

Ativação biológica no solo e o uso de remineralizadores

José Mário Lobo Ferreira¹, Edenilson Meyer², Paulo Emilio Lovato³, Marcos Alberto Lana⁴

Resumo - Os microrganismos desempenham importante papel na ciclagem, solubilização e disponibilização de nutrientes para as plantas, como, também, na capacidade de infiltração e retenção de água no solo, na produção de fitormônios e na proteção das culturas. Essa interação microrganismos-plantas aumenta a eficiência dos remineralizadores e pode ser influenciada pelo manejo dos agroecossistemas. Entretanto, o estabelecimento de microrganismos no Sistema depende da criação de um hábitat favorável, da restauração da cadeia alimentar no solo e da promoção da biodiversidade. A nutrição das plantas, por sua vez, é influenciada pela atividade biológica, cujo monitoramento é estratégico para o manejo dos agroecossistemas.

Palavras-chave: biologia do solo; bioinsumo; agromineral; solubilização de nutriente; nutrição mineral.

Biological activation in the soil and the use of remineralizers

Abstract - Microorganisms play an important role in the cycling, solubilization and availability of nutrients for plants, as well as in the ability to infiltrate and retain water in the soil, phytohormones production and crop protection. This microorganism-plant interaction increases the remineralizers efficiency and can be influenced by the agroecosystems management. The establishment of microorganisms in the system depends on the creation of a favorable habitat, the restoration of the food chain in the soil and the promotion of biodiversity. Plant nutrition, in turn, is influenced by biological activity and it's assessment is strategic for the agroecosystems management.

Keywords: Soil biology; bioinputs; agrominerals; nutriente solubulization; mineral nutrition.

INTRODUÇÃO

Remineralizadores⁵ são fontes de nutrientes de baixo custo comparadas aos sais solúveis, porém, as lentas taxas de dissolução de minerais presentes nesses materiais representam um obstáculo para o uso generalizado. Uma grande variedade de bactérias e fungos pode contribuir para acelerar o processo de dissolução desses

minerais, e, com isso, proporcionar o aumento da fertilidade do solo e uma nutrição mais equilibrada para os cultivos agrícolas (RIBEIRO *et al.*, 2020a).

A interação entre plantas e microrganismos pode ser alavancada com o uso de inoculantes formulados e/ou com o manejo dos Sistemas Agrícolas que propicie maior ativação da biologia do solo, e, consequentemente, o aumento da biodisponibilização

de vários nutrientes que estão complexados nos argilominerais, na matéria orgânica (MO) do solo, ou presentes nos remineralizadores. A solubilização dos nutrientes desses materiais ocorre tanto por meio de processos físicos e químicos quanto biológicos.

Entre os diversos tipos de agrominerais⁶ regionais já conhecidos pelos agricultores, como os calcários, os sulfatos natu-

¹Eng. Agrônomo, Doutorando UFSC, Pesq. EPAMIG Sede - DPPE, Belo Horizonte, MG, jmlobo@epamig.br.

²Eng. Agrônomo, D.Sc., Pesq. UFSC, Florianópolis, SC, edenilsonmeyer@hotmail.com.

³Eng. Agrônomo, D.Sc., Prof. Tit. UFSC, Florianópolis, SC, paulo.lovato@ufsc.br.

⁴Eng. Agrônomo, D.Sc., Prof. Associado Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Suécia, marcos.lana@slu.se.

⁵Segundo a Lei nº 12.890, de 10.12.2013, remineralizadores referem-se a todo material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos e que altere os índices de fertilidade do solo por meio de adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo (BRASIL, 2013).

⁶Recursos agrominerais são minerais e rochas utilizados para melhorar a produtividade e a saúde do solo. Podem ser aplicados indiretamente, ao se extrair e concentrar um ou mais minerais por meio de processos industriais para a produção de fertilizantes convencionais e altamente solúveis (caracterizados como agrominerais *commodities*), ou podem ser aplicados diretamente no solo, sem processamento, exceto a moagem em tamanho fino (pó de rocha) (STRAATEN, 2022).

rais e as rochas fosfatadas, recentemente tem aumentado o uso de rochas silicáticas cominuídas, como fonte de potássio (K) e de outros nutrientes. Há uma crescente utilização dessa fonte de nutrientes por parte dos produtores, e este movimento foi potencializado pela atual crise dos fertilizantes, o que gerou aumento nos custos de produção e, conseqüentemente, uma oportunidade para a adoção de fontes alternativas visando substituir, mesmo que parcialmente, os sais solúveis.

A eficácia agrônômica dos remineralizadores depende da sua composição química, mineralógica e granulométrica, além das características do solo, das condições ambientais, das exigências das culturas e do manejo dos Sistemas de Produção, incluindo a ativação da biologia do solo (Fig. 1).

Os agrominerais adicionam macro e micronutrientes no Sistema, com exceção do nitrogênio (N), e a ativação biológica proporciona a solubilização dos nutrientes e a disponibilização de forma mais balanceada para as plantas cultivadas, além de influenciar na estabilidade dos agregados do solo, na capacidade de infiltração e

retenção de água, e na produção de substâncias que auxiliam na proteção e no desenvolvimento das plantas.

Alguns princípios no manejo dos agroecossistemas propiciam a ativação da biologia do solo e o fornecimento de nutrientes de forma balanceada para as plantas cultivadas. A aferição da atividade biológica do solo, de forma acessível aos agricultores, permite o monitoramento desta importante interação entre microrganismos, plantas e nutrição.

