MICRORGANISMOS SOLUBILIZADORES DE FÓSFORO

Este relatório técnico detalha a importância, os mecanismos de ação, os principais organismos envolvidos e a aplicação prática dos solubilizadores de fósforo, com foco nas culturas de soja e milho em solos do Cerrado.

Microrganismos Solubilizadores de Fósforo

Introdução

O fósforo (P) é um macronutriente essencial para o desenvolvimento vegetal, desempenhando funções cruciais na transferência de energia (ATP), síntese de ácidos nucleicos (DNA e RNA), processos fotossintéticos [3], crescimento radicular, divisão celular, florescimento, formação de grãos e enchimento de grãos.

Em culturas como a soja e o milho, níveis adequados de fósforo são fundamentais para alcançar altas produtividades. No entanto, a disponibilidade de P para as plantas é frequentemente limitada em solos agrícolas, especialmente em solos tropicais intemperizados como os do Cerrado brasileiro. O chamado **"paradoxo do fósforo"**. Embora presente em abundância em muitos solos, cerca de **80% a 90% do P aplicado via fertilizantes torna-se indisponível** ao ser retido por minerais de ferro e alumínio (em solos ácidos) ou cálcio (em solos alcalinos). Nesses solos, o P tende a ficar preso por óxidos de ferro e alumínio, tornando-se inacessível às raízes das plantas, mesmo quando presente em grandes quantidades [10].

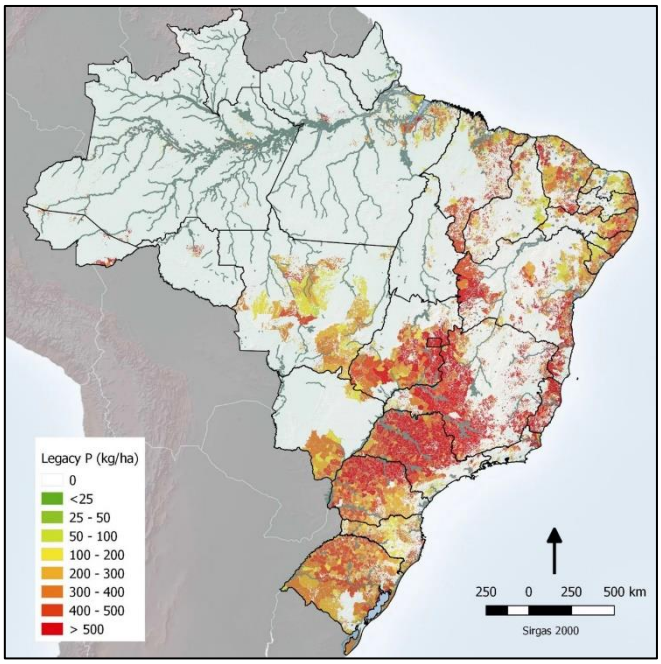
Por isso, estratégias que aumentem a disponibilidade de fósforo são cada vez mais importantes. Entre elas destacam-se a construção gradual da fertilidade do solo, o manejo adequado do pH, o uso de fertilizantes fosfatados eficientes e a utilização de microrganismos solubilizadores de fósforo. Esses organismos conseguem liberar parte do fósforo adsorvido por meio da produção de ácidos orgânicos e outros mecanismos biológicos, aumentando a concentração do nutriente na solução do solo e favorecendo sua absorção pelas raízes.

Diante desse desafio, os microrganismos solubilizadores de fósforo (MSF) emergem como uma solução biotecnológica promissora. Esses organismos são capazes de converter o fósforo insolúvel presente no solo em formas assimiláveis pelas plantas, otimizando o uso de fertilizantes fosfatados e contribuindo para uma agricultura mais sustentável [1] [2]. Este relatório técnico detalha a importância, os mecanismos de ação, os principais organismos envolvidos e a aplicação prática dos MSF, com foco nas culturas de soja e milho em solos do Cerrado.



Importância dos Microrganismos Solubilizadores de Fósforo

A baixa eficiência de uso do fósforo aplicado via fertilizantes é um problema global, com estimativas indicando que apenas 10% a 25% do P adicionado é efetivamente absorvido pelas plantas [10]. O restante permanece no solo em formas indisponíveis, acumulando-se ao longo do tempo. Essa fixação do P não apenas representa um custo elevado para os produtores, mas também gera preocupações ambientais devido à lixiviação e escoamento superficial que podem contaminar recursos hídricos [2].



