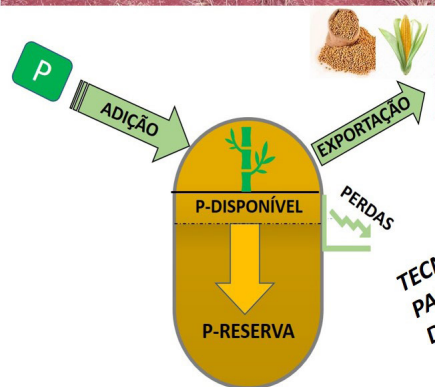


Tecnologias e Estratégias para Aumentar a Eficiência de Uso de Reservas de Fósforo Acumuladas em Latossolo Vermelho no Bioma Cerrado



OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL



**TECNOLOGIAS E ESTRATÉGIAS
PARA APROVEITAMENTO
DAS RESERVAS DE FÓSFORO
ACUMULADAS NOS SOLOS**



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Milho e Sorgo
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento***

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
230**

**Tecnologias e Estratégias para Aumentar
a Eficiência de Uso de Reservas de
Fósforo Acumuladas em Latossolo
Vermelho no Bioma Cerrado**

Antônio Marcos Coelho
Sidney Netto Parentoni
Francisco Adriano de Souza
Ivanildo Evódio Marriel

*Embrapa Milho e Sorgo
Sete Lagoas, MG
2021*

Esta publicação está disponível no endereço:
<https://www.embrapa.br/milho-e-sorgo/publicacoes>

Embrapa Milho e Sorgo
Rod. MG 424 Km 45
Caixa Postal 151
CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG
Fone: (31) 3027-1100
Fax: (31) 3027-1188
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
da Unidade Responsável

Presidente
Maria Marta Pastina

Secretário-Executivo
Elena Charlotte Landau

Membros
Cláudia Teixeira Guimarães, Mônica Matoso Campanha, Roberto dos Santos Trindade e Maria Cristina Dias Paes.

Revisão de texto
Antonio Claudio da Silva Barros

Normalização bibliográfica
Rosângela Lacerda de Castro (CRB 6/2749)

Tratamento das ilustrações
Mônica Aparecida de Castro

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Mônica Aparecida de Castro

Fotos da capa
Antônio Marcos Coelho

1ª edição
Publicação digital (2021)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Nome da unidade catalogadora

Tecnologias e estratégias para aumentar a eficiência de uso de reservas de fósforo acumuladas em Latossolo Vermelho no bioma Cerrado / Antônio Marcos Coelho ... [et al.]. – Sete Lagoas : Embrapa Milho e Sorgo, 2021.

47 p. : il. -- (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1679-0154; 230).

1. Solo. 2. Fertilizante. 3. Fósforo. 4. Fertilizante fosfatado. I. Coelho, Antônio Marcos. II. Parentoni, Sidney Neto. III. Souza, Francisco Adriano de. IV. Marriel, Ivanildo Evódio. V. Série.

CDD (21. ed.) 631.85

Rosângela Lacerda de Castro (CRB 6/2749)

© Embrapa, 2021

Sumário

Resumo05

Abstract07

Introdução.....09

Material e Métodos 11

Resultados e Discussão13

Conclusão.....41

Agradecimentos.....42

Referências42

Tecnologias e Estratégias para Aumentar a Eficiência de Uso de Reservas de Fósforo Acumuladas em Latossolo Vermelho no Bioma Cerrado

Antônio Marcos Coelho¹

Sidney Netto Parentoni²

Francisco Adriano de Souza³

Ivanildo Evódio Marriel⁴

Resumo – Em um Latossolo Vermelho da região do Cerrado, representativo de grandes áreas de cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merr.] e milho (*Zea mays*) no Brasil, os efeitos imediato e residual do P, aplicado nas doses de 0, 218 e 436 kg de P ha⁻¹, em 2003, foram quantificados através de três diferentes tecnologias e estratégias envolvendo as culturas do milho e da soja em rotação: (1) Genética do milho, incluindo diferentes cultivares; (2) Sistema Santa Fé - Milho consorciado com braquiária; e (3) Inoculação de microrganismos. Os experimentos foram conduzidos no período de 2003 a 2014, na área experimental da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas-MG. Verificaram-se, ao longo desse período, decréscimos acentuados na “biodisponibilidade” de P residual (extrator Mehlich1) para todos os níveis de P. Considerando o nível crítico de P no solo de 8 a 10 mg dm⁻³, verificou-se que a aplicação inicial de 218 e 436 kg de P ha⁻¹ manteve ao final do período, valores acima ou próximos do nível crítico. Entretanto, sem aplicação de P, ocorreu uma acentuada redução na “biodisponibilidade”, com valores bem abaixo do nível crítico, como consequência da mineração e exportação do P do solo pelos cultivos. Assim, pode-se dizer que, no período de tempo considerado, as culturas do milho, da soja e da braquiária se desenvolveram em condições de adequada e limitada “biodisponibilidades de P”. O desenvolvimento do

1 Antônio Marcos Coelho, Engenheiro Agrônomo, Doutor em Solos e Agricultura de Precisão, Pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo;

2 Sidney Netto Parentoni, Engenheiro Agrônomo, Doutor em Genética e Melhoramento de Plantas, Pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo;

3 Francisco Adriano de Souza, Engenheiro Agrônomo, Doutor em Ecologia Molecular Microbiana, Pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo;

4 Ivanildo Evódio Marriel, Engenheiro Agrônomo, Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, Pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo.

milho e da soja no campo e os aumentos nas produtividades de grãos obtidas com o aumento dos níveis de P no solo evidenciam claramente que P residual contribui para o pool prontamente biodisponível de P para as plantas, mas a taxa de liberação deve ser suficiente para manter o valor próximo ou acima do nível crítico necessário para atender as exigências de P das plantas de alto rendimento. Os resultados evidenciam a importância da disponibilidade de híbridos de milho que têm a capacidade de uma melhor aquisição/utilização do fósforo em solo com adequada ou baixa “biodisponibilidade” de P residual, inferior ao nível crítico considerado. Assim, a dose de aplicação de fertilizante fosfatado deve ser considerada quando genótipos com maior “eficiência no uso do fósforo” ou “tolerância ao baixo teor de fósforo” são utilizados. Nessas pesquisas não foram verificadas evidências de que o uso do consórcio de milho e braquiária e/ou a aplicação de microrganismos (fungo micorrízico e *Azospirillum*) podem, diretamente, otimizar o aproveitamento das reservas de fósforo do solo. Os resultados evidenciaram que existe grande potencial de redução na demanda por fertilizantes fosfatados, caso as reservas de P no solo sejam utilizadas. Entretanto, o potencial e o tempo de aproveitamento das reservas de P no solo estão intimamente relacionados à “biodisponibilidade” do P residual (extrator Mehlich), cujos valores devem estar acima dos níveis críticos pré-estabelecidos que proporcionam produtividade econômica aos agricultores.

Termos para indexação: fósforo residual, balanço de fósforo, sistema de cultivo, cultivares, microrganismos, milho, soja, braquiária

Techologies and Strategies To Increase The Efficiency Of Use Of Phosphrus Reserves Accumulated In Red Latosol In The Cerrado Bioma

Abstract – In a Red Latosol in the Cerrado region, representative of large areas of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] and corn (*Zea mays*) cultivation in Brazil, the immediate and residual effect of P, applied at doses of 0, 218 and 436 kg of P ha⁻¹ in 2003, were quantified through three different technologies and strategies involving corn and soybean crops in rotation: (1) Corn genetics, including different cultivars; (2) Santa Fé System - Corn intercropped with Brachiaria; and (3) Inoculation of microorganisms. The experiments were carried out from 2003 to 2014, in the experimental area of Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas-MG. During this period, accentuated decreases in the “bioavailability” of residual P (Mehlich1 extractor) were verified for all P levels. Considering the critical level of P in the soil of 8 to 10 mg dm⁻³ it was found that the initial application of 218 and 436 kg of P ha⁻¹, maintained at the end of the period, values above or close to the critical level. However, without P application, there was a marked reduction in “bioavailability”, with values well below the critical level, as a consequence of soil P mining by crops. Thus, it can be said that in the period of time considered, the crops of corn, soybeans and brachiaria, developed in conditions of adequate and limited P “bioavailability”. The development of corn and soybeans in the field and the increases in grain yields obtained with increasing levels of P in the soil clearly evidence that residual P contributes to the readily bioavailable pool of P for plants, but the release rate should be sufficient to maintain the value close to or above the critical level necessary to meet the P requirements of high-yielding plants. The results show the importance of the availability of corn hybrids that have the capacity for a better acquisition/use of phosphorus in soil with adequate or low residual P ‘bioavailability’, lower than the considered critical level. Thus, the application rate of phosphate fertilizer should be considered when corn hybrids with greater “efficiency in the use of phosphorus” or “tolerance to low phosphorus content” are used. In these studies, no evidence was found that the use of maize and brachiaria intercropping and/or the application of microorganisms (mycorrhizal fungus and *Azospirillum*) can optimize the use of

phosphorus reserves in the soil. The results showed that there is great potential to reduce the demand for phosphate fertilizers, if P reserves in the soil are used. However, the potential and time of utilization of P reserves in the soil are closely related to the bioavailability of residual P (extractor Mehlich1), whose values must be above the critical levels pre-established that provide economic productivity to farmers.

Index terms: legacy phosphorus, phosphorus balance, cropping system, cultivars, microorganisms, corn, soybean, brachiaria.

Introdução

O fósforo (P) é um elemento essencial à vida e é um dos mais importantes nutrientes para manutenção da capacidade produtiva dos solos. O setor agrícola é o principal consumidor mundial de fósforo, respondendo por 80% a 90% da demanda total (Tirado; Allsopp, 2012). As rochas fosfáticas constituem a fonte primária de P, sendo, portanto, um recurso não renovável.

Atualmente, uma das prioridades nas pesquisas para maximizar a duração das reservas mundiais de P é aumentar a eficiência do seu uso na agricultura. Essa prioridade pode estar relacionada ao P aplicado como fertilizantes minerais e orgânicos (esterco animal, compostos e bio sólidos), mas também das reservas de P do solo acumuladas como residual de aplicações anteriores de fertilizantes (Heffer et al., 2006). Assim, novas estratégias precisam ser implementadas a fim de melhorar a eficiência de uso do P dos sistemas de cultivo, incluindo reajustes nas recomendações de fertilizantes, adoção de melhores práticas de manejo, uso de rotação de culturas incluindo espécies mobilizadoras de P e intensificação do uso de subprodutos.

Além disso, a reengenharia de processos de plantas, fertilizantes e microrganismos é necessária, tais como o desenvolvimento de cultivares eficientes no uso de P, novos fertilizantes com eficiência aprimorada e associações benéficas estimulantes entre plantas e microrganismos. Os microrganismos podem ampliar e maximizar a capacidade de aquisição de nutrientes e água pelo sistema radicular – micorrizas, ou aumentar a disponibilidade de P na rizosfera – microrganismos solubilizadores e mineralizadores (Javaid, 2009; Oliveira et al., 2009; Finkel et al., 2017; Ferrol et al., 2019). Todas essas estratégias podem aumentar o aproveitamento do P residual do solo e contribuir para a redução da necessidade de aportes de fertilizantes fosfatados, levando a um melhor aproveitamento do fósforo na agricultura.

O atual entendimento entre a maioria dos pesquisadores é que as mudanças na capacidade de extração do P do solo e dos fertilizantes aplicados (formas lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis, etc.), e a diminuição na “biodisponibilidade” de P adicionado para as plantas com o tempo, podem ser bem explicadas pelos conceitos atuais relacionados ao equilíbrio de P em solos (Novais; Smyth, 1999; Syers et al., 2008; Oliveira, 2018). Estes envolvem principalmente reações de adsorção e precipitação, que podem ser ampla-

mente reversíveis com o tempo. O que agora requer atenção é até que ponto este conceito de adsorção/precipitação reversíveis pode ser reconciliado com informações agrônômicas ao avaliar o efeito residual do P e a eficiência do uso do fertilizante P.