IMPORTÂNCIA DA ATIVIDADE BIOLÓGICA NA DISPONIBILIZAÇÃO DE NUTRIENTES PARA AS PLANTAS CULTIVADAS

Solos são sistemas biológicos de alta complexidade, como já se postulou no início do século XX (ALBRETCH, 2011). Representam um hábitat físico, quimicamente complexo e heterogêneo, e suportam uma elevada diversidade de táxons microbianos e faunísticos (FAO, 2015). Estas características permitem que organismos com metabolismos diferentes possam conviver e interagir em estado de

equilíbrio dinâmico, muitas vezes com relações de dependência essenciais para a sua sobrevivência, proporcionando condições ideais para uma biodiversidade elevada, incluindo populações de macro e microrganismos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Este arranjo dinâmico e complexo proporciona uma série de funções no ambiente solo, com destaque para a transformação e a ciclagem de nutrientes. As plantas estão associadas a uma gama de microrganismos, principalmente bactérias e fungos, os quais têm um papel crucial para o crescimento destas, como também para a tolerância e prevenção de doenças.

Alguns fatores são determinantes para a atividade biológica do solo, como a disponibilidade de nutrientes, o teor de umidade, o grau de acidez, a temperatura, a concentração de sais e a aeração, pois a maioria dos microrganismos é aeróbico, como a macrofauna (LEPSCH, 2011).

Por outro lado, a adoção de práticas agrícolas que promovem distúrbios ao Sistema, como o revolvimento do solo, a eliminação de uma cobertura permanente e diversificada da superfície, a compactação, o aporte de substâncias tóxicas para os microrganismos (como pesticidas e determinados sais solúveis), gera perdas da biodiversidade e da MO, e, conseqüentemente, perdas de nutrientes e redução da capacidade de reter íons como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e K, além de diminuir a capacidade de infiltração e retenção de água no solo (HIGASHIKAWA *et al.*, 2019).

O uso de herbicidas e sais solúveis, dependendo das fontes e das doses, pode gerar impactos na biologia do solo e desequilíbrios nutricionais nas plantas cultivadas. O excesso de um nutriente, por exemplo, pode provocar um desbalanço nutricional, tornando as plantas mais suscetíveis e menos produtivas. Esses desequilíbrios podem promover uma maior pressão de pragas, doenças e plantas espontâneas, levando ao uso de medidas remediadoras, como por exemplo os pesticidas, que, por sua vez, geram ainda mais desequilíbrios no Sistema (Fig. 2). Estes processos dimi-

Figura 1 - Principais fatores que influenciam na eficiência agrônômica dos agrominerais



Fonte: Ribeiro *et al.* (2020a).

Nota: MO - Matéria orgânica.

nuem a resiliência dos agroecossistemas, promovendo, conseqüentemente, o aumento dos custos, a maior exposição aos riscos climáticos e a menor autonomia dos agricultores.

Observa-se, no Brasil, nos anos de 2000 e 2018, um aumento no consumo de fertilizantes solúveis acompanhado por um aumento no consumo de pesticidas (Fig. 3 e 4 e Tabela 1).

O aumento do uso de pesticidas pode ser interpretado como um sinal de disfuncionalidade do Sistema, condicionado ao uso de substâncias que promovem mais distúrbios, além de gerar impactos negativos ambientais e repercutir na saúde dos agricultores e consumidores.

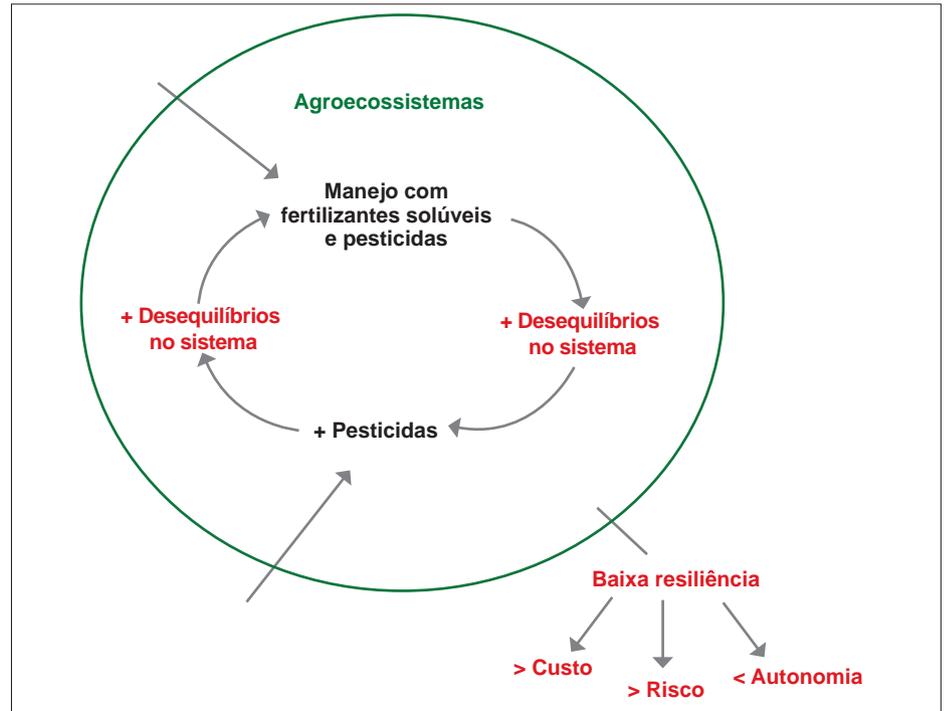
Remineralizadores e bioinsumos podem promover a substituição parcial ou total dos sais solúveis e pesticidas nos Sistemas de Produção.

