

COMO MANEJAR FÓSFORO NO SISTEMA DE PRODUÇÃO

Ed. 02 | DEZ/2022

AUTORES

André Somavilla

Eng. Agr. Dr. Consultor na Raízes Consultoria e pesquisador em Solos pela Agrodinâmica Pesquisa Agrícola. andre.somavilla@agrodinamica.net.br

Daniela Basso Facco

Eng. Agr. Ma. Pesquisadora em Solos do IAGRO-MT. daniela.facco@iagromt.org.br

Rodrigo K. Hammerschmitt

Eng. Agr. Me. Pesquisador em Solos e Coordenador de Pesquisa do IAGRO-MT. rodrigo.knevez@iagromt.org.br

Leandro Zancanaro

Eng. Agr. Me. Pesquisador e Consultor Raízes Consultoria. leandrozancanaro@raizesconsultoria.com.br

Táimon Semler

Eng. Agr. Pesquisador e Consultor na Raízes Consultoria. taimonsemler@raizesconsultoria.com.br

Franklin W. V. de Oliveira

Eng. Agr. Especialista em Proteção de Plantas. Coordenador de Projetos de Defesa Agrícola da Aprosoja-MT. franklin.oliveira@aprosoja.com.br

Gabriel Augusto da Silva

Eng. Agr. Analista de Projetos Defesa Agrícola da Aprosoja-MT. gabriel.silva@aprosoja.com.br

Jerusa Rech

Eng. Agr. Dra. Gerente de Defesa Agrícola da Aprosoja-MT. jerusa.rech@aprosoja.com.br

Karoline C. Barros

Eng. Agr. Ma. Analista de Projetos Defesa Agrícola da Aprosoja-MT. karoline.barros@aprosoja.com.br

FÓSFORO COMO NUTRIENTE ESSENCIAL

Para um elemento químico ser elevado ao grau de “essencial” é preciso que este cumpra uma série de requisitos. O primeiro e mais importante consiste em sua ausência impossibilitar o curso normal do ciclo de vida dos organismos. Este quesito é perfeitamente contemplado pelo elemento químico fósforo (P). Isso porque, o P é um componente chave no composto orgânico trifosfato de adenosina (ATP), em fosfolípidios, no ácido desoxirribonucléico (DNA), entre outros compostos. Sendo assim, a falta de suprimento de P impacta fundamentalmente nos processos de transporte de energia, síntese de proteínas, transferência genética, divisão celular e no crescimento dos tecidos meristemáticos. Por outro lado, o suprimento adequado de P às plantas melhora os processos de fotossíntese, floração, frutificação e maturação.

No corpo vegetal, o P é muito móvel e, quando em falta, é transferido de folhas mais velhas para mais jovens, ocasionando sintomas visuais de deficiência do nutriente. A deficiência de P, causa menor crescimento da planta (proporcionando um aspecto de planta raquítica) (**Figura 1**) e induz a produção em excesso de antocianinas, dando às folhas mais velhas uma coloração levemente purpúrea. Na cultura do milho, seria uma planta com folhas velhas com aspecto arroxeadado nas bordas. Além de sua essencialidade, o P é considerado um macronutriente devido a sua elevada demanda pelos vegetais; os teores de P no tecido foliar de plantas saudáveis está entre 0,1–0,4% da matéria seca (Weil e Brady, 2017). Associado a elevada demanda, a absorção de P pelas plantas ocorre via sistema radicular e, portanto, a manutenção de teores satisfatórios de P disponível no solo é indispensável para o crescimento vegetal (Tian et al., 2019) e, neste aspecto, o aporte antrópico de P é fundamental.



Figura 1 - Plantas com menor crescimento e aspecto raquítico devido a falta de suprimento adequado de P. Fonte: Leandro Zancanaro (arquivo pessoal).

DINÂMICA DO P EM SOLOS DO CERRADO

Para compreensão da dinâmica do P no solo, independente de qual seja o solo, é necessário entender, a priori, um pouco do elemento químico P e suas propriedades. O arranjo químico e a valência conferem ao elemento ^{31}P alta reatividade e, embora possa assumir quatro números de oxidação (+1, +3, +4 e +5), jamais será encontrado na forma catiônica no solo. A forma mais comum e abundante do P na crosta terrestre é em ligação a átomos de oxigênio formando o oxianion fosfato. Neste caso, o P coordena quatro átomos de oxigênio em uma conformação tetraedral (PO_4^{3-}) extremamente estável e, além disso, três dos quatro oxigênios do fosfato são altamente reativos. A elevada reatividade do oxianion fosfato é decisiva para o comportamento químico de adsorção e disponibilidade de P nos solos, especialmente solos mais intemperizados como aqueles ocorrentes no cerrado brasileiro.

No solo, o P pode ocorrer nas formas inorgânicas (Pi) ou orgânicas (Po). As formas inorgânicas do P são ortofosfato (HPO_4^{-2} e H_2PO_4^-) na solução do solo e disponível para as plantas; ligado a cátions, como cálcio, formando fosfatos de cálcio geogênicos (provenientes do material de origem do solo) ou antropogênicos (provenientes da ação humana); adsorvido de forma específica a argilominerais e oxi-hidróxidos de Fe e Al. Na forma orgânica o P está ligado a pelo menos um átomo de carbono, formando principalmente ortofosfato monoésteres (por exemplo, fosfatos de inositol e monofosfato de adenosina) e ortofosfato diésteres (por exemplo, ácidos nucleicos, fosfolipídeos) que constituem a matéria orgânica do solo e a biomassa microbiana do solo.

Cabe ressaltar que a forma química P_2O_5 , comumente utilizada no meio agrícola para expressar teores de P, não existe. P_2O_5 é apenas uma forma convencional pelo homem para expressar teores de P. Isso não significa que sua utilização seja equivocada. Pelo contrário, os sistemas de recomendação atualmente empregados são baseados na utilização desta unidade. Entretanto, o agricultor deve ficar atento quando for calcular doses de reposição de P baseado na exportação do nutriente, uma vez que, os teores são expressos em “mg de P kg^{-1} ”. A forma correta de transformar kg de P em kg de P_2O_5 é obtida pela multiplicação pelo fator 2,29.

