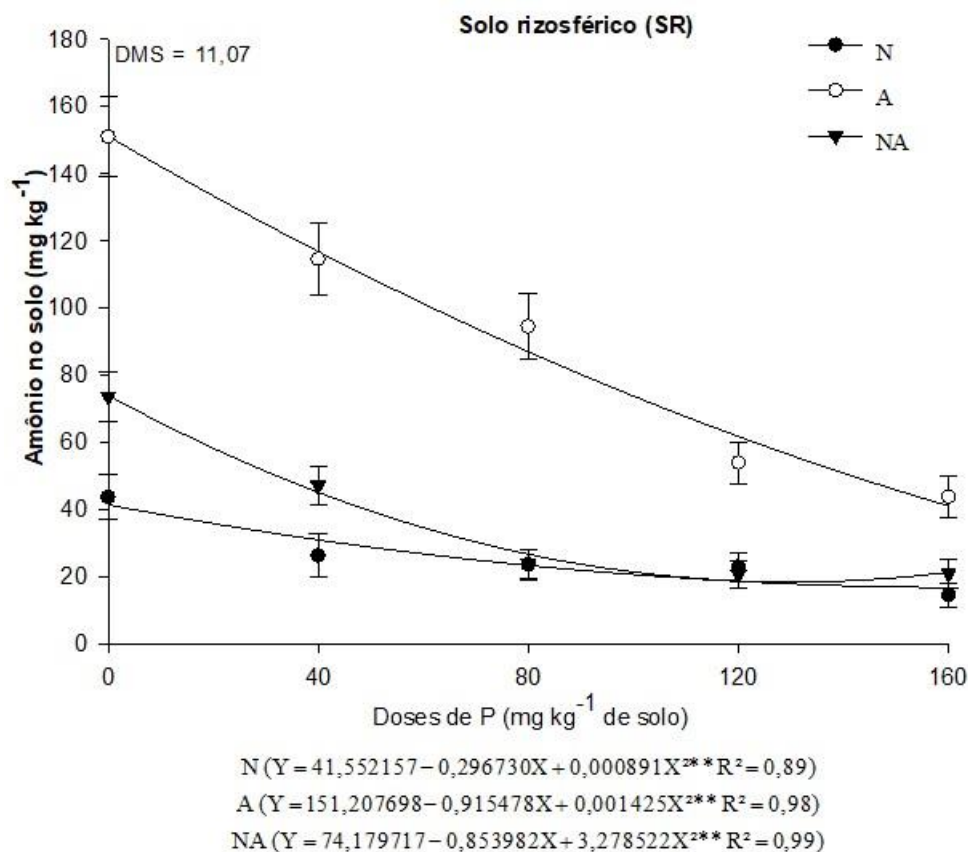


Figura 16 - Amônio (mg kg^{-1}) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrato; A: amônio; NA: nitrato+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X^2 (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

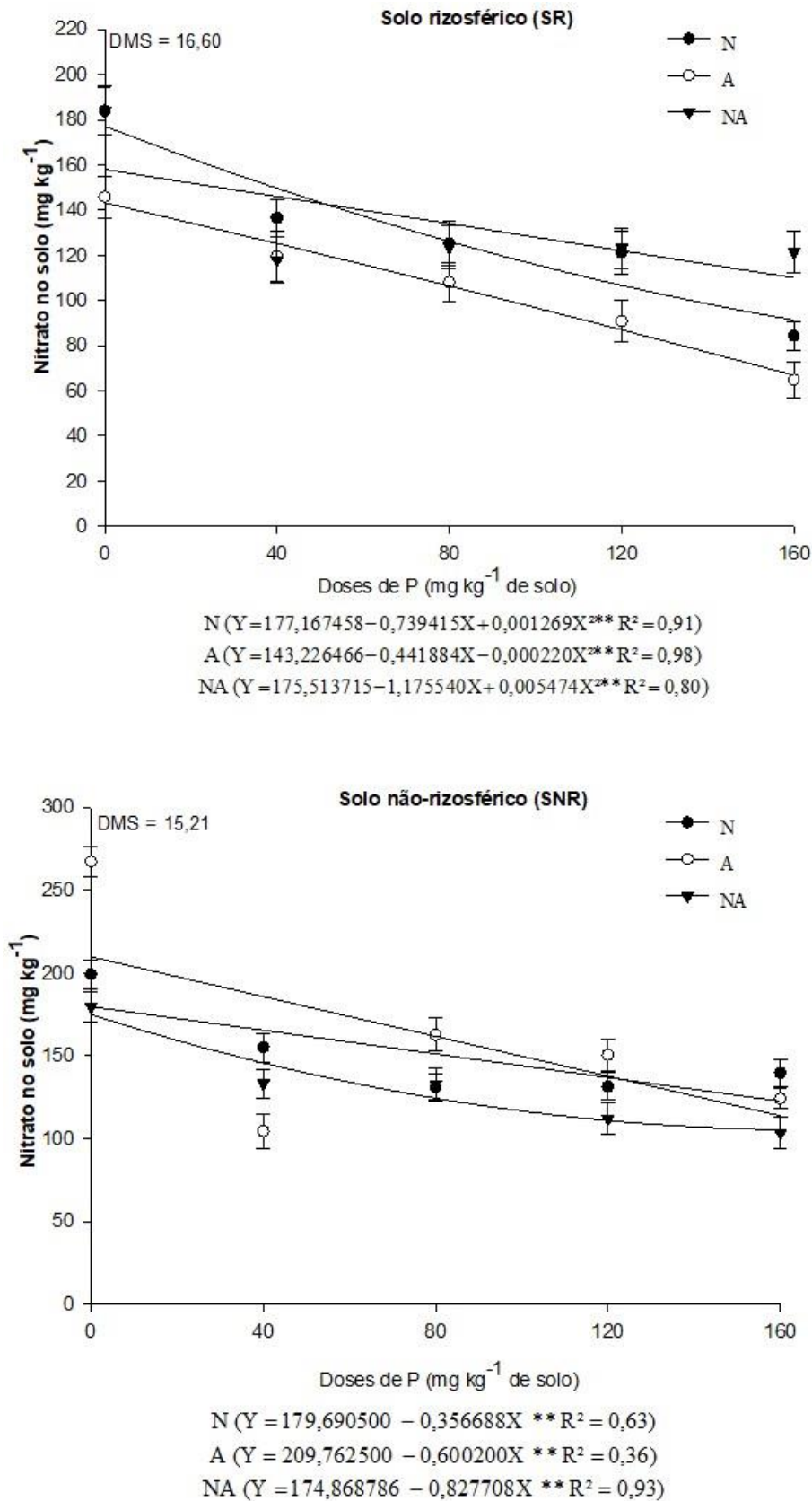


Figura 17 - Nitrito (mg kg^{-1}) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrito; A: amônio; NA: nitrito+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X^2 (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

Houve redução muito mais brusca dos teores de NH_4^+ do que dos teores de NO_3^- com o aumento das doses de P, também, no solo não-rizosférico (Figuras 16 e 17). Os teores de N-mineral foram maiores nos tratamentos A (e doses mais baixas de P) ou NA (e doses mais altas de P) no solo rizosférico, com comportamento linear decrescente (0,01 de significância) ou quadrático (pico a 0 mg P kg^{-1} de solo), respectivamente. No solo não-rizosférico os valores de N-mineral foram maiores nos tratamentos A, NA e N, respectivamente, em todas as doses de P, com comportamento quadrático cujos picos foram a 0 mg P kg^{-1} de solo (Figura 18). A relação amônio: nitrato, no solo rizosférico, foi muito maior nos tratamentos A em todas as doses de P; porém, NA e N se igualaram ou se aproximaram na maioria das condições, mesmo os tratamentos NA recebendo inicialmente metade do aporte nitrogenado na forma amoniacal. No solo não-rizosférico, N resultou em valores menores da relação amônio: nitrato em todas as condições. A relação amônio: nitrato apresentou comportamento linear decrescente a 0,01 de significância para A e NA (Figura 19).

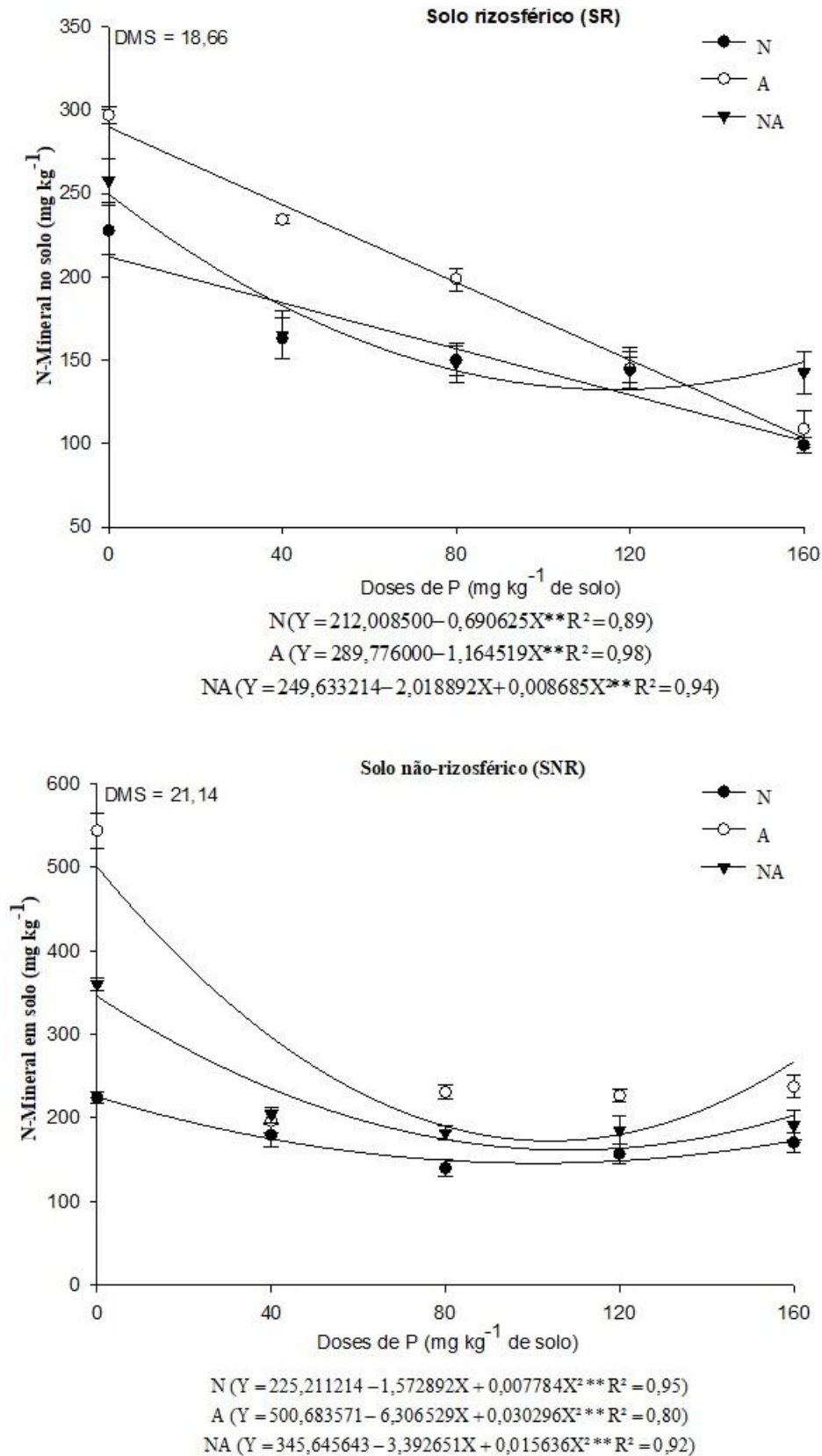


Figura 18 - N-mineral (mg kg^{-1}) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. $\text{DMS}_{0,05}$ é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrato; A: amônio; NA: nitrato+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X^2 (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

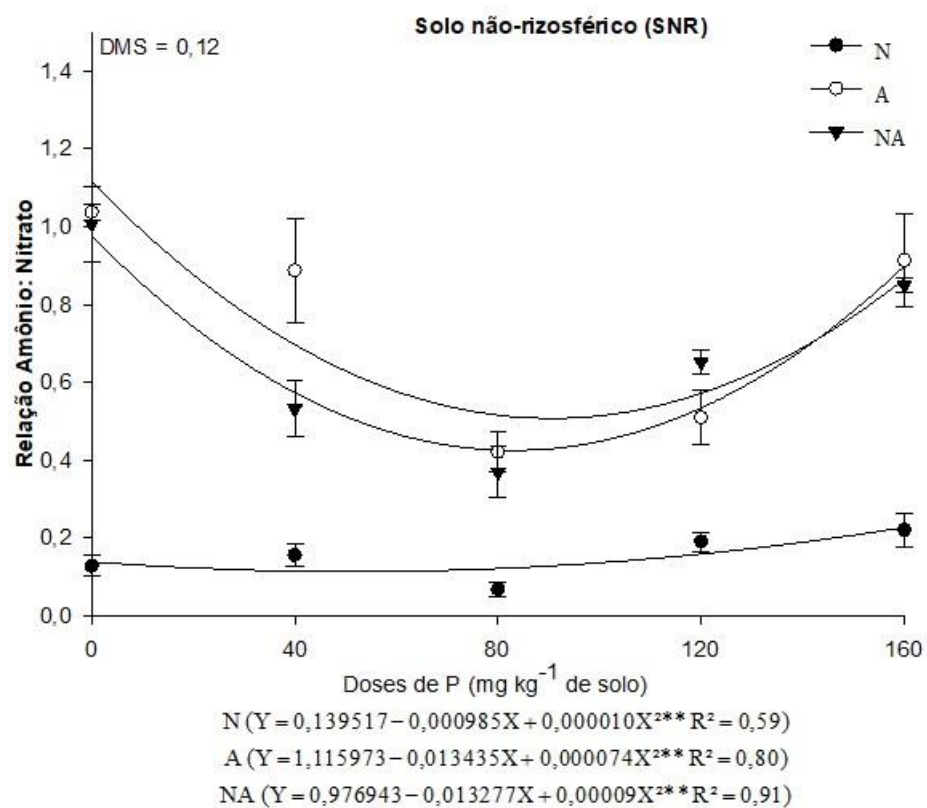
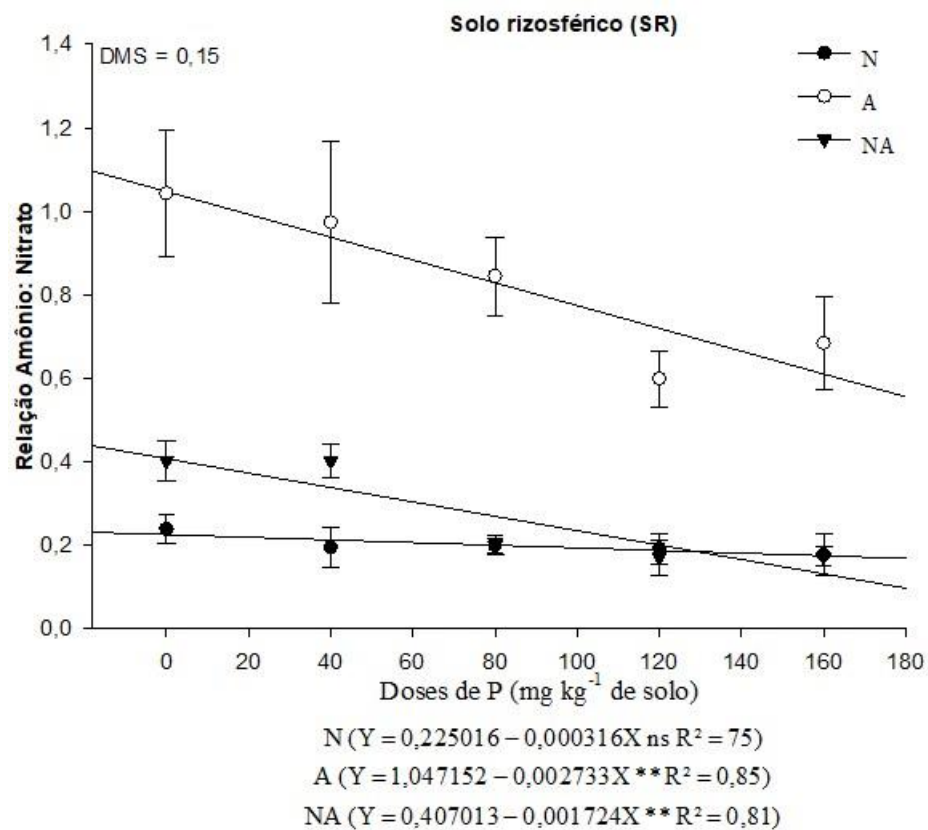


Figura 19 - Relação amônio: nitrato em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrato; A: amônio; NA: nitrato+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X² (efeito quadrático); NS (não significativo); * (p<0,05); ** (p<0,01). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

4.1.3. Labilidade e compartimentos de P

No solo rizosférico, A resultou em teores mais altos de P lábil e moderadamente lábil a 160 mg p kg⁻¹ de solo, entre as três formas de adubação nitrogenada. Os tratamentos N, por sua vez, geralmente resultaram em teores mais altos de P lábil e moderadamente lábil nas doses mais baixas de SFT. Os dados de P lábil apresentaram comportamento linear crescente a 0,01 de significância, enquanto os dados de P moderadamente lábil apresentaram comportamento linear crescente (para N), decrescente (para NA) ou quadrático com pico a 160 mg p kg⁻¹ de solo, a 0,01 de significância (Figuras 20 e 21). Os tratamentos A resultaram nos menores teores de P menos lábil entre as três formas de adubação nitrogenada, enquanto NA e N alternaram-se ao longo das doses de SFT entre a primeira e a segunda posição (Figura 22). Os dados de P menos lábil apresentaram comportamento quadrático, com picos a 0 mg p kg⁻¹ de solo (para NA) ou 160 mg p kg⁻¹ de solo (para N e A).

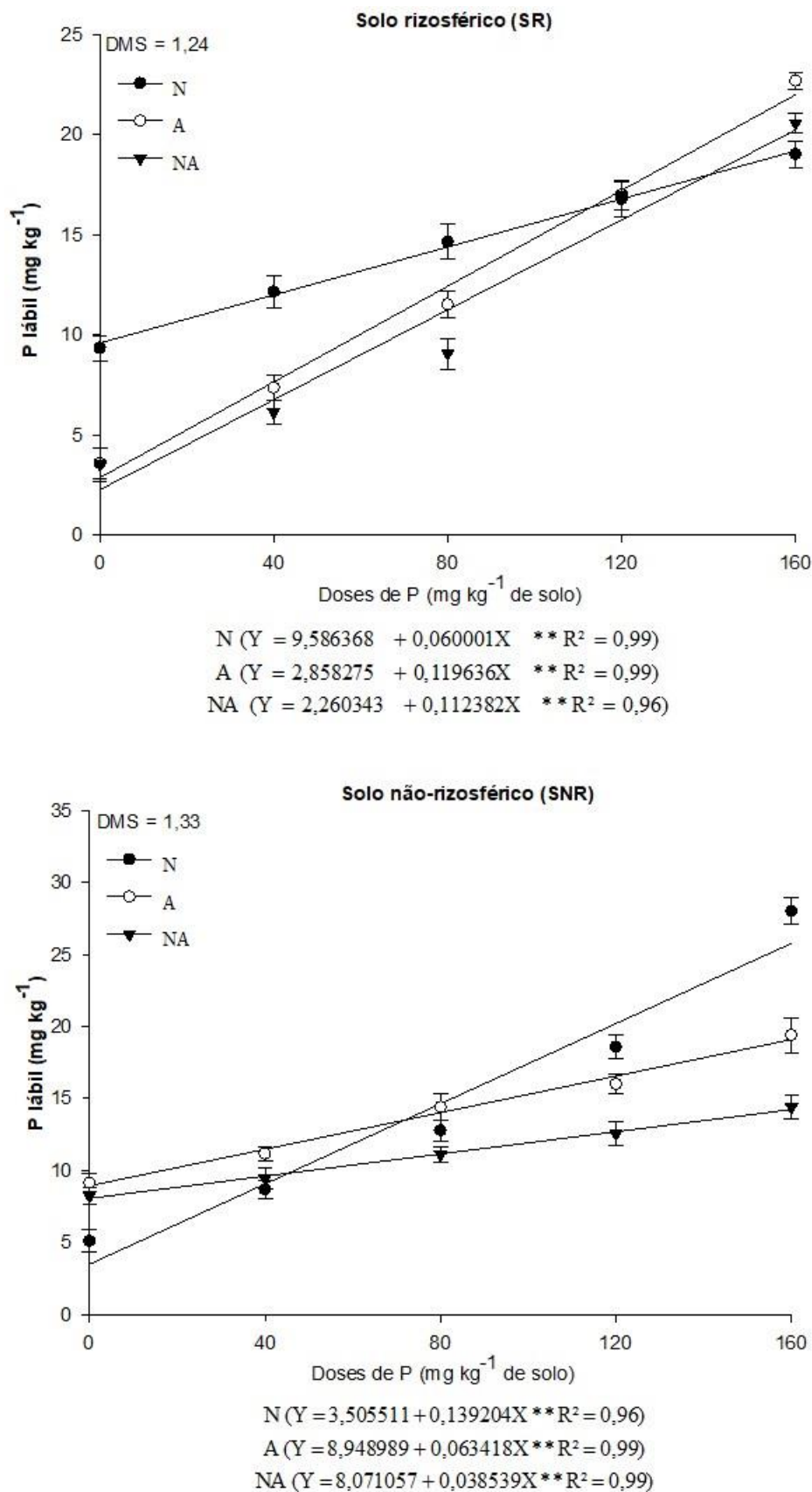


Figura 20 - P lábil (mg kg^{-1}) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrato; A: amônio; NA: nitrato+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X² (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