A adição de agrominerais silicáticos, além de adicionar nutrientes no Sistema, gera novas partículas minerais, e, com isto, mais superfície específica, essencial para a interação dos microrganismos com os minerais e com as plantas. As superfícies na natureza fornecem locais de interação máxima entre várias formas

de vida ou níveis de organização. Nos solos de clima tropical, geralmente muito intemperizados, existem poucas cargas negativas que permitem a retenção de cátions. A característica da argila e do

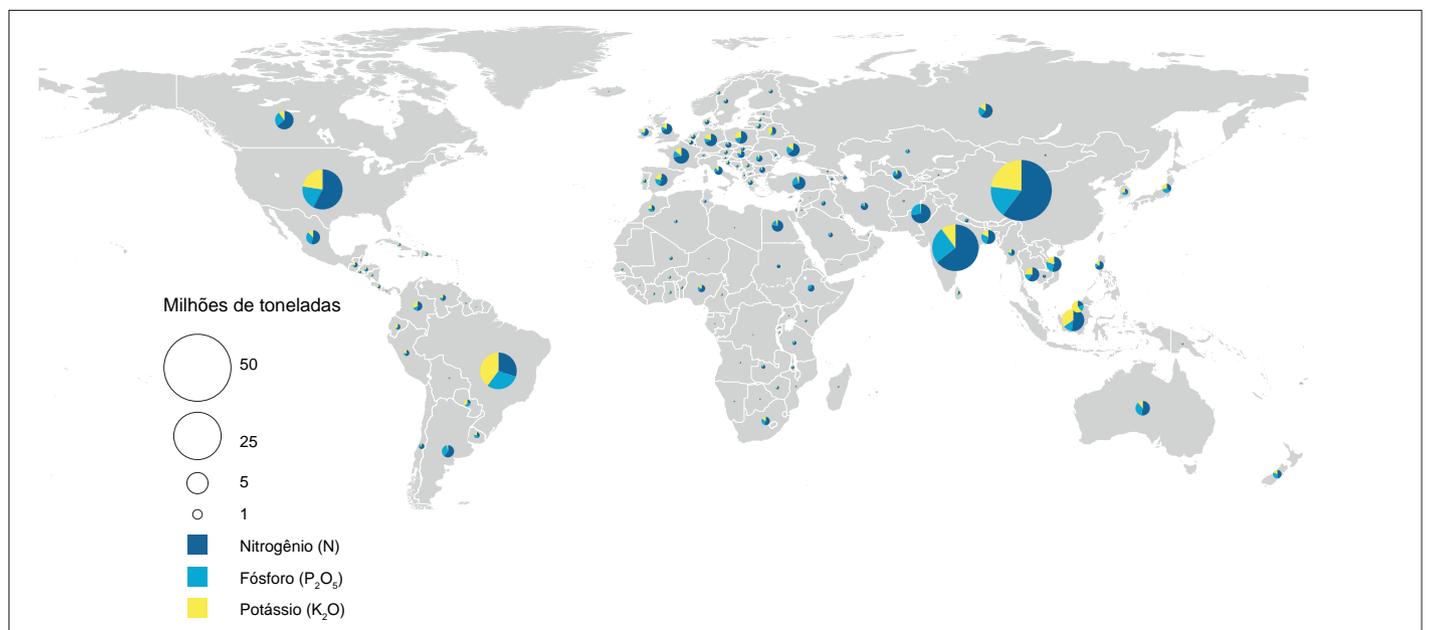
húmus de atrair, reter e liberar cátions é chamada capacidade de troca de cátions (CTC). A adição dos remineralizadores nesses solos, cuja fração argilosa é dominada por caulinita ou óxidos hidratados,

Figura 2 - Diagrama sobre a adoção de práticas que promovem distúrbios aos agroecossistemas e suas conseqüências