Em condições naturais, solos do cerrado brasileiro possuem teores totais de P em torno de 200 mg/kg^{-1} (Pavinato et al., 2020) e teores de P disponível muito baixos. Entretanto, a vegetação nativa consegue sobreviver graças a intensa ciclagem de nutriente que ocorre no sistema e a elevada capacidade adaptativa às condições de baixa disponibilidade de nutrientes. Neste caso, as frações orgânicas e inorgânicas de P permanecem em equilíbrio graças a ciclagem promovida pela atividade biológica endêmica e suprem a demanda da vegetação.

Quando o cerrado é “aberto” e inicia-se o processo agropecuário, os reduzidos teores de P não são suficientes para suprir as demandas das culturas agrícolas. Neste caso, há a necessidade de adição de P para elevação dos níveis de disponibilidade do nutriente. A adição de fertilizantes solúveis aos solos causa um desequilíbrio nas condições naturais e um excesso de P na solução do solo devido a dissolução do fertilizante. A partir daí o P pode seguir caminhos contrários para reestabelecimento do equilíbrio químico, como por exemplo, ser adsorvido aos grupos funcionais reativos do solo, ser incorporado a biomassa microbiana ou se manter disponível e ser absorvido pelas plantas. Seguir um ou outro destes caminhos e a magnitude destes processos está atrelada a características como pH do solo, composição da fração argila, atividade biológica, acúmulo de matéria orgânica no solo, presença de plantas, revolvimento do solo, dinâmica da água no solo, etc.

Diferentemente de outros elementos, e devido a reatividade química, o oxianion fosfato tem elevada capacidade de ser adsorvido a grupos funcionais reativos presentes na superfície de argilominerais e óxidos de ferro e alumínio que compõem a fração argila do solo. Devido a este fenômeno, logo nos primeiros anos de cultivo, grande parte do P adicionado é imobilizado à matriz mineral do solo e fica indisponível para as culturas. Neste momento, o solo atua como um dreno de P e maiores doses de fertilizante fosfato deve ser feita para melhorar a produtividade dos cultivos.

Esta interação entre o elemento químico P e a matriz mineral do solo é fundamental para definir estratégias de caráter físico e químico de manejo de fertilizantes e corretivos de acidez. O primeiro ponto chave para reduzir a imobilização de P aos argilominerais e óxidos de ferro e alumínio e melhorar seu aproveitamento pelas plan-

tas é alterar as características químicas do solo através da elevação do pH. A elevação do pH modifica o balanço de cargas da superfície da matriz mineral do solo e, como consequência, reduz a adsorção específica do fosfato. O segundo ponto chave é de caráter físico e consiste em concentrar o fertilizante em um único ponto (próximo às plantas) reduzindo o contato fosfato – matriz mineral e conseqüentemente gerando menor adsorção de P.

Outro ponto fundamental para melhorar a eficiência do uso de fertilizantes fosfatados no sistema de produção diz respeito a presença de matéria orgânica no solo. Como discutido anteriormente, no solo o P está presente em formas inorgânicas ou orgânicas. Sendo que a matéria orgânica do solo, em especial a biomassa microbiana, atua como um estoque temporário de P na forma orgâ-

nica e impede sua imobilização a matriz mineral. A partir da morte de microrganismos e da mineralização de compostos orgânicos pela comunidade microbiana há uma ciclagem do nutriente no sistema e sua disponibilização às plantas.

Com o passar dos anos e a consecutiva adição de fertilizantes fosfatados, a capacidade adsorviva do solo vai sendo reduzida devido a elevação dos teores totais de P do solo e conseqüentemente maior fração do volume desse nutriente adicionado mantém-se disponível às culturas. De qualquer modo, independentemente se for área com pouco histórico de cultivo ou com agricultura consolidada, é fundamental que o agricultor e/ou técnico responsável efetuem um adequado diagnóstico da disponibilidade de P às culturas para determinar as melhores doses e modos de aplicação de fertilizantes fosfatados.

DIAGNÓSTICO DE DISPONIBILIDADE DE P E RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO FOSFATADA

A nível de diagnóstico de fertilidade do solo, não há necessidade alguma de ser definido de onde provem o P (orgânico ou inorgânico, adsorvido ou livre em solução) utilizado pelas plantas. Para esta finalidade, o importante é saber qual o valor de “disponibilidade” de P no solo e qual seu comportamento ao longo do tempo. Assim sendo, basta escolher um método de extração de P “disponível” que tenha correlação com a produtividade das culturas agrícolas. Este trabalho de correlação e determinação de valores críticos exige intenso trabalho de pesquisa nos mais diferentes cenários de solo e cultivos agrícolas para que seja validado e esteja disponível aos agricultores. Para qualquer modificação nos métodos tidos como padrões, são necessárias novas pesquisas para revalidação das curvas resposta e reestabelecimentos das classes de disponibilidade de nutrientes.

A quantificação dos teores de P disponível no solo é feita com o uso de soluções extratoras, resinas de troca iônicas ou qualquer outro adsorvente capaz de adsorver o fosfato que já está na solução do solo e equilibrar com aquele que está em formas mais fracamente adsorvidas ao solo. Para solos brasileiros, são utilizados extratores de dois grupos principais, a saber: aqueles que atuam com dissolução ácida; e aqueles que atuam como agente adsorvedor do fosfato. Como exemplo do primeiro grupo temos o extrator Mehlich-1 que, sem dúvida, é um dos mais empregados a nível de Brasil. O extrator Mehlich-1 é uma mistura de ácidos fortes em pequenas concentrações e, apesar de ser facilmente aplicável a nível de laboratório, possui algumas limitações. A primeira delas se refere à exaustão da capacidade de extração com o aumento dos teores de argila do solo. Este fato é contornado com a utilização do teor de argila no momento da interpretação das classes de disponibilidade de P. O segundo problema é a superestimativa do teor de P em solos previamente fertilizados com fosfatos naturais. Neste caso, não recomenda-se utilizar o extrator Mehlich-1 pelo menos até seis anos após utilização de fosfato natural na área (Somavilla et al., 2021).

No segundo grupo de extratores temos a Resina de Troca Aniônica (RTA) que são materiais sintéticos de alta massa molecular constituídas de uma matriz polimérica com grupos funcionais com capacidade de adsorção de ânions. A resina é um excelente extrator de fosfatos e não possui os problemas elencados acima para o método Mehlich-1. Porém é um método mais caro e mais sofisticado para implementação em laboratórios que processam grande número de análises, como os de Ciência do Solo.