A aplicação frequente de fertilizantes fosfatados é capaz de aumentar as reservas de P do solo – constituindo um “legado”. O legado P pode ser categorizado como inorgânico e orgânico, referindo-se ao excesso de P inorgânico e/ou orgânico não assimilado, respectivamente, da adição de fertilizantes inorgânicos e/ou orgânicos no ano de aplicação (Doydora et al., 2020). Este legado pode apresentar viés negativo tanto do ponto de vista econômico (retorno financeiro) como do socioambiental, por não ser sustentável (recurso não renovável) e por apresentar potencial poluidor (eutrofização de corpos d’água). Por outro lado, a manutenção de altas produtividades requer o suprimento adequado de fósforo (P) para as plantas. Isso implica o desenvolvimento de estratégias e tecnologias capazes de aumentar a eficiência de uso do P pelas culturas agrícolas.

Neste contexto, o objetivo deste estudo é contribuir para uma avaliação mais sistemática e prática do efeito residual do fósforo no solo. Se a recuperação do P adicionado ocorre não apenas no ano da aplicação, mas também nos anos subsequentes, isso levanta as seguintes questões: (a) em que escala de tempo o nível de recuperação de P deve ser medido por meio de análises do solo e produtividades das culturas?; (b) durante quanto tempo o P residual pode produzir rendimentos que são economicamente viáveis para o agricultor?; e (c) qual a influência da cultivar, do sistema de culturas, e da presença de microrganismos na otimização do uso das reservas de P do solo?

Os resultados obtidos nessa pesquisa são uma contribuição ao Objetivo de Desenvolvimento Estratégico (ODS-2), Meta 2.4 - Sistemas Sustentáveis de Produção de Alimentos, e estão alinhados ao Portifólio de Projetos “Nutrientes para Agricultura”, desafio para inovação relacionado ao aproveitamento do P aplicado via fertilizantes minerais solúveis e do P residual do solo em culturas anuais, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa).

Material e Métodos

Planejamento experimental e histórico de uso da área

Experimentos foram conduzidos no campo experimental da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas-MG (19° 28' S, 44° 15' O, 732 m de altitude). Uma área total de 5,0 ha foi dividida em 12 faixas no sentido L - O, com dimensões variadas de acordo com o contorno do terreno (Coelho et al., 2004). A área é equipada com sistema fixo de irrigação, tipo aspersão, com dimensões de 20 m entre linhas de irrigação e 18 m entre aspersores, instalado em 2006.

O solo é classificado como Latossolo Vermelho, textura muito argilosa, com uma declividade de 6% no sentido N-S. A fertilidade do solo de cada faixa foi inicialmente caracterizada em 2003, através de amostragens de solo, realizadas nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

Com base nos resultados das análises químicas de solo, uma das faixas (Faixa 7) foi escolhida para experimentos sobre adubação fosfatada e aproveitamento das reservas de fósforo do solo (efeito residual). Essa faixa apresentou as seguintes características químicas: pH-água 5,98 e 5,52; M.O. 33,5 e 27,5 g dm⁻³; P-Melich1 5,3 e 3,2 mg dm⁻³; K 43,6 e 20,1 mg dm⁻³; Ca 3,4 e 1,86 cmol_c dm⁻³; Mg 0,83 e 0,44 cmol_c dm⁻³; Sat. Al (m) 1,1 e 17%; Sat. Bases (V) 53 e 30%, respectivamente para as profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.



Figura 1. Vista aérea da área experimental e da faixa de número 7, cultivada com milho e selecionada para a condução de experimentos com diferentes níveis de fósforo.

A faixa (20 m x 150 m = 3.000 m²) foi dividida em três partes de igual área (1.000 m²) para a construção de ambientes com diferentes níveis de fósforo. Assim, em 2003, três níveis de P foram estabelecidos com a aplicação de superfosfato triplo (45% P₂O₅) nas doses de 0, 218 e 436 kg de P ha⁻¹, correspondendo, respectivamente, a 0, 500 e 1.000 kg de P₂O₅ ha⁻¹. Esses três ambientes foram caracterizados como de baixo (B), médio (M) e alto (A) nível de P no solo. O fertilizante fosfatado foi aplicado a lanço na superfície do solo e, posteriormente, incorporado ao solo na profundidade de até 15 cm com o uso da enxada rotativa. Além disso, para elevar o teor de K no solo, foi aplicada a lanço em toda faixa a dose de 240 kg de K₂O ha⁻¹ (fonte cloreto de potássio), sendo esse nutriente posteriormente incorporado ao solo, juntamente com o fertilizante fosfatado. Visando corrigir a acidez e elevar os teores de Ca e Mg, foram aplicadas, em 2012, as doses de 1,0, 1,5 e 2,0 Mg ha⁻¹ de Agrosilício® (CaO 27%, MgO 7%, SiO₂ 16%, PRNT 68%), respectivamente, nas áreas de médio, alto e baixo P. O Agrosilício foi aplicado na superfície do solo, juntamente com gesso agrícola (17% Ca, 14% S), na dose de 1,0 Mg ha⁻¹.

Assim, no período de 2003 a 2014, foi conduzida nessa faixa uma série de experimentos, sem aplicação adicional de fertilizante fosfatado. Os experimentos envolveram tratamentos com genótipos de milho, sistema milho consorciado com braquiária, cultura da soja em sistema de rotação e aplicação de microrganismos (associação de fungos micorrízicos arbusculares e *Azospirillum*). Em 2006/2007, a faixa foi cultivada com milheto, sem aplicação de fertilizantes, e ele foi utilizado como planta de cobertura.

No período de 2003 a 2006, foram conduzidos experimentos com 12 híbridos de milho para estudos da eficiência no uso de P, sob manejo de solo com preparo convencional (Coelho et al., 2003; Coelho; Alves, 2004; Parentoni et al., 2010). Posteriormente, o sistema de manejo de solo utilizado foi o de semeadura direta. No período do outono/inverno dos anos de 2008 e 2009, foram conduzidos experimentos envolvendo quatro híbridos de milho cultivados em sistema solteiro e consorciados com braquiária visando avaliar o aproveitamento das reservas de P no solo (Coelho, 2014). No período de verão dos anos agrícolas de 2009/2010, 2010/2011 e 2013/2014, foram feitos experimentos com a cultura da soja em rotação como o milho, visando avaliar a eficiência dessa cultura no aproveitamento das reservas de P no solo (Coelho, 2015a). No verão de 2012/2013, experimento envolvendo a cultura do milho consorciado com braquiária, associado à aplicação de mi-

crorganismos visando potencializar o aproveitamento das reservas de P no solo, foi conduzido (Coelho, 2015b). O delineamento experimental utilizado e o manejo das culturas são detalhados na apresentação dos resultados obtidos para cada um desses experimentos. Assim, os resultados obtidos nesses experimentos são objetos dessa publicação.

Resultados e Discussão

Evolução da fertilidade do solo

Para a caracterização da fertilidade do solo nos diferentes níveis de P dentro da faixa, no decorrer do período de condução dos experimentos, amostragens de solo foram realizadas em 2008, 2010 e 2013. As amostragens dentro de cada nível de P foram realizadas nas subparcelas (8,4 m x 10,0 m) referentes aos tratamentos milho solteiro e consorciado com braquiária, retirando-se cinco amostras simples no sentido diagonal nas entrelinhas das culturas, na profundidade de 0 cm a 20 cm.

As análises químicas e físicas foram realizadas nos laboratórios da Embrapa Milho e Sorgo, sendo determinados: o pH em água, a acidez potencial ($H + Al$) extraída com solução de acetato de cálcio pH 7,0; acidez tocável (Al), Ca e Mg extraídas em solução de KCl 1N; K , P , Zn , Cu , Mn e Fe extraídos pelo extrator Mehlich1; carbono orgânico em analisador de carbono a 800 °C, sendo os teores de matéria orgânica obtidos multiplicando-se os teores de carbono orgânico pelo fator de 1,72. Com base nesses resultados, foram calculadas a CTC-pH7, saturação por Al (m), soma de bases (SB) e saturação por bases (V). Os resultados dessas análises, apresentados na Tabela 1, são valores médios obtidos dentro de cada nível de P.

Os resultados iniciais das análises químicas de amostras de solo coletadas em 2003, relatadas acima e mostradas na Tabela 1, revelaram que de um modo geral o solo já apresentava a fertilidade construída, em níveis relativamente mais favoráveis, quando comparado às características químicas normalmente observadas em solos sob vegetação natural de Cerrado. Portanto, pode-se dizer que a área em estudo, apresentava solo não degradado e com um perfil de 40 cm de profundidade com níveis de fertilidade considerados

adequados para se obter alto potencial produtivo já no primeiro ano, desde que as correções ainda requeridas fossem efetuadas adequadamente.

Assim, no decorrer do período experimental, sob um sistema de cultivos intensivos de milho, braquiária e soja, e o manejo adequado da fertilidade do solo, com aplicações de corretivos e fertilizantes, foi possível manter ou aumentar os teores dos nutrientes no solo em valores adequados para o desenvolvimento das culturas (Tabela 1). Por outro lado, o aporte ao solo de palhadas dessas culturas no período considerado possibilitou um ganho significativo de matéria orgânica no solo. Os teores de M.O. durante o período de estudo (2003 a 2014, 11 anos) aumentaram na ordem de 11 a 12 g dm⁻³, ou seja, 1 g dm⁻³ por ano, independentemente do nível de P do solo (Tabela 1). Esse resultado indica que o sistema de rotação soja-milho, em áreas de Cerrado, pode contribuir com o sequestro de carbono atmosférico. Além disso, há os benefícios tradicionais relacionados ao aumento dos teores de M.O. no solo, tais como estruturação do solo, CTC, retenção de água e atividade biológica.

Tabela 1. Atributos químicos de amostras de solo coletadas na profundidade de 0-20 cm antes (2003) e durante a condução dos experimentos no período de 2003 a 2014. Níveis de P no solo: baixo (B), médio (M) e alto (A).

Atributos do solo	2003	2008				2010				2013	
		B	M	A	B	M	A	B		M	A
Indicadores do Potencial Produtivo											
M.O. - g dm ⁻³	33	36	36	36	42	41	40	48		47	48
pH - água	5,9	5,4	5,7	5,5	5,5	6,0	5,7	5,8		6,0	5,8
CTC-cmol _c dm ⁻³	8,2	8,5	9,0	9,0	7,9	7,2	7,6	9,7		9,6	11,0
Sat. Al - %	1,1	6,0	2,1	5,4	6,4	2,3	2,2	0,0		0,0	0,1
Sat. Bases - %	53	46	58	50	41	58	47	50		63	58
Indicadores da "Biodisponibilidade" de Macronutrientes											
Ca-cmol _c dm ⁻³	3,4	2,9	4,1	3,5	2,6	3,4	2,9	3,9		4,9	5,2
Mg-cmol _c dm ⁻³	0,8	0,6	0,8	0,6	0,5	0,6	0,5	0,7		0,8	0,9
K-mg dm ⁻³	44	124	129	146	96	79	57	126		113	123
P-mg dm ⁻³	5,3	6,7	10,6	27,8	6,5	10,3	23,6	3,8		8,7	17,6
Indicadores da "Biodisponibilidade" de Micronutrientes											
Zn - mg dm ⁻³	7,5	2,3	3,5	4,8	2,7	3,0	3,5	2,1		2,9	3,9
Cu - mg dm ⁻³	1,2	1,3	1,0	1,2	1,7	1,3	1,4	1,1		0,8	1,0
Mn - mg dm ⁻³	61	32	34	31	34	36	32	38		44	41
Fe - mg dm ⁻³	38	39	34	39	32	35	41	41		41	42

Com relação aos teores de P no solo, verificou-se ao longo do período um decréscimo acentuado na “biodisponibilidade” indicada pelo extrator Mehlich1 para todos os níveis de P (Figura 2). Análises químicas, realizadas em amostras de solo coletadas na profundidade de 0-20 cm, nas diferentes áreas, quatro meses após a aplicação das doses de P em 2003, revelaram valores médios de 5,3; 20,5 e 39,7 mg P dm⁻³ (extrator Mehlich1), respectivamente, para os níveis de P, baixo, médio e alto (Coelho, 2014). De acordo com resultados de pesquisa realizada por Coelho e França (1994) nesse solo, sob preparo convencional, o nível crítico de P (extrator Mehlich1) para atingir 90% da produtividade máxima de milho (7,0 Mg ha⁻¹) situou-se entre 8 e 10 mg dm⁻³ do solo. Assim, considerando esses valores como o nível crítico de P no solo, verifica-se que a aplicação inicial de 218 e 436 kg P ha⁻¹ manteve no solo, no período considerado (2003 a 2013), valores acima ou próximos do nível crítico (Figura 2). Entretanto, sem aplicação de P, ocorreu uma acentuada redução na “biodisponibilidade” com valores muito abaixo do nível crítico, como consequência da mineração do P do solo pelos cultivos (Tabela 1, Figura 2).