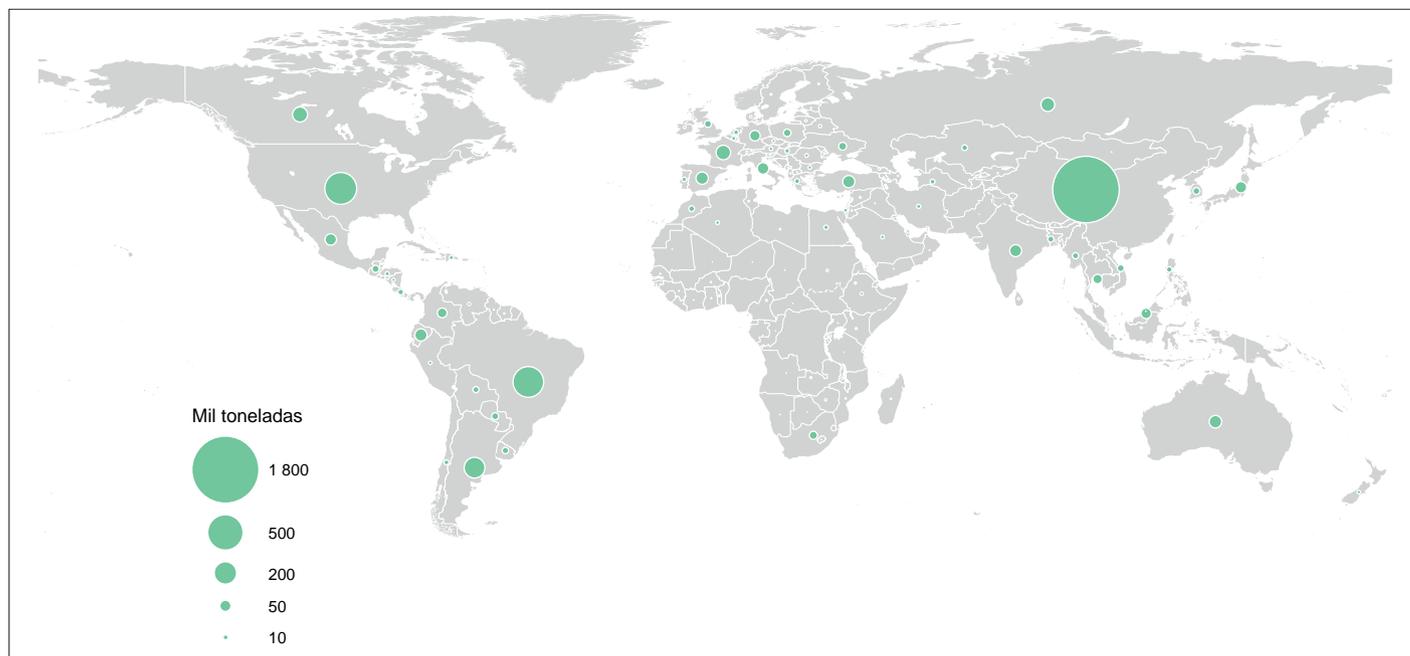
Fonte: Elaboração dos autores.

Figura 3 - Uso de fertilizantes no mundo em 2018



Fonte: Adaptado de FAO (2020).

Figura 4 - Uso de pesticidas no mundo em 2018



Fonte: Adaptado de FAO (2020).

Tabela 1 - Consumo de fertilizantes e pesticidas no Brasil nos anos de 2000 e 2018

Consumo no Brasil	2000	2018	Aumento (%)
Fertilizantes (consumo total)	6,6 milhões de t	17 milhões de t	158
Fertilizantes (consumo/área)	120 kg/ha	268 kg/ha	123
Pesticidas (consumo total)	140.423 t	377.176 t	169
Pesticidas (consumo/área)	2,56 kg/ha	5,94 kg/ha	132

Fonte: FAO Statistical Yearbook (2020).

pode aumentar a CTC. Com a atividade biológica no solo, o processo de bio-temperismo promove a modificação desses minerais liberando nutrientes. Esse processo de bio-temperismo pode ser acelerado por ação de microrganismos na rizosfera. Contudo, essa dissolução dos minerais primários, encontrados nos remineralizadores, ocorre parcialmente, ou seja, libera parte dos nutrientes, e a outra parte permanece no solo na forma de novos minerais, como os argilominerais 2:1. O elemento carbono (C), presente na MO, também é essencial tanto para a CTC do solo como para a atividade biológica, responsável pela solubilização dos elementos de interesse agrônomo contidos nos agrominerais.

Papel do carbono e da atividade biológica na disponibilização de nutrientes

O carbono (C) faz parte dos processos de ciclagem de nutrientes e está presente em todos os aspectos relacionados com a qualidade dos solos. O aumento do teor de C no solo, além de elevar a CTC, proporciona melhor capacidade de retenção de água, agregação do solo, do armazenamento de nutrientes e da sorção de poluentes orgânicos e/ou inorgânicos (COTRUFO *et al.*, 2013).

Nitrogênio

O aporte de C orgânico no solo aumenta a eficiência da ciclagem e a entrada de vários elementos, com destaque para

o N. O material de origem dos solos não contém quantidades significativas de N (em oposição a outros elementos), sendo a principal entrada nos ecossistemas via fixação do N₂ atmosférico a partir de um grupo especializado de microrganismos do solo. As maiores taxas de fixação de N foram observadas em leguminosas e em outros organismos com capacidade simbiótica de fixar N, calculadas em aproximadamente 50 a 200 kg/ha. Além da fixação biológica do nitrogênio (FBN) nas leguminosas, outras bactérias não nodulíferas, como as do gênero *Azospirillum*, têm sido utilizadas em diversas culturas (FERNANDES; SOUZA; SANTOS, 2018).

Calcula-se que aproximadamente a metade do N recebido anualmente nas lavouras do mundo (43%-50%) é proveniente de fertilizantes sintéticos. A taxa de recuperação de fertilizantes é de aproximadamente 50%, ou seja, metade de todo o N adicionado anualmente nas áreas de cultivo do mundo não é incorporada à biomassa do que é colhido, gerando uma perda expressiva de N, que é removido dos agroecossistemas para a atmosfera e para os corpos d'água superficiais e subterrâneos.

os (entre 20% e 25% do total do input de N) (LEPSCH, 2011).