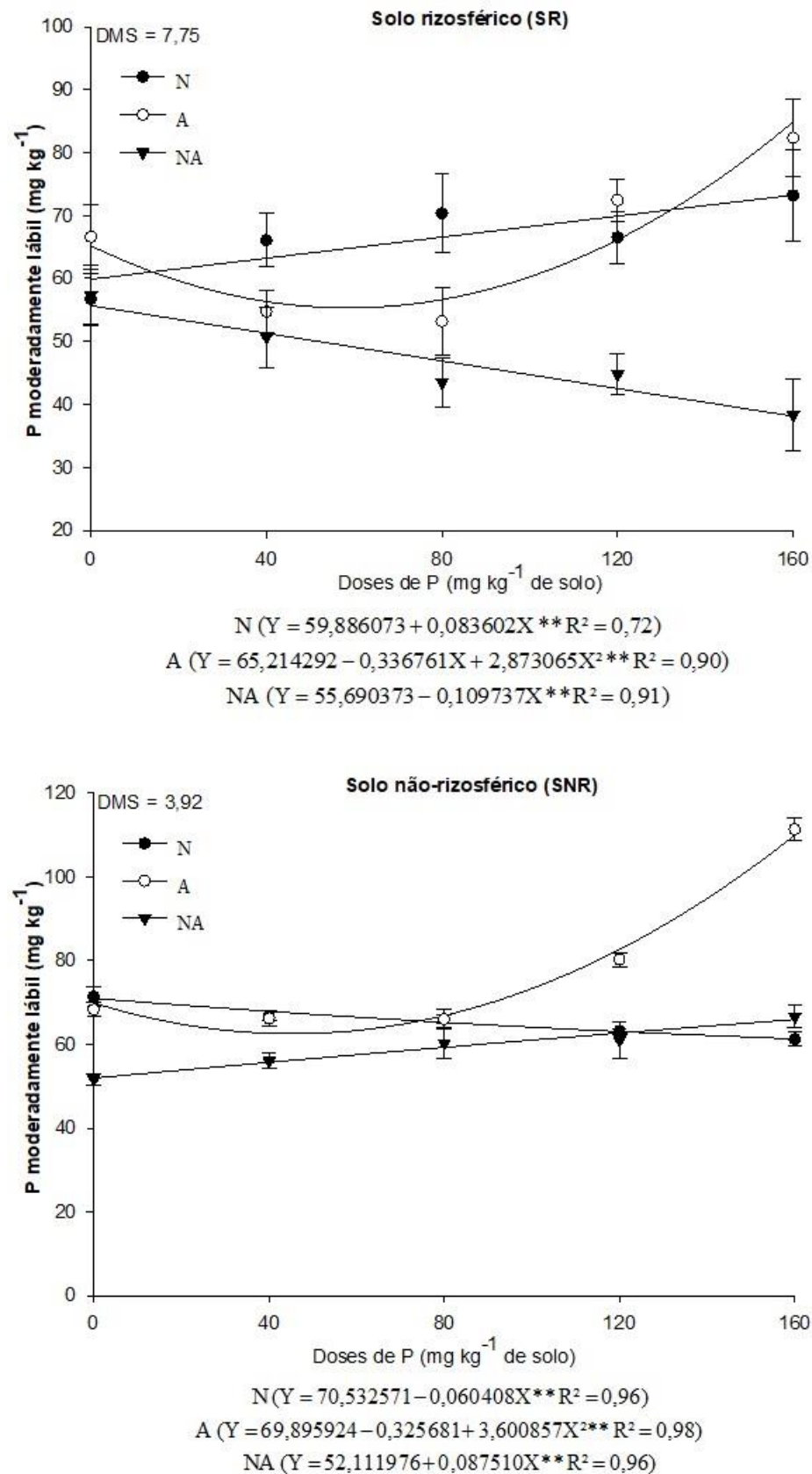


Figura 21 - P moderadamente lábil (mg kg⁻¹) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrato; A: amônio; NA: nitrato+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X² (efeito quadrático); NS (não significativo); * (p<0,05); ** (p<0,01). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

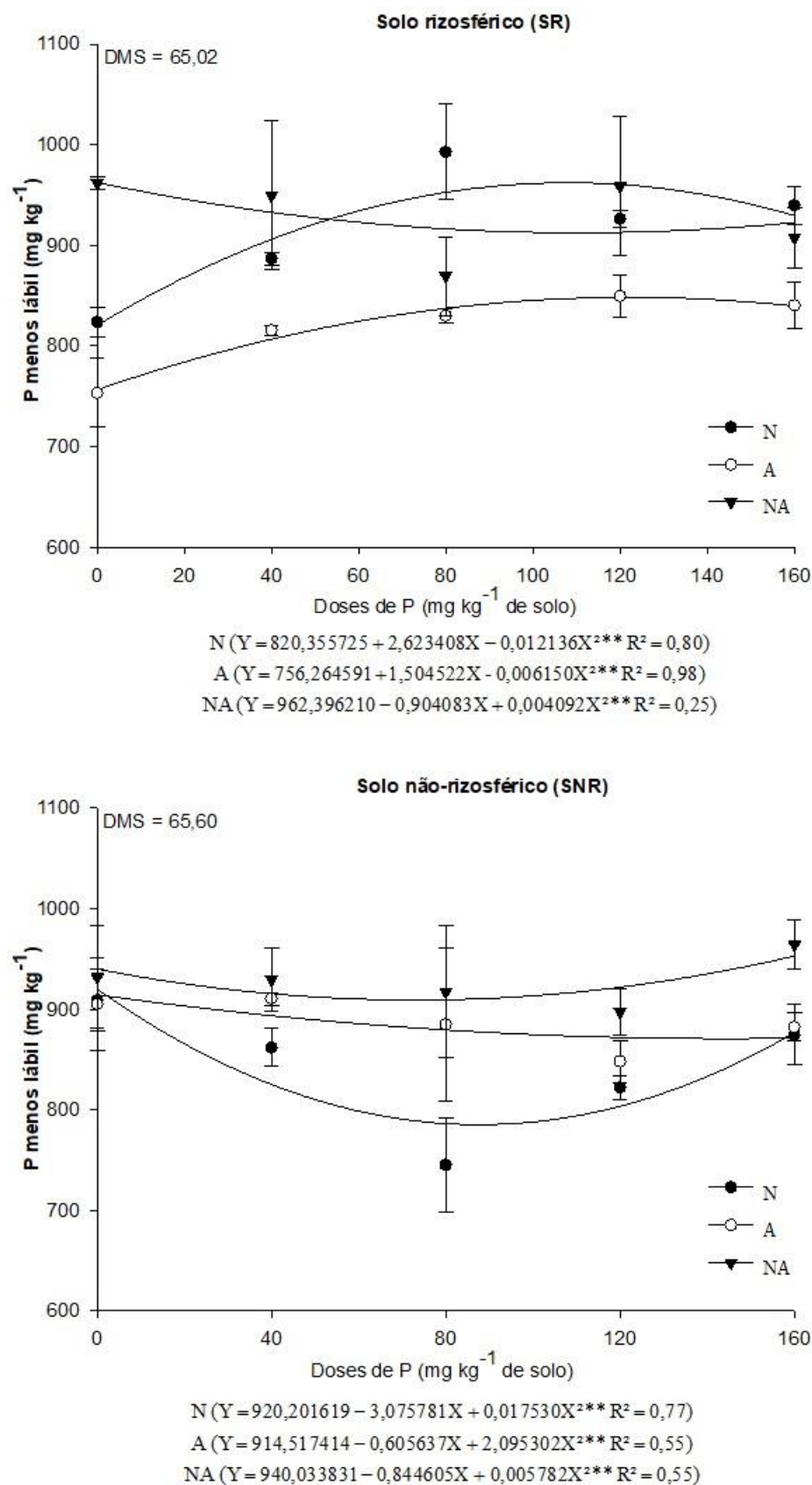


Figura 22 - P menos lábil (mg kg^{-1}) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. $\text{DMS}_{0,05}$ é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrito; A: amônio; NA: nitrito+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X^2 (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

No solo não-rizosférico, N e NA resultaram nos menores teores de P lábil, nas três doses mais baixas de SFT, enquanto nas doses mais altas de SFT N resultou nos valores mais altos de P lábil. Os dados de P lábil apresentaram comportamento linear crescente a 0,01 de significância (Figura 20). NA resultou nos menores teores de P moderadamente lábil nas quatro doses menores de SFT, com teor um pouco mais baixo que N na dose mais alta do fertilizante, enquanto N resultou em valores intermediários ou iguais aos valores de A. Os dados de P moderadamente lábil apresentaram comportamento linear crescente (para NA), decrescente (para N) ou quadrático com pico a 160 mg p kg⁻¹ de solo, a 0,01 de significância (Figura 21). Em relação ao P menos lábil, N resultou nos valores geralmente mais baixos, seguido de NA e A. Os dados de P menos lábil apresentaram comportamento quadrático, com picos a 160 mg p kg⁻¹ de solo (para NA) ou a 0 mg p kg⁻¹ de solo (para N e A) (Figura 22).

No solo rizosférico, A foi a forma de nitrogênio com menores teores de fosfato no compartimento geoquímico (Pi) em todas as doses de SFT, enquanto NA foi o que apresentou maiores teores nas doses mais baixas e se igualou a N nas duas doses mais altas de P (Figura 23). NA, por sua vez, apresentou menores teores no compartimento biológico (Po), enquanto N e A resultaram em maiores teores para esse mesmo compartimento (Figura 24). Os tratamentos A resultaram nos menores teores de P total (Pt) no final do estudo (Figura 25). No solo não-rizosférico, NA resultou nos maiores teores de Pi e, conseqüentemente, os maiores teores de Pt (Figuras 23 e 25), seguido de A e N, respectivamente, em quase as doses de P. Os dados de P biológico, P geoquímico e P total apresentaram comportamento quadrático, com picos geralmente a 0 e a 160 mg P kg⁻¹ de solo.

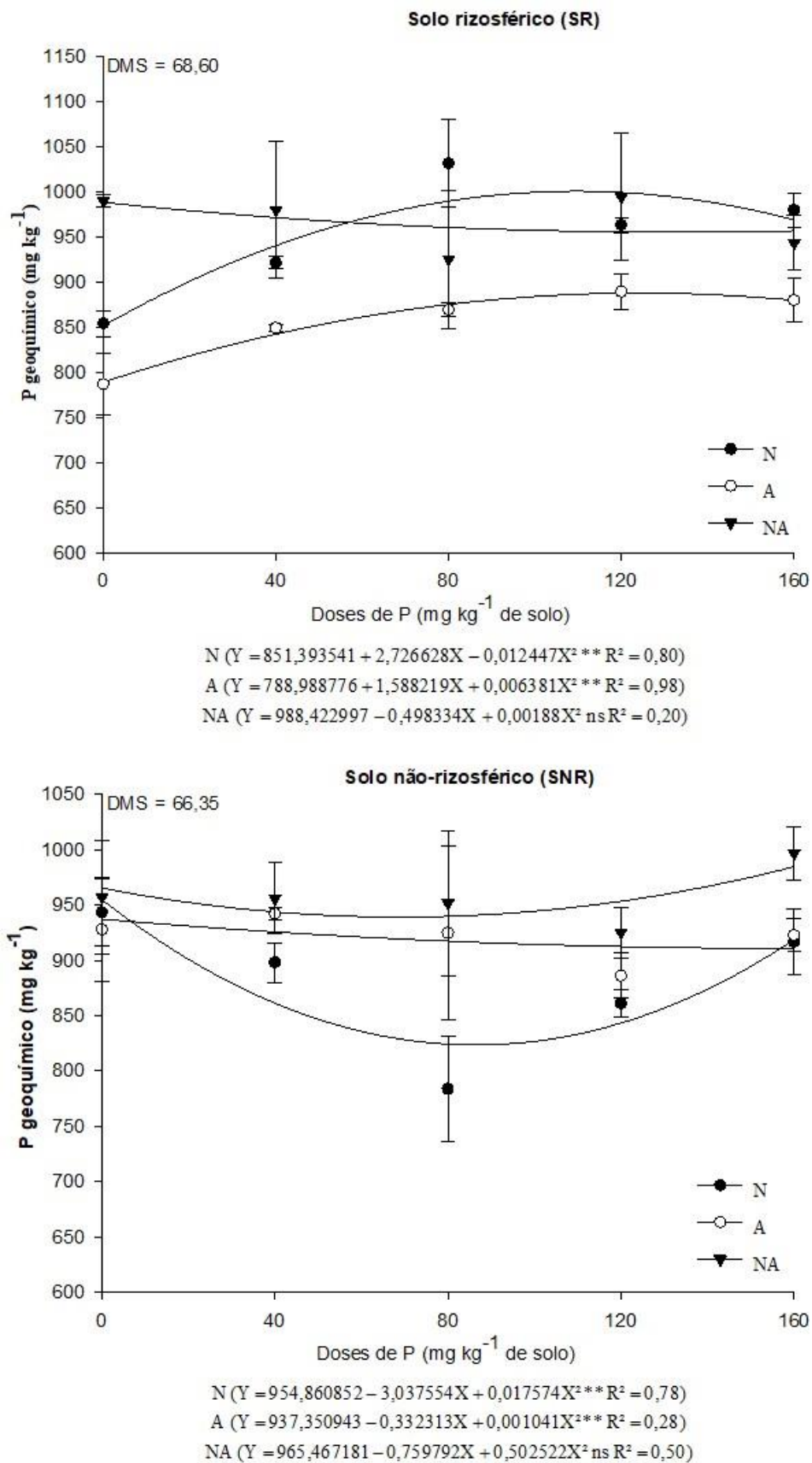


Figura 23 - P geoquímico (mg kg^{-1}) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrito; A: amônio; NA: nitrito+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X² (efeito quadrático); NS (não significativo); * (p<0,05); ** (p<0,01). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

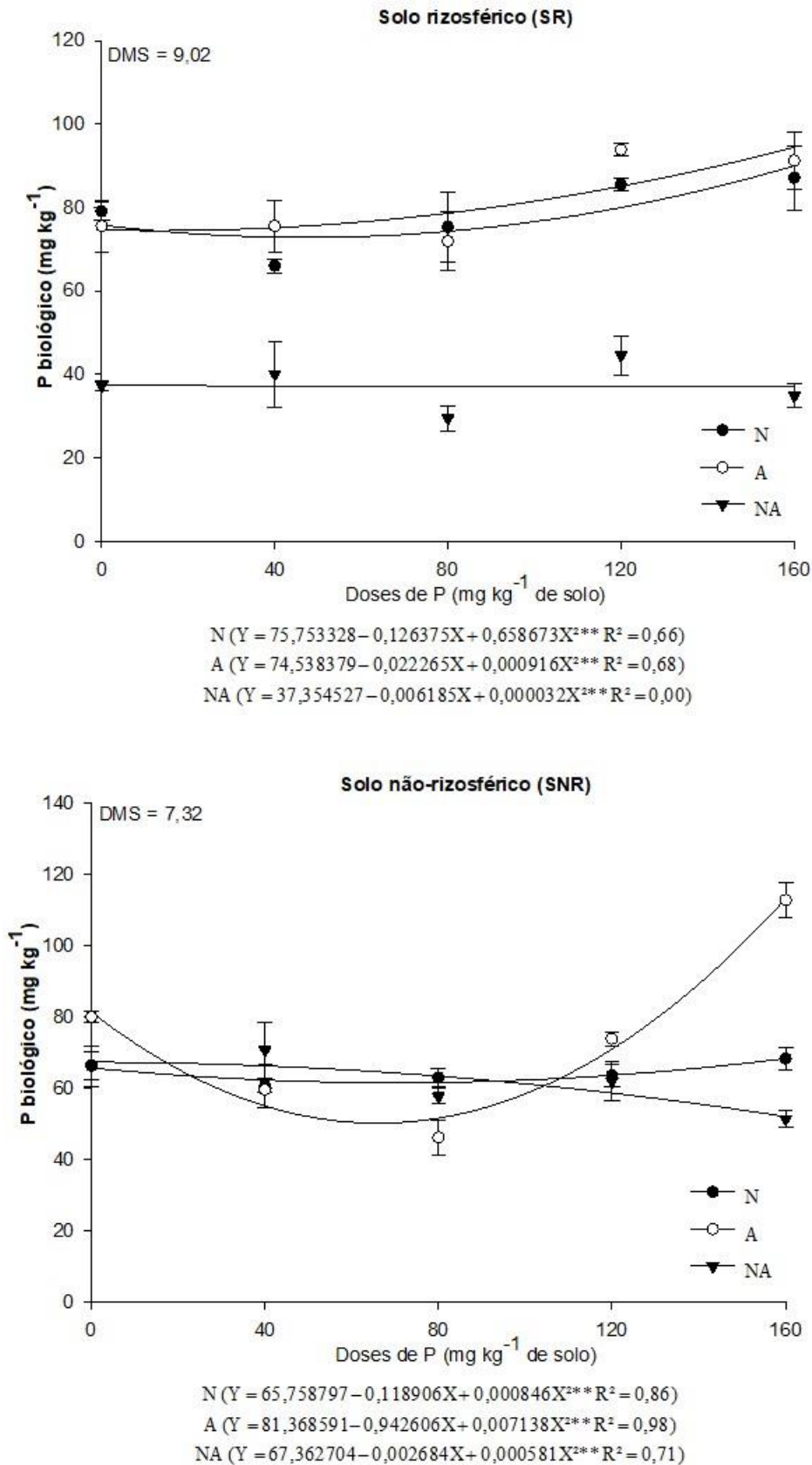


Figura 24 - P biológico (mg kg⁻¹) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrato; A: amônio; NA: nitrato+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X² (efeito quadrático); NS (não significativo); * (p<0,05); ** (p<0,01). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

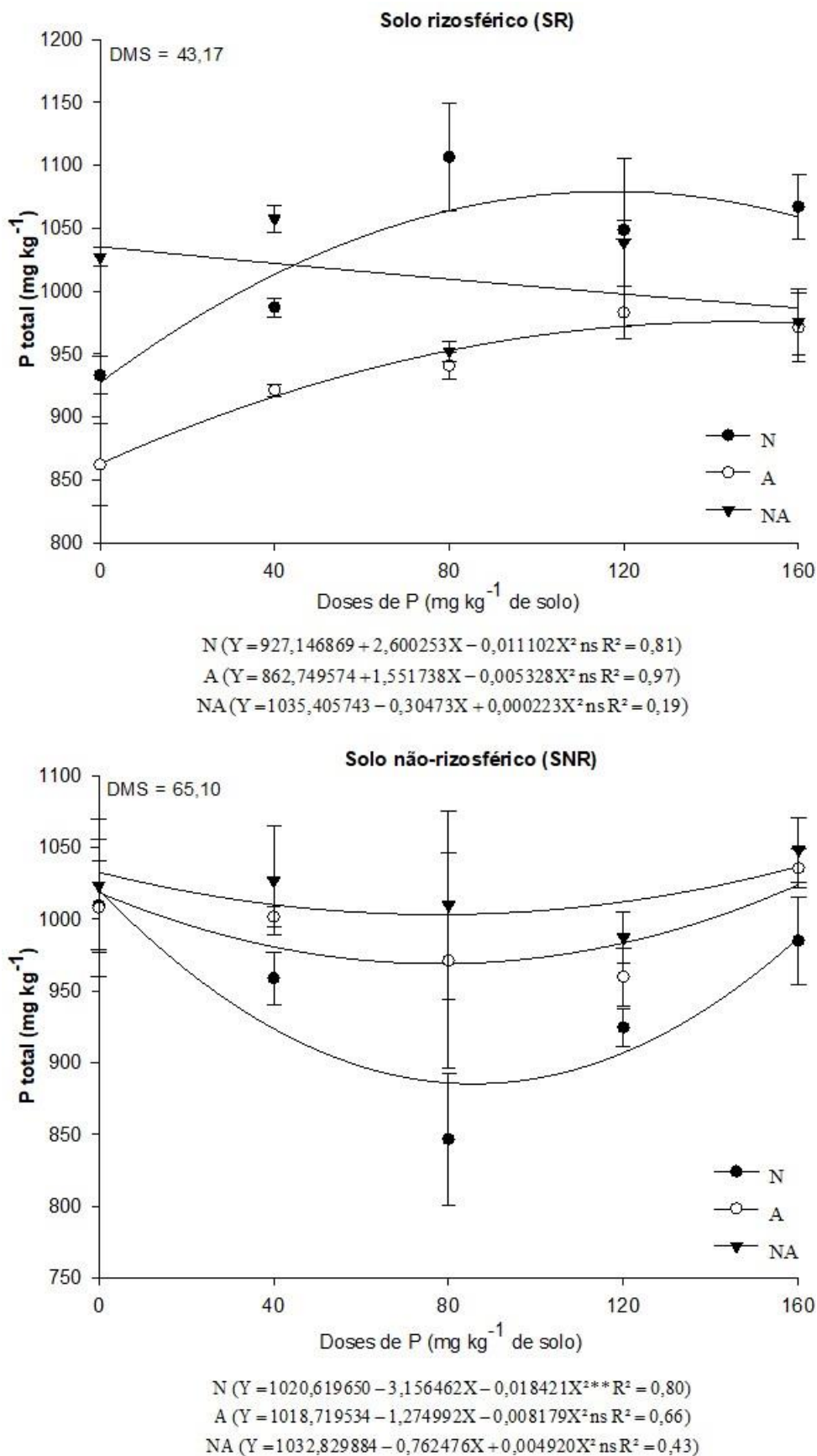


Figura 25 - P total (mg kg⁻¹) em solo rizosférico e não-rizosférico em resposta às diferentes formas de nitrogênio e doses de P. DMS_{0,05} é a diferença mínima significativa (Tukey<0,05). N: nitrato; A: amônio; NA: nitrato+amônio. Efeito de doses: X (efeito linear); X² (efeito quadrático); NS (não significativo); * (p<0,05); ** (p<0,01). As barras verticais mostram o desvio-padrão das médias

4.2. Experimento II

4.2.1. Matéria seca e raiz

Nesse experimento houve redução drástica na produção de tecidos, quando comparado com o experimento anterior (Figura 9 e Tabela 1) e, de maneira geral, os tratamentos A e NA resultaram na maior produção de matéria seca da raiz e matéria seca da parte aérea entre as três formas de adubação nitrogenada, resultando, consequentemente, na maior produção de matéria seca total. Geralmente, os dados de matéria seca apresentaram comportamento linear crescente a 0,01 de significância (Tabela 1). Os tratamentos N e NA geralmente resultaram em maior relação raiz: parte aérea, enquanto A geralmente resultou em melhor desenvolvimento de raiz, com maior comprimento, área e volume, na maioria dos níveis de P (Tabela 2). Todas as equações ajustadas para os dados nas tabelas estão no Anexo 1.

Tabela 1 - Matéria seca do milho em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P

Doses de P (mg kg ⁻¹ de solo)	Adubação nitrogenada		
	N	A	NA
Matéria seca total (g)			
0	1,05 b	1,91 a	1,26 b
40	1,06 c	1,79 a	1,68 a
80	1,08 b	2,49 a	2,18 a
120	1,36 b	2,65 a	2,46 a
160	1,60 c	3,05 a	2,63 b
Ef. de doses	L**	L**	L**
dms		0,20	
Matéria seca da raiz (g)			
0	0,22 c	0,61 a	0,40 b
40	0,34 c	0,53 a	0,41 b
80	0,30 c	1,02 a	0,63 b
120	0,31 b	1,07 a	1,15 a
160	0,20 c	1,18 b	1,25 a
Ef. de doses	NS	L**	L**
dms		0,17	
Matéria seca da parte aérea (g)			
0	0,82 b	1,30 a	0,85 b
40	0,90 b	1,27 a	1,37 a
80	0,77 b	1,47 a	1,55 a
120	1,05 b	1,58 a	1,30 ab
160	1,40 b	1,87 a	1,27 b
Ef. de doses	L**	L**	Q**
dms		0,17	
Relação raiz: parte aérea			
0	0,48 a	0,27 c	0,42 b
40	0,91 a	0,38 c	0,47 b
80	0,41 b	0,40 b	0,69 a
120	0,88 a	0,29 c	0,69 b
160	0,32 b	0,14 c	0,63 a
Ef. de doses	NS	NS	L**
dms		0,08	

Médias seguidas por letras minúsculas comparam, nas linhas, as três formas de adubação nitrogenada na mesma dose de P pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Efeito de doses: L (efeito linear); Q (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). N: adubação níttrica; A: adubação amoniacal; NA: adubação mista.