Um total de 45,7 milhões de toneladas de fósforo foram aplicadas no Brasil entre 1960 e 2016.

Dessas, 30 milhões de toneladas ou 65,6% do fósforo permanece no solo (± $ 40 bilhões).

Previsão para 2050, 105 milhões de toneladas (± $ 140 bilhões).

Mapa do legado do solo P acumulado durante o cultivo e fertilizante mineral P adição nas lavouras brasileiras ao longo do período de 1960 a 2016. A imagem compreende todas as culturas e saldos P (saída P input -P) por município

(gerado pelo software QGIS versão 3.10 -https://qgis.org/en/site/forus ers/index .html)

A utilização desses microrganismos é crucial por diversos motivos.

Recuperação da "Poupança" de Fósforo: Estima-se que existam bilhões de dólares em fósforo acumulado nos solos brasileiros que podem ser resgatados.

Redução de Custos e Dependência Externa: O Brasil importa grande parte do fósforo que consome; o uso de biológicos reduz a necessidade de altas doses de fertilizantes químicos e a vulnerabilidade a crises internacionais.

Sustentabilidade: Substituem ou complementam fertilizantes minerais, reduzindo impactos ambientais como a eutrofização de águas e a acidificação do solo.

Aumento de Produtividade: Lavouras tratadas apresentam melhor arranque, maior resistência a veranicos e incrementos significativos na colheita.

Os MSF oferecem uma alternativa para mitigar esses problemas, ao:

Aumentar a disponibilidade de P: Transformam o P retido em formas solúveis, como o íon fosfato ($H_2PO_4^-$), que as plantas podem absorver [2].

Melhorar a eficiência da adubação: Permitem que as plantas aproveitem melhor o P já presente no solo e o P aplicado via fertilizantes, reduzindo a dependência de novas aplicações [1].

Promover o crescimento vegetal: Além de solubilizar o P, muitos MSF também produzem hormônios promotores de crescimento (auxinas, giberelinas, citocininas) e exibem atividade antibiótica contra patógenos, contribuindo para o vigor das plantas e o aumento da produtividade [1].

Contribuir para a sustentabilidade: Reduzem a necessidade de fertilizantes químicos, diminuindo custos de produção e o impacto ambiental da agricultura [2].

Mecanismos de Solubilização de Fósforo

Os solubilizadores atuam principalmente na rizosfera (região próxima às raízes), onde estabelecem uma relação simbiótica ou de parceria com a planta. Eles quebram as ligações químicas que mantêm o fósforo "preso" aos minerais (solubilização) ou à matéria orgânica (mineralização). Ao serem aplicados via sementes ou sulco de plantio, esses organismos colonizam as raízes e passam a secretar substâncias que disponibilizam o nutriente de forma contínua durante o ciclo da cultura.

Mecanismos de Ação

O fósforo orgânico, que pode representar 20% a 30% do P total do solo, precisa ser mineralizado para se tornar disponível às plantas. Esse processo é mediado por enzimas extracelulares produzidas pelos MSF [1] [2]. Os microrganismos utilizam uma combinação de processos químicos e bioquímicos para liberar o fósforo:

Produção de Ácidos Orgânicos: A via metabólica mais comum. Microrganismos excretam ácidos orgânicos de baixo peso molecular (e.g., ácido glucônico, cítrico, oxálico, tartárico) que reduzem o pH local e quelam cátions (Fe^{3+}, Al^{3+}, Ca^{2+}) ligados ao fosfato, liberando-o para a planta. Essa quelação libera o fosfato para a solução do solo. O ácido glucônico é um dos agentes mais frequentes na solubilização de fosfato mineral [1] [3].

Liberação de Enzimas (Fosfatases e Fitases): Atuam na mineralização do fósforo orgânico, quebrando moléculas complexas presentes na palhada e matéria orgânica.

Produção de Sideróforos: Compostos quelantes de ferro de alta afinidade, liberados em resposta ao estresse de ferro, que podem solubilizar fosfatos férricos [1]. Estes compostos "sequestram" o ferro, desfazendo a ligação do fósforo com esse metal e tornando o nutriente livre.