As plantas diferem-se pela preferência por fontes de N, podendo absorver formas inorgânicas, como o NO_3^- e NH_4^+ , e formas orgânicas. Além da disponibilidade no solo, tanto as plantas micorrizadas quanto as não micorrizadas apresentam capacidade de absorção de aminoácidos pelas raízes. Essa capacidade é totalmente comparável à absorção de N inorgânico em razão das características semelhantes. Aminoácidos livres é a classe mais abundante de monômeros de N orgânico na solução do solo. Além de aminoácidos, as plantas são capazes de absorver outras formas de N orgânico diretamente dos solos, incluindo peptídeos, ureídeos e, até mesmo, proteínas. Foram identificados dois mecanismos de absorção de proteínas em plantas: absorção de aminoácidos e de peptídeos após a quebra, por ação de proteases liberadas pelas raízes, e absorção de proteínas intactas, via processo de endocitose em pelos radiculares (FERNANDES; SOUZA; SANTOS, 2018).

Alternativas para o uso de sais solúveis como fonte de N incluem o uso de adubos verdes, sobretudo as leguminosas, a ciclagem de N, por meio da produção de biomassa vegetal deixada como cobertura, a aplicação de esterco animal ou composto, dentre outras. No esterco de bovinos, cerca de 70% do N estão fixados em proteínas (SCHELLER, 1998). Substâncias húmicas tamponam e quelatizam o N, reduzindo as perdas por volatilização e lixiviação (MASTERS, 2019).

Portanto, a adição de C nos Sistemas, por meio de aplicação de compostagem, consorciação de diferentes cultivos, plantas de cobertura, rotação de culturas, policultivos, entre outros, pode reduzir perdas de N nos Sistemas Agrícolas. Quanto mais alto o teor de húmus, mais N é reposto a partir da reserva destes (Fig. 5).

A maior proporção de enxofre (S) no solo encontra-se na MO (cerca de 95%), e seu ciclo assemelha-se ao ciclo do N, sendo o fluxo controlado por reações me-

Figuras 5 - A adição de fontes de carbono aumenta a atividade biológica



José Mário Lobo Ferreira

Nota: Presença de actinomicetos sobre a palhada gerada pelas plantas de cobertura.

diadas por organismos presentes no solo (LEPSCH, 2011).

Fósforo

O fósforo (P) está entre os nutrientes mais limitantes nos sistemas naturais, pois está presente em pequenas quantidades e disponível apenas em suas formas solúveis, que reagem prontamente com Ca, ferro (Fe) e alumínio (Al), formando compostos insolúveis. Como a absorção de P pelas plantas é um processo relativamente ineficiente, cerca de 60% do total de P adicionado nos solos não são absorvidos por estas (FAO, 2015). Quando o P é liberado das rochas pelo intemperismo, este passa por processos de sorção - desorção (interações entre P na solução do solo e fases sólidas), dissolução - precipitação (equilíbrio mineral) e mineralização -

imobilização (conversões biologicamente mediadas de P entre formas inorgânicas e orgânicas). Tanto plantas como microrganismos podem produzir enzimas que liberam o fosfato organicamente fixado. O aumento do metabolismo proteico gera um aumento do P solúvel no solo (SCHELLER, 1998). Além da avaliação do P lábil, por meio de extratores como o Mehlich-1, recomenda-se analisar o P total no solo para se ter ideia do tamanho do reservatório deste elemento e quais as estratégias para acessá-lo (FAO, 2022).

Existem determinadas espécies de microrganismos que solubilizam o P, incluindo espécies de *Azotobacter*, *Pantoea*, *Microbacterium*, *Pseudomonas* e *Bacillus*. Relações entre fungos micorrízicos e bactérias solubilizadoras de fosfato podem ser estabelecidas: as bac-

térias produzem uma enzima que libera o fosfato, o qual será solubilizado próximo às hifas fúngicas; os fungos podem absorvê-lo prontamente e transportá-lo através das hifas para as raízes da planta. As bactérias solubilizadoras de fosfato compartilham parte do C que receberam das plantas, via exsudatos, com os fungos (MASTERS, 2019).

As micorrizas desempenham papéis centrais na nutrição das plantas, como evidenciado pelos efeitos benéficos na nutrição do P e no crescimento das plantas cultivadas, incluindo pastagens. Fungos micorrízicos arbusculares têm relações com mais de 90% das plantas (a maioria das plantas cultivadas está associada a estes fungos). O movimento de nutrientes, bem como a atividade biológica, depende da umidade e da água do solo. Como o diâmetro das hifas fúngicas é muito menor do que as raízes das plantas, essas podem colonizar novas zonas no ambiente do solo e captar a água que as raízes normalmente não absorvem (MASTERS, 2019).

Potássio

Ao contrário do N, P e S, o K, encontrado na solução do solo como K^+ , é influenciado pelos processos de troca catiônica e intemperismo. O K pode ser encontrado nos solos principalmente como parte dos minerais primários, e, também, como parte do pool não trocável em minerais secundários. Nestas formas, o K é lentamente disponível para as plantas e para os microrganismos. O K trocável em coloides do solo e o K solúvel em água são reservatórios prontamente disponíveis, no entanto, representam apenas 1% e 2%, respectivamente, do K total do solo (FAO, 2022).