Tabela 2 – Parâmetros de raiz do milho em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P

Doses de P (mg kg ⁻¹ de solo)	Adubação nitrogenada		
	N	A	NA
Comprimento (cm)			
0	1183 b	2941 a	2092 ab
40	932 b	4168 a	2201 b
80	915 b	4952 a	1694 b
120	1091 b	5323 a	2262 b
160	1339 b	3478 a	2021 b
Ef. de doses	NS	Q**	NS
dms		1379	
Área (cm²)			
0	244 a	410 a	382 a
40	205 b	529 a	426 a
80	156 b	675 a	249 b
120	206 c	736 a	444 b
160	257 b	610 a	385 b
Ef. de doses	NS	Q**	NS
dms		181	
Volume (cm³)			
0	4,01 a	4,60 a	6,00 a
40	3,73 a	5,69 a	6,24 a
80	3,00 b	7,53 a	4,60 b
120	3,11 b	8,22 a	7,16 a
160	3,52 b	8,79 a	5,74 b
Ef. de doses	NS	L**	NS
dms		2,54	

Médias seguidas por letras minúsculas comparam, nas linhas, as três formas de adubação nitrogenada na mesma dose de P pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Efeito de doses: L (efeito linear); Q (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). N: adubação níttrica; A: adubação amoniacal; NA: adubação mista

4.2.2. pH e nitrogênio no solo

Em todas as formas de adubação e distâncias rizosféricas, o pH diminuiu linearmente a 0,01 de significância, com o aumento da dose de P. Os tratamentos A resultaram em valores de pH consideravelmente mais baixos, principalmente nas doses mais altas de SFT. Os valores de pH para N foram sempre maiores que os valores de NA e de A, respectivamente, na mesma dose e a mesma distância rizosférica. NA resultaram em padrão semelhante, com valores intermediários entre N e A (Tabela 3).

Tabela 3 - pH (CaCl₂) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas

Distância (mm)	Dose de P (mg kg ⁻¹)	pH (CaCl ₂)					
		N		A		NA	
0,0-0,5	0	5,60	aBC	4,92	cA	5,26	bBC
	40	5,70	aAB	4,65	cA	5,18	bAB
	80	5,81	aA	4,37	cB	5,09	bA
	120	5,42	aA	4,28	cB	4,85	bA
	160	5,03	aA	4,19	cB	4,69	bAB
	dms = 0,31	Q**		L**		L**	
0,5-1,0	0	5,88	aB	5,11	cA	5,49	bAB
	40	5,57	aA	4,84	cA	5,21	bAB
	80	5,27	aAB	4,57	cAB	4,92	bA
	120	5,11	aAB	4,43	cAB	4,77	bA
	160	4,95	aA	4,28	cB	4,62	bAB
	dms = 0,18	L**		L**		L**	
1,0-2,0	0	6,45	aA	5,03	cA	5,74	bA
	40	5,82	aA	4,85	cA	5,33	bA
	80	5,20	aBC	4,67	cAB	4,93	bA
	120	5,02	aAB	4,44	cAB	4,73	bA
	160	4,84	aAB	4,21	cB	4,52	bAB
	dms = 0,22	Q**		L**		L**	
2,0-3,0	0	5,72	aB	5,02	cA	5,37	bBC
	40	5,37	aBC	4,78	cA	5,08	bAB
	80	5,02	aC	4,55	cAB	4,79	bA
	120	4,81	aB	4,42	abAB	4,62	bA
	160	4,59	aB	4,30	abB	4,45	bB
	dms = 0,22	L**		L**		L**	
3,0-4,0	0	5,82	aB	5,08	cA	5,45	bAB
	40	5,51	aABC	4,86	cA	5,19	bAB
	80	5,52	aBC	4,65	cAB	4,92	bA
	120	5,07	aAB	4,52	bAB	4,79	bA
	160	4,94	aAB	4,40	cAB	4,67	bAB
	dms = 0,26	L**		L**		L**	
4,0-5,0	0	5,21	aC	4,98	abA	5,16	bC
	40	5,20	aC	4,80	cA	5,09	bB
	80	5,21	aBC	4,62	cAB	5,00	bA
	120	5,09	aAB	4,54	cAB	4,91	bA
	160	4,98	aAB	4,45	bAB	4,82	cAB
	dms = 0,23	L**		L**		L**	
5,0-10,0	0	5,42	aBC	5,09	bA	5,25	abBC
	40	5,37	aBC	4,91	cA	5,14	bAB
	80	5,32	aBC	4,74	cA	5,03	bA
	120	5,16	aAB	4,68	cA	4,92	bA
	160	5,00	aAB	4,63	bA	4,81	abA
	dms = 0,21	L**		L**		L**	

Médias seguidas por letras minúsculas comparam, nas linhas, as três formas de adubação nitrogenada na mesma dose de P e distância rizosférica pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras maiúsculas comparam, na coluna, as distâncias rizosféricas na mesma dose de P e a mesma forma de adubação nitrogenada pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Efeito de doses: L (efeito linear); Q (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). N: adubação níttrica; A: adubação amoniacal; NA: adubação mista

Os tratamentos A, nas diferentes distâncias rizosféricas, resultaram sempre nos maiores teores de NH_4^+ no solo ao final do experimento, seguido por NA e N, respectivamente. Nos tratamentos A, os maiores teores de NH_4^+ se concentraram entre 0-0,5 mm de distância. Nos tratamentos com aporte menor dessa forma de nitrogênio (NA), ou sem aporte N), não houve um padrão tão bem definido de distribuição ao longo das distâncias (Tabela 4). Os maiores teores de NO_3^- se concentraram em N, NA e A, respectivamente e, da mesma forma, nos tratamentos N, os maiores teores foram em 0-0,5 mm, seguidos de 0,5-1 mm, 1-2 mm e, por fim, nas maiores distâncias com os valores menores (Tabela 5). Assim, considerando o N-mineral como um todo, A resultou nos maiores teores, seguido de NA e N, na maioria das condições, e todas as formas de nitrogênio tiveram maiores teores de N-mineral em 0-0,5 mm, com maior concentração do elemento nas proximidades da raiz (Tabela 6). Por conta desses resultados, A resultou em valores muito maiores na relação amônio: nitrato, enquanto NA e N não diferiram entre si na maioria das condições, com valores bem baixos, mesmo NA tendo recebido aporte significativo de nitrogênio amoniacal também no início do experimento (Tabela 7). N geralmente apresentou comportamento linear decrescente ou quadrático para amônio, nitrato e N-mineral no solo, com maiores valores a 0 mg P kg⁻¹ de solo; enquanto A apresentou comportamento linear crescente ou quadrático, com picos a 160 mg P kg⁻¹ de solo; e o NA, por sua vez, apresentou comportamento quadrático, com picos a 160 mg P kg⁻¹ de solo, em todas as distâncias rizosféricas (Tabelas 4 a 6).

Tabela 4 - Amônio (mg kg^{-1}) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas

Amônio no solo (mg kg^{-1})						
Distância (mm)	Dose de P (mg kg^{-1})	N		A		NA
0,0-0,5	0	78	bDE	536	aA	39 cAB
	40	64	cBC	524	aA	22 bB
	80	44	cCD	512	aA	259 bBC
	120	25	cD	643	aA	308 bAB
	160	22	cCD	775	aA	361 bA
	dms = 43	L**		Q**		Q**
0,5-1,0	0	132	bA	239	cD	26 cAB
	40	28	cD	378	aB	157 bC
	80	66	cA	493	bA	182 aE
	120	105	cA	597	aA	208 bD
	160	100	cA	677	aA	234 bB
	dms = 34	Q**		L**		Q**
1,0-2,0	0	115	bB	284	aBC	260 aAB
	40	65	bAB	315	aBC	311 aA
	80	57	bAB	346	aB	320 aA
	120	64	cB	510	aB	329 bA
	160	37	cBC	674	aAB	338 bA
	dms = 41	NS		Q**		Q**
2,0-3,0	0	72	bE	355	aB	33 cB
	40	59	bAB	358	aB	319 aA
	80	36	cD	360	aB	283 bAB
	120	18	cD	481	aBC	246 bCD
	160	17	cD	602	aB	210 bB
	dms = 41	NS		Q**		Q**
3,0-4,0	0	84	bBC	292	aBC	23 cB
	40	71	cA	360	aB	214 bA
	80	53	cABC	428	aB	247 bAB
	120	45	cC	491	aBC	279 bCD
	160	22	cCD	554	aB	281 bB
	dms = 39	L*		L**		Q**
4,0-5,0	0	93	bCD	273	aCD	5 cAB
	40	43	cC	323	aBC	221 bB
	80	49	cBCD	373	aBC	226 bCD
	120	55	cBC	442	aBC	231 bCD
	160	49	cB	510	aC	236 bB
	dms = 37	NS		L**		Q**
5,0-10,0	0	97	bC	204	aD	45 cA
	40	51	cBC	281	aC	174 bC
	80	48	cBCD	359	aB	216 bDE
	120	46	cC	427	aC	259 bBC
	16	44	cB	496	aC	301 bA
	dms = 30	L**		L**		L**

Médias seguidas por letras minúsculas comparam, nas linhas, as três formas de adubação nitrogenada na mesma dose de P e distância rizosférica pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras maiúsculas comparam, na coluna, as distâncias rizosféricas na mesma dose de P e a mesma forma de adubação nitrogenada pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Efeito de doses: L (efeito linear); Q (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). N: adubação nítrica; A: adubação amoniacal; NA: adubação mista

Tabela 5 - Nitrato (mg kg^{-1}) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas

Nitrato no solo (mg kg^{-1})							
Distância (mm)	Dose de P (mg kg^{-1})	N		A		NA	
0,0-0,5	0	420	aA	21	cCD	316	bA
	40	422	aA	72	cA	270	bA
	80	378	aA	109	cB	224	bA
	120	427	aA	65	cAB	179	bA
	160	426	aA	22	cBC	133	bA
	dms = 49	NS		Q**		L**	
0,5-1,0	0	255	aB	53	cAB	199	bB
	40	276	aB	73	cA	186	bB
	80	234	aB	93	cB	172	bB
	120	105	aB	97	cAB	159	bA
	160	213	aB	43	cA	146	bA
	dms = 24	L**		Q**		L**	
1,0-2,0	0	150	bC	22	cD	188	aB
	40	130	bD	33	cC	179	aB
	80	170	aC	43	bC	171	aB
	120	21	aB	29	cC	162	bA
	160	191	aBC	16	cC	154	bA
	dms = 22	L**		Q**		L**	
2,0-3,0	0	172	aC	23	bD	172	aB
	40	183	aC	40	cBC	148	bB
	80	162	aC	57	cC	125	bC
	120	142	aC	36	cC	101	bC
	160	152	aCD	15	cC	77	bB
	dms = 19	L**		Q**		L**	
3,0-4,0	0	106	bD	39	cBC	160	aB
	40	83	BDE	49	cB	159	aB
	80	84	bD	59	cC	157	aC
	120	84	bD	54	cB	156	aC
	160	84	bEF	53	cC	155	aB
	dms = 20	NS		Q**		L**	
4,0-5,0	0	92	bD	45	cCD	190	aB
	40	84	bDE	83	bA	163	aB
	80	69	cD	131	bA	136	aBC
	120	53	cD	75	bA	110	aBC
	160	61	bF	18	cC	83	aB
	dms = 26	NS		Q**		L**	
5,0-10,0	0	94	bD	57	cA	166	aB
	40	82	bE	80	bA	159	aB
	80	107	bD	103	bB	152	aBC
	120	132	bC	70	cA	145	aAB
	160	119	bDE	39	cAB	138	aA
	dms = 26	L**		Q**		L**	

Médias seguidas por letras minúsculas comparam, nas linhas, as três formas de adubação nitrogenada na mesma dose de P e distância rizosférica pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras maiúsculas comparam, na coluna, as distâncias rizosféricas na mesma dose de P e a mesma forma de adubação nitrogenada pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Efeito de doses: L (efeito linear); Q (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). N: adubação nítrica; A: adubação amoniacal; NA: adubação mista

Tabela 6 - N-mineral (mg kg^{-1}) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas

		N-mineral no solo (mg kg^{-1})					
Distância (mm)	Dose de P (mg kg^{-1})	N		A		NA	
0,0-0,5	0	520	bA	633	aA	316	cA
	40	473	bA	573	aA	492	bA
	80	501	bA	633	aA	484	bA
	120	460	bA	682	aA	476	bA
	160	448	bA	731	aA	467	bA
	dms = 72	L*		L**		Q**	
0,5-1,0	0	420	aB	352	bC	225	cB
	40	304	bB	451	aB	342	bB
	80	387	cB	610	aA	355	bB
	120	322	cB	665	aA	367	bBC
	160	313	cB	720	aA	379	bB
	dms = 40	Q**		Q**		Q**	
1,0-2,0	0	294	dC	378	aBC	214	cB
	40	195	cD	348	bC	490	aA
	80	265	cD	388	bC	491	aA
	120	292	cB	539	aB	491	bA
	160	228	cC	690	aAB	492	bA
	dms = 42	NS		Q**		Q**	
2,0-3,0	0	262	bC	466	aB	172	cB
	40	241	cC	397	bBC	467	aA
	80	244	bCD	417	aC	407	aB
	120	164	cCD	517	aB	347	bBC
	160	169	cD	617	aB	287	bC
	dms = 49	L**		L**		Q**	
3,0-4,0	0	216	bD	404	aBC	183	bB
	40	155	bDE	409	aBC	372	aA
	80	190	cE	486	aC	404	bB
	120	140	cDE	545	aB	436	bBC
	160	106	cE	604	aB	436	bC
	dms = 48	L*		L**		Q**	
4,0-5,0	0	185	bD	376	aBC	195	bB
	40	128	bE	406	aBC	384	aB
	80	174	cE	505	aB	362	bB
	120	121	cE	517	aB	341	bC
	160	110	cE	528	aC	319	bC
	dms = 49	Q**		Q**		Q**	
5,0-10,0	0	215	bD	312	aC	211	bB
	40	133	dE	361	aC	333	aB
	80	191	cDE	462	aBC	368	bB
	120	189	cC	497	aB	407	bB
	160	164	cD	530	aC	439	bA
	dms = 34	Q*		Q**		Q**	

Médias seguidas por letras minúsculas comparam, nas linhas, as três formas de adubação nitrogenada na mesma dose de P e distância rizosférica pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras maiúsculas comparam, na coluna, as distâncias rizosféricas na mesma dose de P e a mesma forma de adubação nitrogenada pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Efeito de doses: L (efeito linear); Q (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). N: adubação nítrica; A: adubação amoniacal; NA: adubação mista

Tabela 7 - Relação amônio: nitrato no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas

Relação amônio: nitrato							
Distância (mm)	Dose de P (mg kg ⁻¹)	N		A		NA	
0,0-0,5	0	0,19	bE	15,50	aAB	0,13	bA
	40	0,12	bD	7,06	aA	0,82	bC
	80	0,09	bE	4,83	aA	1,16	bC
	120	0,06	bF	9,85	aAB	1,66	bBC
	160	0,06	bE	32,90	aB	2,53	bAB
	dms = 4,53	NS		Q**		NS	
0,5-1,0	0	0,52	bD	4,55	aC	0,13	bA
	40	0,10	bD	5,19	aA	0,85	bC
	80	0,28	bCDE	5,59	aA	1,06	bC
	120	0,55	bB	8,80	aB	1,31	bC
	160	0,47	bB	15,9	aC	1,61	bC
	dms = 1,29	NS		Q**		NS	
1,0-2,0	0	0,76	bC	12,9	aAB	0,14	bA
	40	0,50	bBC	9,7	aA	1,75	bAB
	80	0,34	bCD	8,1	aA	1,88	bAB
	120	0,31	bDE	17,3	aA	2,04	bAB
	160	0,19	bCDE	41,8	aA	2,28	bBC
	dms = 5,68	NS		Q**		NS	
2,0-3,0	0	0,42	bD	15,70	aA	0,01	bA
	40	0,32	cC	9,03	aA	2,16	bA
	80	0,22	cDE	6,37	aA	2,2	bA
	120	0,12	cEF	13,60	aAB	2,46	bA
	160	0,11	cDE	41,70	aA	2,82	bAB
	dms = 3,17	NS		Q**		L*	
3,0-4,0	0	1,29	bA	7,64	aBC	0,16	bA
	40	0,87	cA	7,46	aA	1,35	bA
	80	0,64	cAB	7,82	aA	1,62	bA
	120	0,53	cBC	9,26	aB	1,97	bA
	160	0,27	cCD	11,16	aA	2,62	bAB
	dms = 4,97	NS		Q**		L**	
4,0-5,0	0	1,35	bA	8,59	aABC	0,03	bA
	40	0,54	bB	3,90	aA	1,37	bBC
	80	0,73	bA	2,84	aA	1,67	bAB
	120	1,03	bA	5,90	aB	2,13	bAB
	160	0,82	cA	27,98	aB	3,03	bA
	dms = 2,95	NS		Q**		NS	
5,0-10,0	0	1,05	bB	3,81	aC	0,27	bA
	40	0,67	bAB	3,53	aA	1,10	bC
	80	0,46	bBC	3,51	aA	1,43	bBC
	120	0,35	cCD	6,14	aB	1,80	bBC
	160	0,37	cBC	13,63	aC	2,25	bC
	dms = 1,31	NS		Q**		L*	

Médias seguidas por letras minúsculas comparam, nas linhas, as três formas de adubação nitrogenada na mesma dose de P e distância rizosférica pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras maiúsculas comparam, na coluna, as distâncias rizosféricas na mesma dose de P e a mesma forma de adubação nitrogenada pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Efeito de doses: L (efeito linear); Q (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). N: adubação nítrica; A: adubação amoniacal; NA: adubação mista

4.2.3. Labilidade e compartimentos de P no solo

De maneira geral, os níveis de P aumentaram nas maiores distâncias da raiz, em todos os compartimentos de P. Os tratamentos A resultaram em teores mais baixos de P lábil na região mais próxima a raiz, porém, os seus teores foram superiores ou se equipararam aos níveis de N entre os valores mais altos para as outras distâncias rizosféricas. Entre as distâncias rizosféricas, os níveis de P lábil nos tratamentos A aumentaram proporcionalmente à distância do tapete de raízes, na mesma dose aplicada de P, em todas as doses aplicadas de superfosfato triplo (SFT) (Tabela 8). O mesmo padrão se manteve em relação ao P moderadamente lábil, com A resultando em níveis mais altos entre as três formas de nitrogênio ou se equiparando a N entre os teores mais altos, porém, nesse caso praticamente não existiram diferenças entre as distâncias rizosféricas (Tabela 9). Em relação ao P menos lábil, N geralmente resultou em valores mais altos, seguido por N e NA na maioria das doses de SFT e das distâncias rizosférica (Tabela 10). Os dados de P lábil, moderadamente lábil e menos lábil apresentaram, de maneira geral, comportamento quadrático, com picos a 0 ou 160 mg P kg⁻¹ de solo, ou ainda, comportamento linear crescente a 0,01 de significância.

Tabela 8 - P lábil (mg kg^{-1}) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas

P lábil (mg kg^{-1})						
Distância (mm)	Dose de P (mg kg^{-1})	N		A		NA
0,0-0,5	0	29	aE	7	bD	4 aA
	40	27	aE	4	cE	8 bD
	80	29	aC	2	cE	12 bD
	120	43	aCD	4	cC	11 bE
	160	58	aD	6	cD	10 bD
	dms = 3,57	Q**		Q**		Q**
0,5-1,0	0	33	aE	36	aD	6 bA
	40	26	bE	77	aD	17 ABC
	80	48	bBC	118	aC	28 cC
	120	34	dD	88	aD	22 cD
	160	29	bE	58	aC	16 cCD
	dms = 7,02	NS		Q**		Q**
1,0-2,0	0	45	aE	49	aC	6 bA
	40	89	aC	63	bC	22 cA
	80	59	bB	77	aD	40 cC
	120	62	aBC	63	aD	31 bC
	160	65	aD	49	bC	25 cC
	dms = 8,61	Q**		Q**		Q**
2,0-3,0	0	125	aC	47	bC	4 cA
	40	92	aC	62	bC	17 cABC
	80	60	bB	77	aD	29 cC
	120	83	aB	59	bD	24 cCD
	160	106	aC	49	bC	19 cC
	dms = 10,88	Q**		Q**		Q**
3,0-4,0	0	75	aD	61	bC	3 cA
	40	61	aD	66	aC	13 bBCD
	80	47	bBC	71	aD	30 cC
	120	50	bCD	59	aE	25 cCD
	160	52	aD	49	aC	19 cC
	dms = 8,95	Q*		Q**		Q**
4,0-5,0	0	301	aA	155	bB	4 cA
	40	266	aA	212	bB	13 cCD
	80	231	bA	270	aB	38 cA
	120	253	aA	228	aB	39 bB
	160	274	aA	186	bB	41 cB
	dms = 28,84	Q**		Q**		L**
5,0-10,0	0	266	aB	198	bA	3 cA
	40	238	aB	253	aA	21 cAB
	80	220	bA	309	aA	40 cB
	120	233	bA	267	aA	50 cA
	160	246	aB	226	aA	60 cA
	dms = 26,48	Q**		Q**		L**

Médias seguidas por letras minúsculas comparam, nas linhas, as três formas de adubação nitrogenada na mesma dose de P e distância rizosférica pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras maiúsculas comparam, na coluna, as distâncias rizosféricas na mesma dose de P e a mesma forma de adubação nitrogenada pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Efeito de doses: L (efeito linear); Q (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). N: adubação níttrica; A: adubação amoniacal; NA: adubação mista

Tabela 9 - P moderadamente lábil (mg kg^{-1}) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas

P moderadamente lábil (mg kg^{-1})							
Distância (mm)	Dose de P (mg kg^{-1})	N		A		NA	
0,0-0,5	0	241	bA	370	aAB	237	bA
	40	297	aA	323	aA	210	bA
	80	363	aA	302	bC	183	cA
	120	352	aA	376	aB	196	bA
	160	376	bA	450	aB	209	cA
	dms = 40,10	Q**		Q**		Q**	
0,5-1,0	0	235	bA	319	aBC	206	bA
	40	287	aA	248	bB	183	cA
	80	326	aAB	196	bD	157	cA
	120	323	aAB	273	bC	173	cA
	160	340	aA	350	aC	188	bA
	dms = 34,22	NS		Q**		Q**	
1,0-2,0	0	234	bA	343	aABC	249	bA
	40	253	bA	344	aA	200	cA
	80	265	bC	356	aABC	152	cA
	120	277	bB	477	aA	174	cA
	160	337	bA	598	aA	195	cA
	dms = 41,33	L**		L*		Q**	
2,0-3,0	0	235	bA	389	aA	212	bA
	40	248	bA	326	aA	188	cA
	80	323	aAB	353	aABC	153	bA
	120	284	bB	474	aA	181	cA
	160	355	bA	595	aA	198	cA
	dms = 53,75	L**		Q**		Q*	
3,0-4,0	0	233	bA	352	aABC	211	bA
	40	255	bA	321	aA	195	cA
	80	274	bBC	379	aAB	178	cA
	120	312	bAB	473	aA	192	cA
	160	380	aA	211	bA	206	cA
	dms = 45,46	L**		NS		Q**	
4,0-5,0	0	232	bA	317	aBC	224	bA
	40	251	bA	312	aAB	194	cA
	80	266	bC	403	aA	165	cA
	120	287	bB	474	aA	179	cA
	160	353	bA	568	aA	194	cA
	dms = 40,46	L**		Q**		Q**	
5,0-10,0	0	264	abA	288	aC	214	bA
	40	272	aA	306	aAB	189	bA
	80	262	bC	326	aBC	164	cA
	120	314	bAB	478	aA	183	cA
	160	370	bA	617	aA	202	cA
	dms = 43,40	Q**		Q**		Q**	