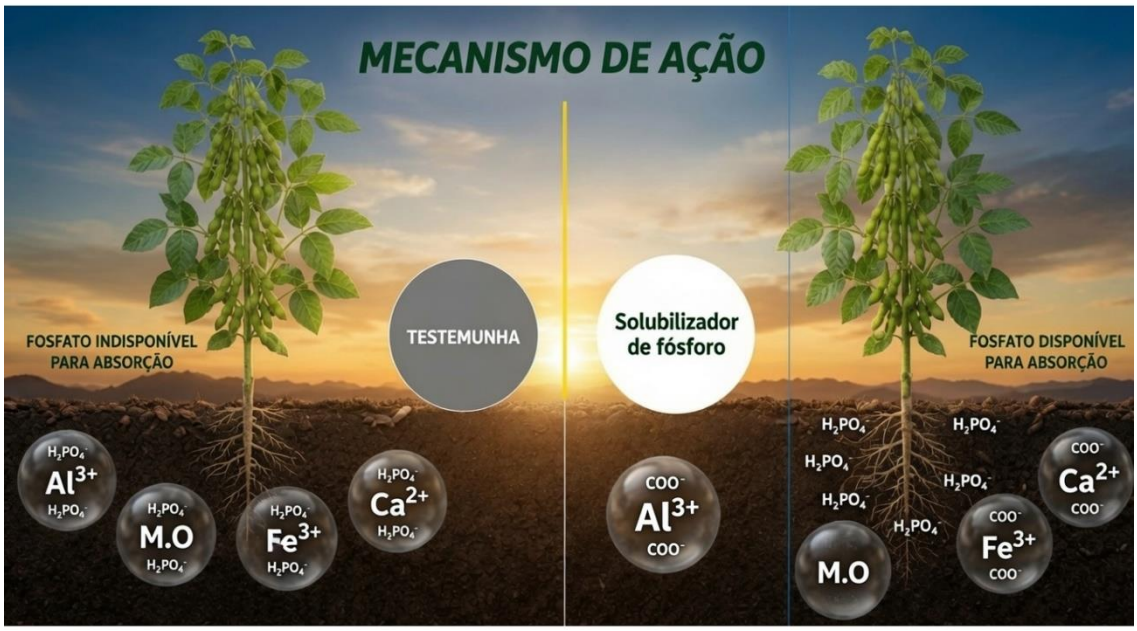
Produção de Hormônios: Secretam substâncias como o ácido indolacético (AIA), que estimulam o crescimento de raízes finas, aumentando a área de exploração do solo pela planta.

Excreção de Prótons (H^+): A liberação de prótons acidifica o microambiente ao redor das células microbianas, o que aumenta a solubilidade dos fosfatos inorgânicos. Isso ocorre, por exemplo, durante a assimilação de amônio (NH_4^+) pelos microrganismos [1].

Produção de Exopolissacarídeos (EPS): Polímeros de carboidratos que formam complexos com íons metálicos, contribuindo para a solubilização [1].

Produção de Ácidos Inorgânicos: Embora menos eficientes que os ácidos orgânicos, alguns MSF produzem ácidos como o sulfúrico e nítrico, que também podem solubilizar fosfatos [1].

Exopolissacarídeos (EPS): Produzem uma espécie de "goma" ou biofilme que ajuda a concentrar os ácidos e nutrientes ao redor da raiz, além de proteger a planta contra estresses hídricosOs MSF empregam uma variedade de mecanismos bioquímicos para solubilizar e mineralizar o fósforo no solo. Esses mecanismos podem ser categorizados em solubilização de fósforo inorgânico e mineralização de fósforo orgânico [1] [2].



Organismos Solubilizadores de Fósforo

A diversidade de microrganismos com capacidade solubilizadora é vasta, incluindo bactérias e fungos:

Bactérias: São as mais comuns em produtos comerciais devido à rapidez de reprodução. Destacam-se as cepas de ***Bacillus subtilis*** e ***Bacillus megaterium*** (identificadas pela Embrapa para o produto BiomaPhos). Outros gêneros importantes incluem *Pseudomonas*, *Burkholderia*, *Rhizobium* e *Azospirillum*.