Independentemente do método de extração utilizado, os valores absolutos de teor de P disponível transmite pouca informação e obrigatoriamente devem ser correlacionados com a absorção e produtividade das culturas. Somente as conclusões obtidas a partir da relação quantidade de “P disponível” versus

“produtividade de plantas” tem interesse agrônômico. A partir desta correlação são estabelecidos níveis críticos de P no solo, que variam em função da cultura e tipo de solo, e representam o teor de P extraído pelo método laboratorial no qual é possível obter 90% do rendimento máximo de cada cultura (Figura 2).

Conhecer o nível crítico para cada solo e cultura é fundamental para o agricultor. Isso porque, ele representa o valor de disponibilidade de P abaixo do qual há grande probabilidade de resposta da planta a adição de P. Neste caso, a dose de P recomendada deve considerar a correção do solo (focado em aumentar os teores de P disponível) e reposição do nutriente exportado pelas culturas (Figura 2).

As doses utilizadas para correção dos níveis de P no solo estão diretamente relacionadas ao teor de argila do solo e seu potencial de fixação/adsorção de P. Assim sendo, é certo que solos arenosos (baixo teor de argila) necessitam menores doses de P para atingirem o nível crítico de disponibilidade. Assim como, solos com maior grau de intemperismo e elevado teor de argila e presença de óxidos de ferro e alumínio necessitam maiores doses de P.

Por meio da fertilização fosfatada de correção, ao alcançar valores de disponibilidade de P acima do nível crítico, a probabilidade de resposta da cultura a adição de fertilizante fosfatado torna-se baixa ou nula, e normalmente a fertilização para fins de incremento de produtividade não é economicamente viável. Nestes casos, há a necessidade apenas de adição de nutrientes para reposição do valor exportado pelas culturas mais eventuais perdas de P do sistema (estratégia de “manutenção”). Esta estratégia de fertilização proporciona melhor eficiência de uso do P e evita o esgotamento do solo.

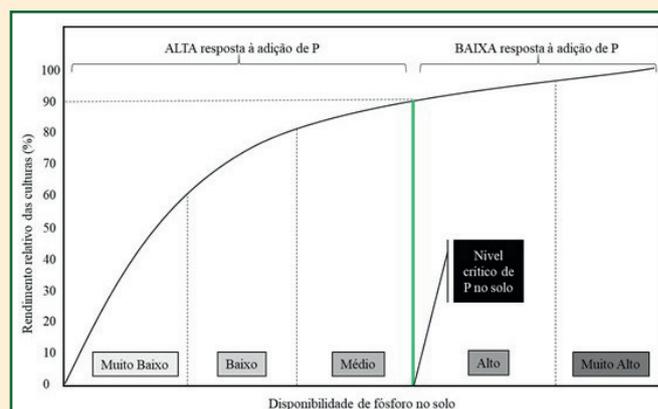


Figura 2: Curva resposta à adubação fosfatada em função da disponibilidade de P no solo.

RELAÇÃO ENTRE ADUBAÇÃO FOSFATADA E CALAGEM

Conforme discutido no item “Dinâmica do P em solos do cerrado” o oxianion fosfato é extremamente reativo e com muita facilidade é adsorvido pela matriz mineral do solo, especialmente por partículas de argilominerais e óxidos de ferro e alumínio existentes em abundância nos solos do Cerrado brasileiro. Devido a eletronegatividade do fosfato esta adsorção é extremamente energética e, ao longo do tempo, é ajustada física e quimicamente. Com isso, dificilmente será desfeita, sendo que o tempo de retorno do P a solução do solo varia de minutos (frações mais disponíveis) a centenas de anos (frações menos disponíveis) (Helfenstein et al., 2020).

Em virtude do comportamento químico do fosfato no solo, é de suma importância que o agricultor “prepare” o solo para receber a fertilização fosfatada, mesmo sendo ela destinada a correção dos níveis de disponibilidade de P. Este preparo deve ser feito com a correção da acidez do solo. A utilização de calcário é a única forma eficaz de elevar o pH do solo, eliminar a presença de formas tóxicas de Al (Al^{3+}), equilibrar a disponibilidade de micronutrientes e fornecer Ca e

Mg para as culturas. Como consequência da elevação do pH do solo, os sítios de adsorção que inicialmente iriam imobilizar fosfato são quimicamente alterados e consequentemente tornam-se menos ávidos a realizar ligações químicas com o fosfato.

Em áreas com pouco histórico de cultivo, sempre que houver a necessidade de correção de pH do solo e dos níveis de disponibilidade de P a calagem deve ser realizada para efetivamente atingir as condições desejadas. O ideal seria que, quando da utilização de fontes solúveis, a calagem fosse realizada antes da fertilização. Já quando se utiliza fosfatos naturais a correção da acidez pode ser realizada após a fertilização devido a necessidade de condições específicas de solo para solubilização do fertilizante. De qualquer modo, a calagem é extremamente necessária pois proporciona a redução da imobilização de fosfato a matriz mineral do solo (Kaminski e Melo, 1984). Em áreas com maior histórico de cultivo e que há necessidade de adição de calcário, o momento da aplicação de calcário em relação a fertilização fosfatada é pouco significativo, uma

vez que, estas áreas também costumam ter valores ligeiramente maiores de P disponível.

A utilização simultânea de fosfatos solúveis (Superfosfato triplo e Simples, MAP, DAP, etc) e corretivo da acidez do solo (calcário) é um tema muito discutido no meio agrícola. Isso pois, surge o questionamento sobre uma “possível” formação de fosfato de cálcio insolúvel e, portanto, o P tornar-se-ia indisponível às plantas. A nível de solo agricultável esse fenômeno não ocorre ou é insignificante por uma série de fatores. O primeiro ponto que precisamos entender é que para ocorrer formação de fosfato de cálcio deve haver condições termodinâmicas favoráveis. Ou seja, presença de fosfato (PO_4^{3-}) e cálcio (Ca^{+2}) em solução e pH predominantemente alcalino – acima de 7 para a maior parte dos fosfatos de cálcio (Dorozhkin, 2009).