O declínio na disponibilidade de P verificada no período analisado (Figura 2) é devido à remoção e à exportação de P no produto colhido (declínio biológico) e a transformações químicas do P no solo (declínio químico). De acordo com Novais e Smyth (1999), em solos tropicais, frações argilosas como óxidos hidratados amorfos de Fe e Al, além de gibbsita, goethita e caulinita são responsáveis pela maior precipitação/adsorção de P. Ao compreender esses mecanismos, o gerenciamento do P para melhorar a eficiência do uso, pode ser mais bem planejado. Portanto, a demanda de P pelas culturas deve ser considerada. Plantas de desenvolvimento intenso e de ciclo curto, como o milho, requerem maiores quantidades de P em solução e reposição mais rápida de P adsorvido do que culturas perenes (Lino et al., 2018). Assim, pode-se dizer que, no período de tempo considerado, as culturas de milho, soja e braquiária, cultivadas no solo da área, desenvolveram-se em condições de limitada e adequada “biodisponibilidades” de P, como revelado pelo extrator Mehlich1 (Figura 2).

A quantidade de P que permanece em forma “biodisponível” no solo, por determinado período de tempo, pode também ser considerada como um método de estimar a eficiência do P aplicado, mas não a sua recuperação. Assim, capacidade de avaliar os níveis de P “biodisponíveis” no solo em uma

base regular e reconhecer a variabilidade espacial para fazer recomendações de P mais precisas é fundamental para garantir um melhor uso dos fertilizantes fosfatados.

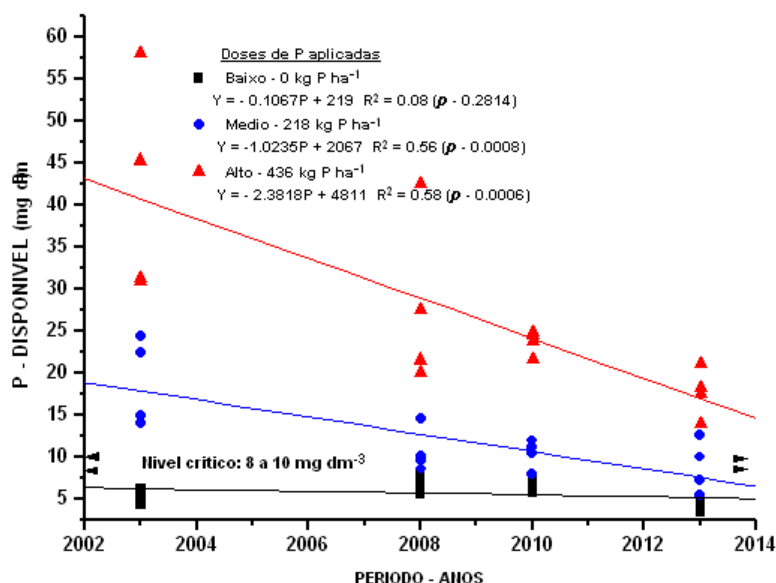


Figura 2. Relação entre as doses de P aplicadas e o P “biodisponível” pelo extrator Mehlich1, no período de condução dos experimentos (2003 a 2013).

Após cultivos de milho solteiro e consorciado com a braquiária (2008, 2009, 2012/2013), avaliou-se a “biodisponibilidade de P residual”, em amostras de solo coletadas na camada superficial (20 cm) em 2010 e 2013. Diferenças significativas foram verificadas entre os níveis de P aplicados, sendo que para os sistemas de cultivos, os valores foram estatisticamente similares (Tabela 2). Assim, as ciclagens de P pela biomassa de braquiária (2,71 a 6,34 kg de P ha⁻¹) e de milho (2,0 e 2,93 kg de P ha⁻¹), no período analisado (Tabelas 9 e 10), não foram em quantidades suficientes, para alterar significativamente a “biodisponibilidade” de P dentro do sistema, como revelado pelas análises de solo (Tabela 2). De acordo com Ferreira et al. (2014), resíduos com alta relação C: N, alto teor de lignina e baixo teor de celulose como as espécies da

família *Poaceae*, incluindo assim o milho e a braquiária, se decompõem mais lentamente e liberam menores quantidades de P, enquanto os resíduos com baixa relação C: N, baixo teor de lignina e alto conteúdo de celulose, como as espécies da família *Brassicaceae*, se decompõem mais rapidamente e liberam maiores quantidades de P no solo.

Tabela 2. Biodisponibilidade de P residual (extrator Mehlich1) em função dos níveis de P e sistema de cultivo.

Nível de P ^{1/} Kg ha ⁻¹	Sistema de cultivo	2010 ----- mg dm ⁻³ -----	2013 ----- mg dm ⁻³ -----
0	Milho	6,97±2,4 ^{2/}	4,22±1,7
(baixo)	Milho + braquiária	6,05±1,3	3,48±1,0
218	Milho	10,10±2,2	7,36±2,4
(médio)	Milho + braquiária	10,53±4,0	10,14±4,7
436	Milho	23,86±5,3	16,22±5,1
(alto)	Milho + braquiária	23,43±7,3	19,10±8,2
0		6,51c ^{3/}	3,85c
218	Média de níveis	10,32b	8,75b
436		23,65a	17,66a
Média sistema	Milho	13,65A	10,91A
	Milho + braquiária	13,34A	9,26A
Média geral		13,50	10,09
CV %		42	53

^{1/}Níveis de P aplicados em 2003. ^{2/}Desvio Padrão. ^{3/}Médias nas mesmas colunas seguidas pelas mesmas letras não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey 5%. Letras minúsculas comparam níveis de P, e maiúsculas, sistema de cultivo.

Eficiência de híbridos de milho no aproveitamento das reservas de fósforo no solo

O relativo alto custo unitário dos fertilizantes à base de fósforo, aliado à deficiência generalizada e à diminuição na “biodisponibilidade” com o tempo do P fertilizante aplicado, exige o desenvolvimento de tecnologias que possam tornar mais eficiente o uso do fósforo aplicado no solo. A avaliação e a seleção de cultivares de milho adaptadas, com maior eficiência na aquisição das diferentes formas do pool de P no solo (formas lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis) e/ou maior utilização interna de P, podem fazer parte de tal abordagem. Aumentar a eficiência da planta para adquirir P é uma boa estratégia para extrair P de solos fixadores de P. A avaliação e seleção de cultivares de milho mais eficientes na absorção de fósforo, portanto, reveste-se de importância tanto para agricultores tecnificados como para os de baixo

capital de investimento com o intuito de elevar sua produção e consequentemente, aumentar a quantidade de alimentos produzida no País.

No período de 2003 a 2006 (anos agrícolas 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006), a área experimental foi utilizada com experimentos envolvendo híbridos de milho para estudos de eficiência de uso de P. Os híbridos utilizados foram obtidos de combinações híbridas de linhagens originárias de avaliações *per se*, para adaptação a solos ácidos e eficiência na utilização de P (Parentoni et al., 2002). Assim, doze híbridos simples comerciais e experimentais de milho, provenientes do programa de melhoramento da Embrapa Milho e Sorgo, previamente classificados como eficientes (híbridos 1 a 6) e ineficientes (híbridos 7 a 12) ao P, foram testados em solo com diferentes níveis de P, classificados como baixo (B) médio (M) e alto (A), e manejado no sistema de preparo convencional do solo.

Foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados com quatro repetições em cada nível de P, sendo as parcelas constituídas por duas linhas de milho com 4,0 m de comprimento. A semeadura foi sempre realizada no mês de novembro, no espaçamento de 0,80 m e densidade de 60.000 sementes ha^{-1} . Como adubação de semeadura foram aplicados 30 kg de N ha^{-1} (ureia) e 72 kg de K_2O ha^{-1} (Cloreto de potássio). Na adubação de cobertura foram aplicados 100 kg de N ha^{-1} (ureia).

Os resultados de produtividade de grãos dos 12 híbridos de milho nos três níveis de P são apresentados na Tabela 3. As análises estatísticas revelaram efeitos altamente significativos ($p \leq 0,01$) para os níveis de P e híbridos, não sendo significativa a interação entre esses fatores, um indicativo que os híbridos avaliados apresentaram comportamento similar em resposta ao aumento da disponibilidade de P no solo (Tabela 3). Na média geral dos três anos, reduções médias de 2,73 Mg ha^{-1} (33%) e 2,44 Mg ha^{-1} (31%), nas produtividades de grãos, foram observadas entre os níveis de P, alto e médio, quando comparado ao tratamento controle (Tabela 3). Entretanto, dentro de cada nível de P, a magnitude de resposta variou entre híbridos, com significativas diferenças em produtividades de até 3,0 Mg ha^{-1} de grãos, principalmente nos anos de 2004 e 2005, quando o P residual foi avaliado (Tabela 3).



Fotos: Sidney Netto Parentoni

Figura 3. Desenvolvimento comparativo de híbridos de milho em solo com baixo nível de fósforo.

No nível baixo de P (controle), todos os híbridos, em maior ou menor amplitude, reduziram as produtividades de grãos, sendo essa redução crescente quando o efeito residual do P é avaliado (Tabela 3). Entretanto, é importante mencionar que os híbridos BRS 1001, BRS 1010, HS20x723 e HS161x5046 apresentaram, no baixo nível de P, boas produtividades de grãos (de 6,50 a 8,00 Mg ha⁻¹) (Tabela 3). Esses resultados indicam que a triagem e seleção de genótipos de milho que se desenvolvem bem e produzem cerca de 70% a 80% dos rendimentos máximos em solos com baixos níveis de fósforo “bio-disponível” é uma estratégia de manejo importante, seja individualmente ou em conjunto com as outras tecnologias (plantio direto, rotação e sucessão de culturas, associação com microrganismos, etc.), podendo reduzir significativamente a necessidade de fósforo nas adubações e, assim, aumentar a eficiência de utilização desse recurso básico.

Tabela 3. Produtividade de grãos de híbridos de milho em razão do efeito imediato e residual de níveis de P aplicados em 2003.

Híbridos <i>1/</i>	Baixo-0 kg P ha ⁻¹			Médio-218 kg P ha ⁻¹			Alto-436 kg P ha ⁻¹		
	2004	2005	2006	2004	2005	2006	2004	2005	2006
Prod. Grãos Mg ha ⁻¹									
<i>Híbridos Eficientes</i>									
01	7,34	6,07	4,48	9,10	8,89	7,71	8,70	9,50	7,95
02	5,12	6,28	4,30	6,98	8,69	7,43	8,43	10,11	7,36
03	8,02	4,60	5,18	9,84	7,48	8,86	8,97	7,20	10,05
04	6,82	6,96	4,47	8,11	9,54	7,33	7,39	10,53	8,60
05	6,59	5,96	5,65	8,44	8,28	8,86	9,67	8,54	10,00
06	6,78	6,32	6,47	8,94	9,55	8,69	7,89	8,30	8,95
<i>Híbridos Ineficientes</i>									
07	5,75	4,44	5,81	8,40	8,33	9,47	8,17	8,52	9,32
08	5,71	2,32	6,56	6,84	5,47	8,97	5,53	6,23	9,34
09	5,40	4,18	4,74	6,69	6,58	7,47	5,70	6,74	8,49
10	5,22	3,91	4,95	5,43	7,14	8,59	7,48	8,23	9,15
11	5,56	6,56	4,85	6,92	7,75	7,12	7,68	9,89	6,94
12	6,53	2,65	5,30	6,36	5,65	8,78	6,81	6,34	7,85
Média	6,05	5,02	5,25	7,60	7,78	8,27	7,48	8,35	8,67
DMS ^{2/}	2,87	3,04	3,24	2,73	3,77	3,14	3,00	4,24	3,41
CV %	19	24	25	14	19	15	16	20	16

^{1/}Híbridos: 01-BRS1001, 02-BRS3060, 03- BRS1010, 04-HS228-3x1154, 05-HS20x723, 06-HS161x5046, 07-HS26x1113-01, 08-HS228-3x1057-68, 09-HS13x64, 10-HS5046x53, 11-HS20x22, 12-HS1096x228-3.