A liberação de K ocorre por meio da ação de ácidos orgânicos: parte dos minerais primários e secundários é dissolvida e os nutrientes contidos são liberados, inclusive microelementos (LEPSCH, 2011). As bactérias solubilizadoras de K desempenham um papel central na solubilização de minerais potássicos. Embora

ainda existam poucas informações, Sattar et al. (2019) apresentam uma extensa revisão dos mecanismos de solubilização de K usados por bactérias. A produção de ácidos orgânicos fortes (ácidos oxálico, tartárico e cítrico, e íons H^+) é um mecanismo importante de solubilização de minerais potássicos, como mica, biotita, muscovita, feldspato, ilita e ortoclásio (KOUR et al., 2020). Dentre os principais grupos de bactérias solubilizadoras de K já foram descritas as espécies *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Paenibacillus* spp., *Bacillus mucilaginosus*, *B. edaphicus*, *B. circulans*, *Arthrobacter* sp., *Enterobacter hormaechei*, *Paenibacillus mucilaginosus*, *P. frequentans*, *Cladosporium* sp., *Aminobacter* sp., *Sphingomonas* sp., *Burkholderia* sp., e *Paenibacillus glucanolyticus*.

Com relação aos fungos, seu papel na solubilização de K é mais pronunciado pela produção de ácidos orgânicos, especialmente ácido oxálico, cítrico e glucônico, o que leva à dissolução de minerais silicáticos, mica e feldspato (VASSILEVA et al., 2000). Além disso, fungos filamentosos podem exercer forças biofísicas capazes de levar à ruptura dos minerais, reduzindo o tamanho das partículas e criando superfícies reativas mais acessíveis à ação dos outros microrganismos (XIAO; LIAN; SHAO, 2012). Entre os fungos, destacam-se os gêneros *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium* e os fungos micorrízicos arbusculares do gênero *Glomus*.

A sobrevivência e a atividade desses microrganismos dependem das características presentes no solo, como estrutura, textura, teor de MO, umidade, temperatura, entre outras (MEENA et al., 2016). Daí a importância do uso de técnicas conservacionistas para garantir uma boa atividade dos microrganismos solubilizadores de nutrientes, sejam nativos sejam inoculados na área.

Um fator importante que deve ser considerado quando se trata da distribuição espacial de K é a profundidade. Recentes estudos indicam que a estratificação vertical do K não é pronunciada, de modo que

não considerar o armazenamento desse elemento em profundidades superiores a 20 cm pode levar à subestimação do armazenamento de K nos solos (CORRENDO et al., 2021 apud FAO 2022).

Adubar os Sistemas de Produção passa, portanto, pela promoção da ativação da biologia do solo (SCHELLER, 1998). Com isso, parte das reservas de nutrientes do solo será acessada e disponibilizada para as plantas, por meio da interação destas com os microrganismos do solo (Fig. 6).

O conceito de adubação de Liebig afirma que as plantas, essencialmente, podem fazer uso apenas de nutrientes solúveis, e que a retirada das colheitas necessariamente empobrece o solo, se os nutrientes não forem repostos por meio da adubação, pelo menos em quantidade igual à perdida. Diversos experimentos de campo e ensaios, nas últimas décadas, demonstraram que as plantas podem mobilizar ativamente os nutrientes a partir dos silicatos primários, por meio de uma dissolução estrutural, das secreções de raízes e da atuação de microrganismos na rizosfera (SCHELLER, 1998).

A proporção dos diferentes minerais no solo, a granulometria, e as reservas nutricionais contidas nesses minerais e nos agrominerais eventualmente adicionados ao Sistema formam um aspecto importante da fertilidade do solo. Por outro lado, a quantidade e a composição das secreções rizosféricas e a atividade da biomassa microbiana vêm sendo influenciadas decisivamente pelo manejo dos Sistemas de Produção. Segundo Scheller (1998), podem ser verificados dois aspectos essenciais na fertilidade do solo:

- a) um lado mais estático, que se refere à granulometria e à composição dos agrominerais, teor de argila, pH e presença de macro e micronutrientes;
- b) um lado mais dinâmico, determinado pela atividade biológica no solo, ciclagem de elementos, taxas de reposição de K, P, Ca, Mg e micronu-

trientes a partir dos minerais do solo e do metabolismo de aminoácidos e proteínas.

O uso intensivo de fertilizantes solúveis e a exposição do solo aos processos erosivos podem diminuir rapidamente o teor de MO do solo e afetar a atividade biológica, levando ao declínio estrutural, à acidificação do solo, à proliferação de pragas e doenças, e, até mesmo, contribuindo para a liberação indesejável de gases de efeito estufa (GEE) (FAO, 2022). Tanto o excesso como a deficiência de nutrientes podem ser prejudiciais ao Sistema (Fig. 7).