Fungos: Gêneros como *Aspergillus*, *Penicillium* e *Fusarium* são conhecidos por sua alta eficiência na secreção de ácidos. Fungos como *Aspergillus* (especialmente *Aspergillus niger*), *Penicillium* (*Penicillium oxalicum*), *Gongronella*, *Fusarium* e *Talaromyces* são conhecidos por sua capacidade de solubilização. Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) estabelecem associações simbióticas com as raízes das plantas,

formando extensas redes de hifas que exploram maiores volumes de solo e facilitam a captura de P [1].

Embrapa em parceria com a empresa Bioma, desenvolveu o primeiro inoculante comercial brasileiro de MSF. Contém as cepas BRM 119 (*Bacillus megaterium*) e BRM 2084 (*Bacillus subtilis*). É aplicado via jato dirigido no sulco de semeadura ou tratamento de sementes [1] [4]. Embora promissor, os pesquisadores não recomendam a redução das doses de fósforo aplicadas à cultura, mas sim a otimização do uso do P já presente e adicionado [1].

Aplicação em Soja e Milho em Solos do Cerrado

Os solos do Cerrado brasileiro são caracterizados por seu elevado grau de intemperismo, baixa fertilidade natural e alta capacidade de fixação de fósforo, principalmente devido à presença de óxidos de ferro e alumínio [10]. Nesses solos, a adubação fosfatada é crucial, mas sua eficiência é limitada pela rápida imobilização do P [10]. O uso de MSF, especialmente em culturas como soja e milho, que demandam altas quantidades de P, tem demonstrado resultados promissores:

Aumento da Produtividade: Estudos de campo com inoculantes à base de MSF têm mostrado incrementos médios de 10% a 12% na produtividade de soja e milho [4]. Para outras culturas, como feijão, sorgo, arroz, cana-de-açúcar, braquiária e café, o potencial também é significativo [4].

Manejo Sustentável: A integração de MSF no manejo da soja e do milho no Cerrado contribui para a redução da dependência de fertilizantes minerais, otimizando o aproveitamento do P acumulado no solo e promovendo um sistema agrícola mais sustentável e economicamente viável [2] [4].

Principais ganhos para a produtividade:

1. Aumento Direto da Colheita (Sacas por Hectare)

O uso da tecnologia demonstra incrementos consistentes em diversas culturas, mesmo em áreas de alto investimento:

Milho: Ganhos médios de **11 a 15 sacas a mais** por hectare.

Soja: Incrementos de **5 a 5,5 sacas extras** por hectare.

Feijão: Aumento de produtividade de até **17%** (cerca de 6 sacas a mais por hectare).

Cana-de-açúcar: Ganhos de **15% a 20%** em biomassa, além de um aumento significativo na quantidade de açúcar.

2. Expansão do Sistema Radicular

As bactérias (*Bacillus subtilis* e *Bacillus megaterium*) presentes no produto produzem hormônios e substâncias que estimulam o crescimento de **raízes finas**. Isso aumenta drasticamente a área de exploração do solo, permitindo que a planta alcance o fósforo que é imóvel e está "preso" em camadas mais profundas.

3. Melhoria na Absorção de Nutrientes

Atua como uma "biofábrica", quebrando as ligações químicas do fósforo retido no solo (inorgânico) e mineralizando o fósforo da matéria orgânica. Isso resulta em:

Um aumento de cerca de **20% na absorção de fósforo** pela planta.

Maior **eficiência do fertilizante** aplicado, potencializando o adubo que muitas vezes é perdido para o solo.

4. Vigor Inicial e Maturidade Uniforme

O fósforo é o nutriente da energia (ATP) e da divisão celular. O uso do solubilizador promove um **melhor arranque inicial** da lavoura e uma **maturidade mais precoce e uniforme** dos grãos, o que é fundamental para o sucesso da safra.

5. Resiliência contra Estresses Climáticos

Em situações de **veranicos** (períodos de seca) ou altas temperaturas, as plantas inoculadas tendem a sofrer menos. Como as bactérias ajudam a aprofundar as raízes, a planta consegue buscar umidade em camadas inferiores do solo, mantendo o "motor" do metabolismo funcionando mesmo sob estresse hídrico.