Médias seguidas por letras minúsculas comparam, nas linhas, as três formas de adubação nitrogenada na mesma dose de P e distância rizosférica pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras maiúsculas comparam, na coluna, as distâncias rizosféricas na mesma dose de P e a mesma forma de adubação nitrogenada pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Efeito de doses: L (efeito linear); Q (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). N: adubação nítrica; A: adubação amoniacal; NA: adubação mista

Tabela 10 - P menos lábil (mg kg^{-1}) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas

P menos lábil (mg kg^{-1})							
Distância (mm)	Dose de P (mg kg^{-1})	N		A		NA	
0,0-0,5	0	676	aA	573	bA	528	bA
	40	647	aA	548	bB	520	bA
	80	660	aC	522	bD	515	bA
	120	676	aD	586	bBC	523	cA
	160	743	aC	640	bB	531	cAB
	dms = 48	Q**		Q**		NS	
0,5-1,0	0	681	aA	566	bA	495	cA
	40	674	aA	547	bB	484	cA
	80	679	aC	528	bD	488	bA
	120	675	aD	569	bC	509	cA
	160	591	bC	611	aB	524	cAB
	dms = 54	Q**		Q**		NS	
1,0-2,0	0	681	aA	550	aA	491	aA
	40	769	aB	620	abAB	474	bA
	80	776	aB	690	abBCD	482	bA
	120	835	aB	718	aABC	480	bAB
	160	846	aB	745	aAB	479	bBC
	dms = 208	L**		L**		NS	
2,0-3,0	0	697	aA	599	bA	528	cA
	40	775	aB	748	aA	512	bA
	80	866	aA	897	aA	447	bA
	120	888	aA	888	aA	505	bA
	160	873	aAB	879	aA	557	bA
	dms = 49	Q**		Q**		Q**	
3,0-4,0	0	564	aB	453	bA	471	bA
	40	690	aB	545	bB	466	cA
	80	291	cC	637	aCD	473	bA
	120	781	aC	764	aAB	436	bB
	160	870	aAB	891	aA	481	bBC
	dms = 51	L**		L**		NS	
4,0-5,0	0	693	aA	559	bA	468	cA
	40	770	aB	705	bAB	485	cA
	80	863	aA	852	aAB	495	bA
	120	890	aA	612	cBC	490	cAB
	160	894	aAB	373	cC	442	bC
	dms = 51	L**		L**		NS	
5,0-10,0	0	666	aA	548	bA	465	cA
	40	758	aA	685	bA	492	cA
	80	853	aA	821	aABC	477	bA
	120	875	aAB	587	bBC	485	cAB
	160	901	aA	353	cC	483	bBC
	dms = 60	L**		Q**		NS	

Médias seguidas por letras minúsculas comparam, nas linhas, as três formas de adubação nitrogenada na mesma dose de P e distância rizosférica pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras maiúsculas comparam, na coluna, as distâncias rizosféricas na mesma dose de P e a mesma forma de adubação nitrogenada pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Efeito de doses: L (efeito linear); Q (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). N: adubação nítrica; A: adubação amoniacal; NA: adubação mista

Os tratamentos A e NA resultaram, de maneira geral, em menores teores de P geoquímico (Pi), nas diferentes distâncias rizosféricas (Tabela 11). Porém, A resultou nos maiores teores de P biológico (Po) e NA resultou nos menores valores desse compartimento (Tabela 12). Os dados de N e A apresentaram, geralmente, comportamento linear crescente a 0,01 de significância para Po e Pi, ou ainda, comportamento quadrático, com pico a 160 mg P kg⁻¹ de solo. Os dados de NA, de maneira geral, não apresentaram efeito de dose para Pi, ou apresentaram comportamento quadrático, com picos a 0 mg P kg⁻¹ de solo para Po (Tabelas 11 e 12). Os dados de NA apresentaram valores mais uniformes entre as diferentes distâncias da raiz, nas diferentes doses de SFT, para todos os compartimentos de P analisados (Tabelas 8 a 12).

Tabela 11 - P geoquímico (mg kg^{-1}) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas

P geoquímico (mg kg^{-1})							
Distância (mm)	Dose de P (mg kg^{-1})	N		A		NA	
0,0-0,5	0	695	aA	586	bA	535	bA
	40	669	aB	567	bA	528	bA
	80	685	aC	540	bD	525	bA
	120	699	aC	610	abB	526	bA
	160	765	aB	679	aB	544	bA
	dms = 94	Q*		Q**		NS	
0,5-1,0	0	699	aA	582	bA	502	cA
	40	695	aAB	558	bA	493	bA
	80	701	aBC	547	bD	499	bA
	120	697	aC	594	bB	522	bA
	160	608	aC	641	aB	539	bAB
	dms = 79	NS		Q**		NS	
1,0-2,0	0	701	aA	567	aA	497	aA
	40	788	aA	631	abA	482	bA
	80	795	aAB	709	aBCD	493	bA
	120	856	aAB	736	aAB	492	bA
	160	862	aAB	762	aAB	493	aAB
	dms = 208	L**		L**		NS	
2,0-3,0	0	715	aA	621	abA	533	bA
	40	792	aA	759	aA	520	bA
	80	882	aA	917	aA	458	cA
	120	906	aA	907	aA	517	bA
	160	891	aA	897	aA	570	bA
	dms = 93	L**		Q**		Q**	
3,0-4,0	0	586	aB	472	bA	477	bA
	40	708	aAB	557	bA	475	bA
	80	706	aBC	659	aCD	486	bA
	120	783	aBC	784	aA	450	bA
	160	895	aA	909	aA	496	bAB
	dms = 84	L**		L**		NS	
4,0-5,0	0	713	aA	579	bA	475	cA
	40	789	aA	718	aA	495	bA
	80	883	aA	874	aAB	509	bA
	120	913	aA	632	bC	505	cA
	160	916	aA	389	bC	459	bB
	dms = 77	L**		Q**		NS	
5,0-10,0	0	688	aA	564	bA	471	cA
	40	778	aA	695	bA	502	cA
	80	871	aA	839	aABC	489	bA
	120	899	aA	604	bC	501	cA
	160	924	aA	370	cC	501	bAB
	dms = 83	L**		Q**		NS	

Médias seguidas por letras minúsculas comparam, nas linhas, as três formas de adubação nitrogenada na mesma dose de P e distância rizosférica pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras maiúsculas comparam, na coluna, as distâncias rizosféricas na mesma dose de P e a mesma forma de adubação nitrogenada pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Efeito de doses: L (efeito linear); Q (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). N: adubação níttrica; A: adubação amoniacal; NA: adubação mista

Tabela 12 - P biológico (mg kg^{-1}) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas

P biológico (mg kg^{-1})							
Distância (mm)	Dose de P (mg kg^{-1})	N		A		NA	
0,0-0,5	0	50	cE	241	aA	177	bAB
	40	105	bE	137	aC	136	aAB
	80	158	aC	162	aB	95	bA
	120	161	aCD	170	aA	95	bA
	160	211	aD	217	aC	95	bA
	dms = 25,38	L**		L**		Q**	
0,5-1,0	0	57	cE	162	aaB	140	bD
	40	109	bE	142	aC	104	bC
	80	127	aBC	63	bC	68	bB
	120	153	aD	32	cC	64	bB
	160	197	aE	55	bD	60	bB
	dms = 19,87	L**		Q**		L**	
1,0-2,0	0	72	bE	178	aB	202	aA
	40	90	cC	240	aA	140	bA
	80	116	bB	231	aA	79	cAB
	120	130	bBC	305	aA	82	cAB
	160	200	bD	442	aAB	84	cAB
	dms = 27,14	L**		Q**		Q**	
2,0-3,0	0	58	bC	169	aB	167	aBC
	40	103	bC	221	aAB	125	bABC
	80	189	aB	216	aA	83	bAB
	120	150	bB	293	aA	84	cAB
	160	221	bC	428	aB	85	cAB
	dms = 27,53	L**		L**		Q**	
3,0-4,0	0	42	bD	167	aB	149	aCD
	40	100	bD	210	aAB	116	bABC
	80	149	bBC	211	aA	83	cAB
	120	148	bCD	289	aA	78	cAB
	160	177	bD	415	aB	74	cAB
	dms = 28,77	L**		L**		Q**	
4,0-5,0	0	39	bA	135	aB	157	aBCD
	40	89	bA	196	aB	111	bBC
	80	90	bA	219	aA	64	bB
	120	112	bA	293	aA	65	cB
	160	178	bA	431	aB	65	cB
	dms = 25,52	L**		Q**		Q**	
5,0-10,0	0	68	bB	141	aB	156	aBCD
	40	112	bB	216	aAB	116	bABC
	80	102	bA	225	aA	76	bAB
	120	135	bA	323	aA	75	cAB
	160	171	bB	475	aA	75	cAB
	dms = 33,37	L**		L**		Q**	

Médias seguidas por letras minúsculas comparam, nas linhas, as três formas de adubação nitrogenada na mesma dose de P e distância rizosférica pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras maiúsculas comparam, na coluna, as distâncias rizosféricas na mesma dose de P e a mesma forma de adubação nitrogenada pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Efeito de doses: L (efeito linear); Q (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). N: adubação níttrica; A: adubação amoniacal; NA: adubação mista

4.2.4. Parâmetros biológicos

Houve maior acúmulo de carbono orgânico solúvel em água (COSA) nos tratamentos A ou NA e, de maneira geral, os teores foram mais altos nas doses mais altas de SFT, com comportamento linear crescente a 0,01 de significância, ou quadrático, com picos a 160 mg P kg⁻¹ de solo a maior dose de fosfato no solo (Tabela 13). O P microbiano (Pm) teve o seguinte padrão: A e/ou NA resultaram em maiores teores que nitrato nas doses 120 e/ou 160 mg P kg⁻¹ de solo na maioria das distâncias da raiz e, além disso, os teores dessa fração foram muito menores na dose de 0 mg P kg⁻¹ de solo e resultaram, na maioria das condições, em um padrão linear crescente a 0,01 de significância, estabelecendo uma relação direta entre a quantidade de P aportado no sistema e o acúmulo de P microbiano (Tabela 14).

Tabela 13 - C orgânico solúvel em água (mg kg^{-1}) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas

Carbono orgânico solúvel em água (mg kg^{-1})							
Distância (mm)	Dose de P (mg kg^{-1})	N		A		NA	
0,0-0,5	0	4,14	bA	6,10	aA	6,39	aA
	40	2,24	cA	6,22	cA	7,69	aA
	80	0,35	cBC	6,33	bA	9,00	aA
	120	2,84	cA	11,1	aA	8,80	bB
	160	5,33	cA	15,9	aA	8,60	bC
	dms = 1,10	Q**		Q**		Q**	
0,5-1,0	0	2,72	bB	2,89	bB	6,55	aA
	40	2,08	cABC	4,06	bB	7,74	aA
	80	1,45	cA	5,22	bBC	8,93	aA
	120	1,93	cB	6,34	bB	8,91	aB
	160	2,41	cC	7,47	bB	8,88	aC
	dms = 0,64	Q**		L**		Q**	
1,0-2,0	0	2,43	bB	2,65	abB	3,51	aBC
	40	1,63	cAB	3,44	bBC	6,52	aAB
	80	0,82	cAB	4,22	bCD	9,54	aA
	120	1,77	cBC	5,86	bB	10,94	aA
	160	2,71	cC	7,50	bB	12,34	aA
	dms = 1,02	Q**		L**		L**	
2,0-3,0	0	2,45	bB	2,92	bB	3,99	aB
	40	1,41	cBCD	3,40	bBC	6,57	aAB
	80	0,36	cBC	3,88	bD	9,14	aA
	120	1,99	cB	5,52	bB	9,48	aB
	160	3,63	cB	7,15	bB	9,82	aBC
	dms = 0,86	Q**		L**		Q**	
3,0-4,0	0	1,62	aCD	1,06	bC	3,15	aBC
	40	0,85	cDE	2,63	bCD	5,95	aB
	80	0,09	cC	4,20	bCD	8,75	aA
	120	0,16	cE	3,76	bC	9,54	aB
	160	0,32	cE	3,31	bD	10,33	aB
	dms = 0,67	Q**		Q**		Q**	
4,0-5,0	0	2,02	bBC	1,04	cC	3,09	aBC
	40	1,02	cCDE	3,61	bBC	6,03	aB
	80	0,02	cC	6,17	bAB	8,97	aA
	120	0,71	cDE	4,21	bC	9,59	aB
	160	1,40	bD	2,25	bD	10,21	aB
	dms = 0,95	Q**		Q**		Q**	
5,0-10,0	0	1,07	bD	1,11	bC	2,26	aC
	40	0,59	cE	1,90	bD	5,33	aB
	80	0,11	cBC	2,39	bE	8,39	aA
	120	1,19	cCD	4,08	bC	9,07	aB
	160	2,27	cC	5,46	bC	9,74	aBC
	dms = 0,50	Q**		L**		L**	

Médias seguidas por letras minúsculas comparam, nas linhas, as três formas de adubação nitrogenada na mesma dose de P e distância rizosférica pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras maiúsculas comparam, na coluna, as distâncias rizosféricas na mesma dose de P e a mesma forma de adubação nitrogenada pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Efeito de doses: L (efeito linear); Q (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). N: adubação nítrica; A: adubação amoniacal; NA: adubação mista

Tabela 14 - P microbiano (mg kg^{-1}) no solo em resposta às diferentes formas de aplicação de N combinadas com cinco níveis de P, nas diferentes distâncias rizosféricas

Distância (mm)	Dose de P (mg kg^{-1})	P microbiano (mg kg^{-1})					
		N		A		NA	
0,0-0,5	0	0,16	aB	5,04	aCD	5,64	aB
	40	2,24	bB	6,22	aCD	7,69	aBC
	80	2,35	cBC	6,33	bB	9,00	aB
	120	2,84	cC	11,11	aB	8,8	bBC
	160	5,33	cCD	5,9	aA	8,6	bC
	dms = 2,49	L**		L**		L**	
0,5-1,0	0	4,67	bA	2,05	aAB	13,55	aA
	40	7,55	bB	15,30	aB	8,10	bBC
	80	8,06	aBC	8,67	aB	3,50	bD
	120	6,46	abD	4,48	bC	8,85	aCD
	160	18,46	bAB	21,37	aA	21,34	aB
	dms = 2,77	L*		Q*		Q**	
1,0-2,0	0	0,55	aB	1,76	aD	0,51	aB
	40	5,75	aB	6,45	aCD	6,19	aBC
	80	8,17	aBC	8,05	aB	7,88	aCD
	120	2,98	bE	7,46	aC	4,41	bE
	160	8,73	cDE	12,14	bBC	27,60	aA
	dms = 2,97	L*		L**		Q**	
2,0-3,0	0	5,36	bA	8,40	aBC	8,41	aA
	40	5,63	cB	22,02	aA	17,17	bA
	80	9,72	cB	19,67	aA	21,06	aA
	120	12,38	bB	18,71	aAB	15,09	bB
	160	12,83	bC	13,63	aB	13,56	aC
	dms = 2,97	L**		L*		L**	
3,0-4,0	0	0,36	aB	1,34	aD	0,93	aB
	40	8,50	aA	8,19	aC	9,31	aB
	80	9,99	aB	11,01	aB	6,98	bCD
	120	11,90	bBC	16,08	aB	13,77	bB
	160	16,75	bB	19,22	aC	15,90	bC
	dms = 2,12	L**		Q**		L**	
4,0-5,0	0	6,29	bA	2,81	aAB	4,48	abA
	40	7,99	aB	4,15	bD	8,67	bC
	80	14,68	bA	15,90	bA	20,26	aA
	120	23,12	aA	21,65	aA	21,00	aA
	160	20,54	cA	29,68	aA	25,57	bC
	dms = 2,98	L**		L**		L**	
5,0-10,0	0	5,36	bA	12,62	aA	4,91	abA
	40	7,57	aB	7,53	aCD	8,06	aBC
	80	7,02	aC	8,31	aB	8,42	aBC
	120	5,43	aDE	5,68	aC	5,94	aDE
	160	6,72	bE	19,23	aA	21,66	aB
	dms = 4,35	NS		Q**		Q**	

Médias seguidas por letras minúsculas comparam, nas linhas, as três formas de adubação nitrogenada na mesma dose de P e distância rizosférica pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas por letras maiúsculas comparam, na coluna, as distâncias rizosféricas na mesma dose de P e a mesma forma de adubação nitrogenada pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$). Efeito de doses: L (efeito linear); Q (efeito quadrático); NS (não significativo); * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$). N: adubação níttrica; A: adubação amoniacal; NA: adubação mista.

4.3. Experimento III

4.3.1. Produção de matéria seca e P em planta

Nos ensaios com 100% de P, A resultou em maior produção de matéria fresca e seca da parte aérea e total. De maneira geral, não houve diferença entre os níveis de P na maioria dos parâmetros de matéria seca, seja nos tratamentos A ou N, mas, para os parâmetros de matéria fresca, o nível mais alto de P resultou em maior produção de matéria fresca da parte aérea (para N e A) e total (para A) (Tabela 15). N resultou em maior teor de P na raiz nos dois os níveis de P e, nos tratamentos com 100% de P, resultou em maior quantidade de P absorvido na parte aérea e total (Tabela 16).

Tabela 15 - Parâmetros de produção de matéria fresca em resposta às duas formas de aplicação de nitrogênio combinadas com dois níveis de P

Produção de matéria (mg)					
Parâmetros	Nível de P (%)	N		A	
MF Parte Aérea	50	0,25	bA	0,24	bA
	100	0,31	aB	0,41	aA
	dms = 0,09				
MF Raiz	50	0,70	aA	0,55	aA
	100	0,64	aA	0,67	aA
	dms = 0,16				
MF Total	50	0,96	aA	0,78	bA
	100	0,95	bA	1,08	aA
	dms = 0,19				
MS Parte Aérea	50	0,03	aA	0,03	bA
	100	0,03	aB	0,04	aA
	dms = 0,01				
MS Raiz	50	0,08	aA	0,06	bB
	100	0,07	bA	0,08	aB
	dms = 0,01				
MS Total	50	0,10	aA	0,09	bA
	100	0,10	aB	0,12	aA
	dms = 0,02				

100% e 50% de P equivalem a 0,32 e 0,16 mM KH_2PO_4 ; A: amônio; N: nitrato; MF: matéria fresca; MS: matéria seca. As diferenças entre as formas de nitrogênio, no mesmo nível de P, são indicadas por letras maiúsculas e as diferenças entre os níveis de P, na mesma forma de N, são indicadas por letras minúsculas (Tukey<0,05)

Tabela 16 - Parâmetros de P em planta em resposta às duas formas de aplicação de nitrogênio combinadas com dois níveis de P

P em planta					
Parâmetros	Nível de P (%)	N		A	
Teor de P na parte aérea (mg g ⁻¹)	50	6,66	bA	6,65	bA
	100	11,06	aA	9,05	aA
	dms = 2,12				
Teor de P na raiz (mg g ⁻¹)	50	3,40	bA	2,50	bB
	100	4,88	aA	3,89	aB
	dms = 0,85				
Teor de P na semente (mg g ⁻¹)	50	0,85	aA	0,79	aA
	100	1,16	aA	1,40	aA
	dms = 0,92				
P absorvido na parte aérea (mg)	50	0,32	aA	0,31	aA
	100	0,84	aA	0,24	aB
	dms = 0,10				
P absorvido na raiz (mg)	50	0,42	aA	0,33	aA
	100	0,32	aA	0,31	aA
	dms = 0,23				
P absorvido total (mg)	50	0,71	bA	0,66	aA
	100	1,40	aA	0,77	aB
	dms = 0,23				

100% e 50% de P equivalem a 0,32 e 0,16 mM KH₂PO₄; A: amônio; N: nitrato; MF: matéria fresca; MS: matéria seca. As diferenças entre as formas de nitrogênio, no mesmo nível de P, são indicadas por letras maiúsculas e as diferenças entre os níveis de P, na mesma forma de N, são indicadas por letras minúsculas (Tukey<0,05)

4.3.2. Raiz e arquitetura do sistema radicular

Não houve diferença entre os tratamentos A e N nos parâmetros comprimento, área, volume e crescimento de raiz. Porém, o nível mais alto de P (100%) resultou em maiores área e volume que o nível mais baixo de P (50%) e, para A, o nível mais baixo de P resultou em maior crescimento diário radicular (Tabela 17).

Tabela 17 – Parâmetros do sistema radicular analisado como um todo em resposta às duas formas de aplicação de nitrogênio combinadas com dois níveis de P

Dados de raiz total					
Parâmetros	Nível de P (%)	N		A	
Comprimento (cm)	50	141,10	aA	160,30	aA
	100	116,40	aA	121,60	aA
	dms = 35,73				
Área (cm ²)	50	232,05	bA	235,50	bA
	100	333,80	aA	332,45	aA
	dms = 54,87				
Volume (cm ³)	50	47,65	bA	38,95	bA
	100	111,90	aA	109,60	aA
	dms = 45,61				
Crescimento (cm dia ⁻¹)	50	9,40	aA	10,70	aA
	100	7,8	aA	8,1	bA
	dms = 2,42				

100% e 50% de P equivalem a 0,32 e 0,16 mM KH₂PO₄; A: amônio; N: nitrato; MF: matéria fresca; MS: matéria seca. As diferenças entre as formas de nitrogênio, no mesmo nível de P, são indicadas por letras maiúsculas e as diferenças entre os níveis de P, na mesma forma de N, são indicadas por letras minúsculas (Tukey<0,05)

Não houve diferença entre os tratamentos A e N para o comprimento da raiz primária, embora os tratamentos A tenham resultado em raízes com menor diâmetro e menor comprimento da zona apical, ou seja, mais finas e melhor ocupadas pelas raízes secundárias ao longo do comprimento. Os tratamentos A resultaram em maior número de raízes secundárias, embora estas tenham apresentado menor diâmetro e menor densidade, ou seja, maior distância entre si, ao longo da do comprimento da raiz principal (Tabela 18). Os tratamentos N resultaram em maior número de raízes

seminais, de maior diâmetro. N também resultou em desenvolvimento de raízes de coroa, ausentes nos tratamentos A (Tabela 19).