^{2/} -DMS – Tukey 5%.

O valor residual do P foi determinado, medindo-se os incrementos nas produtividades de grãos de cada híbrido nos anos seguintes à aplicação inicial de P, em comparação com as produtividades obtidas no tratamento controle, sem aplicação desse nutriente. Esses resultados são apresentados nas Figuras 4 e 5. De modo geral, todos os híbridos apresentaram aumentos nas produtividades de grãos com o aumento na disponibilidade de fósforo no solo. Entretanto, os híbridos BRS 1001, HS26x1113 e HS5046 apresentaram uma maior consistência nos aumentos de produtividades de grãos com aumento na biodisponibilidade do P residual (Figuras 4 e 5). Na média geral dos híbridos, foi possível aumento na produtividade de grãos de milho da ordem de 60% (3,0 Mg ha⁻¹), em razão do efeito residual do P.

Esses resultados confirmam que o P residual contribuiu para o pool prontamente disponível para as plantas. Entretanto, é importante mencionar que, como mostrado na Figura 1, a biodisponibilidade de P residual, avaliada pelo extrator Mehlich1, no período de 2003 a 2008, situava-se acima do nível crítico pré-estabelecido para o solo. Assim, pode-se afirmar que a taxa de liberação do P foi suficiente para manter o valor crítico necessário para atender aos requisitos de P demandado pelos híbridos avaliados, com alguns deles

apresentado miores aumentos nas produtividades de grãos da ordem de 3,0 a 4,8 Mg ha⁻¹ (Figuras 4 e 5), indicando assim que, mesmo em solos com adequada biodisponibilidade de P residual, existem grandes diferenças entre os híbridos em resposta ao melhor aproveitamento desse nutriente.

De modo geral, os resultados confirmam a importância dos programas de melhoramento em selecionar e caracterizar genótipos de milho mais eficientes e produtivos no aproveitamento do P residual dos solos. Entretanto, o que tem sido observado na prática é que a caracterização de genótipos mais eficientes no uso de nutrientes, de um modo geral, não tem sido por parte das empresas que comercializam sementes, incluído nos portfólios de recomendação de cultivares. Maior ênfase é dada aos aspectos de ciclo, tolerância às doenças, pragas e déficit hídrico. Esses aspectos são relevantes, principalmente quando se verifica que o Brasil é altamente dependente na importação de fertilizantes químicos e consequentemente com alta volatilidade dos preços.

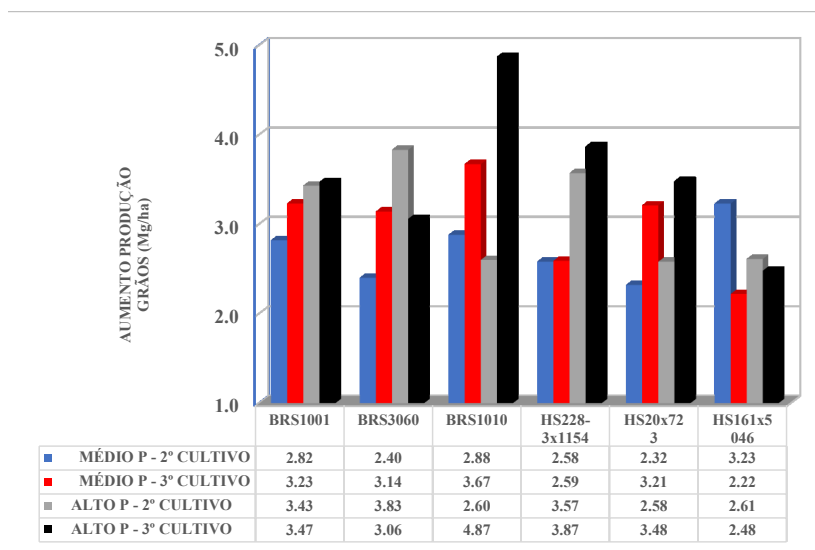


Figura 4. Aumentos nas produtividades de grãos de híbridos de milho eficientes em razão do efeito residual de P.

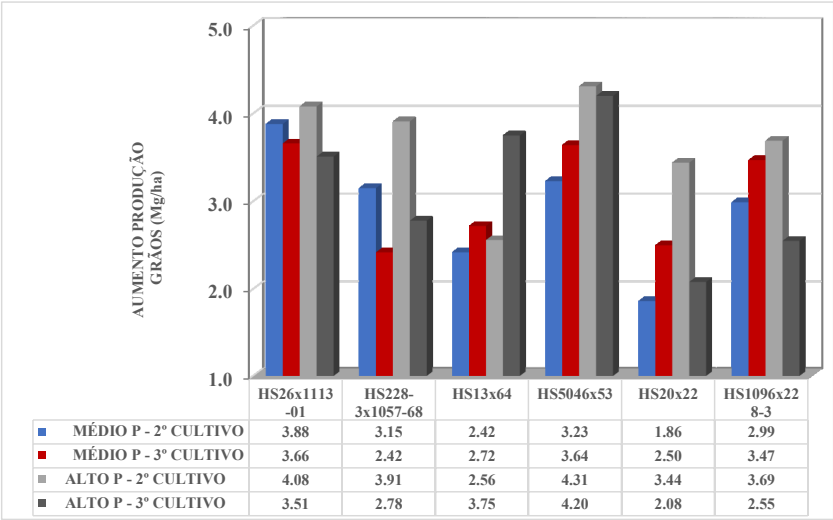


Figura 5. Aumentos nas produtividades de grãos de híbridos de milho ineficientes em razão do efeito residual de P.

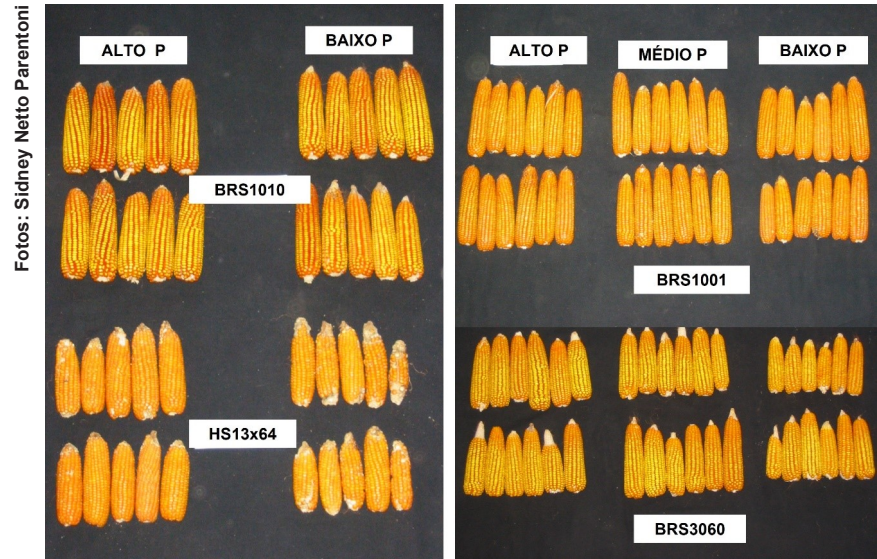


Figura 6. Aspectos das espigas de quatro híbridos de milho cultivados nos níveis alto, médio e baixo de fósforo, visualizadas da esquerda para a direita, respectivamente.

Os resultados da concentração e exportação de P nos grãos dos híbridos de milho são apresentados na Tabela 4. Não foram observadas diferenças significativas na concentração de P nos grãos com aumento nos níveis de P aplicados, mas entre os híbridos sim, variando de 1,75 a 2,75 g P kg⁻¹ de grãos. Isso equivale à exportação de 1,75 a 2,75 kg de P Mg⁻¹ de grãos (4,0 a 6,3 kg de P₂O₅ Mg⁻¹ de grãos). Estes resultados são um indicativo da possibilidade de selecionar genótipos de milho produtivos e com menor concentração de P nos grãos, como uma estratégia para melhor eficiência no uso de P, reduzindo, assim, a exportação no produto colhido e, conseqüentemente, a dose de reposição de P como adubação de manutenção.

Entretanto, ao relacionar as concentrações e remoção de P nos grãos com as produtividades média dos híbridos de milho, constatou-se que a remoção de P nos grãos apresentou uma melhor correlação com a produtividade ($R = 0,70$), o que não se verificou para a concentração de P nos grãos (Figura 7). Assim, a quantidade de P removido nos grãos depende principalmente da quantidade de grãos produzida. Resultados similares foram observados por Eghball et al. (2003) que também não obtiveram correlação significativa ($r = 0,06$, $n = 288$) entre produtividade de grãos de milho e concentração de P nos grãos. Citando outros autores, Fernandes (2001) menciona que híbridos de milho mais eficientes são aqueles que apresentam alta produtividade de grãos com menor acúmulo de P nos grãos. Esses resultados são indicativos de que na seleção de híbridos de milho eficientes quanto ao uso de P, além da concentração de P nos grãos, é importante associar este parâmetro ao potencial produtivo, com estimativas da remoção de P nos grãos.

Tabela 4. Concentração média de P nos grãos (CPG) e P removido nos grãos (PRG) de híbridos de milho cultivados em solo com diferentes níveis de fósforo.

Híbrido	Níveis de P aplicados em 2003					
	Baixo-0 kg P ha ⁻¹		Médio-218 kg P ha ⁻¹		Alto-436 kg P ha ⁻¹	
	CPG g kg ⁻¹	PRG kg ha ⁻¹	CPG g kg ⁻¹	PRG kg ha ⁻¹	CPG g kg ⁻¹	PRG kg ha ⁻¹
<i>Híbridos Eficientes</i>						
BRS1001	1,80	13,21	1,85	16,01	1,80	16,24
BRS3060	1,70	8,70	2,10	13,65	2,10	14,12
BRS1010	2,60	20,30	2,00	21,33	2,00	17,42
HS228-3 x 1154	1,90	14,00	1,75	14,50	1,90	14,25
HS20 x 723	2,00	13,52	2,00	15,49	1,75	17,18
HS161 x 5046	2,80	15,99	2,75	25,65	2,00	16,95
<i>Híbridos Ineficientes</i>						
HS26 x 1113-01	1,95	10,41	1,85	16,00	1,75	14,59
HS228-3 x 1057-68	2,15	11,59	2,00	12,17	1,80	11,13
HS13 x 64	2,15	13,66	1,95	12,66	1,85	10,15
HS5046 x 53	2,10	12,02	2,10	11,20	2,15	18,43
HS20 x 22	1,85	11,36	2,00	15,02	1,75	12,91
HS1096 x 228-3	2,15	14,10	2,10	13,22	1,85	13,45
Média	2,10	13,24	2,03	15,58	1,89	14,79
DMS – Tukey 5%	1,20	14,89	1,64	24,76	0,92	11,66
CV %	14	28	20	39	12	19

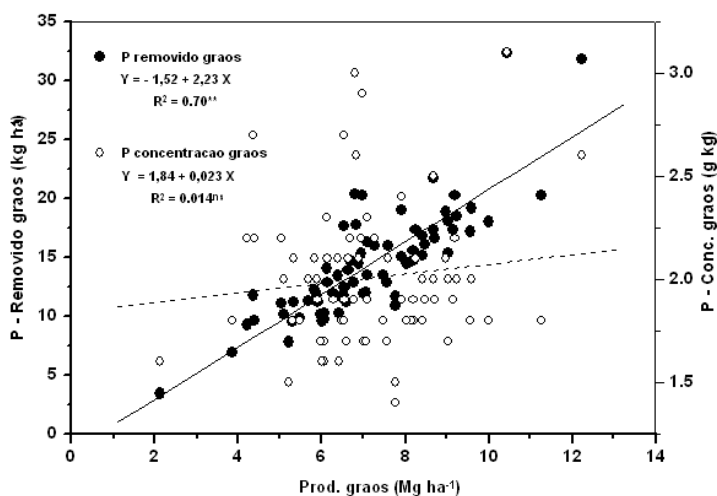


Figura 7. Relação entre a concentração e a remoção de P nos grãos com a produtividade de grãos de híbridos de milho.