6. Rentabilidade e Custo-Benefício (ROI)

O investimento na tecnologia apresenta um alto retorno financeiro para o produtor. Por exemplo, no caso do milho, o custo do produto equivale a menos de duas sacas, enquanto o ganho pode ultrapassar 12 sacas. Na soja, o custo é de cerca de meia saca para um ganho de cinco. Estima-se que o impacto econômico dessa tecnologia nos últimos anos já tenha ultrapassado **4 bilhões de reais** para a agricultura brasileira.

Relação entre disponibilidade de fósforo e pH do solo

A disponibilidade de fósforo está diretamente relacionada ao pH do solo. Em geral, o fósforo apresenta sua **maior disponibilidade em pH entre 6,0 e 6,5**, faixa em que ocorre menor fixação do nutriente e maior concentração na solução do solo.

Solos ácidos (pH abaixo de 5,5)

Nos solos do Cerrado, com pH baixo, há maior presença de ferro (Fe) e alumínio (Al) em formas reativas. O fósforo aplicado reage rapidamente com esses elementos, formando compostos pouco solúveis, como fosfatos de ferro e alumínio.

Consequências:

- Menor disponibilidade de fósforo para as plantas.
- Menor eficiência dos fertilizantes fosfatados.
- Necessidade de maiores doses para construir fertilidade.

Solos com pH adequado (6,0 a 6,5)

Nesta faixa, a atividade do alumínio tóxico é reduzida e a adsorção do fósforo pelos óxidos de ferro e alumínio diminui.

Benefícios:

- Maior concentração de fósforo na solução do solo.

- Melhor desenvolvimento radicular.
- Maior aproveitamento do fertilizante aplicado.
- Maior atividade biológica e mineralização da matéria orgânica.

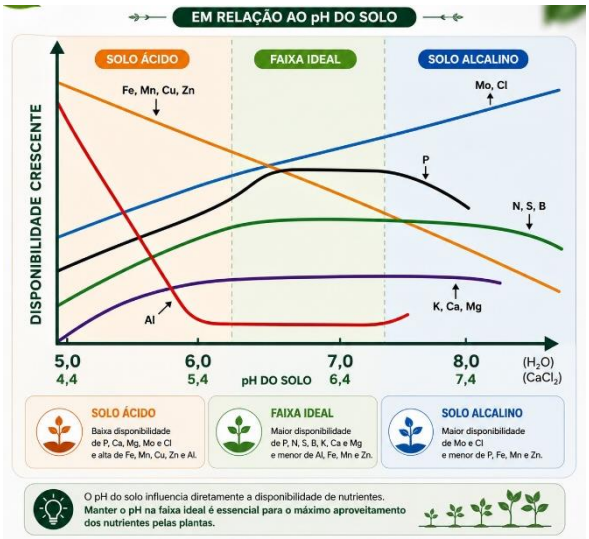
Solos alcalinos (pH acima de 7,0)

Em pH elevado, o fósforo tende a reagir com cálcio, formando fosfatos de cálcio de baixa solubilidade.

Consequências:

- Redução da disponibilidade de fósforo.
- Menor eficiência da adubação fosfatada.

Representação simplificada da Disponibilidade de P



Aplicação prática no Cerrado

Em regiões de cerrado alta capacidade de adsorção de fósforo devido aos teores elevados de óxidos de ferro. A correção da acidez com calcário não "libera" todo o fósforo já adsorvido, mas reduz a intensidade da fixação futura e melhora o aproveitamento do fósforo aplicado. Mesmo em solos corrigidos, os solubilizadores de fósforo podem continuar sendo úteis.

A correção do pH reduz a fixação do fósforo por alumínio e diminui parte da adsorção nos óxidos de ferro, mas **não elimina o problema da indisponibilidade de fósforo**, principalmente em solos muito intemperizados do Cerrado, ricos em óxidos de ferro e alumínio.

Para os Latossolos argilosos do sudoeste de Goiás, onde há décadas de aplicação de fósforo e alta presença de óxidos de ferro, o maior potencial dos solubilizadores costuma estar justamente na recuperação de parte desse fósforo já acumulado no solo, e não apenas no fósforo aplicado na safra atual.

Apenas a calagem libera o fósforo?

Quando o pH sobe para algo entre 5,8 e 6,5, diminui a atividade do alumínio tóxico, aumenta a disponibilidade de fósforo na solução do solo, melhora o crescimento radicular e aumenta a eficiência dos fertilizantes fosfatados. No entanto, os óxidos de ferro continuam presentes e grande parte do fósforo acumulado no solo permanece adsorvida e o fósforo continua sendo um nutriente de baixa mobilidade.