Com utilização de fontes solúveis de P, a presença de fosfato em solução é relativamente fácil de ocorrer. Entretanto, teores elevados de Ca^{+2} são mais difíceis uma vez que a solubilidade do calcário é baixa e conseqüentemente não haverá grande dissociação do CaCO_3 . Outro ponto importante é que a dissociação do CaCO_3 é regulada pelo pH da solução do solo e só ocorre na presença de H^+ (pH ácido). Com isso, mesmo na superfície das partículas de calcário, onde a probabilidade de haver elevados teores de Ca^{+2} é maior, o próprio pH de superfície irá regular a dis-

sociação do CaCO_3 e conseqüente liberação de Ca^{2+} . Além disso, mesmo que houver a presença de (PO_4^{3-}) e cálcio (Ca^{+2}) em solução, dificilmente haverá pontos com pH acima de 8 em virtude de redução na dissociação do CaCO_3 devido a elevação do pH proporcionada por ele mesmo. Sendo assim, não haverá formação e precipitação de fosfato de cálcio. Por outro lado, mesmo que os fatos elencados anteriormente estivessem equivocados e houvesse condições termodinâmicas favoráveis e, conseqüentemente, formação de fosfato de cálcio em pontos específicos no solo, o simples rebaixamento do pH para valores normalmente observados no solo (pH entre 5,5 – 6,0) seria suficiente para reverter a reação e remobilizar os reagentes.

Vale destacar que, o fosfato de cálcio que supostamente seria formado no solo de nada se assemelha ao fosfato de cálcio explorado para produção de fertilizantes. No primeiro caso, o fosfato de cálcio é amorfo (sem nenhuma cristalinidade) e, portanto, muito instável e sujeito a dissociação. No segundo caso, o fosfato de cálcio passou por processos geogênicos de formação (processos ígneos ou sedimentares) e possui diferentes graus de cristalinidade e dureza que lhe conferem potencial de dissociação muito inferior ao primeiro caso.

ESTRATÉGIAS DE FERTILIZAÇÃO FOSFATADA NO SISTEMA DE PRODUÇÃO

O protocolo experimental conduzido com sistema soja/milho no Centro Tecnológico Aprosoja MT (CTECNO-Parecis) localizado em Campo Novo do Parecis – MT e descrito detalhadamente no item “Metodologia e aquisição de dados” é fundamental para a abordagem quanto ao modo de aplicação e dose de uso de P. Este protocolo teve início na safra 2016/17 e até o momento foram avaliadas cinco safras de soja e três safras de milho (Figura 3). Como resultado para cultura da soja, pode-se observar que apenas a partir da quarta safra houve diferenciação significativa de produtividade unicamente entre o tratamento controle (sem utilização de P) e os demais tratamentos com aplicação de P. Já para cultura do milho, que foi cultivada por 3 safras, não ocorreram diferenciação de produtividade entre os tratamentos.

A inexistência de diferença significativa entre os tratamentos na safra de milho 2020/21 está atrelada em parte a grande variabilidade entre as repetições dos tratamentos. Este fato reduz a capacidade do teste de média diferenciar os tratamentos devido ao aumento do desvio padrão. A variabilidade entre as repetições neste protocolo foi devido a presença de nematoides na área, sobretudo *Meloidogyne sp.* e *Pratylenchus brachyurus*. Por este motivo, nas safras 2018/19 e 2019/20 a área teve que ser mantida com braquiária (Figura 3 e Tabela 5)

Imagens representativas dos tratamentos, demonstrando a inexistência de diferenças também durante o crescimento vegetativo das plantas de soja podem ser observadas na Figura 4.