Eficiência do sistema híbrido de milho e consórcio com braquiária

Por causa de alto rendimento, palatabilidade, qualidade nutricional para ração animal, alta adaptabilidade a solos pobres em fósforo (P), consorciação com as culturas de milho e sorgo e facilidade de manejo na dessecação, espécies do gênero *Braquiária* [*Syn. Urochloa (brizantha, ruzizienses, decumbes)*] têm sido utilizadas como forragem em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária e como cobertura vegetal na entressafra de culturas comerciais (Almeida et al., 2019). Além disso, a alta capacidade de absorção de P torna-se importante para melhorar a ciclagem dele no solo e a eficiência do uso dele. A alta eficiência na absorção de P pode estar relacionada a um extenso sistema radicular (Boddey et al., 1996) e à capacidade das raízes de liberar ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como o citrato, solubilizando o P ligado a Fe e Al, podendo, assim, absorver P de frações menos lábeis (Almeida et al., 2018). Por outro lado, o uso de rotações e consorciações de culturas, com espécies capazes de solubilizar o P do solo, pode resultar em maior disponibilidade de P para as culturas subsequentes, resultando em melhor eficiência de uso do P do sistema.

No outono/inverno de 2008 e 2009, simulando a semeadura do milho em segunda safra, foram conduzidos, na área experimental, experimentos envolvendo híbridos de milho e sistema de milho consorciado com braquiária. Os tratamentos envolveram três níveis de P (baixo, médio e alto), previamente estabelecidos, quatro híbridos de milho [BRS 1010, DKB 390 (2008) DKB350 (2009), P30F35 e BRS 3060] e dois sistemas de cultivo: milho solteiro e milho consorciado com braquiária. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com quatro repetições, o delineamento de tratamentos foi em parcelas sub-subdivididas, as parcelas foram formadas pelos níveis de P, as subparcelas, pelos sistemas de cultivo e as sub-subparcelas, pelos híbridos de milho. Os híbridos de milho foram semeados na segunda quinzena do mês de março, no espaçamento de 0,80 m e densidade de 55 mil sementes ha^{-1} . A braquiária (*Urochloa brizantha*, cv Xaraés) foi semeada em sulcos, na linha e entre as linhas de milho, na quantidade de 10 kg ha^{-1} de sementes, e foi utilizada como cobertura de solo. Em 2008, a adubação de semeadura consistiu na aplicação de 45 kg de N ha^{-1} (ureia), 60 kg de K_2O ha^{-1} (cloreto de potássio) e 100 kg de gesso ha^{-1} (14% S e 17% Ca), não sendo realizada

adubação de cobertura com N. Em 2009, não foi realizada adubação na semeadura, sendo que aos 35 dias após a semeadura, foram aplicados 67,5 kg de N ha⁻¹ (ureia). Em ambos os anos foi utilizada irrigação suplementar com aplicação total de 400 mm de água, simulando as condições que ocorrem na região Centro-Oeste do Brasil nessa época do ano.

As produtividades de grãos de milho variaram de 4,0 a 7,0 Mg ha⁻¹, com média geral de 6,0 Mg ha⁻¹ (Tabela 5). É importante mencionar que as produtividades foram obtidas em condições de baixo uso de fertilizantes (uso de reservas de P no solo e baixas doses de N) e de limitado suprimento de água através de irrigação. Entretanto, essas médias de produtividades são similares às que são normalmente obtidas pelos produtores no cultivo do milho de segunda safra na região Centro-Oeste.

Nessas condições, o potencial de respostas do milho ao aumento nos níveis de P no solo variou entre anos, sendo significativo ($p \leq 0,01$) somente em 2009, com incremento na produtividade de grãos da ordem de 1,57 Mg ha⁻¹ (30%), em relação ao tratamento controle (sem P). A resposta não significativa ($p > 0,01$), verificada em 2008, pode ser creditada à não aplicação de N em cobertura. As máximas produtividades foram obtidas com o efeito residual do nível médio de P aplicado (218 kg ha⁻¹) em 2003 (Tabela 5), correspondendo a uma “biodisponibilidade” de P no solo (extrator Mehlich1) de 10,6 mg dm⁻³ nas análises de solo realizadas em 2008 (Tabela 1, Figura 1).

As produtividades de milho foram afetadas pelos sistemas de cultivos utilizados, principalmente no tratamento controle, sem aplicação de P. Em 2008, a produtividade de milho no sistema consorciado com braquiária foi menor (16%) quando comparada à obtida no milho solteiro (Tabela 5). Entretanto, no ano seguinte (2009), as produtividades foram similares nos dois sistemas (Tabela 5). Acredita-se que a não aplicação de N em cobertura no milho em 2008 tenha contribuído para as diferenças observadas. Os híbridos testados apresentaram comportamento similar dentro dos sistemas de cultivos, apresentando, entretanto, diferenças significativas nas produtividades de grãos (Tabela 5).



Fotos: Antônio Marcos Coelho

Figura 8. Desenvolvimento vegetativo do milho e da braquiária em solo com diferentes níveis de fósforo.

As concentrações de P nos grãos aumentaram significativamente ($p \leq 0,01$) com aumento nos níveis de P aplicados, sendo os valores máximos observados no nível mais alto de P (Tabela 5). Mas este parâmetro não foi afetado pelo sistema de cultivo. Com relação às diferenças entre os híbridos, verificou-se que em 2008 elas foram significativas, sendo que o híbrido P30F35 apresentou em relação aos demais menor concentração de P nos grãos. Entretanto, no ano seguinte (2009), os híbridos apresentaram valores similares para este parâmetro (Tabela 5). Esses resultados são indicativos dos efeitos do manejo da cultura e do clima nas estimativas da concentração de P nos grãos em híbridos de milho.

Tabela 5. Produtividade de grãos de milho e concentração de fósforo nos grãos em função dos níveis de P no solo, sistema de cultivo e híbridos de milho.

Nível de P ¹	Sistema de cultivo	Prod. grãos de milho		P-grãos	
		2008	2009	2008	2009
kg ha ⁻¹		----- Mg ha ⁻¹ -----		----- g kg ⁻¹ -----	
0	Milho	6,21	4,87	1,44	1,79
(baixo)	Milho + Braquiária	4,41	5,68	1,45	1,87
218	Milho	6,57	6,72	1,52	2,36
(médio)	Milho + Braquiária	5,88	6,97	1,57	2,51
436	Milho	6,99	6,57	1,83	2,64
(alto)	Milho + Braquiária	6,69	7,13	1,94	2,83
0		5,31a	5,28b	1,45c	1,83c
218	Média Níveis P	6,23a	6,85a	1,55b	2,43b
436		6,48a	6,85a	1,88a	2,74a
Média	Milho	6,59a	6,06a	1,60a	2,26a
Sistema	Milho + Braquiária	5,66b	6,60a	1,65a	2,40a
	BRS 1010	5,09b	5,81b	1,73a	2,40a
	P30F35	6,98a	7,25a	1,48b	2,42a
Híbridos	DKB390/350	6,90a	6,16b	1,66a	2,25a
	BRS3060	5,55a	6,07b	1,64a	2,26a
Média geral		6,13	6,33	1,63	2,33
CV %		23	18	8	14

¹Níveis de P aplicados em 2003. ²Médias nas mesmas colunas seguidas pelas mesmas letras não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey 5%.

Eficiência associada ao uso de microrganismos (fungo micorrízico e *Azospirillum*)

A inclusão de inoculantes biológicos no manejo integrado de nutrientes tem por objetivo aumentar a eficiência de uso de nutrientes e reduzir a aplicação de fertilizantes inorgânicos, ajudando a explorar as reservas de fósforo acumuladas nos solos. Cepas individuais ou consórcios de microrganismos promotores do crescimento de plantas apresentam benefícios potenciais às culturas. Esses microrganismos podem ser inoculados diretamente ao solo, pulverizados em diferentes estádios do desenvolvimento das culturas, introduzidos via fertirrigação ou como revestimento das sementes antes da semeadura. São formulações sob medida que utilizam o conhecimento atual da função dos microrganismos para formulações de bioinoculantes para uma variedade de tipos de solos e sistemas de cultivo (Owen, et al., 2015). Os bioinoculantes projetados para promover o crescimento das plantas, com ênfase no suprimento de P por meio da exploração de reservas de P, com atributos específicos para a mobilização do P do solo, são denominados microrganismos mobilizadores de fósforo (MMP) (Pereira et al., 2020).

Visando verificar o efeito de microrganismos na eficiência de uso das reservas de P no solo, no experimento conduzido no ano agrícola 2012/2013 na área experimental, os tratamentos utilizados dentro de cada um dos três níveis de P pré-estabelecidos envolveram os sistemas de cultivo (milho solteiro e consorciado com braquiária), associados com a aplicação de microrganismos, fungo micorrízico arbuscular (MA) e azospirillum, isoladamente e em combinação, incluindo também um tratamento controle sem microrganismos.

A inoculação do *Rhizoglosum clarum* CNPMS05 foi feita à base de solo inóculo aplicado no sulco de semeadura na dosagem de 100 g por metro linear. A inoculação das sementes com as cepas de *Azospirillum brasilense* CMS11 e CMS1626 foi realizada na dose de 100 mL de inoculante líquido por hectare (equivalente a 100 mL de inoculante com 2×10^8 UFC mL⁻¹ por 60.000 sementes de milho). A inoculação foi realizada revestindo e misturando o inoculante e as sementes de milho em sacos plásticos, manualmente.

O milho, híbrido P30F35, foi semeado no espaçamento de 0,70 m e densidade de quatro sementes por metro. Como adubação de semeadura, foram aplicados 45 kg de N ha⁻¹ (ureia) e 90 kg de K₂O ha⁻¹ (cloreto de potássio). Na adubação de cobertura, realizada no estágio de cinco a seis folhas, foram aplicados 80 kg de N ha⁻¹ (ureia).



Fotos: Antônio Marcos Coelho

Figura 9. Aspectos de desenvolvimento vegetativo do milho solteiro e consorciado com braquiária em solo com diferentes níveis de P residual.

Os resultados de produtividade de grãos, em razão dos níveis de reservas de P no solo (efeito residual), dos sistemas de cultivo e da aplicação dos microrganismos são apresentados nas Tabelas 6 e 7. Verificou-se efeito dos níveis das reservas de P no solo, com aumentos significativos nas produtividades de milho, com aumentos da ordem de 10% e 24% (0,74 e 1,77 Mg ha⁻¹) nas produtividades de grãos, respectivamente nos níveis médio e alto em relação ao controle sem P. A interação entre níveis de reservas de P no solo e tratamentos com os microrganismos não foi significativa ($p>0,01$), assim como o efeito isolado desses tratamentos. Ou seja, dentro de cada nível de reservas de P no solo, a aplicação de microrganismos não proporcionou aumento significativo na produtividade de milho (Tabela 6).

No entanto, houve uma tendência de aumento dos teores de P nas folhas e nos grãos nos tratamentos inoculados com fungos MA em todos os níveis de P (Tabela 6). Para o sistema com milho solteiro a inoculação de fungos MA resultou nos maiores valores absolutos para produção de grãos e acúmulo de P nas folhas e nos grãos (Tabela 7). Por outro lado, no sistema milho consorciado com braquiária a inoculação do fungo MA proporcionou resultado inverso ao do milho solteiro, com menores valores médios para produtividade e acúmulo de P nas folhas e nos grãos (Tabela 7).

Por causa das variações obtidas nos resultados de inoculação, evidentemente, ainda existem lacunas no conhecimento sobre os fatores que afetam a inoculação desses microrganismos. Testes do inoculante de fungos MA comercial registrado no Brasil (Rootella BR), contendo uma estirpe de *Rhizoglomus intraradices* exótica originária de Israel, em solos com três níveis de fertilização com P (0%, 50% e 100% da dose recomendada), Stoffel et al. (2020), obtiveram aumentos médios de 54% no rendimento de grãos para a cultura do milho. Neste artigo, a inoculação foi feita nas sementes, o que é mais eficiente do que a inoculação com solo-inóculo na linha de plantio utilizada por nós. Outros fatores que afetam a resposta à inoculação de fungos MA são estirpe, tipo de solo, atividade e qualidade das populações de fungos MA autoctones, genótipos, entre outras.