Tabela 18 – Dados do RootBox para as raízes primária e secundárias em resposta às duas formas de aplicação de nitrogênio combinadas com dois níveis de P

Dados para arquitetura da raiz					
		Nível de P (%)			
		N		A	
Raiz primária					
Comprimento total (cm)	50	107,59	aA	106,06	aA
	100	112,19	aA	111,41	aA
	dms = 13,90				
Diâmetro (mm)	50	3,48	aA	3,03	bA
	100	3,60	aA	3,05	bA
	dms = 0,28				
Comprimento da zona apical (cm)	50	23,77	aA	11,34	bA
	100	23,86	aA	10,62	bA
	dms = 4,35				
Raízes secundárias					
Número	50	52,60	aB	75,00	aA
	100	53,80	bB	75,50	aA
	dms = 4,93				
Diâmetro (mm)	50	2,67	aA	1,81	aB
	100	2,38	aA	1,83	aB
	dms = 0,28				
Comprimento total (cm)	50	92,62	aA	101,09	aA
	100	91,62	aA	105,49	aA
	dms = 18,30				
Distância média entre raízes (cm)	50	0,28	aB	0,31	aA
	100	0,29	aB	0,32	aA
	dms = 0,20				

100% e 50% de P equivalem a 0,32 e 0,16 mM KH_2PO_4 ; A: amônio; N: nitrato; MF: matéria fresca; MS: matéria seca. As diferenças entre as formas de nitrogênio, no mesmo nível de P, são indicadas por letras maiúsculas e as diferenças entre os níveis de P, na mesma forma de N, são indicadas por letras minúsculas (Tukey<0,05)

Tabela 19 – Dados do RootBox para as raízes seminais e da coroa em resposta às duas formas de aplicação de nitrogênio combinadas com dois níveis de P

Dados para arquitetura da raiz					
Nível de P (%)		N		A	
Raízes seminais					
Número	50	4,20	aA	1,90	aB
	100	4,40	aA	2,10	aB
	dms = 0,79				
Diâmetro (mm)	50	3,25	aA	2,80	aB
	100	3,35	bA	2,82	aB
	dms = 0,28				
Comprimento total (cm)	50	45,50	aA	39,24	aA
	100	45,02	aA	41,24	aA
	dms = 18,30				
Raízes da coroa					
Número	50	2,00	aA	0,00	aB
	100	2,20	bA	0,00	aB
	dms = 0,68				
Diâmetro (mm)	50	3,13	aA	0,00	aB
	100	3,03	aA	0,00	aB
	dms = 0,21				
Comprimento total (cm)	50	19,44	aA	0,00	aB
	100	18,95	aA	0,00	aB
	dms = 2,02				

100% e 50% de P equivalem a 0,32 e 0,16 mM KH_2PO_4 ; A: amônio; N: nitrato; MF: matéria fresca; MS: matéria seca. As diferenças entre as formas de nitrogênio, no mesmo nível de P, são indicadas por letras maiúsculas e as diferenças entre os níveis de P, na mesma forma de N, são indicadas por letras minúsculas (Tukey<0,05)

O sistema radicular da planta média apresentou a mesma arquitetura básica para ambos os níveis de P. Os tratamentos A resultaram em melhor desenvolvimento das raízes secundárias, que ocuparam mais da metade da raiz principal, enquanto os tratamentos com N tiveram menos raízes secundárias, mais concentradas próximas à zona basal. Por outro lado, os tratamentos N resultaram em maior número de raízes seminais e no desenvolvimento das raízes da coroa, enquanto que os tratamentos A tiveram menor número de raízes seminais, mas não tiveram desenvolvimento de raízes da coroa (Figura 25).

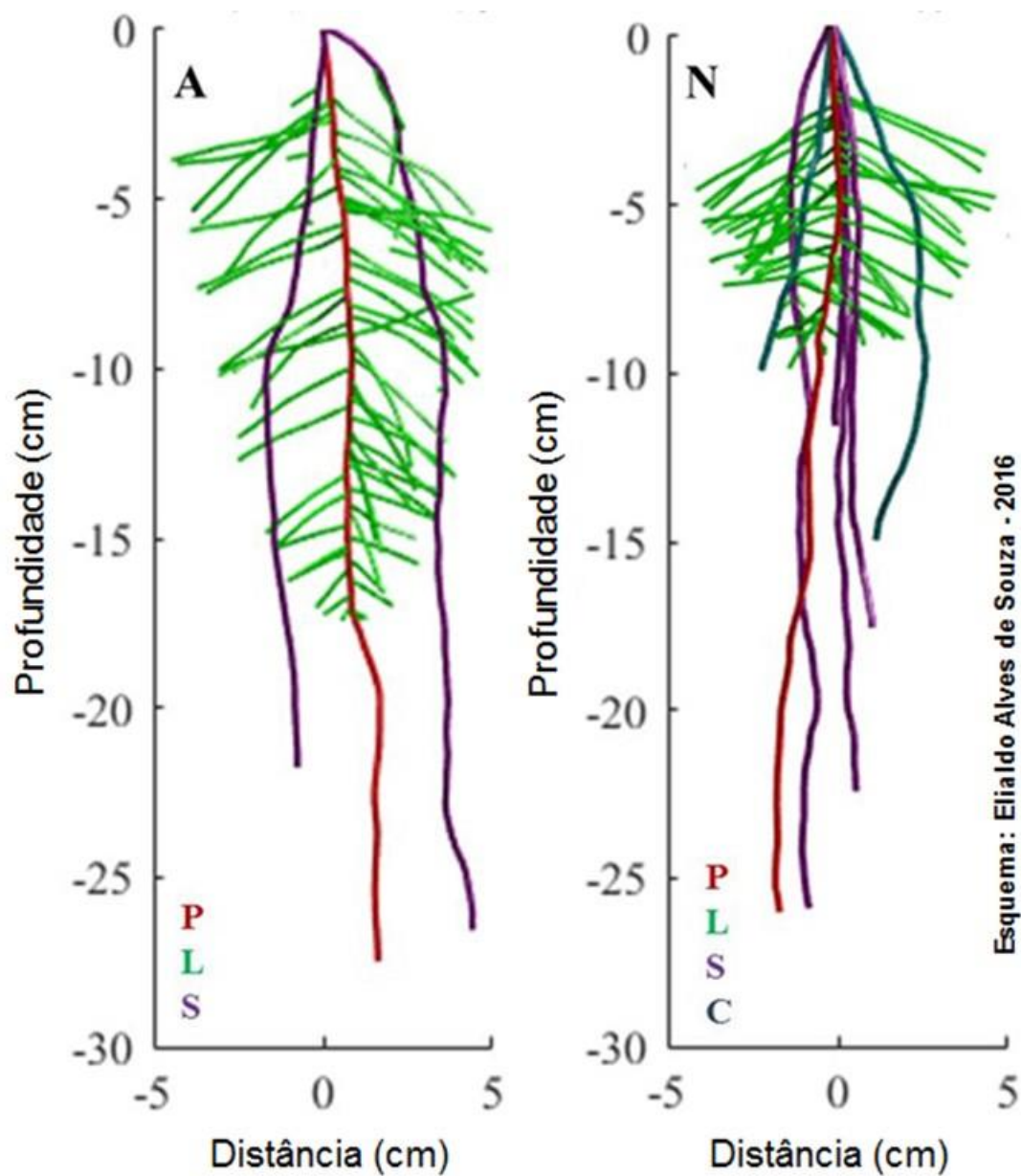


Figura 25 - Arquitetura do sistema radicular das plantas ao final dos experimentos. A: amônio; N: nitrato; P: raiz primária; L: raízes laterais; S: raízes seminais; C: raízes da coroa

5. DISCUSSÃO

5.1. Produção de matéria seca

No experimento II, houve maior produção de matéria seca (total, da raiz e da parte aérea), independentemente da dose de P aplicada, quando a fosfatagem foi associada com adubação nitrogenada exclusivamente amoniacal ou nítrica-amoniacal (Tabela 1). Comparativamente, no experimento I, embora a 160 mg P kg^{-1} de solo os tratamentos A e NA tenham produzido mais matéria seca total (Figura 9), nas outras doses os tratamentos N ficaram entre aqueles com maior produção de tecidos. Além disso, no experimento I, N resultou em maior produção de matéria seca da raiz (Figura 11) e maior relação raiz: parte aérea (Figura 10), enquanto A e NA, geralmente, resultaram em maior produção de matéria seca da parte aérea (Figura 12) e menor relação raiz: parte aérea (Figura 11).

Ma et al. (2013a) encontraram dados semelhantes, também na cultura do milho, nos quais o uso do nitrogênio amoniacal combinado com P (seja na forma de fosfato diamônico - DAP, fosfato monoamônico - MAP ou sulfato de amônio + superfosfato) resultou em produção de matéria seca da parte aérea e da raiz até 26% maior que o tratamento ureia + superfosfato. Como a ureia reage rapidamente na solução do solo formando amônia gasosa (NH_3) e nitrato, esses dados podem ser utilizados para comparações entre fontes amoniacais e nítricas combinadas com P. Essa maior produção pode ser devido a um aumento da eficiência de uso de nutrientes, principalmente do P, pois: 1) A adubação com fontes amoniacais aumenta a extrusão de H^+ pelas raízes, para a manutenção do equilíbrio de cargas, o que resulta em redução do pH rizosférico, com estímulo à proliferação radicular e solubilização de alguns elementos (MA et al, 2013b); 2) Nesses casos, há maior absorção de nitrogênio e P, devido a alterações favoráveis na dinâmica dos nutrientes na rizosfera (JING et al., 2012; MA et al., 2013b); 3) E por alterações na arquitetura radicular (LIMA et al., 2010). A aplicabilidade dessas hipóteses ao presente estudo será discutida nos próximos tópicos.

O aumento da relação raiz: parte aérea associado ao decréscimo da disponibilidade de P (Figura 10 e Tabela 1) é a expressão de um fenômeno bem conhecido: as raízes se tornam os drenos preferenciais para alocação de carbono (C) em deficiência de P, como estratégia para aumentar a eficiência de absorção,

garantindo a exploração de mais espaços intersticiais e maior ocupação de volume de solo (LYNCH e BROWN, 2001; LAMBERS et al., 2010; AZIZ et al., 2011).

5.2. Efeitos sobre o pH

Como mostrado anteriormente, nos experimentos I e II, o pH tornou-se mais ácido no solo rizosférico em decorrência da aplicação de amônio, mais alcalino em resultado da aplicação de nitrato, e intermediário com a combinação das fontes amoniacais-nítricas. O efeito rizosférico, em resposta aos tratamentos, é facilmente constatado ao se observar que no solo não-rizosférico o pH foi bem mais uniforme entre as doses de P e com valores muito semelhantes entre os tratamentos, todos os dados entre 5,1 e 5,5 (Figura 17 e Tabela 3). Além do efeito direto sobre a solubilização, outros fenômenos resultantes da acidificação também podem ser favoráveis à eficiência de uso do fosfato: 1) Os simportadores do tipo $H^+/H_2PO_4^-$ dependem de um gradiente de prótons através da membrana plasmática, de forma que o efluxo de H^+ acaba aumentando a atividade desses transportadores de fosfato (ZENG et al., 2012); 2) A redução do pH para a faixa 4,5-5,0 favorece a atividade fúngica, conhecida pela alta eficiência em mobilizar formas mais recalcitrantes de P_i e P_o através da maior exploração de espaços intersticiais, liberação de ácidos orgânicos, substâncias queladoras e fosfatases ácidas (ZAIDI et al., 2009; SHARMA et al., 2013).

A comunidade fúngica rizosférica é altamente eficiente em mobilizar formas menos lábeis de P_i , pois são capazes de explorar maiores distâncias que as bactérias, sendo mais importantes e mais eficientes na solubilização de fosfato nos solos, devido à produção de mais ácidos orgânicos através da via de oxidação direta que ocorre na face externa da membrana citoplasmática (ROUSK et al., 2009). Assim, reduzem mais significativamente o pH, especialmente através da assimilação preferencial de NH_4^+ , como no caso das plantas e, conseqüentemente, fornecem mais substâncias queladoras ao sistema, competem mais eficientemente com os sítios de adsorção de P e formam mais complexos solúveis com os íons insolubilizadores de P (Ca, Al e Fe) (ZAIDI et al., 2009; SHARMA et al., 2013).

A extrusão de H^+ é o resultado do mecanismo de manutenção do equilíbrio de carga na planta e funciona como resposta à assimilação de NH_4^+ , a partir da atividade da $PM-H^+$ ATPase, uma bomba eletrogênica universal que usa ATP como

fonte de energia para bombear prótons através do apoplasto e cuja função principal é gerar um gradiente eletroquímico e direcionar as atividades de efluxo e influxo de íons e metabólitos através da membrana plasmática (ZENG et al., 2012). As fontes nítricas tiveram um padrão oposto (Figura 17 e Tabela 3), pois elas liberam HCO_3^- e OH^- como resultado do processo de manutenção do equilíbrio de cargas (WELIGAMA et al., 2008), o que explica os valores mais elevados de pH no solo rizosférico nos tratamentos com nitrato em todas as doses de P. Os tratamentos nitrato+amônio resultaram em valores intermediários entre nitrato e amônio, porém, bem mais próximos do amônio, possivelmente devido ao consumo das duas formas do elemento, associado à preferência pela forma amoniacal. O milho tem absorção preferencial por NH_4^+ , especialmente nos estágios iniciais de desenvolvimento (WARNCKE e BARBER, 1973).

A reação do superfosfato triplo (SFT) no solo, por si só, promove uma acidificação local, tanto maior quanto maior a quantidade aportada desse fertilizante (SINCLAIR et al., 1993), pois as suas transformações no solo são: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{PO}_4 + \text{CaHPO}_4 \rightarrow \text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{H}^+ + \text{H}_2\text{PO}_4^- \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{HPO}_4^{2-} \rightarrow 3\text{H}^+ + \text{PO}_4^{3-}$. Silva (2013) avaliou o pH do solo em zonas horizontais em placas de Petri com alguns fertilizantes fosfatados, e constatou que todos diminuíram o pH, e que a redução foi maior nas camadas mais superficiais, com uma diferença de aproximadamente duas unidades entre os solos fosfatados e a testemunha. Essas alterações no raio próximo do grânulo devem-se à troca entre os cátions dos fertilizantes e os íons H^+ dos coloides do solo, como efeito do processo de nitrificação e/ou pela reação do próprio fertilizante (LINDSAY et al., 1962). Ernani et al. (2001), em experimento sem plantas, constatou que o superfosfato triplo baixou o pH de 5,2 para 4,0, nos 32 primeiros dias após a mistura dos fertilizantes com o solo. Ferreira et al. (2014) encontrou resultados semelhantes em experimentos com vasos, com a fosfatagem reduzindo significativamente o pH nas camadas mais superficiais do solo.

5.3. Eficiência de uso do nitrogênio

Os tratamentos com amônio ou com amônio + nitrato apresentaram maiores teores de N-mineral no solo ao final do experimento, especialmente nas regiões mais próximas à raiz (Figura 20 e Tabela 6), o que pode ter favorecido a absorção

de nitrogênio (Tabelas 6 e 7). O NH_4^+ é um cátion em um solo predominantemente eletronegativo, de forma que ele tende a ser retido por um período prolongado no perfil do solo, não estando sujeito à lixiviação para camadas distantes da raiz, como acontece com o NO_3^- , um ânion que tende a ser repelido pelas cargas superficiais (HIREL et al., 2011). Cookson e Cornforth (2002) observaram que o uso de dicianodiamida (DCD) (10 e 25 kg ha^{-1}) em áreas de pastagem reduziu a concentração de NO_3^- (de 140 para 60 e 35 ppm), o que levou à diminuição da lixiviação em mais de 50% na dose mais baixa, chegando a mais de 70% na dose mais alta.

A transferência de nutrientes na rizosfera ocorre através do fluxo de massa e/ou da difusão via solução do solo e, quando o suprimento supera a demanda, alguns elementos tendem a se acumular nas zonas mais próximas às raízes, podendo inclusive ocorrer precipitação (OLIVEIRA et al., 2010). Por conta disso, os dados de amônio, nitrato e N-mineral foram mais altos em $0-0,5$ e $0,5-1 \text{ mm}$ (Tabela 6). Embora a relação amônio: nitrato tenha sido maior nos tratamentos com N-amoniaco, os tratamentos N-amoniaco + N-nítrico, mesmo tendo recebido metade do nitrogênio na forma amoniaco, resultaram nos mesmos valores que os tratamentos com aporte de N-nítrico (Tabela 7 e Figura 21), porque: a) Existe uma absorção preferencial inicial por NH_4^+ na cultura do milho; b) A dicianodiamida reduz a nitrificação, mas não a paralisa completamente (GONG et al., 2013), o que leva à diminuição gradativa dos níveis de NH_4^+ , especialmente nas regiões mais próximas às raízes. A brusca redução dos teores de NH_4^+ não foi resultado apenas de um maior consumo pelas plantas à medida que o P se tornava menos limitante, mas também, possivelmente, um efeito do solo e da microbiota presente nesse solo, promovendo a nitrificação do substrato, mesmo em taxas bem menores do que seria esperado sem a presença do inibidor de nitrificação (IN) dicianodiamida (DCD) que foi aplicado nesse estudo. Isso porque houve redução significativa do NH_4^+ com o aumento da aplicação de P no solo não-rizosférico também (Figura 20).

A absorção do NH_4^+ é passiva e a etapa de redução não é necessária, posteriormente, para a incorporação do nitrogênio nos esqueletos de C, com grande economia de ATP e adenilato (JING et al., 2012). À medida que aumenta a eficiência de uso do nitrogênio, a EUP tende a melhorar também, pois o nitrogênio e o P têm forte relação sinérgica entre si, de forma que ambos os nutrientes, em doses adequadas, promovem incrementos em produtividade maiores em relação aos

obtidos com a aplicação de cada um isoladamente (LEE et al., 1992). O aumento na produção de matéria seca aumenta a demanda desses dois nutrientes de maneira proporcional, pois os seus metabolismos estão intrinsecamente relacionados e estão no cerne do Dogma Central da Biologia Molecular, pois formam conjuntamente os ácidos nucleicos, compostos energéticos e redutores, fosfoproteínas (entre elas a RUBISCO e a PEPC) e uma série de coenzimas (RUFTY et al., 1990; RUFTY et al., 1993). Além disso, o metabolismo vegetal é basicamente o resultado da atividade de uma série de proteínas especializadas (enzimas com nitrogênio como parte fundamental de sua composição) dirigidas por processos energéticos que demandam compostos fosfatados e regulados por processos de fosforilação. O aumento da disponibilidade de P aumenta o consumo de nitrogênio, pois os processos de absorção (de NO_3^-) e assimilação em esqueletos de C (do NH_4^+ reduzido ou absorvido diretamente do solo) desse nutriente estão entre os processos que mais demandam energia na forma de ATP e compostos redutores (NADPH) formados por Pi (BLOOM et al., 1992).

A dicianodiamida (DCD) é um inibidor de nitrificação com vantagens agronômicas e econômicas (como menor custo de produção, menor taxa de volatilização e de fácil armazenamento adequado ao uso com fertilizantes sólidos), o que justifica o seu uso, apesar de não ser o composto mais efetivo em inibir a nitrificação (McCARTY e BREMNER, 1989; FRYE, 2005). Embora a nitrapirina seja o inibidor mais eficiente e também o mais estudado, a DCD possui efeito bacteriostático e não bactericida, com efeito específico sobre as bactérias do gênero *Nitrosomonas*, capaz de uma inibição persistente por algumas semanas, mas que já começa a diminuir seu potencial inibitório nos primeiros dias após a aplicação, como observado por Mason (1987), que tratou ureia com DCD na dose de 10% do nitrogênio total, o que reduziu a conversão do NH_4^+ para outras formas de nitrogênio no solo por 30 dias. A DCD é um fertilizante nitrogenado de liberação lenta (com aproximadamente 66,7% de N), que se decompõe em NH_4^+ e CO_2 com o tempo (McCARTY e BREMNER, 1989). Com o aumento das doses de P, os níveis de NH_4^+ diminuiriam não apenas pelo maior consumo vegetal, mas porque o fosfato, ao deixar de ser limitante, aumenta a atividade e a quantidade da microbiota, favorecendo os processos microbiológicos na rizosfera ao permitir um maior *input* de C pelas plantas melhores nutridas (KING et al., 2002; DAWSON et al., 2003).

A nitrificação reduzida tornou os tratamentos com amônio em tratamentos fornecedores não apenas de NH_4^+ , mas de NH_4^+ e NO_3^- em diferentes proporções, com a participação do NO_3^- crescendo à medida que o experimento avançava para o final. Isso explica o melhor desempenho do amônio e do nitrato + amônio em produzir mais matéria seca, pois inúmeros trabalhos mostram que o fornecimento simultâneo dessas duas formas de nitrogênio tem maior efeito positivo no desenvolvimento do que o fornecimento de apenas uma delas, e que nos estádios iniciais o milho prefere nitrogênio na forma amoniacal, mas, à medida que se desenvolve, a sua preferência muda para nitrogênio nítrico (BELOW e GENTRY, 1987; HEBERER e BELOW, 1989; ADRIAANSE e HUMAN, 1993; SCHORTEMEYER et al., 1993). Assim, a lenta conversão do NH_4^+ promovida pela DCD trabalha em sincronia com a demanda da cultura pelas duas formas de nitrogênio. Da mesma forma, nos tratamentos com aporte de N-nítrico apenas também houve presença de NH_4^+ , mesmo em níveis bem baixos e constantes, por conta da mineralização da matéria orgânica (MOS), um processo universal nos solos que fornece NH_4^+ , como resultado da amonificação (BURGER e JACKSON, 2003).

5.4. Eficiência de uso do P

A eficiência de recuperação é a recuperação aparente que mede a quantidade do nutriente que precisa ser aplicada para que a planta absorva uma unidade dele, enquanto a eficiência fisiológica mede a quantidade do elemento absorvido que é utilizado para a produção de tecidos (ROBERTS, 2008). Assim, a maior eficiência de recuperação do P promovida pelo amônio na dose mais alta de fosfatagem (Figura 15) deveu-se à maior absorção do elemento (Figuras 13 e 14), enquanto a menor eficiência fisiológica do P (Figura 16) ocorreu porque, em condições ótimas de suprimento aumenta a proporção do P_i armazenado no vacúolo onde a planta tende a armazenar a maior parte do P na forma inorgânica) e a perda por efluxo, uma vez que as rotas preferenciais (ingresso no compartimento energético, síntese de biomoléculas e transporte a longa distância) já estão perfeitamente supridas (SCHACHTMAN et al., 1998). Segundo Mi et al. (2007), em baixa disponibilidade do nutriente a ERP é mais importante que a EFR, enquanto em alta disponibilidade, absorver e armazenar se tornam mais importantes. Dessa

forma, a redução da proporção do P_i diretamente utilizado para a produção de matéria seca resulta em uma menor EFP.

No experimento III, o pH da solução da solução nutritiva foi mantido a 6,0, igualando a atividade de bombeamento da $PM-H^+$ ATPase entre tratamentos N-amoniacal e N-nítrico (ZHANG et al., 2010). Além disso, os ensaios foram realizados em soluções nutritivas e os diferentes efeitos entre amônio e nitrato não puderam ser devido às alterações na acidez, composição química da rizosfera ou secreção de ácidos orgânicos (JING et al., 2010; HINSINGER et al., 2011; ZENG et al., 2012). Porém, o nitrogênio estimula a absorção de P pelas plantas e a forma amoniacal estimula a reutilização de P da parede celular (ZHU et al., 2016) e a reutilização do nitrogênio no arroz (TABUCHI et al., 2007). Assim, possivelmente, o amônio pôde estimular a reutilização interna do fosfato durante o estabelecimento da plântula.

Zhu et al. (2001) encontraram que NH_4^+ regula positivamente o conteúdo de pectina e a atividade da pectina metilesterase nas células das raízes sob privação de P, possivelmente remobilizando mais P das paredes celulares e aumentando sua solubilidade nos tecidos vegetais. Além disso, o NH_4^+ aumenta a produção de óxido nítrico (NO), uma molécula sinalizadora envolvida em alguns processos de desenvolvimento vegetal: crescimento, expansão foliar e via de sinalização de citocinina (PAGNUSSAT et al., 2002; AN et al., 2005; STÖHR e STREMLAU, 2006). Além disso, o NO é importante para acelerar a aclimatização (GARCI-A-MATA e LAMATTINA 2001, CUETO et al., 1996; ZHOU et al., 2012; CHEN et al., 2010), incluindo os casos de deficiência de P, como relatado para o tremoço branco (MENG et al. al., 2012). O NH_4^+ aumentou a expressão de OsPT2 no arroz, especialmente no estelo das raízes primárias e laterais sob deficiência de P (Al et al., 2009), indicando que essa forma de nitrogênio pode estar envolvida no transporte interno de fosfato (da raiz para a parte aérea) através da regulação da expressão do OsPT2. Um mecanismo semelhante poderia acontecer também no milho.