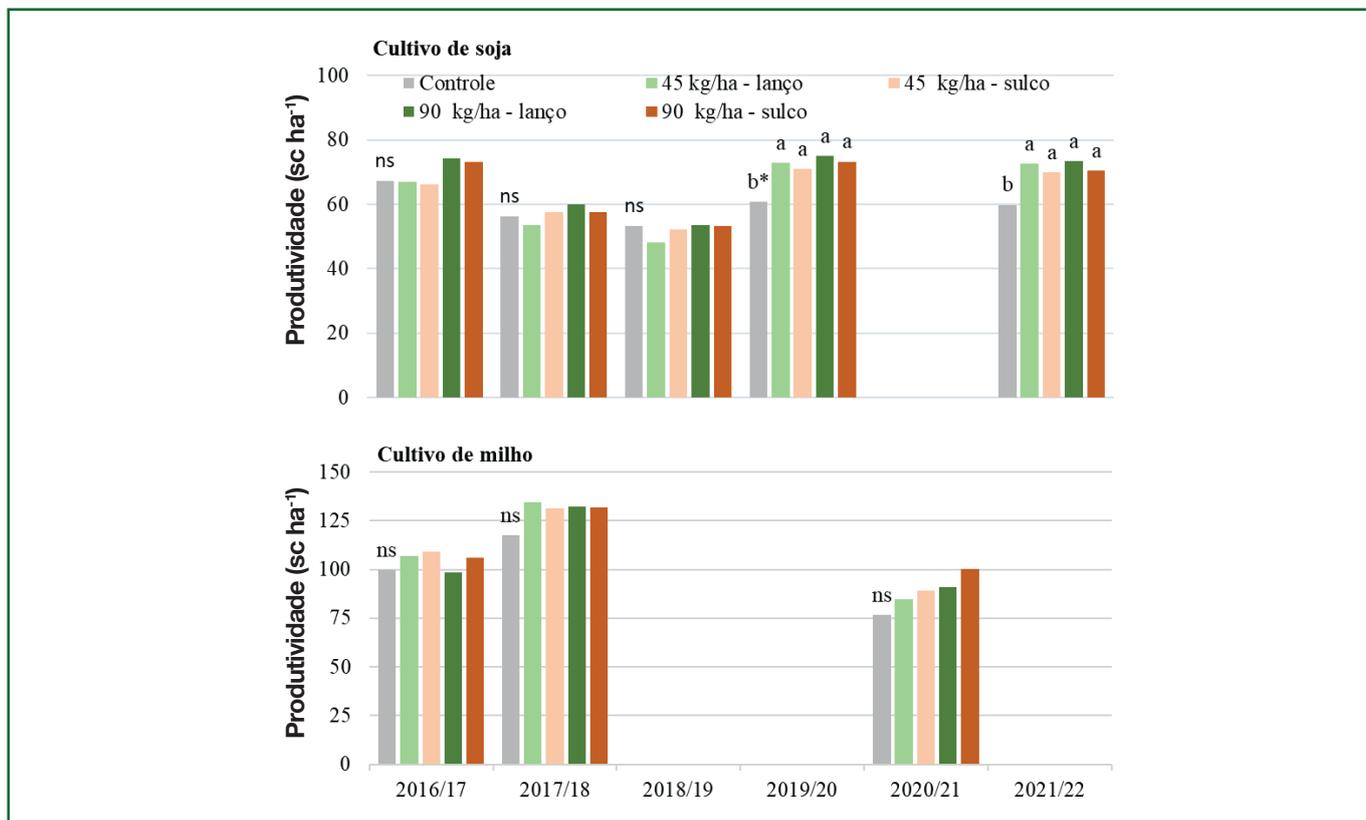


Figura 3. Histórico de produtividade de soja e milho cultivados com diferentes modos e doses de adubação fosfatada em cinco anos agrícolas. Cteco - Parecis - MT. ns – Não significativo. *Significativo pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

RESPOSTA À ADUBAÇÃO FOSFATADA

A partir desse conjunto robusto de resultados, podemos fazer algumas abordagens extremamente pertinentes. A primeira delas está relacionada a única diferença estatística identificada, ou seja, aplicar ou não aplicar P. Considerando o teor de argila do solo e as culturas utilizadas, os níveis de P disponível são classificados como “alto” (Tabela 2). Neste caso, conforme discutido anteriormente, haveria apenas a necessidade de reposição do P exportado via grãos para manter os níveis de produtividade. Fato este que foi alcançado pela menor dose de P_2O_5 utilizada (45 kg ha^{-1}), a qual foi definida neste protocolo justamente por representar o valor médio de exportação de P pelas culturas da soja e milho.

Além disso, cabe ressaltar o tempo transcorrido desde o início do protocolo para que o tratamento sem utilização de P sofresse um esgotamento a ponto de resultar em menor produtividade. Neste caso, o solo suportou o fornecimento de P para as culturas por um período de quatro safras. Este período é extremamente variável e não pode ser assumido como padrão para qualquer condição do sistema de produção. Fatores como teores iniciais de P, mineralogia da fração argila, textura e estruturação do solo, ciclagem de nutriente, taxa de exportação, sensibilidade das culturas e escoamento

superficial atuam decisivamente para prolongar ou antecipar este período.

Outro ponto a ser evidenciado neste protocolo é o fato de inexistir resposta quanto a utilização das doses de 45 e 90 $\text{kg de } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$. Este comportamento demonstra justamente o que foi discutido na Figura 2 quanto a baixa probabilidade de resposta da cultura ao incremento da dose de fertilizante quando os níveis de nutriente no solo são considerados “alto”. Neste caso, após 5 safras de cultivo do sistema soja/milho nenhuma diferenciação foi observada. A utilização recorrente de doses de 90 $\text{kg de } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ quando o solo já possui nível alto de P disponível causa incremento dos teores de P quando não há necessidade e reduz a eficiência de uso do P. Embora o aumento dos teores de P disponível traga certa flexibilidade ao produtor rural, valores “muito alto” (Figura 2) não irão trazer grandes vantagens ao produtor.

Suportar a produtividade e evitar o esgotamento de P do solo por meio da utilização da dose de reposição de P é uma informação importante e o agricultor deve considerar no momento da tomada de decisão da dose de fertilizante a ser utilizado, principalmente em cenários com preços elevados de fertilizantes e/ou valores baixos das commodities agrícolas.

RESPOSTA AO MODO DE APLICAÇÃO DO FERTILIZANTE

Com relação ao modo de aplicação das doses de fertilizantes fosfatado não foi observado diferenças significativas na produtividade dos cultivos em nenhuma safra avaliada. Lembrando que, o solo no qual o protocolo foi instalado já apresentava teores de disponibilidade de P acima do nível crítico. Independente do sistema de produção conduzido pelo agricultor, deve-se sempre buscar e manter os níveis de disponibilidade de nutrientes nos solos acima daqueles considerados críticos para as culturas. A partir deste ponto, a flexibilização quanto a dose e modo de aplicação de fertilizantes é maior e outros fatores podem ser considerados

para definir as estratégias. Como por exemplo a disponibilidade de equipamento, capacidade operacional, mão-de-obra, janela de semeadura das culturas e consequências destes fatores sobre a produtividade das lavouras nos anos anteriores.

Diferentemente, em situações de disponibilidade de P no solo classificada como “muito baixo” e “baixo” (Figura 2), a eficiência técnica de cada quilograma de P aplicado é maior quando for feita aplicação localizada. Quando os níveis de disponibilidade de P no solo forem “médio” (Figura 2) ainda há uma dependência da aplicação imediata de P, em menor quantidade que nos níveis anteriores e a aplicação localizada ainda tende a maior eficiência.



Figura 4. Visual de desenvolvimento de soja nos diferentes tratamentos. Imagem feita em 13/12/2017, segunda safra. Cteco - Pa-recis - MT. Fonte: Taimon Semler (Arquivo Pessoal).”

USO DE MICRORGANISMOS SOLUBILIZADORES COMO ALTERNATIVA PARA REMOBILIZAÇÃO DE P NO SISTEMA SOLO-PLANTA.

O histórico de cultivo e de adição de fertilizantes fosfatados em grande parte das áreas agrícolas do Mato Grosso proporcionou aumento dos teores totais de P nos solos. Entretanto, devido ao comportamento reativo do fosfato no solo, apenas uma pequena fração deste total é efetivamente disponibilizada às plantas. Devido a isso, em cenários de preços elevados de insumos e exploração finita das reservas de P no planeta, buscar alternativas para remobilizar o P presente no solo tem especial importância para o agricultor reduzir custos e melhorar a sustentabilidade da atividade agrícola.

Na tentativa de melhorar a exploração de P nos solos agrícolas, o uso de espécies vegetais mais eficientes na extração de nutrientes fortemente adsorvidos ao solo ou que possuam um sistema radicular mais agressivo são ferramentas importantes. Além de plantas mais eficientes, a microbiota do solo tem grande atuação na ciclagem e remobilização de nutrientes no sistema de produção e consequentemente pode melhorar a eficiência dos fertilizantes. Alguns fungos dos gêneros *Aspergillus*, *Penicillium* e *Rhizoglyphus* (fungos micorrízicos arbusculares) (Souchie and Abboud, 2007; Taktek et al., 2015) e bactérias do gênero *Pantoea*, *Pseudomonas*, *Bacillus* e *Rhizobium* (Rodríguez and Fraga, 1999; Kaur and Reddy,

2015) tem sido apontados na literatura com potencial para uso na agricultura.