Microrganismos solubilizadores produzem ácidos orgânicos, prótons e enzimas que podem solubilizar fosfatos de cálcio, ferro e alumínio. Liberar parte do fósforo adsorvido aos coloides, mineralizar o fósforo orgânico da matéria orgânica e aumentar a exploração do solo pela rizosfera. Por isso, eles podem complementar a adubação mesmo em áreas com pH corrigido.

Quando a resposta tende a ser maior?

Normalmente observa-se maior potencial de resposta quando o solo possui histórico de construção de fósforo e os teores de P total são altos, mas o P disponível é moderado. Em solos onde há boa atividade biológica e existe matéria orgânica suficiente, pois o manejo favorece a sobrevivência dos microrganismos.

Quando a resposta tende a ser menor?

Em Solos muito pobres em fósforo e áreas recém-abertas. Em solos com baixa atividade biológica e em situações onde o fator limitante não é fósforo, mas água, potássio ou outro nutriente.

Posso reduzir a adubação química ao usar esses microrganismos?

Sim, **é possível reduzir a adubação química** com o uso desses microrganismos, mas essa decisão deve ser baseada criteriosamente em uma **análise de solo** atualizada. A redução não é apenas possível, mas recomendada em cenários específicos para aumentar a rentabilidade e a eficiência do sistema produtivo. A redução da adubação química é considerada segura quando os níveis de fósforo no solo estão acima do chamado "nível crítico". A recomendação de redução varia conforme a classificação da fertilidade obtida na análise de solo:

Margem de Redução Recomendada

Regra Geral de 20%: A Embrapa, baseada em dados científicos, indica que o produtor pode reduzir cerca de **20% da adubação fosfatada** se o nível de fósforo no solo já estiver em um patamar adequado. Isso ocorre porque os microrganismos conseguem aumentar a absorção de fósforo pela planta em aproximadamente **19% a 20%**.

Redução por Nível de Fertilidade:

Em áreas com níveis **muito altos** de fósforo, a redução pode chegar a **20%**. Em áreas com níveis **altos ou adequados**, a redução recomendada é de cerca de **15%**.

Casos Extremos em Pesquisa: Em experimentos da Embrapa com milho, feijão e cana-de-açúcar, reduções de até **50% da adubação** ainda resultaram em produtividades superiores às áreas que receberam 100% de adubo químico sem o inoculante.

Quando NÃO reduzir a adubação

É fundamental destacar que os microrganismos não substituem o fertilizante em todas as situações:

Solos de Baixa Fertilidade: Se a análise de solo indicar níveis **muito baixos, baixos ou médios** de fósforo, o produtor **não deve reduzir a adubação**. Nesses casos, os solubilizadores devem ser usados para **otimizar o aproveitamento** do adubo aplicado, garantindo que a planta absorva uma fatia maior do fertilizante químico que, normalmente, seria retido pelo solo.

Requisitos para a Redução Segura

Para que a redução da adubação química seja bem-sucedida, é necessário **Análise de Solo Recente.** O exame deve ter sido feito há, no máximo, **2 anos** e deve incluir análise física (teor de argila) e química. A redução funciona melhor quando combinada com outras boas práticas, como rotação de culturas, manutenção da palhada e correção do pH do solo via calagem.

Deve-se utilizar produtos com garantia de concentração e pureza, como os que utilizam a tecnologia da Embrapa, para evitar o uso de produtos "piratas" ou contaminados que não entregam o resultado esperado.

Em resumo, se o seu solo já possui uma "poupança" de fósforo construída, você pode reduzir a adubação química em **15% a 20%**, colhendo o mesmo ou até mais do que colheria com a dose cheia de adubo convencional. Se o solo é pobre, mantenha o adubo e use os microrganismos para garantir que esse investimento não seja "sequestrado" pelo solo.

Construção do peril so solo

Construir a fertilidade do solo em camadas profundas (especificamente no alvo de **20 a 40 cm**) é considerado um verdadeiro "seguro safra", pois permite que a planta mantenha seu metabolismo funcionando mesmo durante períodos de seca (veranicos), ao encontrar umidade e nutrientes onde as camadas superficiais já secaram. Essa construção não depende de um único fator, mas de uma estratégia sistêmica que envolve os seguintes pilares:

1. Estímulo ao Sistema Radicular Profundo

O uso de microrganismos solubilizadores, como as cepas de ***Bacillus subtilis*** e ***Bacillus megaterium***, é fundamental para "empurrar" a fertilidade para baixo. Essas bactérias produzem hormônios que estimulam a formação de **raízes finas** em grande volume. Por serem bactérias esporulantes e resistentes, elas conseguem realizar uma colonização radicular mais profunda e duradoura, acompanhando o crescimento da raiz durante todo o ciclo. Com raízes mais profundas e agressivas, a planta consegue acessar o fósforo que está imóvel e "preso" em camadas inferiores, aumentando a área de exploração do solo.

2. Adubação do Sistema (Biofábricas de Palhada)

Em vez de adubar apenas a cultura atual, **nutrir o sistema de produção** como um todo. O uso de culturas de entressafra (como milho safrinha, trigo ou mix de cobertura) funciona como uma **biofábrica**. Essas plantas absorvem o fósforo inorgânico do adubo e o transformam em **fósforo orgânico** dentro de sua biomassa. Quando essa palhada se decompõe, o fósforo é liberado de forma gradual e profunda, criando uma "poupança" orgânica que é muito mais eficiente para as safras seguintes.

3. Correção Química e Física do Perfil

Para que as raízes e os microrganismos consigam construir essa fertilidade, as barreiras físicas e químicas precisam ser removidas. A **calagem** é essencial para corrigir o pH em profundidade, liberando o fósforo para a solução do solo.

O fósforo se move por distâncias milimétricas (difusão) e precisa de um caminho livre. Se o solo estiver compactado, a raiz não explora e o fósforo fica bloqueado. Além disso, os microrganismos solubilizadores são aeróbicos e precisam de oxigênio para sobreviver e agir em profundidade.

.

Conclusão

Essa abordagem garante que a redução de custos não comprometa a produtividade, permitindo que o produtor utilize a "poupança" de fósforo já existente no solo de forma estratégica.

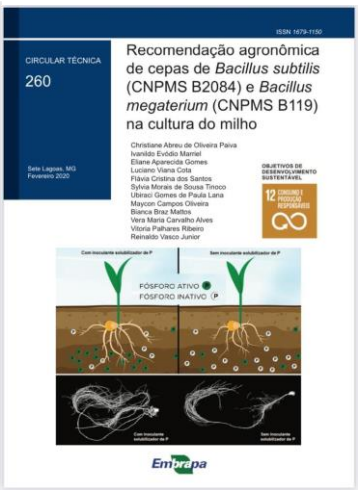
Os microrganismos solubilizadores de fósforo representam uma ferramenta biotecnológica valiosa para a agricultura, especialmente em regiões com solos de alta fixação de P, como o Cerrado brasileiro. Ao converter o fósforo insolúvel em formas disponíveis para as plantas, os MSF não apenas aumentam a produtividade de culturas como soja e milho, mas também promovem a sustentabilidade agrícola, reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos e otimizando o uso dos recursos existentes no solo.

Referências

1 Microrganismos solubilizadores de fósforo - Agroadvance
2 Bactérias solubilizadoras de fosfato: o que são e como funcionam? - Nutrição de Safras
3 Microrganismos Solubilizadores de Fósforo | Corteva Agriscience
4 BiomaPhos: Desbloqueie Fósforo do Solo e Aumente Produtividade - Aegro
5 Mecanismos de solubilização de fosfato por microrganismos promotores de crescimento vegetal - Agroadvance
6 Microrganismos e Disponibilidade de Fósforo (P) nos Solos - Embrapa (PDF)
7 Microrganismos solubilizadores de fósforo e potássio na cultura da soja - Embrapa (PDF)
8 Rendimento e viabilidade de soja em diferentes doses de fósforo - Revista Contribuciones (PDF)
9 solubilizadores de fosfatos associados a fontes de fósforo na - IF Goiano (PDF)
10 Microrganismos e Disponibilidade de Fósforo (P) nos Solos: uma análise crítica - Embrapa (PDF)









Agro-Kaiman

Consultoria Agronômica

Adalberto Vitor Pereira
Engenheiro Agrônomo

(64) 999420515