Uma melhor utilização interna poderia ser estimulada devido à aplicação de NH_4^+ , pois esta forma de nitrogênio teve uma maior produção de matéria fresca e seca da parte aérea e total (Figura 29). Além disso, o amônio mostrou uma maior produção de matéria nas parcelas com 100% de P, apesar de ter uma menor absorção de P nos mesmos tratamentos (Figuras 30 e 31). Mas, a reutilização de P é estimulada sob deficiência e, nestes ensaios, o amônio trabalhou melhor com o

nível mais alto de P do que no nível mais baixo, como observado nos experimentos I e II.

O amônio não aumentou a mobilização de P a partir da semente, uma vez que a concentração e o conteúdo foram semelhantes entre os dois níveis de P (Figuras 30 e 31), como encontrado por Lieffering et al. (1992) em cevada. Para manter a homeostase celular de P, a planta pode facilitar a aquisição de P a partir do ambiente externo ou reutilizar o P que já está dentro delas (LIN et al., 2009; ZHU et al., 2001). No entanto, não está claro como as formas de P afetam a aquisição de P. Mudanças no pH ou na rizosfera sob condições de deficiência de P são importantes, mas não o único fenômeno. Se em pH controlado, sem influência do endosperma e condições sem solo as formas de nitrogênio ainda modificam a utilização de P, há mais fatores a serem considerados do que aquelas mais comumente discutidos na literatura. A forma de nitrogênio, de alguma maneira, poderia mudar positivamente a sinalização sistêmica responsável pela utilização de P nas condições de disponibilidade de P.

5.5. Labilidade e compartimentos de P

As diferenças observadas entre solo rizosférico e não-rizosférico, em relação a cada labilidade (Figuras 24, 25 e 26), mostram que os resultados obtidos na zona de influência da raiz foram realmente devido ao efeito promovido pela interação das plantas com os tratamentos. Os menores teores de P lábil no experimento I, para as doses mais baixas do SFT foram, possivelmente, devido ao maior consumo do nutriente e sua maior mobilização a partir de formas menos lábeis, promovida pelos tratamentos com amônio e nitrato + amônio. A mesma “absorção facilitada” de P lábil observada no experimento II (Tabela 8), P geoquímico nas camadas mais próximas à raiz (Tabela 11), especialmente nas zonas mais próximas às raízes, associada a uma mobilização mais intensa de P nas frações moderadamente (Tabela 9) e menos lábeis (Tabela 10) e a um melhor desenvolvimento vegetal (Tabela 1) resultaram, possivelmente, dos seguintes fenômenos: a) Efeitos rizosférico sobre o pH (HINSINGER, 2001); b) Efeito sobre o gradiente eletroquímico e a atividade da PM-H⁺ ATPase (YAN et al., 2002); c) Efeito morfológico na arquitetura da raiz (LIMA et al., 2010); d) Disponibilidade maior e mais prolongada de nitrogênio, como observado nesse estudo, que tende a favorecer o desenvolvimento de uma

microbiota mais diversa e numerosa capaz de mobilizar P, com aumento da absorção dos dois elementos, devido à interação sinérgica entre eles, e devido ao maior crescimento vegetal que, por sua vez, aumenta ainda mais a demanda por esses elementos em um processo de *feedback* positivo (AKINNIFESI, et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2009).

O maior consumo de P nos tratamentos com amônio mobilizou inclusive o compartimento menos lábil (Figura 26 e Tabela 10), resultante do envelhecimento da quimissorção do P em solos tropicais e que é caracterizado por ligações bidentadas e binucleadas entre fosfato e os oxi-hidróxidos de Fe e Al (SCHMITT et al., 2014). Esse *pool* muitas vezes é considerado “recalcitrante” ou “não-lábil”, capaz de ser mobilizado em situações muito extremas de baixa disponibilidade de P (GATIBONI et al., 2007), mas, como demonstrado nesse trabalho, ele pode repor, mesmo que de maneira não tão expressiva, o P removido da solução ainda no primeiro ciclo de cultivo.

Nitrato + amônio facilitou o consumo de Po (Figura 26 e Tabela 12), possivelmente, devido à manutenção do pH em níveis intermediários em um intervalo adequado à desprotonação das substâncias orgânicas e à redução das forças de ligação entre a matéria orgânica do solo e as partículas do solo, tornando essas substâncias mais suscetíveis à ação da microbiota (CURTIN et al., 1998). A mineralização do Po desempenha um papel imperativo na ciclagem do P de um sistema agrícola e os microrganismos são capazes de produzir uma série de fosfatases, pertencentes aos mais diferentes grupos, capazes de promover a solubilização bioquímica de uma variedade de formas orgânicas de P, incluindo os fitatos, que pertencem ao grupo de formas orgânicas menos solúveis (RICHARDSON e SIMPSON, 2011; SHARMA et al., 2013).

5.6. Parâmetros biológicos

O carbono orgânico solúvel em água (COSA) é derivado, principalmente, dos exsudatos radiculares e estimula as atividades mineralizadora e solubilizadora da microbiota, com grande impacto na transformação de fosfato (CHEN et al., 2002). Assim, a maior presença de fosfato, seja através da aplicação direta ou através da solubilização através dos mecanismos de resposta da planta, geralmente estimula o desenvolvimento da microbiota que, por sua vez, solubiliza mais fosfato e favorece

um *feedback* positivo da planta através da liberação de maior quantidade de fotossintatos na raiz. Porém, não houve uma relação direta entre a maior quantidade de COSA (Tabela 13) e o maior consumo de Po (Tabela 12), possivelmente, porque: 1) Os tratamentos com N-amoniaco demandaram menos do compartimento orgânico de P, embora tenham resultado nos maiores teores de COSA, pois nesses tratamentos houve também uma maior mobilização das formas inorgânicas menos lábeis (Tabelas 9 e 10) em quantidades capazes de suprir a demanda das plantas e dos microrganismos; 2) Os maiores níveis de Po nos tratamentos N-amoniaco e N-amoniaco + N-nítrico devem-se a presença dos ácidos orgânicos de baixo peso molecular no COSA, capazes de solubilizar complexos do tipo Al(Fe)-Po, liberando, conseqüentemente o Po para o sistema depois da quelação dos outros elementos (FOX e COMERFORD, 1990). Além disso, existe uma relação direta entre maior rizodeposição formas solúveis de Co e disponibilidade de nitrogênio (VONG et al., 2007), o que está de acordo com o observado nesse trabalho, pois, de maneira geral, os tratamentos com maiores níveis de nitrogênio disponível exsudaram mais desses compostos (Tabela 6).

Apesar das diferenças observadas entre os tratamentos, geralmente todos eles supriram satisfatoriamente os níveis de nitrogênio no solo (Tabela 6) e fotossintatos como fonte de C e elétrons (Tabela 13), indispensáveis à formação da biomassa microbiana (BMS). Dessa maneira, as diferenças na imobilização temporária do P na biomassa microbiana (Pm) foram devidas às diferenças no aporte de fosfato (com Pm maior nas maiores aplicações de SFT) e à maior habilidade da forma de adubação nitrogenada disponibilizar esse elemento para as plantas e a microbiota (com Pm maior nos tratamentos amônio e nitrato + amônio) (Tabela 14). A adição de fertilizantes fosfatados normalmente resulta em aumento nos teores de Pm (SAFFIGNA et al., 1989; CONTE et al., 2002), mesmo em solo altamente adsorventes, pois a microbiota é extremamente eficiente em competir com os colóides por fosfato nos solos-dreno (LUKITO et al., 1998).

O fósforo microbiano (Pm) é considerado uma forma de transferir fosfato para a biomassa temporariamente e, com isso, retardar a adsorção de P aos colóides e melhorar o sincronismo entre mineralização e absorção pelas plantas (RHEINHEIMER et al., 2001). Esse efeito é temporário e mais importante em condições de maior disponibilidade de P ou em sistema conservacionistas, pois em condições de baixa disponibilidade de P associadas com baixo suprimento de C,

elétrons e nitrogênio, a fração retém muito pouco P do solo, sendo facilmente mobilizada, com pouca influência sobre a disponibilidade de P às plantas e pode, em alguns casos, competir com as culturas pelo pouco P disponível (STEWART e TIESSEN, 1987). Essa é considerada a fração mais ativa do Po, pois é formada, principalmente por fosfatos diéster, o que facilita a ciclagem do elemento após a morte dos microrganismos (TIESSEN et al., 1984; STEWART e TIESSEN, 1987).

5.7. Arquitetura do sistema radicular

Diferentes formas de nitrogênio podem provocar modificações na arquitetura do sistema radicular de forma complementar, uma vez que NO_3^- estimula principalmente o alongamento das raízes laterais (RL) (ZHANG et al., 1999; REMANS et al., 2006), enquanto que NH_4^+ induz principalmente a iniciação dessas RL, maior ramificação e uma maior densidade dessas RL de primeira e de segunda ordem (LIMA et al., 2010), conforme observado para morfologia radicular da planta média e nos dados utilizados no software RootBox (Figura 25 e Tabelas 18 e 19). O efeito do NH_4^+ na ramificação das raízes não é necessariamente um efeito nutricional, mas sim um fenômeno associado a uma sinalização promovida pelo transportador AMT1; 3 (LIMA et al., 2010). O NO_3^- estimula principalmente o alongamento das raízes laterais (ZHANG et al., 1999, REMANS et al., 2006). Diversos sinais associados à forma nitrogenada predominante regulam o estabelecimento da raiz lateral em relação ao alongamento da raiz principal (GIFFORD et al., 2008). Essas duas formas de nitrogênio trabalham de maneira complementar, sendo necessária a aplicação conjunta e, ecologicamente falando, essas modificações morfológicas são uma adaptação às diferenças de mobilidade entre NH_4^+ e NO_3^- no solo, pois o primeiro é altamente adsorvido a resíduos carregados negativamente no solo e um sistema raiz ramificado é o mais eficiente para cortar as distâncias de difusão até a superfície da raiz, enquanto o segundo é altamente móvel e melhor explorado por raízes primárias de longo alcance (MILLER et al., 2007).

As diferentes fontes de nitrogênio não diferiram quanto ao desenvolvimento do sistema radicular considerado como um todo (Tabela 17), mas na quantidade, diâmetro e distribuição dos diferentes tipos de raízes ao longo da raiz principal (Figura 25). As respostas morfológicas mais pronunciadas das plantas à deficiência

de fosfato ocorrem no sistema radicular: produção de raízes mais superficiais, aumento do número e do comprimento dos pelos radiculares e das raízes laterais e aumento da relação raiz: parte aérea (NIU et al., 2012). A predominância de NH_4^+ no solo, por sua vez, é capaz de promover mudanças semelhantes na arquitetura do sistema radicular, independente do *status* de Pi, com efeito pronunciado especialmente sobre as raízes laterais mais superficiais, como forma de facilitar a absorção por difusão desse cátion, que tende a ser adsorvido nas superfícies coloidais (TINKER e NYE, 2000; GIEHL et al., 2012). Como resultado, a raiz apresenta um desenvolvimento que favorece a absorção de elementos limitantes e, conseqüentemente, produz mais matéria seca. Embora o amônio tenha resultado em menor relação raiz: parte aérea, comparativamente, o seu sistema radicular ocupa maior volume de solo e está mais bem distribuído, com maior área de contato.

As modificações na divisão celular são uma resposta de sinalização local, mediada por fitohormônios (especialmente auxina), açúcares e outros compostos, em resposta aos níveis de Pi do meio externo circundante ao meristema das raízes laterais ou primária e, também, aos teores de P nos tecidos (NIU et al., 2012). Portanto, como modificações semelhantes ocorreram nesse estudo, mesmo nos níveis mais altos de P associados com NH_4^+ , elas foram uma resposta à forma de nitrogênio aplicada e não à deficiência de P. Possivelmente, a presença de NH_4^+ aumentou o número de raízes laterais superficiais, o que aumentou significativamente o volume de solo explorado, pois estas competem menos entre si devido à maior distância entre as mesmas (DELATORRE et al., 2004). Jing et al. (2010) também encontraram um melhor desenvolvimento do milho nos estádios iniciais da cultura nos tratamentos que combinavam P e nitrogênio amoniacal em adubação localizada, com maior proliferação radicular. Em estudo conduzido por Wang e Shen (2011), a área, o volume, o comprimento e o número de raízes aumentaram significativamente na presença de nitrogênio amoniacal.

A absorção de P é afetada pela taxa de crescimento radicular, pela concentração desse elemento em solução e pelo raio médio das raízes (ROSOLEM et al., 1994). A maior disponibilidade de P devido ao NH_4^+ possibilitou maior desenvolvimento radicular, aumentando a capacidade exploratória das raízes. Além disso, elementos com baixa taxa de difusão são mais facilmente adquiridos por plantas com maior superfície radicular devido à proximidade entre a superfície absorviva da raiz e o nutriente (HARPER et al., 1991; ROSOLEM, 1995).

6. CONCLUSÕES

O nitrogênio amoniacal aumenta a eficiência de uso do P independentemente da disponibilidade de P no meio, pois promove mudanças químicas e biológicas na rizosfera e, também, mudanças morfológicas na raiz, que favorecem a solubilidade, a mineralização e a absorção desse elemento.

O nitrogênio amoniacal, aplicado isoladamente ou combinado com nitrato, promove maior mobilização de diferentes formas de P orgânico e inorgânico, inclusive das frações menos lábeis, reduz o pH e aumenta a permanência do nitrogênio nas camadas mais próximas à raiz. Consequentemente, aumenta a produção de matéria seca nos estádios iniciais da cultura do milho.

7. REFERÊNCIAS

- ADRIAANSE, F. G.; HUMAN, J.J. Effect of time of application and nitrate: ammonium ratio on aize grain yield, grain N concentration and soil mineral N concentration in a semi-arid region. **Field Crops Research**, v.34, p.57–70, 1993.
- ADU, M. O.; CHATOT, A.; WIESEL, L.; BENNETT, M. J.; BROADLEY, M. R.; WHITE, P. J.; DUPUY, L. X. (2014). A scanner system for high-resolution quantification of variation in root growth dynamics of *Brassica rapa* genotypes. **Journal of Experimental Botany**, v.65, p.2039-2048, 2014.
- ADU, M. O.; CHATOT, A.; WIESEL, L.; BENNETT, M. J.; BROADLEY, M. R.; WHITE, P. J.; DUPUY, L. X. Scanner-based time-lapse root phenotyping. **Bioprotocol**, v.5, n.6, p.1-14, 2015.
- AERTS, R. Interspecific competition in natural plant communities: mechanisms, trade-offs and plant–soil feedbacks. **Journal of Experimental Botany**, v.50, p.29-37, 1999.
- AI, P.; SUN, S.; ZHAO, J.; FAN, X.; XIN, W.; GUO, Q.; YU, L.; SHEN, Q.; WU, P.; MILLER, A. J. Two rice phosphate transporters, OsPht1;2 and OsPht1;6, have different functions and kinetic properties in uptake and translocation. **The Plant Journal**, v.57, p.798-809, 2009.
- ARAY, Y.; SPARKS, D. L. Phosphate reaction dynamics in soils and soil minerals: a multiscale approach. **Advances in Agronomy**, v.94, p.135-179, 2007.
- AKINNIFESI, F. K.; MAKUMBA, W.; SILESHI, G.; AJAYI, O. C.; MWETA, D. Synergistic effect of inorganic N and P fertilizers and organic inputs from *Gliricidia sepium* on productivity of intercropped maize in Southern Malawi. **Plant and Soil**, v.294, p.203-217, 2007.
- AN, L.; LIU, Y.; ZHANG, M.; CHEN, T.; WANG, X. Effects of nitric oxide on growth of maize seedling leaves in the presence or absence of ultraviolet-B radiation. **Journal of Plant physiology** v.162, p.317-326, 2005.
- AZIZ, T.; AHMED I; FAROOQ, M.; MAQSOOD, M. A.; SABIR, M. Variation in phosphorus efficiency among Brassica cultivars I: Internal utilization and phosphorus remobilization. **Journal of Plant Nutrition**, v.34, p.2006-2017, 2011.
- BADRI, D V.; VIVANCO, J. M. Regulation and function of root exudates. **Plant, Cell and Environment**, v.32, p.666-681, 2009.
- BALOTA, E. L.; MACHINESKI, O.; SCHERER, A. Mycorrhizal effectiveness on physic nut as influenced by phosphate fertilization levels. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.23-32, 2012.
- BARILLOT, C. D. C.; SARDE, C.; BERT, V.; TARNAUD, E.; COCHET, N. A standardized method for the sampling of rhizosphere and rhizoplan soil bacteria

associated to a herbaceous root system. **Annals of Microbiology**, v.63, p.471-476, 2013.

BARTLETT, R. J.; ROSS, S. D. Colorimetric determination of oxidizable carbon in acid soil solutions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, p.1191-1192, 1988.

BELOW, F. E.; GENTRY, L. E. Effect of mixed N nutrition on nutrient accumulation, partitioning, and productivity of corn. **Journal of Fertilizer Issues**, v. 4, p.79–85, 1987.

BLOOM, A. J.; SUKRAPANNA, S. S., WARNER, R. L. Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. **Plant Physiology**, v.99, p.1294-1301, 1992.

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

BURGER, M.; JACKSON, L.E. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems. **Soil Biology and Biochemistry**, v.35, p.29-36, 2003.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D.S. fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.925-930, 2002.

CHAIGNON, V.; HINSINGER, P. A biotest for evaluating copper availability to plants in a contaminated soil. **Journal of Environmental Quality**, v.32, p.824-833, 2003.

CHEN, C. R.; CONDRON, L. M.; DAVIS, M. R.; SHERLOCK, R. R. Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and radiata pine (*Pinus radiata* D. Don.). **Soil and Biochemistry**, v.34, p.487-499, 2002.

CHEN, X. P.; Cui, Z. L.; VITOUSEK, P. M.; Cassman, K. G.; MATSON, P. A.; BAI, J. S.; MENG, Q. F.; HOU, P.; YUE, S. C.; RÖMHELD, V.; ZHANG, F. S. Integrated soil–crop system management for food security. **PNAS**, v.108, p.6399-6404, 2011.

COLOMBO, G.A.; PELÚZIO, J.M.; PIRES, L.P.M.; DARONCH, D.G.; MACHADO FILHO, G.C. phosphorus use efficiency of soybean cultivars in cerrado conditions of Tocantins, Brazil. **J. Bioen. Food Sci.**, v.03, p.42-49, 2016.

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

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

COOKSON, R. W.; CORNFORTH, I. S. Dicyandiamide slows nitrification in dairy cattle urine patches: effects on soil solution composition, soil pH and pasture yield. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 34, p. 1461-1465, 2002.

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

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

CUETO, M.; HERNANDEZ-PERERA, O.; MART, N. R.; BENTURA, M. L.; RODRIGO, J.; LAMAS, S.; GOLVANO, M. P. Presence of nitric oxide synthase activity in roots and nodules of *Lupinus albus*. **FEBS letters**, v.398, p.159-164, 1996.

CUNHA, G. M.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; COSTA, G. S.; VELLOSO, A. C. X. Fósforo orgânico em solos sob florestas montanas, pastagens e eucalipto no norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.667-671, 2007.

CURTIN, D.; CAMPBELL, C. A.; JALIL, A. Effects of acidity on mineralization: pH-dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v.30, p.57-64, 1998.

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

DANJON, F.; REUBENS, B. Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. **Plant and Soil**, v.303, p.1-34, 2008.

DAWSON, L. A.; GRAYSTON, S. J.; MURRAY, P. J.; COOK, R.; GANGE, A. C.; ROSS, J. M.; PRATT, S. M.; DUFF, E. I.; TREONIS, A. Influence of pasture management (nitrogen and lime addition and insecticide treatment) on soil organisms and pasture root system dynamics in the field. **Plant and Soil**, v.255, p.121-130, 2003.

DECHERT, G.; VELDKAMP, E.; BRUMME, R. Are partial nutrient balances suitable to evaluate nutrient sustainability of land use systems? Results from a case study in Central Sulawesi, Indonesia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.72, p.201-212, 2005.

DELATORRE, C. A. Phosphate-deficiency response: understanding the signaling pathway. **Tese (Ph.D. in Plant Biology) – University of California, Davis, USA**, 158p., 2004.

DHILLON, J.; TORRES, G.; DRIVER, E.; FIGUEIREDO, B.; RAUN, W.R. World phosphorus use efficiency in cereal crops. **Agronomy Journal**, v.109, p.1-8, 2017.

DI, H. J.; CONDRON, L. M.; FROSSARD, E. Isotope techniques to study phosphorus cycling in agricultural and forest soils: a review. **Biology and Fertility of Soils**, v.24, p.1-12, 1997.

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

ENG J. Sample size estimation: how many individuals should be studied? **Radiology**, v.227, p. 309-313, 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

ERNANI, P. R.; STECKLING, C.; BAYER, C. Características químicas de solo e rendimento de massa seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.939-946, 2001.

FELIPE DE MENDIBURU. **Agricolae: statistical procedures for agricultural research**. R package version 1.2-4, 2016. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>.

FERREIRA, N. R. Eficiência agrônômica de fertilizantes organominerais sólidos e fluidos em relação à disponibilidade de fósforo. **Tese (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”**, Botucatu – 2014. 67p., 2014.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; TIECHER, T.; BARRÓN, V. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia**, v.40, n.4, p.369-379, 2016.

FRYE, W. W. Nitrification inhibition for nitrogen efficiency and environment protection. In: **International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers**, Frankfurt, 2005. Proceedings: Paris, International Fertilizer Industry Association, 2005. 8p. CR-ROM.

FOX, T. R.; COMERFORD, N. B. Low molecular weight organic acids in selected forest soil of the southwestern USA. **Soil Science Society of America Journal**., v.54, p.1139-1144, 1990.

GATIBONI, L. C. Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas. **Universidade Federal de Santa Maria, (tese de doutorado)**, Santa Maria, 2003. 231p.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: Usos e limitações. In: ARAÚJO, A. P.; ALVES, B. J. R. (Eds). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.8. p.141-187, 2013.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; FLORES, J. P. C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.691-669, 2007.

GARCÍA-MATA, C.; LAMATTINA, L. Nitric oxide induces stomatal closure and enhances the adaptive plant responses against drought stress. **Plant Physiology**, v.126, p.1196-1204, 2001.

GIEHL, R. F. H.; GRUBER, B. D.; VON WIRÉN, N. It's time to make changes: modulation of root system architecture by nutrient signals. **Journal of Experimental Botany**, v.65, n.3, p. 769-778, 2014.

GIFFORD, M. L.; DEAN, A.; GUTIERREZ, R. A.; CORUZZI, G. M.; BIRNBAUM, K. D. Cell-specific nitrogen responses mediate developmental plasticity. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA**105, p.803-808, 2008.

GONG, P.; ZHANG, L.; WU, Z.; SHANG, Z.; LI, D. Does the nitrification inhibitor dicyandiamide affect the abundance of ammonia-oxidizing bacteria and archaea in a Hap-Udic Luvisol? **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.1, p.35-42, 2013.

GUPPY, C. N.; MENZIES, N. W.; MOODY, P. W.; COMPTON, B. L.; BLAMEY, F. P. C. Analytical methods and quality assurance: a simplified, sequential, phosphorus fractionation method. **Horizons for Soil, Plant, and Water Analysis**, v.31, p.11-14, 2000.