A braquiária é uma planta utilizada para produzir inóculo de fungos MA em condições de laboratório, em sistemas denominados de vasos de cultivo (Souza et al., 2017). O cultivo desta forrageira em consórcio com o milho possivelmente ativa as populações de fungos MA nativos, aumentando sua

diversidade e densidade de propágulos. Porém, o que explica a tendência de redução com a inoculação é possivelmente a competição entre a estirpe introduzida no inóculo com as espécies de fungos MA nativas, que no caso desta área são compostas por diversas espécies efetivas para o milho, como *Claroideoglossum etunicatum*, *Fuscutata rubra*, *Racocetra crispa* (dados não publicados). Esta última foi recentemente isolada e descrita a partir de amostras coletadas da área deste experimento (Souza et al., 2018).

O cultivo da braquiária em consórcio com o milho, além de apresentar diversos benefícios para o sistema de plantio direto, possivelmente também favorece as populações de fungos MA nativos. Esses fungos são biotróficos obrigatórios e se beneficiam com a presença de raízes ativas de plantas compatíveis no sistema, como é o das pastagens com braquiária. A introdução de forrageiras em sistemas de produção com rotação anual de culturas melhora, independentemente da duração da pastagem, a manutenção da estrutura do solo e a conservação da biodiversidade e atividade microbiana, ao mesmo tempo em que diminuiu a ação de patógenos (Hoeffner et al., 2021).

Conforme revisado por Leggett et al. (2015), pesquisas conduzidas em campo, com várias culturas, em diferentes regiões climáticas, sistemas de cultivo e condições de manejo agrônomo, forneceram resultados conflitantes quanto ao efeito da inoculação do fungo *Penicillium bilaiae* (Jumpstart®), um solubilizador de fósforo, no aumento da produtividade das culturas. Os autores verificaram considerável variabilidade entre os anos na resposta do milho atribuída à inoculação das sementes com *Penicillium bilaiae*, com aumentos na produtividade de grãos, variando de 0,7% a 3,7%, em relação ao tratamento controle, sem inoculação.

Utilizando cepas de microrganismos comercializadas no Brasil, Pereira et al. (2020) verificaram aumentos no rendimento de grãos de 39% quando as sementes de milho foram inoculadas com *B. Subtilis* (CCTB04) na ausência da adubação fosfatada, e de 29% e 15% quando associado à aplicação de 17,5 e 70 kg de P_2O_5 ha⁻¹ respectivamente. Quando inoculado com *Azospirillum brasilense* (AzoTotal) e com aplicação de 105 kg de P_2O_5 ha⁻¹, o aumento na produção de grãos foi de 34%. Além disso, a inoculação com *B. subtilis* e *A. brasilense* aumentou a absorção de P, beneficiando o desenvolvimento dos componentes produtivos, levando a uma melhor eficiência no uso de P e maior rendimento de grãos de milho.

Tabela 6. Produtividade de grãos de milho, concentração de P nas folhas e nos grãos, em função dos níveis de P e da aplicação de microrganismos.

Nível de P ^{1/} kg ha ⁻¹	Tratamentos	Prod. grãos Mg ha ⁻¹	P - foliar g kg ⁻¹	P - grãos g kg ⁻¹
0 (baixo)	Azospirillum	7,71	1,79	1,72
	Fungo Micorrízico	7,35	1,86	1,77
	A + FM	7,45	1,86	1,72
	Testemunha	7,49	1,79	1,71
Média		7,50B ^{2/}	1,83C	1,73B
216 (médio)	Azospirillum	8,06	2,18	1,80
	Fungo Micorrízico	8,02	2,20	1,85
	A + FM	8,66	2,18	1,86
	Testemunha	8,21	2,12	1,75
Média		8,24AB	2,17B	1,81B
436 (alto)	Azospirillum	9,41	2,57	2,23
	Fungo Micorrízico	8,98	2,59	2,33
	A + FM	9,13	2,62	2,34
	Testemunha	9,58	2,49	2,31
Média		9,27A	2,57A	2,30A
Médias dos tratamentos	Azospirillum	8,39a	2,18a	1,92a
	Fungo Micorrízico	8,12a	2,22a	1,98a
	A + FM	8,41a	2,22a	1,97a
	Testemunha	8,43a	2,13a	1,92a
Média geral		8,34	2,19	1,95
CV %		11,0	9,0	8,0

^{1/}Níveis de P aplicados em 2003. ^{2/}Médias nas mesmas colunas seguidas pelas mesmas letras não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey 5%. Letras maiúsculas comparam níveis de P e letras minúsculas comparam os tratamentos de inoculação.

Tabela 7. Produtividade de grãos de milho, concentração de P nas folhas e nos grãos, em função dos sistemas de cultivo e da aplicação de microrganismos.

Sistema de cultivo	Tratamentos	Prod. grãos Mg ha ⁻¹	P - foliar g kg ⁻¹	P - grãos g kg ⁻¹
Milho	Azospirillum	8,42	2,18	1,85
	Fungo Micorrízico	8,70	2,34	2,01
	A + FM	8,28	2,20	1,92
	Testemunha	8,31	2,04	1,84
Média sistema		8,42a	2,19a	1,90b
Milho + Braquiária	Azospirillum	8,37	2,19	1,98
	Fungo Micorrízico	7,55	2,09	1,95
	A + FM	8,54	2,25	2,02
	Testemunha	8,55	2,22	2,00
Média sistema		8,25a	2,19a	1,99a

^{1/}Médias nas mesmas colunas seguidas pelas mesmas letras não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey 5%.

Eficiência da soja cultivada após milho consorciado com braquiária

Nos anos agrícolas 2009/2010 (após cultivos de milho + braquiária no outono inverno de 2008 e 2009), 2010/2011 e 2013/2014 (após cultivo de milho + braquiária em 2012-13), a área experimental foi cultivada com a cultura da soja. Foram utilizadas as cultivares Valiosa (2009/2010), M-SOY 7211 (2010/2011) e BRSMG 500 (2013/2014). Em nenhum ano foram realizadas adubações de semeadura, mas somente a inoculação das sementes com rizóbium. A semeadura foi realizada mecanicamente, utilizando o espaçamento entre linhas de 0,50 m e densidade de 15 sementes m^{-1} .

Os resultados de produtividade de grãos de soja são apresentados na Tabela 8. De modo geral, as produtividades de grãos de soja foram baixas, variando de 1,23 a 2,75 $Mg\ ha^{-1}$. Essas baixas produtividades de soja obtidas nessa pesquisa podem estar associadas ao fato de que as variedades utilizadas apresentam baixa adaptação às condições locais, visto que a fertilidade do solo em níveis considerados adequados (Tabela 1) e o uso de irrigação suplementar não são parâmetros que poderiam justificar as produtividades obtidas. Nessas condições, as respostas aos níveis de reservas de P no solo variaram entre anos, sendo que em 2009/2010 não foram observadas diferenças significativas, mas nos anos seguintes foram obtidos aumentos significativos na produtividade principalmente no nível mais alto de reservas de P no solo (Tabela 8).

Outra hipótese que pode ser levantada é a baixa eficiência da soja no aproveitamento das reservas de P no solo. Avaliando diferentes espécies vegetais quanto à eficiência na absorção e no uso de P através da técnica da diluição isotópica de ^{32}P , Fernandes (2001) verificou que o algodão e o arroz foram os mais eficientes na absorção de P, enquanto a crotalária, o caupi e a soja foram menos eficientes, sendo mais dependentes da adubação fosfatada. O milho apresentou eficiência intermediária. Essa pode ser a razão do alto valor de consumo de P_2O_5 (relação entre o consumo e a demanda da cultura) de 2,1 obtido para a soja, como reportado por Cunha et al. (2018) em pesquisa sobre o balanço de nutrientes na agricultura brasileira no período de 2013 a 2016. Assim, pode-se dizer que a dose de P_2O_5 aplicada na cultura da soja foi duas vezes a quantidade exportada nos grãos, indicando assim acúmulo de P fertilizantes nos solos.

Tabela 8. Produtividade de grãos de soja, cultivada em rotação com o milho solteiro (M) e consorciado com a braquiária (M+B).

Nível de P (kg ha ⁻¹) ¹	Sistema (soja após)	Produtividade de grãos (Mg ha ⁻¹)		
		2009-10	2010-11	2013-14
0	M	2,62	1,30	1,97
(baixo)	M+B	2,52	1,23	2,14
Média		2,57a ²	1,27b	2,05b
218	M	2,75	1,87	2,27
(médio)	M+B	2,34	2,02	2,17
Média		2,55a	1,95a	2,27ab
436	M	2,88	2,21	2,33
(alto)	M+B	1,95	2,13	2,47
Média		2,42a	2,17a	2,40a
Média	M	2,75A ²	1,77A	2,24A
Sistema	M+B	2,27B	1,82A	2,21A
Média geral		2,51	1,79	2,23
CV %		15	15	13

¹Níveis de P aplicados em 2003. ²Médias nas mesmas colunas seguidas pelas mesmas letras não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey 5%. Letras minúsculas comparam níveis de P e letras maiúsculas comparam sistemas.

Por outro lado, a produtividade de soja foi afetada pelo sistema milho consorciado com braquiária no experimento conduzido em 2009/2010, sendo similares nos anos seguintes (Tabela 8). As menores produtividades da soja cultivada em sucessão ao milho consorciado com a braquiária em 2009/2010, em todos os níveis de P (Tabela 8), podem estar associadas à deficiência de N apresentada pelas plantas na fase inicial de desenvolvimento (baixa eficiência inicial do rizóbium em fixar o N para a soja), como observado no campo pelo amarelecimento das folhas. Conforme relatado anteriormente, é importante mencionar que a soja cultivada nesse ano foi em sucessão a dois cultivos de milho consorciado com a braquiária, com aplicação de baixas doses de N no milho, associado ao elevado aporte de palhadas de milho e de braquiária deixadas na superfície do solo (Tabelas 9 e 10).



Fotos: Antônio Marcos Coelho

Figura 10. Aspectos de desenvolvimento vegetativo das cultivares de soja em solo com diferentes níveis de P residual.

Ciclagem de N, P e K na biomassa da braquiária e do milho

Nesses experimentos, visando quantificar a ciclagem de nutrientes, principalmente do P, o potencial de produção de biomassa da braquiária consorciada com o milho foi avaliado aos 30 dias após a colheita do milho, e as concentrações de N, P e K na matéria seca foram determinadas. Em 2008 e 2009, as produtividades de matéria seca de braquiária não foram afetadas pelos níveis de P no solo (Tabela 9), apresentando rendimentos similares de matéria seca ($3,34 \text{ Mg ha}^{-1}$) nos dois anos, com uma concentração média de P de $1,41 \text{ g kg}^{-1}$ de matéria seca. Como foi utilizada como planta de cobertura de solo, a ciclagem de P foi da ordem de $4,52 \text{ kg P}$ ($10 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$). Por outro lado, verifica-se que as quantidades médias de N (50 kg ha^{-1}) e K (77 kg ha^{-1}) na biomassa de braquiária, são mais expressivas do que aquelas observadas para o P (Tabela 9).

Tabela 9. Produção de biomassa seca de braquiária consorciada com o milho e quantidades de nutrientes extraídas e ciclagens para o solo.

Nível P ^{1/} kg ha ⁻¹	B. Seca Mg ha ⁻¹	N		P		K	
		g kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	g kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	g kg ⁻¹	kg ha ⁻¹
Ano - 2008							
0-baixo	3,76a ^{2/}	15,22a	58,92a	0,68b	2,42a	20,50a	75,67a
218-médio	2,85a	15,45a	43,96a	0,87b	2,40a	20,96a	61,35a
436-alto	3,34a	13,96a	49,73a	1,08a	3,32a	21,77a	71,84a
Média	3,32	14,87	50,87	0,88	2,71	21,08	69,61
CV %	39	17	55	26	39	14	46
Ano - 2009							
0-baixo	3,72a	15,31a	57,05a	1,45b	5,33b	24,96a	92,58a
218-médio	3,28a	17,44a	56,07a	1,95b	5,89b	26,33a	84,00a
436-alto	3,07a	16,64a	50,93a	2,47a	7,79a	25,35a	77,64a
Média	3,36	16,47	54,68	1,95	6,34	25,55	84,74
CV %	30	10	30	27	37	8	29
Ano 2012 / 2013							
0-baixo	3,43b ^{2/}	13,03b	44,23b	0,91b	3,08b	25,57a	86,67a
218-médio	4,10a	14,77a	60,40a	0,86b	3,51b	24,30a	98,88a
436-alto	3,70ab	15,07a	55,17a	1,26a	4,57a	25,13a	92,00a
Média	3,74	14,28	53,27	1,01	3,72	25,00	92,52
CV %	29	9	28	18	31	11	30

^{1/}Níveis de P aplicados em 2003. ^{2/}Médias nas mesmas colunas seguidas pelas mesmas letras não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey 5%.