O sucesso da utilização de fungos ou bactérias como agentes solubilizadores de P é reportado no meio científico. Entretanto, em sua maioria são resultados obtidos a partir de protocolos instalados em nível de laboratório (Barroso and Nahas, 2008; Gomes; et al., 2014; Filho et al., 2020). Logo, tem-se a necessidade de avaliação a campo em condições condizentes com a realidade do produtor rural. No protocolo abordado nesta nota técnica, a partir da segunda safra do ano 2020/21 foi iniciada avaliação do uso de microrganismos solubilizadores de P em condições de campo. Para esta avaliação foram utilizadas, simultaneamente, duas espécies do gênero *Bacillus* (*B. subtilis* e *B. megaterium*) aplicadas no sulco de semeadura. Ao total, foram avaliados dois cultivos (milho - 2020/21 – terceira safra de milho e soja - 2021/22 – quinta safra de soja), sendo que, para ambos casos não foram identificadas diferenças significativas em produtividade (Tabela 1). Embora que para cultura do milho, a variabilidade entre as repetições devido a presença de nematoides na área possa ter implicado na inexistência de diferença significativa entre os tratamentos.

A concentração de P no tecido foliar para ambos cultivos em todos tratamentos foi considerada acima dos limites críticos para as culturas (Kurihara et al., 2014; Malavolta, et a., 1997). Isto reforça o fato de o solo possuir níveis de P em condições satisfatórias para o desenvolvimento vegetal (Tabela 2). Comparativamente, não foi identificada diferença estatística quanto a presença ou ausência de microrganismos solubilizadores de P em nenhum tratamento (dose ou modo de utilização de fertilizante fosfatado).

Diferenças significativas entre os tratamentos com e sem o uso de microrganismos solubilizadores de P deveriam existir no tratamento testemunha. Uma vez que, em condições de não fornecimento de P via fertilizante, há uma necessidade maior de suprimento da planta por meio do nutriente presente no solo. Neste caso, a atuação dos solubilizadores de P sobre o fornecimento de P seria mais evidente. Fato este não observado neste protocolo, possivelmente devido ao pequeno número de cultivos (2 cultivos). Neste caso, há a necessidade de um período maior de avaliações para conclusões mais assertivas.

Em publicação de Oliveira et al. (2020), os autores avaliaram a viabilidade de utilização de *B. subtilis* e *B. megaterium* para as culturas de soja e milho nos anos agrícolas de 2018/19 e 2019/20 em áreas de lado-a-lado. Segundo os autores, houve um benefício devido a utilização das bactérias. Para os tratamentos avaliados nesta nota técnica, não foi realizada análise de viabilidade devido ao fato de não ter havido diferença entre a produtividade dos tratamentos. Caso nos próximos anos de cultivo for observada diferença de produtividade, uma análise econômica será realizada.

Tabela 1. Produtividade e concentração de P no tecido foliar de milho e soja em função da utilização de microrganismos solubilizadores de P na linha de semeadura. Ctecno - Parecis - MT.

Modo de aplicação	Dose de P (kg ha ⁻¹)	Microrganismo solubilizador de P			
		Ausente	Presente	Ausente	Presente
		Teor no tecido (mg kg ⁻¹)		Produtividade (sc ha ⁻¹)	
----- Safrinha milho 2020/21 -----					
Controle		2,6 a*	2,8 a	74 a	79 a
	45	2,8 a	3,0 a	79 a	91 a
Lanço	90	3,0 a	3,1 a	85 a	97 a
	45	2,6 a	2,8 a	89 a	89 a
Sulco	90	2,6 a	2,8 a	103 a	98 a
----- Safra soja 2021/22 -----					
Controle		2,5 a	2,5 a	61 a	59 a
	45	3,6 a	3,5 a	73 a	72 a
Lanço	90	4,2 a	3,7 a	73 a	74 a
	45	3,3 a	2,9 a	71 a	69 a
Sulco	90	3,4 a	3,3 a	71 a	70 a

*Comparação de médias pelo teste de Scott-Knott (p<0,05) para o fator de variação presença e ausência de Microrganismo solubilizador de P

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sem dúvida a aplicação de fertilizantes a lanço é a estratégia mais viável para o operacional de uma fazenda. Entretanto, para que também seja viável tecnicamente é preciso que o sistema esteja em condições de receber fertilizante superficialmente. Para o caso das condições de solo e cultivo avaliados neste comunicado, não houve resposta das culturas quanto ao modo de aplicação do fertilizante. O que ficou evidente foi a necessidade de repor a massa de nutriente exportada a custos de esgotamento progressivo do sistema. Por outro lado, é desnecessário utilizar dose excessiva a custos de menor retorno técnico e econômico.

A utilização de microrganismos solubilizadores de P não resultou em aumento significativo de produtividade dos cultivos. Entretanto, há a necessidade de período maior de avaliação para obtenção de resultados mais representativos.

METODOLOGIA E AQUISIÇÃO DE DADOS DO PROTOCOLO

CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O protocolo experimental foi instalado no ano de 2016/2017 no Centro Tecnológico Aprosoja MT em Campo Novo do Parecis. No local, o solo é caracterizado com textura média (> 70 % de areia e 22 % de argila), longo histórico de cultivo agrícola e teores de disponibilidade de macronutrientes acima dos níveis considerados críticos (Tabela 2). O clima da região é classificado como Aw – Tropical com estação seca, sendo a distribuição mensal de precipitação acumulada, durante o período de condução do presente protocolo, apresentada da Tabela 3.

Inicialmente o protocolo era constituído de cinco tratamentos, dispostos em delineamento de blocos completos casualizados, com a proposta de avaliar doses e modos de aplicação de P no sistema soja/milho. A partir do ano agrícola de 2020/2021, cada parcela foi subdividida para avaliação da utilização de microrganismos solubilizadores de P. Atualmente, o protocolo está composto por 10 tratamentos e quatro repetições em parcelas de 80 m² (4 x 20 m) (Tabela 4).

Nos seis anos agrícolas transcorridos desde a implantação do protocolo, foram implantadas as culturas de soja, milho e braquiária na sequência representada na Tabela 5. O cultivo de braquiária em duas ocasiões durante o período se fez necessário para manejo da população de nematoides presentes na área.

Tabela 2. Caracterização química¹ e física² do solo no momento da instalação do experimento. Ctecno - Parecis - MT. (2016/2017).

Parametros		Profundidade (cm)		
		0-10	10-20	20-40
pH	CaCl ₂	5,5	4,8	4,7
P	mg dm ⁻³	40	6,9	0,9
K	mg dm ⁻³	56	25	22
S	cmol _c dm ⁻³	9,7	9,2	9,3
Ca	cmol _c dm ⁻³	3,1	1,3	0,7
Mg	cmol _c dm ⁻³	0,6	0,3	0,2
Al ⁺³	cmol _c dm ⁻³	0	0	0
H	cmol _c dm ⁻³	2,4	3	2,3
V	%	62	37	30
MO	g dm ⁻³	21	12	9
Zn	mg dm ⁻³	5,7	1,3	-
Cu	mg dm ⁻³	0,8	0,6	-
Fe	mg dm ⁻³	39,6	89,4	-
Mn	mg dm ⁻³	10,5	3,2	-
B	mg dm ⁻³	0,4	0,3	-
Argila	g kg ⁻¹	220	210	-
Areia	g kg ⁻¹	730	735	-
Silte	g kg ⁻¹	50	55	-

Laboratório: ¹ Laboratório Solo Análise, Primavera do Leste – MT. Extratores: P, K, Zn, Cu, Fe e Mn (Mehlich-1); S (fosfato de cálcio); Ca, Mg e Al (cloreto de potássio – 1 mol L⁻¹); H (acetato de cálcio a pH= 7); MO (dicromato de potássio); B (água quente); ² Laboratório Solo Análise, Primavera do Leste – MT. **Análise textural:** método da pipeta. Metodologias realizadas de acordo com Teixeira et al. (2017).

Tabela 3. Precipitação mensal acumulada durante o período de condução do protocolo. Ctecno - Parecis - MT.

Mês	Ano Safra					
	2016/17	2017/18	2017/18	2019/20	2020/21	2021/22
Agosto	-	32	32	0	0	0
Setembro	127	32	32	21	1	79
Outubro	95	179	179	162	140	135
Novembro	244	226	226	157	99	146
Dezembro	342	271	271	141	152	344
Janeiro	327	466	466	225	156	240
Fevereiro	524	355	355	257	363	422
Março	352	190	190	143	324	438
Abril	141	190	190	20	171	7
Maio	53	14	14	41	0	-
Junho	1	0	0	2	0	-
Julho	0	0	0	0	0	-
Total anual	2.206	1.956	1.956	1.169	1.406	1.811

Tabela 4. Descrição dos tratamentos aplicados ao experimento modos de adubação fosfatada (milho safrinha) cultivados em uma condição de textura média na safra 2020/21. Ctecno - Parecis - MT

Tratamento	Modo de aplicação	Dose de P ₂ O ₅ (Kg ha ⁻¹)	Bactérias solubilizadora de P
1A	-	0	Ausência
1B	-	0	Presença
2A	Sulco	45	Ausência
2B	Sulco	45	Presença
3A	Sulco	90	Ausência
3B	Sulco	90	Presença
4A	Lanço	45	Ausência
4B	Lanço	45	Presença
5A	Lanço	90	Ausência
5B	Lanço	90	Presença

VARIÁVEIS QUANTIFICADAS

Durante o período de condução do protocolo experimental foram realizadas avaliações de produtividade, massa de mil grãos e, para safra 2021/2022, teor nutricional em folhas. Na sequência estão descritos os procedimentos utilizados quantificação destas variáveis:

- **Produtividade de grãos:** A produtividade de grãos foi estabelecida pela média de produtividade de dois pontos por parcela – cada ponto constituído de área igual a 5,4 m² (3 linhas x 4 m). Após colheita, a massa de grãos foi corrigida para teor de umidade igual a 13 % e extrapolada para produtividade por hectare.
- **Teor nutricional em folhas:** As amostras foliares foram coletadas quando as plantas apresentavam florescimento pleno. Após coleta, as amostras foram secas a 60 °C e enviadas para laboratório.

ANÁLISES ESTATÍSTICA

Para todas as variáveis quantificadas no protocolo, as médias foram avaliadas por análise de variância e, quando apresentavam significância, comparadas pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Para a variável produtividade quantificada entre os anos de 2016 e 2020 a análise de variância foi realiza-

da considerando experimento unifatorial com tratamentos qualitativos. A partir de 2020, o protocolo passou a ser avaliado de modo bifatorial (5 x 2) com parcela subdividida. Sendo o fator principal a adubação fosfatada e o fator secundário a utilização de microrganismos solubilizadores de P.

Tabela 5. Sequência de cultivos e utilização de fertilizantes durante período de condução do protocolo. Cteco - Parecis - MT

Safr	Cultura	Cultivar/híbrido/espécie	Semeadura	Ciclo (dias)	K ₂ O Kg ha ⁻¹	N Kg ha ⁻¹	----- Kg ha ⁻¹ -----					
							B	S	Cu	Zn	Mg	Calcário
2016/17	Soja	M 8372 IPRO	10/11/2016	123	120	-	1,7	90	-	-	-	-
	Milho	AG 8088	12/03/2017	-	60	82	-	55	-	-	-	-
2017/18	Soja	M 7739 IPRO	28/10/2017	111	120	-	0,75	41	0,75	-	-	1800
	Milho	SYN Fórmula VIP	28/03/2018	100	90	82	-	-	-	2,50	-	-
2018/19	Soja	BMX Bônus IPRO	15/10/2018	112	113	-	0,8	53	-	-	25	-
	Braquiaria	<i>B. ruziziensis</i>	26/02/2019	115	-	-	-	-	-	-	-	-
2019/20	Soja	HO Maracaí IPRO	14/10/2019	110	108	-	0,5	45	-	-	-	-
	Braquiaria	<i>B. ruziziensis</i>	11/02/2020	126	-	29	-	-	-	-	-	-
2020/21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Milho	NK 505 VIP3	27/01/2021	159	90	125	-	-	-	2,50	-	-
2021/22	Soja	TMG 2379 IPRO	16/10/2021	122	108	-	0,5	45	-	-	-	-
	Milho	DKB 360 PRO3	18/02/2022	-	60	101	0,5	36	-	-	-	-
Total					869	419	5	364	0,75	5	25	1800

REFERÊNCIAS

- Kaminski, J. e Mello. F.A.F. (1984). Época de aplicação de fosfatos em relação ao calcário no suprimento de fósforo ao sorgo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 8 297- 300.
- Malavolta, E.; Vitti, G.C.; Oliveira, S.A. Avaliação do estado nutricional. In: Malavolta, E.; Vitti, G.C.; Oliveira, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed., Piracicaba, Potafos, 1997. p.115-230.
- Weil, R. R.; Brady, N. C. Phosphorus and potassium. In: WEIL, R. R.; BRADY, N. C. The nature and properties of soils. 15th ed. Columbus, OH: Pearson, 2017. cap. 14, p. 643-695.
- Barroso, C. B., and Nahas, E. (2008). Solubilização do fosfato de ferro em meio de cultura. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 43, 529–535. doi: 10.1590/S0100-204X2008000400012.
- Dorozhkin, S. V (2009). Calcium Orthophosphates in Nature, Biology and Medicine. *Materials (Basel)*. 2, 399–498. doi: 10.3390/ma2020399.
- Filho, M. V. P., da Silva, A. B., and Florentino, L. A. (2020). Solubilization of araxá natural phosphate and decomposition of plant residues by bacterial isolates. *Cienc. e Agrotecnologia* 44, 1–7. doi: 10.1590/1413-7054202044008420.
- Gomes, E. A., Silva, U. de C., Marriel, I. E., Christiane Abreu de Oliveira, and Lana, U. G. de P. (2014). Rock phosphate solubilizing microorganisms isolated from maize rhizosphere soil. *Rev. Bras. Milho e Sorgo* 15, 69–81.
- Helfenstein, J., Pistocchi, C., Oberson, A., Tamburini, F., Goll, D. S., and Frossard, E. (2020). Estimates of mean residence times of phosphorus in commonly considered inorganic soil phosphorus pools. *Biogeosciences* 17, 441–454. doi: 10.5194/bg-17-441-2020.
- Kaur, G., and Reddy, M. S. (2015). Effects of Phosphate-Solubilizing Bacteria, Rock Phosphate and Chemical Fertilizers on Maize-Wheat Cropping Cycle and Economics. *Pedosphere* 25, 428–437. doi: 10.1016/S1002-0160(15)30010-2.

Kurihara, C. H., Staut, L. A., and Maeda, S. (2014). Diagnose do Estado Nutricional de Soja e Algodoeiro, pelos Métodos das Faixas de Suficiência e DRIS, em Mato Grosso do Sul e Mato Grosso. Embrapa Agropecuária Oeste, 6.

Oliveira, C. A. de, Cota, L. V., Marriel, I. E., Gomes, E. A., Sousa, S. M. de, Alves, V. M. C., et al. (2020). Viabilidade Técnica e Econômica do Biomaphos® (Bacillus subtilis CNPMS B2084 e Bacillus megaterium CNPMS B119) nas Culturas de Milho e Soja. Embrapa, 26. Available at: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1126348>.

Pavinato, P. S., Rocha, G. C., Cherubin, M. R., Harris, I., Jones, D. L., and Withers, P. J. A. (2020). Map of total phosphorus content in native soils of Brazil. *Sci. Agric.* 78, 1–5. doi: 10.1590/1678-992x-2020-0077.

Rodríguez, H., and Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnol. Adv.* 17, 319–339. doi: 10.1016/S0734-9750(99)00014-2.

Somavilla, A., Caner, L., Bortoluzzi, E. C., Santanna, M. A., and Rheinheimer, D. dos S. (2021). P-legacy effect of soluble fertilizer added with limestone and phosphate rock on grassland soil in subtropical climate region. 211. doi: 10.1016/j.still.2021.105021.

Souchie, E. L., and Abboud, A. C. de S. (2007). Solubilização de fosfato por microrganismos rizosféricos de genótipos de Guandu cultivados em diferentes classes de solo. *Semin. Ciências Agrárias* 28, 11. doi: 10.5433/1679-0359.2007v28n1p11.

Taktek, S., Trépanier, M., Servin, P. M., St-Arnaud, M., Piché, Y., Fortin, J.-A., et al. (2015). Trapping of phosphate solubilizing bacteria on hyphae of the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* DAOM 197198. *Soil Biol. Biochem.* 90, 1–9. doi: 10.1016/j.soilbio.2015.07.016.

Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., and Teixeira, W. G. (2017). Manual de métodos de análise de solo. 3a Ed. Rev. Brasília: Embrapa Available at: http://www.cse.edu.uy/sites/www.cse.edu.uy/files/documentos/Liccom_Camejo_2011-07-28.pdf.

Tian, J., Boitt, G., Black, A., Wakelin, S., Chen, L., Cai, K., et al. (2019). Mass balance assessment of phosphorus dynamics in a fertilizer trial with 57 years of superphosphate application under irrigated grazed pasture. *Nutr. Cycl. Agroecosystems.* doi: 10.1007/s10705-019-09992-1.



Associação dos Produtores de Soja e Milho do Estado de Mato Grosso

Rua Engenheiro Edgard Prado Arze, nº1.777
Edifício Cloves Vettorato, CPA
CEP 78.049-932 Cuiabá-MT

EDIÇÃO 02

Dezembro 2022

DIRETORIA – GESTÃO 2021/2023

PRESIDENTE

Fernando Cadore

VICE-PRESIDENTE

Lucas Luis Costa Beber

COORDENADOR DA COMISSÃO DE DEFESA AGRÍCOLA

Fernando Ferri

VICE-COORDENADOR DA COMISSÃO DE DEFESA AGRÍCOLA

Jorge Diego Oliveira Santos Giacomelli

GERENTE ADMINISTRATIVO – IAGRO-MT

Alexandre Andrade Zamarioli

GERENTE DA COMISSÃO DE DEFESA AGRÍCOLA

Jerusa Rech

É permitida a reprodução desta Circular Técnica, desde que citada a fonte.

Para mais informações do conteúdo dessa publicação:



65 3644-4215



defesa.agricola@aprosoja.com.br