HADLEY WICKHAM. The Split-Apply-Combine Strategy for Data Analysis. **Journal of Statistical Software**, v.40, n.1, p.1-29, 2011. URL <http://www.jstatsoft.org/v40/i01/>.

HAMMOND J. P.; WHITE P. J. (2008) Sucrose transport in the phloem: integrating root responses to phosphorus starvation. **Journal of Experimental Botany**, v.59, p.93-109, 2008.

HARPER, J. L.; JONES, M.; SACKVILLE-HAMILTON, N. R. The evolution of roots and the problems of analysing their behaviour. In: ATKINSON, D. (Ed.). **Plant root growth: an ecological perspective**. Oxford: Blackwell, 1991. p.3-22.

HEBERER, J. A.; BELOW, F. E. Mixed nitrogen nutrition and productivity of wheat grown in hydroponics. **Annals of Botany**, v.63, p.643-649, 1989.

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

HILTNER, L. Über neuere Erfahrungen und Probleme auf dem Gebiete der Bodenbakteriologie unter besonderer Berücksichtigung der Gründüngung und Brache. **Arb DLG**, v.98, p.59-78, 1904.

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

HINSINGER, P.; BETENCOURT, E.; BERNARD, L.; BRAUMAN, A.; PLASSARD, C.; SHEN, J.; TANG, X.; ZHANG, F. P for two, sharing a scarce resource: soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species. **Plant Physiology**, v.156, p.1078-1086, 2011.

HINSINGER, P.; GILKES, R. J. Mobilization of phosphate from phosphate rock and alumina-sorbed phosphate by the roots of ryegrass and clover as related to rhizosphere pH. **European Journal of Soil Science**, v.47, p.533-544, 1996.

HINSINGER P.; GOBRAN, G. R.; GREGORY, P. J.; WENZEL, W. W. Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes. **New Phytologist**, v.168, p.293-30, 2005.

HIREL, B.; TÉTU, T.; LEA, P. J.; DUBOIS, F. Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture. **Sustainability**, v.3, p. 1452-1485, 2011.

HOFFMANN, C.M.; LADEWIG, E.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus uptake of maize as affected by ammonium and nitrate nitrogen - measurements and model calculations. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.157, p.225-232, 1994.

JANEGITZ, M.C.; SOUZA, E.A.; ROSOLEM, C.A. Brachiaria as a cover crop to improve phosphorus use efficiency in a no-till Oxisol. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, v.40, p.1-9, 2016.

JING, J. Y.; RUI, Y.; ZHANG, F.; RENGEL, Z.; SHEN, J. Localized application of phosphorus and ammonium improves growth of maize seedling by stimulating root proliferation and rhizosphere acidification. **Field Crops Research**, v.119, p.355-364, 2010.

JING, J.Y.; ZHANG, F.; RENGEL, Z.; SHEN, J. Localized fertilization with P plus N elicits an ammonium-dependent enhancement of maize root growth and nutrient uptake. **Field Crops Research**, v.133, p.176-185, 2012.

KANT, S.; BI, Y.; ROTHSTEIN, S. J. Understanding plant response to nitrogen limitation for the improvement of crop nitrogen use efficiency. **Journal of Experimental Botany**, v.62, n.4, p. 1499-1509, 2011.

KEENEY, D. R.; NELSON, D. W. Nitrogen: inorganic forms. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. (Eds.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1982. Part 2, p. 625-642.

KING, J. S.; ALBAUGH, T. J.; ALLEN, H. L.; BUFORD, M.; STRAIN, B. R.; DOUGHERTY, P. Below-ground carbon input to soil is control led by nutrient availability and fine root dynamics in loblolly pine. **New Phytology**, v.154, p.389-398, 2002.

KLEINEIDMAN, K.; KOŠMRLJ, K.; KUBLIK S, PALMER, I.; PFAB, H.; RUSER, R.; FIEDLER, S; SCHLOTER, M. Influence of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyzazole phosphate (DDMP) on ammonia-oxidizing bacteria and archaea in rhizosphere and bulk soil. **Chemosphere**, v.84, p.182-186, 2011.

KUCEY, R. M. N. Phosphate solubilizing bacteria and fungi in various cultivated and virgin Alberta soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v.63 p.671–678, 1983.

KUCHENBUCH, R.; JUNGK, A. A method for determining concentration profiles at the soil-root interface by thin slicing rhizosphere soil. **Plant and Soil**, v.68, p.391-394, 1982.

LAMBERS, H.; BRUNDRETT, M. C.; RAVEN, J. A.; HOPPER, S. D. Plant mineral nutrition in ancient landscapes: high plant species diversity on infertile soils is linked to functional diversity for nutritional strategies. **Plant and Soil**, v.334, p.11–31, 2011.

LAMONT, B. B. Structure, ecology and physiology of root cluster S: a review. **Plant and Soil**, v.248, p.1-19, 2003.

LARSEN, J.; JARAMILLO-LÓPEZ, P.; NAJÉRA-RINCÓN, M.; GONZÁLEZ-ESQUIVEL, C. E. Biotic interactions in the rhizosphere in relation to plant and soil nutrient dynamics. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.15, n.2, p.449-463, 2015.

LEE, R. B.; PURVES, J. V.; RATCLIFFE, R. G.; SAKER, L. R. Nitrogen assimilation and the control of ammonium and nitrate absorption by maize roots. **Journal of Experimental Botany**, v.43, p.1385-1396, 1992.

LEITNER, D.; KLEPSCH, S.; BODNER, G.; SCHNEPF, A. A dynamic root system growth model based on L-Systems: tropisms and coupling to nutrient uptake from soil. **Plant and Soil**, v.332, p.177-192, 2010.

LIEFFERING, M.; ANDREWS, M.; MCKENZIE, B. A. Effects of nitrogen on leaf growth of temperate cereals: a review. **Proceedings Agronomy Society of N.Z.**, v.23, p.21-30, 1992.

LIMA, J. E.; KOJIMA, S.; TAKAHASHI, H.; VON WIRÉN, N. Ammonium triggers lateral root branching in Arabidopsis in an ammonium transporter1;3-dependent manner. **Plant Cell**, v.22, n.11, p.3621-3633, 2010.

LIMA, J. G. C.; SCHULZE, S. M. B. B.; RIBEIRO, M. R.; BARRETO, S. B. Mineralogia de um Argissolo vermelho-amarelo da zona úmida costeira do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.:881-892, 2008.

LIN, W. Y.; LIN, S. I.; CHIOU, T. J. Molecular regulators of phosphate homeostasis in plants. **Journal of Experimental Botany**, v.60, p.1427-1438, 2009.

LINDSAY, W. L; FRAZIER, A. W.; STEPHENSON, H. F. Identification of reaction products from phosphate fertilizer in soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 26, n.3, p.446-452, 1962.

Liu, H.; Tang, C.; Li, C. The effects of nitrogen form on root morphological and physiological adaptations of maize, white lupin and faba bean under phosphorus deficiency. **AoB Plants**, v.3, p.1-15, 2016.

LUKITO, H. P.; KUONO, K.; ANDO, T. Phosphorus requirements of microbial biomass in a regosol and an andosol. **Soil Biology and Biochemistry**, v.30, p.865-872, 1998.

LUSTER J.; GÖTTLEIN, A.; NOWACK, B.; SARRET, G. Sampling, defining, characterizing and modeling the rhizosphere – the soil Science tool box. **Plant and Soil**, v.321, p.457-482, 2009.

LYNCH, J. P.; BROWN, K.M. Top soil foraging: An architectural adaptation of plants to low phosphorus availability. **Plant and Soil**, v.237, p. 225–237, 2001.

MA, Q.; TANG, H.; RENGEL, Z.; SHEN, J. Banding phosphorus and ammonium enhances nutrient uptake by maize via modifying root spatial distribution. **Crop and Pasture Science**, v.64, p.965-975, 2013a.

MA Q, ZHANG F, RENGEL Z, SHEN J. Localized application of NH_4^+ -N plus P at the seedling and later growth stages enhances nutrient uptake and maize yield by inducing lateral root proliferation. **Plant and Soil**, v.372, p.65-80, 2013b.

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

MAKKONEN, K.; HELMISAARI, H. S. Assessing fine-root biomass and production in a Scots pine stand: comparison of soil core and ingrowth core methods. **Plant and Soil**, v.210, p.43-50, 1999.

MASON, M. G. Effects of dicyandiamide (a nitrification inhibitor) on leaching of nitrogen and growth of cereals. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 27, n. 1, 1987.

MCCARTY, G. W. Modes of action of nitrification inhibitors. **Biology and Fertility of Soils**, v.29, n.1, p. 1-9, 1999.

MCCARTY, G. W.; BREMNER, J. M. Laboratory evaluation of dicyandiamide as a soil nitrification inhibitor. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 20, n.19-20, p. 2049-2065, 1989.

McLAREN, T. I.; GUPPY, C. N.; TIGHE, M. K.; CHEFE, C. R.; FLAVEL, R. J.; COWIE, B. C. C. Validation of soil phosphate removal by alkaline and acidic reagents in a Vertosol soil using XANES spectroscopy. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.46, 2015.

MENG, Z.B.; CHEN, L.Q.; SUO, D.; LI, G. X.; TANG, C. X.; ZHENG, S. J. Nitric oxide is the shared signalling molecule in phosphorus-and iron-deficiency-induced

formation of cluster roots in white lupin (*Lupinus albus*). **Annals of Botany**, v.109, p.1055-1064, 2012.

MERLIN, A.; HE, Z.L.; ROSOLEM, C.A. Ruzigrass affecting soil-phosphorus availability. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.48, p.1583-1588, 2013.

MI, G.; CHEN, F.; ZHANG, F. Physiological and genetic mechanisms for nitrogen-use efficiency in maize. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, v.10, n.2, p. 57-63, 2007.

MI, G.; CHEN, F.; ZHANG, F. Physiological and genetic mechanisms for nitrogen-use efficiency in maize. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, v.10, n.2, p. 57-63, 2007.

MILLER, A. J.; FAN, X.; ORSEL, M.; SMITH S. J.; WELLS D. M. Nitrate transport and signalling. **Journal of Experimental Botany**, v.58, p.2297-2306, 2007.

MOURA, E. G.; SERPA, S. S.; SANTOS, J. G. D.; COSTA SOBRINHO, J. R. S.; AGUIAR, A. C. F. Nutrient use efficiency in alley cropping systems in the Amazonian periphery. **Plant and Soil**, v.35, p.363–371, 2010.

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

NEGASSA, W.; DULTZ, S.; SCHLICHTING, A.; LEINWEBER, P. Influence of specific organic compounds on phosphorus sorption and distribution in a tropical soil. **Soil Science**, v. 173, n. 9, p. 587-601, 2008.

NEUMANN, G. Construction and setup of rhizoboxes. In: LUSTER, J.; FINLAY, R. (Eds) **Handbook of methods used in rhizosphere research**. Swiss Federal Research Institute WSL: Birmensdorf, p.143-144, 2006.

NEUMANN, G.; GEORGE, T. S.; PLASSARD, C. Strategies and methods for studying the rhizosphere - the plant science toolbox. **Plant and Soil**, v.321, p.431-456, 2009.

NGUYEN, C. Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and controls. **Agronomie**, v.23, p.375-396, 2003.

NIU, Y. F.; CHAI, R. S.; DONG, H. F.; WANG, H.; TANG, C. X.; ZHANG, Y. S. Effect of elevated CO₂ on phosphorus nutrition of phosphate-deficient *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh under different nitrogen forms. **Journal of Experimental Botany**, v.26, p.1-13, 2012.

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

OBURGER, E.; SCHMIDT, H. New methods to unravel rhizosphere processes. **Trends in Plant Science**, v.21, n.3, p.243-255, 2016.

OELKERS, E. H.; VALSAMI-JONES, E. Phosphates mineral reactivity and global sustainability. **Elements**, v.4, p.83-87, 2008.

OLILA, O. G. REDDY, K. R.; HARRIS, W. G. Forms and distribution of inorganic phosphorus in sediments of two shallow eutrophic lakes in Florida. **Hydrobiologia**, p.302:147, 1995.

OLIVEIRA, E. M. M.; RUIZ, H. ALVAREZ, V. H.; FERREIRA, P. A.; COSTA, P. O.; ALMEIDA, I.C. C. . Nutrient supply by mass flow and diffusion to maize plants in response to soil aggregate size and water potential. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.317-328, 2010.

OLIVEIRA, F. A.; CAVALCANTE, L. F.; SILVA, I. F.; PEREIRA, W. E.; OLIVEIRA, J. C.; COSTA FILHO, J. F. Crescimento do milho adubado com nitrogênio e fósforo em um Latossolo Amarelo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.4, p.238-244, 2009.

PAGNUSSAT, G. C.; SIMONTACCHI, M.; PUNTARULO, S.; LAMATTINA, L. Nitric oxide is required for root organogenesis. **Plant Physiology**, v.129, p.954-956, 2002.

PARFITT, R. L. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. **Journal of Soil Science**, v.40, p.359-369, 1989.

PARFITT, R. L.; ATKINSON, R. J. Phosphate adsorption on goethite (α -FeOOH). **Nature**, v.264, p.740-742, 1976.

PÉRET, B.; DESNOS, T.; JOST, R.; KANNO, S.; BERKOWITZ, O.; NUSSAUME, L. Update on root architecture responses root architecture responses: in search of phosphate. **Plant Physiology**, v.166, p.1713-1723, 2014.

POLOMSKI, J.; KUHN, N. Root research methods. In: WASEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Eds) **Plant roots the hidden half**, 3rd edn. Marcel Dekker, New York, USA, pp 295–321, 2002.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing: Vienna, 2016. URL <https://www.R-project.org/>.

REMANS, T.; NACRY, P.; PERVENT, M.; FILLEUR, S.; DIATLOFF, E.; MOUNIER, E.; TILLARD, P.; FORDE, B. G. GOJON, A. The *Arabidopsis* NRT1.1 transporter participates in the signaling pathway triggering root colonization of nitrate-rich patches. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA** **103**, p.19206-19211, 2006.

RHEINHEIMER, D.S. Fósforo orgânico do solo. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Eds). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.139-157.

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

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

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.34, n.15/16, p.2339-2354, 2002.

RICHARDSON, A. E.; PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V.; GRACE, P. R. Soil microorganisms and phosphorus availability. **The Soil Biota**, p.50-62, 1994.

RICHARDSON, A. E.; SIMPSON, R. J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability. **Plant Physiology**, v.156, p.989-996, 2011.

RILEY, O.; BARBER, S. A. Effect of ammonium and nitrate fertilization on phosphorus uptake as related to root induced pH changes at the root-soil interface. **Soil Science Society of America Journal**, v.35, p.301-306, 1971.

ROBERTS, T. L. Improving nutrient use efficiency. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v.32, p. 177-182, 2008.

ROSOLEM, C. A.; ASSIS, J. S.; SANTIAGO, A. D. Root growth and mineral nutrition of corn hybrids as affected by phosphorus and lime. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.25 p. 2491-2499, 1994.

ROSOLEM, C. A. Relações solo-planta na cultura do milho. Jaboticabal: **Funep**, 1995, 53p.

ROUSK, J.; BROOKES, P. C.; BÅÅTH, E. contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization. **Applied and Environmental Microbiology**, v.75, n.6, p.1589-1596, 2009.

RUAN, J.; ZHANG, F.; WONG, M. H. Effect of nitrogen form and phosphorus source on the growth, nutrient uptake and rhizosphere soil property of *Camellia sinensis* L. **Plant and Soil**, v.223, p.65-73, 2000.

RUFTY, T. W. JR.; MACKOWN, C. T.; ISRAEL, D. W. Phosphorus stress effects on assimilation of nitrate. **Plant Physiology**. V.94, p.328-333, 1990.

RUFTY, T. W. JR.; ISRAEL, D. W.; VOLK, R. J.; QIU, J.; AS, T. Phosphate regulation of nitrate assimilation in soybean. **Journal of Experimental Botany**, V.44, p.879-891, 1993.

SAFFIGNA, P. G.; POWLSON, D. S.; BROOKES, P. C.; TOMAS, G. A. Influence of sorghum residues and tillage on soil organic matter and soil microbial biomass in an Australian vertisol. **Soil Biology and Biochemistry**, v.21, p.759-765, 1989.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKII, J. Factors affecting the phosphorus availability and the fertilization management in no-tillage system. **Ciência Rural**, v.38, n.2, p.576-586, 2008.

SARKAR, D. **Lattice: Multivariate Data Visualization with R**. Springer: New York. ISBN 978-0-387-75968-5

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

SCHIMEL, J. P.; BENNETT, J. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm. **Ecology**, v.85, p.591-602, 2004.

SCHMITTI, D. E.; GATIBONI, L. C.; GIROTTO, E.; LORENSINI, F.; MELO, J. W. B.; BRUNETTO, G. Phosphorus fractions in the vineyard soil of the Serra Gaúcha of Rio Grande do Sul, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.2, p.134-140, 2014.

SCHMIDT, E. L. Nitrification in soil. In: STEVENSON, F.J. **Nitrogen in agricultural soils**. Madison, American Society of Agronomy, p. 253-288, 1982.

SCHORTEMAYER, M.; FEIL, B.; STAMP, P. Root morphology and nitrogen uptake of maize simultaneously supplied with ammonium and nitrate in a split-root system. **Annals of Botany**, v.72, p.107-115, 1993.

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

SHARMA, S. B.; SAYYED, R. Z.; TRIVEDI, M. H.; GOBI, A. T. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **SpringerPlus**, v.2, p.1-14, 2013.

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

SIGMAPLOT. 2011. For windows, version 11.0. Systat Software, 2011.

SILVA, R. C. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados com solubilidade variada. **Tese (doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba – 2013**. 166p. 2013.

SILVERSTEIN, R. M.; BASSLER, G. C.; MORRILL, T. C. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. LTC: Rio de Janeiro, 1994. 387p.

SINCLAIR, A.G.; JOHNSTONE, P.D.; SMITH, L.C.; RISK, W.H. Effect of reactive phosphate rock on the pH of soil under pasture. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v.36, p.381-384, 1993.

SIX, J.; FELLER, C.; DENNEF, K.; GOLE, S. M.; MORAES, J. C.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effects of no-tillage. **Agronomie**, v.22, n.755-775, 2002.

SMILEY, R. W. Rhizosphere pH as influenced by plants, soils and nitrogen fertilizers. **Soil Science Society of America**, v.38, p.795-799, 1974.

SOUZA, R. F.; FAQUIN, V.; ANDRADE, A. T.; TORRES, P. R. F. Formas de fósforo em solos sobre influência da calagem e adubação orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1535-1544, 2007.

STEWART, J. W. B.; TIESSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. **Biogeochemistry**, v.4, p.41-60, 1987.

STARKEY, R. L. Some influences of the development of higher plants upon the microorganisms in the soil: IV. Influences of proximity to roots on abundance and activity of micro-organisms. **Soil Science**, v.32, p.367-393, 1931.

STÖHR, C.; STREMLAU, S. Formation and possible roles of nitric oxide in plant roots. **Journal of Experimental Botany**, v.57, p.463-470, 2006.

SYERS, J.K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. **FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18**, 2008.

TABUCHI, M.; ABIKO, T.; YAMAYA, T. Assimilation of ammonium ions and reutilization of nitrogen in rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of Experimental Botany**, v.58, p.2319-2327, 2007.

TEDLA, T.; STANGHELLINI, M. E. Bacterial population dynamics and interactions with *Pythium aphanidermatum* in intact rhizosphere soil. **Phytopathology**, v.82, p.652-656, 1992.

TENNAT, D.A. Test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v.63, n.3, p.995-1001, 1975.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J.; CALEGARI, A. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Rev Bras Cienc Solo**, v.36, p.271-81, 2012.

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

TINKER, P. B.; NYE, P. H. **Solute movement in the rhizosphere**: Oxford: Blackwell Scientific, 2000.

TURPAULT, M. P. Sampling of rhizosphere soil for physicochemical and mineralogical analyses by physical separation based on drying and shaking. In: LUSTER, J.; FINLAY, R. (Eds) **Handbook of methods used in rhizosphere research**. Swiss Federal Research Institute WSL, Birmensdorf, p.196–197, 2006.

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

VAN VELDHoven, P. P.; MANNAERTS, G. P. Inorganic and organic phosphate measurements in the nanomolar range. **Analytical Biochemistry**, v.161, n.1, p.45-48, 1987.

VAN DE WIEL, C.C.M.; VAN DER LINDEN, C.G.; SCHOLTEN, O.E. Improving phosphorus use efficiency in agriculture: opportunities for breeding. **Euphytica**, v.207, p.1-22, 2016.

VERHEIJEN, F. G. A.; JONES, R. J. A.; RICKSON, R. J.; SMITH, C. J. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. **Earth Science**, v.94, p.23-38, 2009.

VONG, P. C.; PIUTTI, S.; BENIZRI, E.; SLEZACK-DESCHAUMES, S.; ROBIN, C.; GUCKERT, A. Water-soluble carbon in roots of rape and barley: impacts on labile soil organic carbon, arylsulphatase activity and sulphur mineralization. **Plant and Soil**, v.294, p.19-29, 2007.

WALKER, T.; SYERS, J. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, v.15, p.1-19, 1976.

WANG, B.; SHEN, Q. Effects of ammonium on the root architecture and nitrate uptake kinetics of two typical lettuce genotypes grown in hydroponic systems. **Journal of Plant Nutrition**, v.35, n.10, p.1497-1508, 2011.

WARNCKE, D. D.; BARBER, S. A. Ammonium and nitrate uptake by corn (*Zea mays* L.) as influenced by nitrogen concentration and $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^-$ ratio. **Agronomy Journal**, v.65, p.950-953, 1973.

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.

YAN, F.; ZHU, Y.; MULLER, C.; ZORB, S. S. Adaptation of H^+ -pumping and plasma membrane H^+ ATPase activity in proteoid roots of white upin under phosphate deficiency. **Plant Physiology**, v.129, n.1, p.50–63, 2002.

YANG, X.; POST, W. M.; THORNTON, P. R.; JAIN, A. The distribution of soil phosphorus for global biogeochemical modeling. **Biogeosciences**, v.10, p.2525-2537, 2013.

YANG, M.; FANG, Y.; SUN, D.; SHI, Y. Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: a meta-analysis. *Science Reports*, v.6, p.1-9, 2013.

ZAIDI, A.; KHAN, M. S.; AHMED, M.; OVES, M.; WANI, P. A. Recent Advances in Plant Growth Promotion by Phosphate-Solubilizing Microbes. In: KHAN, M. S.; ZAIDI, A.; MUSSARAT, J. (Eds). **Microbial Strategies for Crop Improvement**. Berlin: Heidelberg-Springer-Verlag, 2009. p. 23-50.

ZENG, H.; JUAN, L.; HOU-KING, Z.; GAN, L.; TING-JUN, D.; QI-RONS, S.; GUO-HUA, X. Stimulation of phosphorus uptake by ammonium nutrition involves plasma membrane H⁺ ATPase in rice roots. **Plant and Soil**, v.357, p.205-214. 2012.

ZHANG, H.; JENNINGS, A.; BARLOW, P. W.; FORDE, B. G. Dual pathways for regulation of root branching by nitrate. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA** **96**, p.6529-6534, 1999.

ZHANG, F.; SHEN, J.; ZHANG, J.; LI, L.; CHEN, X. Rhizosphere processes and management for improving nutrient use efficiency and crop productivity: implications for China. **Advances in Agronomy**, v.107, p.1-32, 2010.

ZHAO, F. J.; WU, J.; MCGRATH, S. P. Soil organic sulphur and its turnover. In: PICCOLO, A. (Ed.) **Humic substances in terrestrial ecosystems**. Elsevier, p.467-506, 1996.

ZHOU, Y.; XU, X. Y.; CHEN, L. Q.; YANG, J. L.; ZHENG, S. J. Nitric oxide exacerbates Al-induced inhibition of root elongation in rice bean by affecting cell wall and plasma membrane properties. **Phytochemistry**, v.76, p.46-51, 2012.

ZHU, Y. G.; SMITH, S. E. (2001). Seed phosphorus (P) content affects growth, and P uptake of wheat plants and their association with arbuscular mycorrhizal (AM) fungi. **Plant and Soil**, v.231, p.105-112, 2001.

ANEXO I – Equações ajustadas para os diferentes parâmetros apresentados em tabelas no experimento II.

Equações ajustadas para matéria seca.

Matéria seca total		
Nitrogênio aplicado	R²	Equação
N	0,67	$1,24 + 7.10^{-3}X$
A	0,86	$1,68 + 2.10^{-3}X$
NA	0,28	$1,51 + 2.10^{-3}X$
Matéria seca da raiz		
Nitrogênio aplicado	R²	Equação
N	0,21	$0,40 + 1.10^{-5}X$
A	0,65	$0,45 - 2.10^{-5}X$
NA	0,50	$0,64 + 8.10^{-6}X$
Matéria seca da parte aérea		
Nitrogênio aplicado	R²	Equação
N	0,85	$0,81 + 4.10^{-3}X$
A	0,91	$1,15 + 3.10^{-3}X$
NA	0,81	$0,86 + 5.10^{-3}X - 8.10^{-6}X^2$
Relação raiz: parte aérea		
Nitrogênio aplicado	R²	Equação
N	0,49	$0,49 - 2.10^{-3}X$
A	0,34	$0,47 + 1.10^{-3}X$
NA	0,87	$0,69 - 3.10^{-3}X$

Equações ajustadas para os dados de raiz.

Comprimento		
Nitrogênio aplicado	R²	Equação
N	0,21	$1168,20 - 7,34X + 0,05X^2$
A	0,65	$2790,13 + 52,40X - 0,29X^2$
NA	0,50	$2123,94 - 2,88X - 2.10^{-2}X^2$
Area		
Nitrogênio aplicado	R²	Equação
N	0,90	$248,00 - 1,92X + 0,01X^2$
A	93	$388,80 + 5,62X - 3.10^{-2}X^2$
NA	0,04	$392,67 - 0,49X + 3.10^{-3}X^2$
Volume		
Nitrogênio aplicado	R²	Equação
N	0,21	$4,21 - 3.10^{-2}X + 2.10^{-4}X^2$
A	0,96	$4,79 - 3.10^{-3}X$
NA	0,05	$6,00 - 5.10^{-3}X + 4.10^{-5}X^2$
Densidade		
Nitrogênio aplicado	R²	Equação
N	0,93	$9,91 - 8.10^{-3}X + 5.10^{-5}X^2$
A	0,21	$0,50 + 2.10^{-3}X - 7.10^{-6}X^2$
NA	0,24	$0,60 + 2.10^{-4}X - 2.10^{-6}X^2$

Equações ajustadas para pH.

Distância rizosférica: 0,0-0,5 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,96	$5,59 + 7.10^{-3}X - 7.10^{-5}X^2$
A	0,95	$4,86 - 5.10^{-3}X$
NA	0,94	$5,33 - 4.10^{-3}X$
Distância rizosférica: 0,5-1,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,94	$5,92 - 5.10^{-3}X$
A	0,97	$5,07 - 5.10^{-3}X$
NA	0,98	$5,45 - 5.10^{-3}X$
Distância rizosférica: 1,0-2,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,99	$6,46 - 2.10^{-2}X + 6.10^{-5}X^2$
A	0,99	$5,05 - 5.10^{-3}X$
NA	0,97	$5,66 - 8.10^{-3}X$
Distância rizosférica: 2,0-3,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,98	$5,67 - 7.10^{-3}X$
A	0,98	$4,98 - 4.10^{-3}X$
NA	0,98	$5,33 - 6.10^{-3}X$
Distância rizosférica: 3,0-4,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,94	$5,75 - 5.10^{-3}X$
A	0,98	$5,05 - 4.10^{-3}X$
NA	0,97	$5,40 - 5.10^{-3}X$
Distância rizosférica: 4,0-5,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,78	$5,26 - 1.10^{-3}X$
A	0,97	$4,95 - 3.10^{-3}X$
NA	0,99	$5,00 - 2.10^{-3}X$
Distância rizosférica: 5,0-10,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,93	$5,47 - 3.10^{-3}X$
A	0,93	$5,04 - 3.10^{-3}X$
NA	0,99	$5,26 - 3.10^{-3}X$

Equações ajustadas para amônio no solo.

Distância rizosférica: 0,0-0,5 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,92	$70,05 - 0,33X$
A	0,99	$479,79 - 0,04X + 9.10^{-3}X^2$
NA	0,96	$56,43 + 3,72X - 1.10^{-2}X^2$
Distância rizosférica: 0,5-1,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,45	$112,00 - 140X + 9.10^{-3}X^2$
A	0,98	$262,45 + 2,74X$
NA	0,95	$38,28 + 2,67X - 9.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 1,0-2,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,82	$107,37 - 0,82X + 3.10^{-3}X^2$
A	0,99	$288,28 - 0,43X + 2.10^{-3}X^2$
NA	0,88	$57,96 + 5,54 - 2.10^{-2}X^2$
Distância rizosférica: 2,0-3,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,95	$71,99 - 7.10^{-2}X + 5.10^{-5}X^2$
A	0,98	$358,40 - 0,99X + 7.10^{-7}X^2$
NA	0,77	$5,07 + 12,30X + 5.10^{-4}X^2$
Distância rizosférica: 3,0-4,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,95	$98,50 - 0,49X$
A	0,92	$270,65 + 1,89X$
NA	0,77	$5,07 + 12,30X + 3.10^{-4}X^2$
Distância rizosférica: 4,0-5,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,87	$85,57 - 0,82X + 4.10^{-3}X^2$
A	0,99	$265,15 + 1,49X$
NA	0,71	$29,20 + 4,19X - 2.10^{-2}X^2$
Distância rizosférica: 5,0-10,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,61	$79,25 - 0,27X$
A	0,99	$207,55 + 1,82X$
NA	0,92	$79,55 + 1,49X$

Equações ajustadas para nitrato no solo.

Distância rizosférica: 0,0-0,5 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,64	$422,60 - 3.10^{-2}X + 4.10^{-5}X^2$
A	0,92	$33,25 + 1,64X + 1.10^{-2}X^2$
NA	0,99	$316,30 - 1,14X$
Distância rizosférica: 0,5-1,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,65	$267,80 - 0,42X$
A	0,92	$51,78 + 0,91X - 6.10^{-3}X^2$
NA	0,99	$198,85 - 0,33X$
Distância rizosférica: 1,0-2,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,64	$138,05 + 0,41X$
A	0,91	$21,92 + 0,46X - 3.10^{-3}X^2$
NA	0,99	$187,95 - 0,21X$
Distância rizosférica: 2,0-3,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,57	$182,10 - 0,23X$
A	0,92	$21,48 + 7,67X - 5.10^{-3}X^2$
NA	0,99	$172,20 - 0,60X$
Distância rizosférica: 3,0-4,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,55	$83,35 + 6.10^{-3}X$
A	0,89	$36,05 + 0,67X - 5.10^{-3}X^2$
NA	0,99	$170,20 - 0,60X$
Distância rizosférica: 4,0-5,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,45	$74,61 - 1.10^{-2}X - 7.10^{-4}X^2$
A	0,92	$32,02 - 2,14X - 1.10^{-2}X^2$
NA	0,45	$189,70 - 0,70X$
Distância rizosférica: 5,0-10,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,64	$86,55 + 0,25X$
A	0,93	$55,60 + 1,07X - 8.10^{-3}X^2$
NA	0,99	$165,95 - 0,17X$

Equações ajustadas para N-mineral no solo.

Distância rizosférica: 0,0-0,5 cm		
Nitrogênio aplicado	R²	Equação
N	0,90	$492,74 - 0,31X$
A	0,99	$517,55 + 1,36X$
NA	0,81	$372,43 + 2,57X - 2.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 0,5-1,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R²	Equação
N	0,91	$379,65 - 1,82X + 9.10^{-3}X^2$
A	0,94	$289,03 + 4,90X - 1.10^{-2}X^2$
NA	0,92	$372,24 + 2,33X - 9.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 1,0-2,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R²	Equação
N	0,06	$245,34 - 0,41X + 3.10^{-3}X^2$
A	0,99	$309,94 + 3.10^{-2}X + 1.10^{-2}X^2$
NA	0,86	$246,00 + 5,32X - 2.10^{-2}X^2$
Distância rizosférica: 2,0-3,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R²	Equação
N	0,82	$245,05 - 0,62X$
A	0,89	$345,50 + 1,50X$
NA	0,72	$212,80 + 5,35X - 3.10^{-2}X^2$
Distância rizosférica: 3,0-4,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R²	Equação
N	0,94	$181,70 - 0,49X$
A	0,95	$322,40 + 1,77X$
NA	0,72	$212,81 + 5,35X - 3.10^{-2}X^2$
Distância rizosférica: 4,0-5,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R²	Equação
N	0,98	$160,09 - 0,84X + 3.10^{-3}X^2$
A	0,99	$304,87 + 3,24X - 1.10^{-2}X^2$
NA	0,77	$219,14 + 3,52X - 2.10^{-2}X^2$
Distância rizosférica: 5,0-10,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R²	Equação
N	0,29	$178,36 - 0,65X + 4.10^{-3}X^2$
A	0,99	$259,46 + 3,08X - 9.10^{-3}X^2$
NA	0,97	$220,96 + 2,55X - 8.10^{-3}X^2$

Equações ajustadas para relação amônio: nitrato no solo.

Distância rizosférica: 0,0-0,5 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,99	$0,18 - 2.10^{-3}X + 5.10^{-6}X^2$
A	0,96	$16,57 - 0,42X + 3.10^{-3}X^2$
NA	0,98	$0,21 + 1.10^{-2}X - 2.10^{-5}X^2$
Distância rizosférica: 0,5-1,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,38	$0,43 - 5.10^{-3}X + 3.10^{-5}X^2$
A	0,98	$5,00 - 5.10^{-2}X + 7.10^{-4}X^2$
NA	0,97	$0,19 + 1.10^{-2}X - 4.10^{-5}X^2$
Distância rizosférica: 1,0-2,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,98	$0,75 - 6.10^{-3}X + 2.10^{-5}X^2$
A	0,97	$14,39 - 0,31X + 3.10^{-2}X^2$
NA	0,91	$0,31 + 3.10^{-2}X - 1.10^{-4}X^2$
Distância rizosférica: 2,0-3,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,99	$0,43 - 3.10^{-3}X + 7.10^{-6}X^2$
A	0,97	$17,52 - 0,43X + 4.10^{-3}X^2$
NA	0,89	$0,25 + 4.10^{-2}X - 2.10^{-4}X^2$
Distância rizosférica: 3,0-4,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,98	$1,26 - 9.10^{-3}X + 2.10^{-5}X^2$
A	0,89	$10,48 - 0,33X + 3.10^{-3}X^2$
NA	0,89	$0,25 + 4.10^{-2}X - 2.10^{-4}X^2$
Distância rizosférica: 4,0-5,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,41	$1,21 - 1.10^{-2}X + 6.10^{-5}X^2$
A	0,94	$9,98 - 0,32X + 3.10^{-3}X^2$
NA	0,98	$0,13 + 2.10^{-2}X - 2.10^{-5}X^2$
Distância rizosférica: 5,0-10,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,99	$1,04 - 1.10^{-2}X + 4.10^{-5}X^2$
A	0,97	$4,27 - 7.10^{-2}X + 8.10^{-4}X^2$
NA	0,97	$0,44 + 1.10^{-2}X$

Equações ajustadas para P lábil no solo.

Distância rizosférica: 0,0-0,5 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,94	$29,34 - 0,15X + 2.10^{-3}X^2$
A	0,95	$66,46 - 0,10X + 6.10^{-4}X^2$
NA	0,96	$4,07 + 1.10^{-1}X - 6.10^{-4}X^2$
Distância rizosférica: 0,5-1,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,27	$29,86 + 0,23X - 2.10^{-3}X^2$
A	0,86	$-2,24 + 2,05X - 1.10^{-2}X^2$
NA	0,94	$5,09 + 0,42X - 2.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 1,0-2,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,22	$54,13 + 0,36X - 2.10^{-3}X^2$
A	0,91	$47,59 + 0,60X - 4.10^{-2}X^2$
NA	0,94	$4,52 + 0,65X - 3.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 2,0-3,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,22	$126,80 - 1,31X + 7.10^{-3}X^2$
A	0,91	$46,96 + 0,61X - 4.10^{-3}X^2$
NA	0,94	$3,90 + 0,46X - 2.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 3,0-4,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,22	$75,74 - 0,50X + 2.10^{-3}X^2$
A	0,21	$60,95 + 0,25X - 2.10^{-3}X^2$
NA	0,94	$1,80 + 0,50X - 2.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 4,0-5,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,93	$302,12 - 1,35X + 7.10^{-3}X^2$
A	0,92	$154,94 + 2,32X - 1.10^{-2}X^2$
NA	0,68	$-1,44 + 0,95X - 4.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 5,0-10,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,96	$264,81 - 0,93 + 5.10^{-3}X^2$
A	0,92	$197,92 + 2,21X - 1.10^{-2}X^2$
NA	0,98	$6,04 + 0,36X$

Equações ajustadas para P moderadamente lábil no solo.

Distância rizosférica: 0,0-0,5 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,95	$241,02 + 1,82X - 6.10^{-3}X^2$
A	0,97	$365,34 - 1,78X + 1.10^{-2}X^2$
NA	0,94	$238,21 - 1,02 + 5.10^{-4}X^2$
Distância rizosférica: 0,5-1,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,97	$236,77 + 1,43X - 5.10^{-3}X^2$
A	0,94	$320,91 - 2,84X + 2.10^{-2}X^2$
NA	0,93	$207,03 - 0,98 + 5.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 1,0-2,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,87	$226,86 + 0,58X$
A	0,98	$345,09 - 0,90X + 2.10^{-2}X^2$
NA	0,95	$250,52 - 1,84 + 9.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 2,0-3,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,75	$233,86 + 0,69X$
A	0,98	$381,45 - 1,90X + 2.10^{-2}X^2$
NA	0,95	$212,84 - 0,94 + 5.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 3,0-4,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,97	$236,23 + 0,08X - 5.10^{-3}X^2$
A	0,98	$343,64 - 0,64X + 1.10^{-2}X^2$
NA	0,95	$211,76 - 0,67 + 4.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 4,0-5,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,88	$222,08 + 0,69X$
A	0,98	$314,20 - 0,90X - 9.10^{-5}X^2$
NA	0,94	$225,00 - 1,13 + 3.10^{-9}X^2$
Distância rizosférica: 5,0-10,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,88	$268,46 - 0,50X + 7.10^{-3}X^2$
A	0,98	$290,60 - 0,59X + 2.10^{-2}X^2$
NA	0,94	$214,85 - 1,02 + 6.10^{-3}X^2$

Equações ajustadas para P menos lábil no solo.

Distância rizosférica: 0,0-0,5 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,95	$675,37 - 0,97X + 9.10^{-3}X^2$
A	0,97	$575,68 - 1,46X + 0,012X^2$
NA	0,94	$529,62 - 0,39 + 2.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 0,5-1,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,86	$688,70 - 1,06X + 0,01X^2$
A	0,95	$567,23 - 1,01X + 8.10^{-3}X^2$
NA	0,95	$493,06 - 0,29 + 3.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 1,0-2,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,87	$22,69 + 0,06X$
A	0,98	$34,51 - 0,09X + 2.10^{-3}X^2$
NA	0,95	$25,05 - 0,18 + 9.10^{-4}X^2$
Distância rizosférica: 2,0-3,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,98	$689,99 + 2,99X - 0,01X^2$
A	0,98	$594,20 - 5,14X - 0,02X^2$
NA	0,77	$536,61 - 1,72 + 0,01X^2$
Distância rizosférica: 3,0-4,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,99	$579,12 + 1,70X$
A	0,99	$438,81 + 2,74X$
NA	0,19	$467,22 - 0,02X$
Distância rizosférica: 4,0-5,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,98	$687,58 + 2,80X - 9.10^{-3}X^2$
A	0,92	$548,22 + 7,10X - 0,05X^2$
NA	0,93	$464,38 + 0,92X - 6.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 5,0-10,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,92	$692,69 + 1,47X$
A	0,93	$536,93 + 6,74X - 0,05X^2$
NA	0,30	NA: $470,55 + 0,27X - 1.10^{-3}X^2$

Equações ajustadas para P geoquímico no solo.

Distância rizosférica: 0,0-0,5 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,97	$694,15 - 0,86X + 8.10^{-3}X^2$
A	0,95	$588,57 - 1,37X + 0,01X^2$
NA	0,86	$536,88 - 0,36X + 2.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 0,5-1,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,85	$693,26 + 0,48X - 5.10^{-3}X^2$
A	0,96	$581,81 - 1,02X + 9.10^{-3}X^2$
NA	0,98	$500,53 - 0,25X + 3.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 1,0-2,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,95	$722,27 + 0,10X$
A	0,95	$581,98 + 1,24 X$
NA	0,19	$490,68 + 6.10^{-3}X$
Distância rizosférica: 2,0-3,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,82	$743,65 + 1,17X$
A	0,97	$614,05 + 5,08X - 0,02X^2$
NA	0,80	$540,84 - 1,64X + 0,01X^2$
Distância rizosférica: 3,0-4,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,93	$596,37 + 1,75X$
A	0,99	$455,95 + 2,75X$
NA	0,15	$472,94 - 0,04X$
Distância rizosférica: 4,0-5,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,89	$735,06 + 1,35X$
A	0,93	$565,45 + 7,14X - 0,05X^2$
NA	0,92	$471,33 + 1,02X - 7.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 5,0-10,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,93	$713,04 + 1,49X$
A	0,93	$553,65 + 6,68X - 0,05X^2$
NA	0,61	$478,13 + 0,36X - 1.10^{-3}X^2$

Equações ajustadas para P biológico no solo.

Distância rizosférica: 0,0-0,5 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,96	$61,67 + 0,94X$
A	0,80	$229,52 - 2,08X + 0,13X^2$
NA	0,98	$160,41 - 0,51X$
Distância rizosférica: 0,5-1,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,97	$63,49 + 0,81X$
A	0,89	$174,70 + 1,73X - 3.10^{-4}X^2$
NA	0,98	$127,01 - 0,50X$
Distância rizosférica: 1,0-2,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,90	$65,03 + 0,72X$
A	0,95	$193,75 - 0,19X + 1.10^{-2}X^2$
NA	0,98	$203,36 - 2,11X + 9.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 2,0-3,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,82	$69,82 + 0,93X$
A	0,96	$182,87 - 0,29X + 1.10^{-2}X^2$
NA	0,77	$149,79 - 0,51X$
Distância rizosférica: 3,0-4,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,82	$59,99 + 0,79X$
A	0,96	$178,31 - 0,30X + 1.10^{-2}X^2$
NA	0,77	$137,63 - 0,47X$
Distância rizosférica: 4,0-5,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,89	$41,41 + 0,75X$
A	0,98	$145,96 + 0,27X + 9.10^{-3}X^2$
NA	0,98	$158,74 - 1,59X + 6.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 5,0-10,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,89	$71,45 + 0,57X$
A	0,97	$156,10 + 0,20X + 1.10^{-2}X^2$
NA	0,78	$139,77 - 0,50X$

Equações ajustadas para P COSA no solo.

Distância rizosférica: 0,0-0,5 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,92	$4,27 - 9.10^{-2}X + 6.10^{-4}X^2$
A	0,98	$6,24 - 4.10^{-2}X + 6.10^{-4}X^2$
NA	0,97	$6,35 + 5.10^{-2}X - 2.10^{-4}X^2$
Distância rizosférica: 0,5-1,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,92	$2,76 - 3.10^{-2}X + 1.10^{-4}X^2$
A	0,99	$2,91 + 3.10^{-2}X$
NA	0,98	$6,53 + 4.10^{-2}X - 2.10^{-4}X^2$
Distância rizosférica: 1,0-2,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,92	$2,49 - 4.10^{-2}X + 2.10^{-4}X^2$
A	0,97	$2,31 + 3.10^{-2}X$
NA	0,96	$4,16 + 6.10^{-2}X$
Distância rizosférica: 2,0-3,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,93	$2,54 - 5.10^{-2}X + 4.10^{-4}X^2$
A	0,92	$2,46 + 3.10^{-2}X$
NA	0,98	$3,94 + 8.10^{-2}X - 3.10^{-4}X^2$
Distância rizosférica: 3,0-4,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,97	$1,65 - 3.10^{-2}X + 1.10^{-4}X^2$
A	0,96	$1,01 + 6.10^{-2}X - 3.10^{-4}X^2$
NA	0,92	$3,10 + 9.10^{-2}X - 3.10^{-4}X^2$
Distância rizosférica: 4,0-5,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,93	$2,08 - 4.10^{-2}X + 2.10^{-4}X^2$
A	0,92	$0,92 + 0,10X - 6.10^{-4}X^2$
NA	0,99	$3,03 + 9.10^{-2}X - 3.10^{-4}X^2$
Distância rizosférica: 5,0-10,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,95	$1,12 - 3.10^{-2}X + 2.10^{-4}X^2$
A	0,98	$0,88 + 3.10^{-2}X$
NA	0,90	$3,23 + 5.10^{-2}X$

Equações ajustadas para P microbiano no solo.

Distância rizosférica: 0,0-0,5 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,87	$3,05 + 5.10^{-2}X$
A	0,99	$4,09 - 9.10^{-2}X$
NA	0,95	$4,35 - 8.10^{-2}X$
Distância rizosférica: 0,5-1,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,60	$3,75 + 7.10^{-2}X$
A	0,36	$13,28 - 0,15X + 1.10^{-3}X^2$
NA	0,91	$9,91 - 0,19X + 2.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 1,0-2,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,34	$2,49 + 3.10^{-2}X$
A	0,86	$2,81 + 5.10^{-2}X$
NA	0,76	$3,14 - 8.10^{-2}X + 1.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 2,0-3,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,92	$4,84 + 5.10^{-2}X$
A	0,82	$9,92 - 0,28X - 1.10^{-3}X^2$
NA	0,84	$9,06 - 0,24X - 1.10^{-3}X^2$
Distância rizosférica: 3,0-4,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,91	$2,26 + 9.10^{-2}X$
A	0,89	$0,84 - 0,24X - 1.10^{-3}X^2$
NA	0,85	$2,50 + 9.10^{-2}X$
Distância rizosférica: 4,0-5,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,86	$5,80 + 0,11X$
A	0,62	$2,50 + 9.10^{-2}X$
NA	0,45	$7,89 + 8.10^{-2}X$
Distância rizosférica: 5,0-10,0 cm		
Nitrogênio aplicado	R ²	Equação
N	0,10	$6,78 + 3.10^{-3}X - 4.10^{-5}X^2$
A	0,81	$13,24 - 0,21X + 2.10^{-3}X^2$
NA	0,76	$10,25 - 0,16X + 1.10^{-3}X^2$