Em 2012/2013, as produtividades de biomassa seca de braquiária consorciada com o milho, assim como as concentrações e extrações de N e P, foram afetadas pelos níveis de P no solo, com os maiores valores obtidos nos níveis médio e alto de P (Tabela 9). Para o K, os valores foram similares, não sendo afetados pelos níveis de P aplicados. Por outro lado, verifica-se que as concentrações e extrações de N e K e, conseqüentemente, a ciclagem desses nutrientes foram mais expressivas do que aquelas observadas para o P. A produtividade média de biomassa seca foi de 3,74 Mg ha⁻¹, com concentrações médias de N, P e K de 14,28; 1,01 e 25,00 g kg⁻¹, respectivamente. Como foi utilizada como planta de cobertura de solo, a ciclagem de N, P e K, foi de 53,27; 3,72 (8,52 kg P₂O₅ ha⁻¹) e 92,52 kg ha⁻¹ (111 kg K₂O ha⁻¹), respectivamente (Tabela 9).

Para o milho, embora com maiores produtividades de biomassa, as concentrações e as quantidades de N, P e K contidos nela seguem os mesmos padrões da braquiária, ou seja, maiores teores de N e K e baixos de P (Tabela 10).

Tabela 10. Produção de biomassa seca de milho e quantidades de nutrientes extraídas e ciclagens para o solo.

Nível P ^{1/} kg ha ⁻¹	B. Seca Mg ha ⁻¹	N g kg ⁻¹	P g kg ⁻¹	K g kg ⁻¹
		kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
Ano – 2009				
0-baixo	5,67c ^{2/}	6,91b	0,27b	1,53b
218-médio	6,57b	7,35a	0,25b	1,64b
436-alto	8,35a	7,39a	0,34a	2,83a
Média	6,86	7,21	0,28	2,00
CV %	9	8	22	26
Ano 2012 / 2013				
0-baixo	6,71b	8,22a	0,35b	2,36b
218-médio	7,07b	7,82a	0,36b	2,54b
436-alto	8,60a	8,93a	0,45a	3,88a
Média	7,46	8,32	0,39	2,93
CV %	7	15	21	19

^{1/}Níveis de P aplicados em 2003. ^{2/}Médias nas mesmas colunas seguidas pelas mesmas letras não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey 5%.



Fotos: Antônio Marcos Coelho

Figura 11. Biomassa de milho e braquiária na colheita do milho e o desenvolvimento da braquiária nas parcelas do sistema consorciado e da soja após milho.

Produção total de grãos, exportação de P e balanço de P.

Os dados de produção total de grãos, concentração média de P nos grãos, exportação de P nos grãos e balanço parcial de P (quantidade aplicada menos exportada nos grãos) são apresentados na Tabela 11. Esses resultados representam um resumo dos dados obtidos nos experimentos conduzidos na área experimental, como apresentados e discutidos anteriormente.

A produção total de grãos obtida no período analisado, com aplicação de 218 e 436 kg de P ha⁻¹, foi de 51,76 Mg ha⁻¹ e 54,45 Mg ha⁻¹, respectivamente, contra 40,30 Mg ha⁻¹ obtida sem aplicação de P, representando aumentos de 28 % e 35% em razão do efeito residual de P aplicado em 2003. Esses percentuais confirmam o valor agrônomo e econômico do efeito residual de longo prazo do P aplicado (Tabela 11) o que também indica o valor residual do P aplicado como um índice de eficiência do uso de P em termos de ganhos em produtividade de grãos.

O método de balanço (PUE_g), ou seja, o P total removido nos grãos de milho e soja dividido pelo P total aplicado (TPR/TPA), expresso em porcentagem, foi usado para calcular a recuperação do P aplicado pelas culturas de milho e soja. Assim, pode ser medida a eficiência de uso de P, expressando a remoção total de P nas culturas como uma porcentagem do P total aplicado. Utilizando esse conceito, o total de P removido nos grãos de 116,61 Kg ha⁻¹ e 136,22 Kg ha⁻¹ representou 53,50 % e 31,24 %, respectivamente, das doses de 218 e 436 kg ha⁻¹ do P total aplicado (Tabela 11), indicando assim um balanço positivo, em que significativas quantidades de P permaneceram ainda como reservas no solo.

De acordo com Syers et al. (2008), o método do balanço é apropriado para calcular a recuperação de P e a eficiência por uma importante razão. Para o N, o método de diferença, que tem sido amplamente usado por muitos anos, é apropriado porque muito pouco de uma aplicação de N permanece no solo como N mineral para beneficiar uma cultura subsequente. No entanto, quando P é adicionado ao solo como fertilizante químico ou orgânico pode haver um grande resíduo de P, o que pode aumentar o rendimento das culturas subsequentes por vários anos.

Tabela 11. Efeito residual do P nas produtividades acumuladas de grãos, concentração média de P nos grãos e quantidades exportadas nos grãos, nos experimentos com seis cultivos de milho e três cultivos de soja, conduzidos no período de 2003 a 2014.

Períodos	Culturas	P – Nível ¹	Prod. total de grãos	Conc. P nos grãos ²	P exportado nos grãos
		(kg ha ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹)	(kg Mg ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)
2003 - 2006	Milho (3) ³	0 - Baixo	16,32	2,10	34,27
2008 - 2009	Milho (2)	0 - Baixo	10,59	1,64	17,37
2012 - 2013	Milho (1)	0 - Baixo	7,50	1,73	12,97
2009 - 2014	Soja (3)	0 - Baixo	5,89	4,37	25,74
Total		0	40,30		90,35
2003 - 2006	Milho (3)	218 - Médio	23,67	2,03	48,05
2008 - 2009	Milho (2)	218 - Médio	13,08	1,99	26,03
2012 - 2013	Milho (1)	218 - Médio	8,24	1,81	14,91
2009 - 2014	Soja (3)	218 - Médio	6,77	4,08	27,62
Total		218	51,76		116,61
2003 - 2006	Milho (3)	436 - Alto	24,50	1,89	46,30
2008 - 2009	Milho (2)	436 - Alto	13,69	2,31	31,62
2012 - 2013	Milho (1)	436 - Alto	9,27	2,30	21,32
2009 - 2014	Soja (3)	436 - Alto	6,99	5,29	36,98
Total		436	54,45		136,22
Total geral	(9)		146,51		343,18

¹Níveis de P aplicados no solo em 2003. ²Concentração de P nos grãos refere-se aos dados médios obtidos no período para cada cultura. ³Números entre parênteses referem-se ao número de cultivos.

Outro método para o cálculo do balanço de P pode ser obtido utilizando a seguinte equação: $P\text{-balanço eficiência (\%)} = (P\text{-exportado}) / (P\text{-exportado} + \Delta P \text{ solo}) \times 100$. Onde ΔP é a diferença entre o P total no solo fertilizado menos o P total no solo sem aplicação de P, obtidos ao final do experimento. Utilizando esse conceito, Soltangheisi et al. (2020), em experimentos de longa duração, conduzidos no período de 2009 a 2017 (nove anos), com a cultura do milho, produtividade total acumulada de 52 Mg ha⁻¹ de grãos e aplicação total de 335 kg de P ha⁻¹ (superfosfato simples), obtiveram índices de eficiência variando de 47% a 55%, em função da presença ou ausência de plantas utilizadas como cobertura de solo. É importante mencionar que esses índices de recuperação foram obtidos com aplicação anual de doses de P (46 e 59 kg ha⁻¹).

Cunha et al. (2018) relataram dados sobre o balanço de nutrientes na agricultura brasileira de 2013 a 2016, mostrando fatores de consumo de P₂O₅ (relação entre consumo e a demanda da cultura) em torno de 1,2 e 2,1 para o milho e a soja, respectivamente. A taxa de uso de fertilizantes, expressando a exportação no produto colhido em relação ao consumo (quantidade apli-

cada), foi de 80% e 47%, respectivamente para o milho e a soja. Portanto, a taxa média de P_2O_5 aplicada para o milho está 20% acima da exportação e de 53% para a soja, indicando menor eficiência no uso de fertilizantes.

Outro índice de eficiência do uso de P muito utilizado e de grande importância para os produtores é o índice de eficiência agrônômica (IEA), calculado pela equação: $IEA = (\text{produção total de grãos com adubação fosfatada} - \text{produção total de grãos da testemunha}) / \text{dose de P aplicada}$. Com base nessa expressão, foram obtidos os IEA de 52 e 32 kg de grãos por kg de P aplicado, respectivamente, para as doses de 218 e 436 kg de $P\ ha^{-1}$, durante o período (2003-2014) após a aplicação das doses de P.

O estoque residual de P no solo foi calculado a partir da diferença entre o aporte de P via fertilizante aplicado em 2003 e a exportação total de P nos grãos das culturas de milho e de soja, no período de 2003 até 2013, calculada em kg de $P\ ha^{-1}$ com base na produtividade total e no teor médio de P nos grãos (Tabela 11). Então, utilizando esse conceito, ficaram como reservas de P no solo as quantidades de 100 e 300 kg de $P\ ha^{-1}$.

Assim, após vários anos de exploração agrícola, o estoque de P nos solos é uma grande reserva deste elemento, que pode ser explorada pelos produtores. Como consequência, é comum encontrar áreas cuja biodisponibilidade de P é duas ou mais vezes superior ao nível considerado adequado ou suficiente para uma satisfatória produção das culturas, na ausência da aplicação deste elemento naquele ano agrícola.

O potencial de aproveitamento dessas reservas foi avaliado a partir de 2014, em experimentos com as culturas de milho solteiro e consorciado com a braquiária e em rotação com a soja. Para avaliar o efeito residual dessas reservas de P no solo quando comparado às aplicações recentes de P, foram incluídos tratamentos com a reposição de doses de P (0, 50 e 100 kg de $P_2O_5\ ha^{-1}$) como adubação de manutenção. Os resultados parciais dessa pesquisa foram apresentados e publicados no II Congresso Mundial sobre Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta – <http://www.wccif2021.com.br> (Coelho et al., 2021).

Entretanto, é importante lembrar de que a produtividade de uma cultura e a quantidade de P absorvido podem ser afetadas não somente pela “biodisponibilidade” de P do solo, mas também por uma variedade de fatores que

variam de ano para ano. Esses fatores incluem: clima (precipitação, temperatura, luz) durante a estação de crescimento; condições agronômicas, incluindo a “biodisponibilidade” de outros nutrientes essenciais, especialmente N e K; estresse biótico (pragas e doenças); e fatores de solo, como textura e estrutura.

Conclusões

O desenvolvimento do milho e da soja no campo e os aumentos nas produtividades de grãos, obtidas com o aumento dos níveis de P no solo, evidenciam claramente que P residual contribui para o pool prontamente biodisponível de P para as plantas, mas a taxa de liberação deve ser suficiente para manter o valor próximo ou acima do nível crítico necessário para atender as exigências de P das plantas de alto rendimento.

Entre as tecnologias e estratégias utilizadas, a maior eficiência no aproveitamento das reservas de P do solo foi verificada entre os híbridos de milho, como indicado pelas diferenças no aumento de produtividades de grãos.

Os resultados evidenciam a importância da disponibilidade de híbridos de milho que têm a capacidade de uma melhor aquisição/utilização do fósforo em solo com adequada ou baixa “biodisponibilidade de P residual”, inferior ao nível crítico considerado.

Nessas pesquisas não foram verificadas evidências de que o uso do consórcio de milho e braquiária e/ou a aplicação de microrganismos (Fungo micorrízico e *Azospirillum*) podem, diretamente, otimizar o aproveitamento das reservas de fósforo do solo, em aumentar potencialmente a bioacessibilidade deste nutriente pelas cultura de milho, braquiária e soja.

Após nove cultivos, sendo seis de milho e três de soja, os cálculos do balanço de P no sistema indicaram que as quantidades totais de P exportadas nos grãos foram inferiores às doses de P aplicadas, ficando, assim, um estoque residual de P-fertilizante no solo bastante significativo.

Os resultados evidenciaram que existe grande potencial de redução na demanda por fertilizantes fosfatados, caso as reservas de P no solo sejam utilizadas. Entretanto, o potencial e o tempo de aproveitamento das reservas de P no solo estão intimamente relacionados à biodisponibilidade do P resi-

dual (extrator Mehlich¹), cujos valores devem estar acima dos níveis críticos pré-estabelecidos que proporcionam produtividade econômica aos agricultores. Assim, a capacidade em avaliar os níveis de “biodisponibilidade” de P no solo de forma regular, para estabelecer recomendações mais precisas desse nutriente, é fundamental para garantir um melhor uso de fertilizantes.

Agradecimentos - Financiamento

Essas pesquisas foram, no período de 2003 a 2006, parcialmente financiadas pela Fundação McNight - Collaborative Crop Research Program, e, posteriormente, pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, Projeto: Rede MP1-FertBrazil (01.13.05.001.01.02.006) Nutrientes para Agricultura Brasileira.

Referências

ALMEIDA, D. S.; MENEZES-BLACKBURN, D.; ZHANG, H.; HAYGARTH, P. M.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus availability and dynamics in soil affected by long-term ruzigrass cover crop. **Geoderma**, v. 337, p. 434-443, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.056>.

ALMEIDA, D. S.; PENN, C. J.; ROSOLEM, C. A. Assessment of phosphorus availability in soil cultivated with ruzigrass. **Geoderma**, v. 312, p. 64-73, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.003>.

BODDEY, R. M.; RAO, I. M.; THOMAS, R. J. Nutrient cycling and environmental impact of *Brachiaria* pastures. In: MILES, J.; MAASS, B. L.; VALLE, C. B. (ed.). **Brachiaria: biology, agronomy and improvement**. Cali: CIAT; Campo Grande: Embrapa-CNPGC, 1996. p. 72-86.

COELHO, A. M.; SOUZA, F. A. de; RESENDE, A. V. de; OLIVEIRA, A. C. de. Maize and brachiaria intercropping system efficiency in the use of soil phosphorus reserves and fresh fertilizer. In: WORLD CONGRESS ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK-FORESTRY SYSTEMS, 2., 2021. Proceedings reference... Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 591-596. WCCLF. Evento online.

COELHO, A. M. Maize and brachiaria intercropping system efficiency in the use of soil phosphorus reserves. In: WORLD CONGRESS ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK-FOREST SYSTEMS; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS, 3., 2015, Brasília, DF. **Towards sustainable intensification**: proceedings. Brasília, DF: Embrapa, 2015a.

COELHO, A. M. Efficiency in the use of soil phosphorus reserves by soybean cultivated after maize intercropping with brachiaria. In: WORLD CONGRESS ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK-FOREST SYSTEMS; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS, 3., 2015, Brasília, DF. **Towards sustainable intensification**: proceedings. Brasília, DF: Embrapa, 2015b.

COELHO, A. M. Maize and brachiaria intercropping system efficiency in the use of soil phosphorus reserves. In: WORLD FERTILIZER CONGRESS OF CIEC, 16., 2014, Rio de Janeiro. **Technological innovation for a sustainable tropical agriculture**: proceedings. Rio de Janeiro: International Scientific Centre of Fertilizers, 2014. p. 368-370.

COELHO, A. M.; PARENTONI, S. N.; GAMA, E. E. G.; SCHAFFERT, R. E. Planning of test areas based on soil spatial variability to evaluate abiotic stresses in crops. In: FROM partnership to community: the arc of change in the CCRP, 2004. Valls, Holanda: The McNight Foundation Collaborative Crop Research Program, 2004.

COELHO, A. M.; ALVES, V. M. C. Adubação fosfatada na cultura do milho. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, São Pedro, SP. **Fósforo na agricultura brasileira**: anais. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2004. p. 243-283.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E. de. Adubação fosfatada na cultura do milho sob condições irrigadas. In: CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE MILHO E SORGO. **Relatório Técnico Anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo 1992-1993**. Sete Lagoas, 1994. v. 6, p. 40-42.

COELHO, A. M.; PARENTONI, S. N.; GAMA, E. E. G.; SCHAFFERT, R. E.; ALVES, V. M. C.; GODOY, G. L. Effect of the soil-solution ratio on the sensibility of the P extractor Mehlich1 to discriminate the differences in productivity of maize hybrids contrasting for phosphorus efficiency. In: INTERNATIONAL

SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 2. 2003, Perth. **Proceedings...** Perth: University of Western Australia, 2003. p. 98-99.

CUNHA, J. F. da; FRANCISCO, E. A. B.; PROCHNOW, L. I. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira no período de 2013 a 2016. **Informações Agronômicas**, n. 162, p. 1-14, 2018.

DOYDORA, S.; GATIBONI, L.; GRIEGER, K.; HESTERBERG, D.; JONES, J. L.; MCLAMORE, E. S.; PETERS, R.; SOZZANI, R.; BROECH, L. V. den; DUCKWORTH, O. W. Accessing legacy phosphorus in soils. **Soil System**, v. 4, n. 4, article 74, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems4040074>.

EGHBALL, B.; SHANAHAN, J. F.; VARVEL, G. E.; GILLEY, J. E. Reduction of high soil test phosphorus by corn and soybean varieties. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 5, p. 1233-1239, 2003. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2003.1233>.

FERNANDES, C. **Eficiência de diferentes culturas e híbridos de milho quanto a utilização de fósforo em solos de cerrado**. 2001. 51 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2001.

FERREIRA, P. A. A.; GIROTTI, E.; TRENTIN, G.; MIOTTO, A.; MELO, G. W. B. de; CERETTA, C. A.; KAMINSKI, J.; DEL FRARI, B. K.; MARCHEZAN, C.; SILVA, L. O. S.; FAVERSANI, J. C.; BRUNETTO, G. Biomass decomposition and nutrient release from black oat and hairy vetch residues deposited in a vineyard. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1621-1632, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832014000500027>.

FERROL, N.; AZCÓN AGUILAR, C.; PÉREZ-TIENDA, J. Review: arbuscular mycorrhizas as key players in sustainable plant phosphorus acquisition: an overview on the mechanisms involved. **Plant Science**, v. 280, p. 441-447, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.11.011>.

FINKEL, O. M.; CASTRILLO, G.; HERRERA PAREDES, S.; GONZALES, I. S.; DANGL, J. L. Understanding and exploiting plant beneficial microbes. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 38, p. 155-163, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.04.018>.

HEFFER, P.; PRUD'HOMME, M.; MUIRHEAD, B.; ISHERWOOD, K. **Phosphorus fertilization: issues and outlook**. Colchester: International Fertilizer Society, 2006. 33 p. Proceedings 586.

HOEFFNER, K.; BEYLICH, A.; CHABBI, A.; CLUZEAU, D.; DASCALU, D.; GRAEFE, U.; GUZMÁN, G.; HALLAIRE, V.; HANISCH, J.; LANDA, B. B.; LINSLER, D.; MENASSERI, S.; ÖPIK, M.; POTTHOFF, M.; SANDOR, M.; SCHEU, S.; SCHMELZ, R. M.; ENGELL, I.; PÉRÈS, G. Legacy effects of temporary grassland in annual crop rotation on soil ecosystem services. **Science of the Total Environment**, v. 780, 146140, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146140>.

JAVOID, A. Arbuscular mycorrhizal mediated nutrition in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 32, p. 1595-1618, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904160903150875>.

LEGGETT, M.; NEWLANDS, N. K.; GREENSHIELDS, D.; WEST, L.; INMAN, S.; KOIVUNEN, M. E. Maize yield response to a phosphorus-solubilizing microbial inoculation in field trials. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, p. 1467-1478, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859614001166>.

LINO, A. C. M.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GALINDO, F. S.; MAESTRELO, P. R.; RODRIGUES, M. A. C. Effect of phosphorus applied as monoammonium phosphate-coated polymers in corn culture under no-tillage system. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 39, n. 1, p. 99-112, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2018v39n1p99>.

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

OLIVEIRA, C. A.; ALVES, V. M. C.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; SCOTTI, M. R.; CARNEIRO, N. P.; GUIMARÃES, C. T.; SCHAFFERT, R. E.; SÁ, N. M. H. Phosphate solubilizing microorganisms isolated from rhizosphere of maize cultivated in an oxisol of the Brazilian Cerrado Biome. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, p. 1782-1787, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.012>.

OLIVEIRA, L. E. Z. **Biodisponibilidade de fósforo residual em diferentes manejos de solo e adubação**. 2018. 83 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

OWEN, D.; WILLIAMS, A. P.; GRIFFITH, G. W.; WITHERS, P. J. A. Use of commercial bio-inoculants to increase agricultural production through improved phosphorus acquisition. **Applied Soil Ecology**, v. 86 p. 41-54, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.09.012>.

PARENTONI, S. N.; SOUZA JÚNIOR, C. L. de; ALVES, V. M. C.; GAMA, E. E. G.; COELHO, A. M.; OLIVEIRA, A. C. de; GUIMARÃES, C. T.; VASCONCELOS, M. J. V. de; PACHECO, C. A. P.; MEIRELLES, W. F.; MAGALHÃES, J. V. de; GUIMARÃES, L. J. M.; SILVA, A. R. da; MENDES, F. F.; SCHAFFERT, R. E. Inheritance and breeding strategies for phosphorus efficiency in tropical maize (*Zea mays* L.). **Maydica**, v. 55, n. 1, p. 1-15, 2010.

PARENTONI, S. N.; GAMA, E. E. G.; SANTOS, M. X.; PACHECO, C. A. P.; GUIMARÃES, P. E.; MEIRELLES, W. F.; RIBEIRO, P. H. E.; BAHIA FILHO, A. F. C.; GUIMARÃES, C.; PAIVA, E. Melhoramento para adaptação a solos ácidos, tolerância à toxidez de alumínio e eficiência no uso de fósforo em milho. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., 2002, Florianópolis.

Meio ambiente e a nova agenda para o agronegócio de milho e sorgo: [resumos expandidos]. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. CD-ROM. Seção de Palestras.

PEREIRA, N. C. M.; GALINDO, F. S.; GASOLA, R. P. D.; DUPAS, E.; ROSA, P. A. L.; MORTINHO, E. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Corn yield and phosphorus use efficiency response to phosphorus rates associated with plant growth promoting bacteria. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, n. 40, p. 1-12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00040>.

SOLTANGHEISI, A.; TELES, A. P. B.; SARTOR, L. R.; PAVINATO, P. S. Cover cropping may alter legacy phosphorus dynamics under long-term fertilizer addition. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, article 13, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00013>.

SOUZA, F. A. de; SILVA, I. R.; BARRETO, M. B. B. de; OEHL, F.; GOTO, B. T.; MAIA, L. C. *Racocetra crispa* (Glomeromycotina) delimited by integrative evidence based on morphology, long continuous nuclear rDNA sequencing and phylogeny. **Mycological Progress**, v. 17, p. 999-1011, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11557-018-1410-9>.

SOUZA, F. A. de; SCHLEMPER, T. R.; STURMER, S. L. A importância da tecnologia de inoculação de fungos micorrízicos para a sustentabilidade na olericultura. In: LOPES, C. A.; PEDROSO, M. T. M. (ed.). **Sustentabilidade e horticultura no Brasil: da retórica à prática**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 223-251.

STOFFEL, S. C. G.; SOARES C. R. F. S.; MEYER, E.; LOVATO, P. E.; GIANCHINI, A. J. Yield increase of corn inoculated with a commercial arbuscular mycorrhizal inoculant in Brazil. **Ciência Rural**, v. 50, n. 7, p. 1-10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200109>.

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use**: reconciling changing concepts of soil phosphorus behavior with agronomic information. Rome: FAO, 2008. 108 p. (FAO. Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, 18).

TIRADO, R.; ALLSOPP, M. **Phosphorus in agriculture**: problems and solutions. Amsterdam: Greenpeace International, 2012. 35 p. Technical report.



Milho e Sorgo



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL