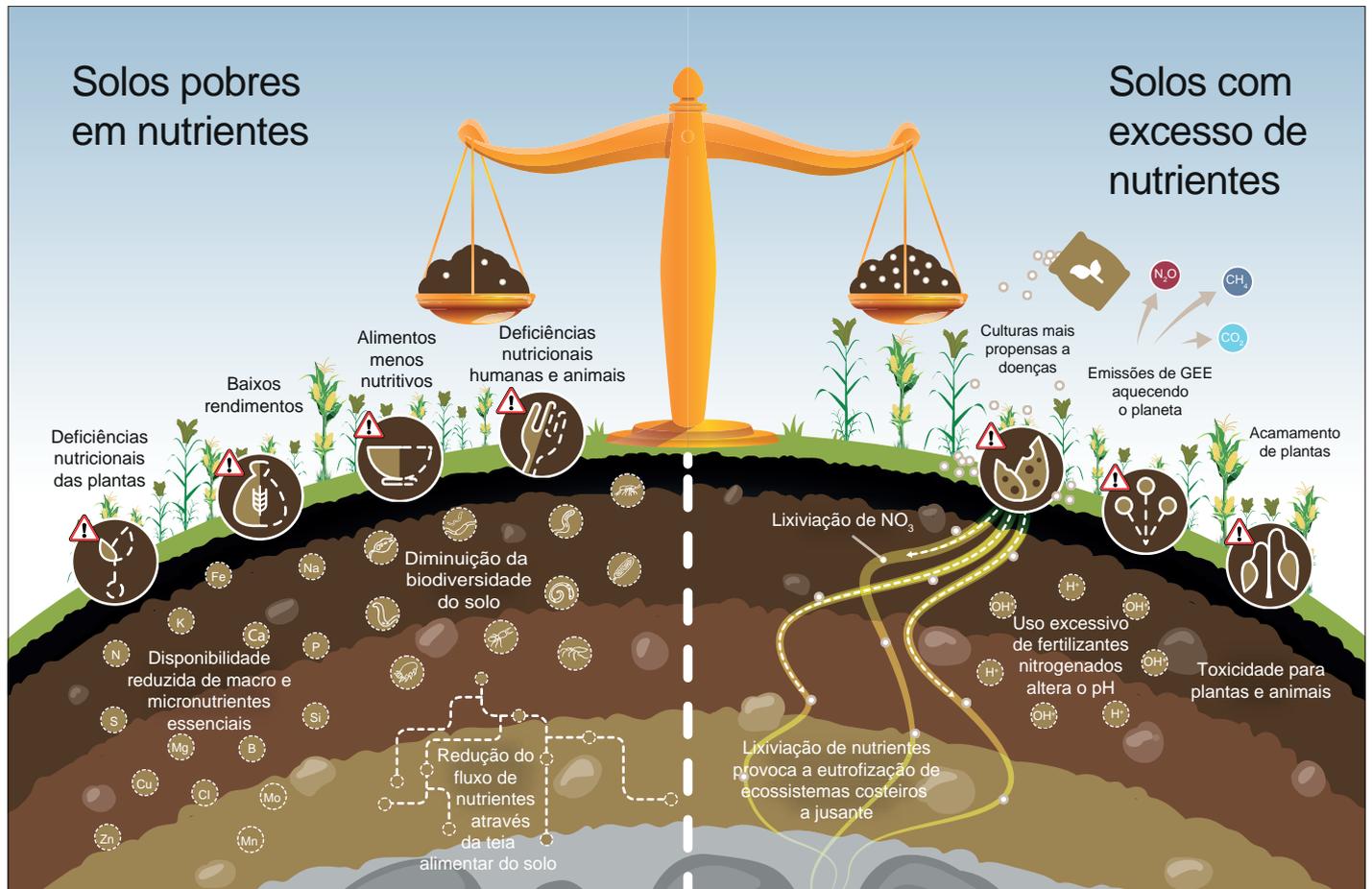
A atividade biológica é influenciada pela estrutura do solo e pelo teor de umidade, ao mesmo tempo em que influencia na formação e na estabilidade dos agregados do solo.

Figura 6 - Adesão do solo nas raízes facilitada pela interação entre os microrganismos e a planta



José Mário Lobo Ferreira

Figura 7 - Identificação dos impactos gerados tanto pela deficiência de nutrientes no solo como pelo excesso



Fonte: Adaptado de FAO (2022).

Nota: GEE - Gases de efeito estufa.

IMPORTÂNCIA DA ATIVIDADE BIOLÓGICA PARA A ESTRUTURA DO SOLO E CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO E RETENÇÃO DE ÁGUA

Embora a baixa fertilidade seja uma característica natural de alguns solos, em muitas circunstâncias, esta pode ser reduzida em decorrência de processos como: erosão, acidificação, salinização, urbanização, impermeabilização e desequilíbrio de nutrientes, causados principalmente por práticas insustentáveis no manejo do solo. Estima-se que esses processos afetam aproximadamente 33% dos solos no mundo (FAO, 2015).

O crescimento ideal da maioria das plantas ocorre quando as raízes podem acessar tanto o oxigênio quanto a água no solo. O solo deve, portanto, permitir a infiltração de água, drenar rapidamente quando saturado para permitir que o ar atinja as raízes, e reter e redistribuir a água para uso das plantas.

Embora a argila proporcione integridade estrutural aos agregados, a MO e as substâncias produzidas por microrganismos conferem uma forma estável a estes agregados (PIKUL JUNIOR *et al.*, 2009), pois o metabolismo do solo é muito influenciado pelas condições de umidade (SCHELLER, 1998).

A manutenção da estrutura⁷ do solo envolve os microrganismos e a fauna, além das raízes das plantas, permitindo a infiltração de água nos macroporos e a retenção nos microporos. Bactérias produzem géis e mucilagens, possibilitando aglutinar pequenas partículas e criando aglomerados. Os fungos possibilitam juntar estes vários pequenos agregados em uma estrutura maior, com uma complexidade que permite a formação de húmus e de macro e microporos (LEPSCH, 2011).

Agregados estáveis e canais também permitem um maior fluxo de trocas gasosas. Em solos saudáveis, é comum encontrar bactérias fixadoras de N de vida

livre, que exigem solos com sistemas de trocas gasosas funcionais. Quando os solos são compactados, sem estrutura, a fixação do N e o processo de ciclagem de outros elementos ficam comprometidos.

Solos muito ricos em húmus retêm mais água (a energia que retém a água está relacionada com a superfície específica das partículas). Quanto maior for a superfície, mais água o solo poderá reter. Quando são adicionados fertilizantes inorgânicos ao solo (que quase sempre estão na forma de sais bastante solúveis), a faixa de retenção de água disponível diminui, pois esta se move para locais onde a concentração de sal é maior.

Com a intensificação da ocorrência de eventos extremos, sobretudo chuvas de alta intensidade, processos erosivos também podem ocorrer nas áreas de produção. A identificação da concentração do escoamento superficial (enxurradas) e de possíveis pontos críticos, referentes ao sistema de drenagem das estradas que margeiam ou que cortam as áreas de produção, permite o planejamento para a implantação de estruturas de contenção dos processos erosivos, como os terraceamentos e as caixas de infiltração.

A adoção dessas práticas de conservação, contudo, estão focadas, muitas vezes, nos sintomas dos solos que perderam a capacidade de infiltração e retenção das águas pluviais. O bom funcionamento do Sistema e o manejo conservacionista devem estar pautados também na promoção da estabilidade dos agregados do solo.

A temperatura do solo é importante para a germinação e o desenvolvimento das plantas cultivadas, para a atividade de microrganismos, para os processos de transformação dos resíduos vegetais em húmus e para a capacidade de retenção da água no solo. Em solos descobertos, a amplitude térmica é maior e as temperaturas podem chegar a níveis muito altos, prejudicando a atividade biológica e promovendo perdas de água no Sistema. Muitas áreas de produção agrícola e de

pastagens apresentam uma baixa cobertura do solo. Nesta situação, a MO pode ser degradada e os processos erosivos são muito mais intensos. Plantas espontâneas indicam, muitas vezes, Sistemas sem um bom funcionamento, como por exemplo, solos compactados, desequilíbrio de nutrientes, baixo teor de MO e acidez do solo.

Uma cobertura permanente, diversificada e com raízes vivas é uma estratégia importante para a atividade biológica e o manejo sustentável da fertilidade do solo. Diferentes espécies de plantas produzem uma variedade de exsudatos, atraindo maior diversidade de microrganismos. O aumento da resiliência dos Sistemas de Produção está relacionado com a redundância no Sistema, ou seja, para uma mesma função existem diferentes microrganismos. Numa condição de estresse hídrico, por exemplo, uma determinada funcionalidade do Sistema se manteria com a presença de microrganismos adaptados a esta condição de estresse. Diferentes plantas também podem propiciar a ciclagem de nutrientes no Sistema, pela arquitetura de raízes distintas e pela capacidade de solubilizar determinados nutrientes (Fig. 8).

POTENCIAL DA ATIVIDADE BIOLÓGICA PARA A SOLUBILIZAÇÃO DE NUTRIENTES CONTIDOS NOS REMINERALIZADORES

Rochas formadas em profundidade, quando expostas à superfície, ficam sujeitas a condições de pressão e de temperatura diferentes daquelas de sua formação e tornam-se instáveis. Iniciam-se assim as alterações físicas e químicas, nas quais elementos químicos, presos na estrutura dos minerais, são liberados no solo. A solução do solo, enriquecida de produtos metabólicos, gás carbônico e ácidos húmicos, aumenta a intensidade das reações de hidrólise, alterando os minerais contidos nas rochas, e provocando a remoção e a

⁷A estrutura do solo refere-se ao tamanho e formato dos poros e ao arranjo de suas partículas sólidas (LEPSCH, 2011).

Figura 8 - Plantas de cobertura – Trigo-mourisco, *Crotalaria juncea*, Milheto e *Urochloa ruziziensis* (syn. *Brachiaria ruziziensis*)



José Mário Lobo Ferreira

difusão de cátions como Fe, K, sódio (Na), Mg e Ca (LEPSCH, 2011).

Os nutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas cultivadas podem ser reciclados mediante a decomposição microbiana de materiais orgânicos no solo, como também, de elementos liberados por ação de intemperismo de minerais e rochas, envolvendo processos físicos e químicos que são modificados pela atividade biológica de plantas, microrganismos e animais.

O intemperismo biológico compreende a desintegração de rochas e a dissolução de minerais. Fungos fornecem rotas dinâmicas para a alocação de C derivado de plantas para a dissolução de minerais (os micélios fornecem canais para o transporte de longa distância dos nutrientes liberados pelo processo de intemperismo de volta às plantas). Essas vias miceliais fazem a ponte entre substratos heterogêneos, reduzindo a influência da variação local na relação carbono/nitrogênio (C/N). A produção de matrizes de polissacarídeos, por biofilmes de bactérias e/ou fungos em interfaces com

superfícies minerais e raízes, influencia os padrões de produção de antibióticos e moléculas de detecção de outros organismos, com efeitos concomitantes na estrutura da comunidade microbiana, e na composição qualitativa e quantitativa de compostos solubilizantes minerais e de produtos de intemperismo. Padrões de alocação de C e de mobilização de nutrientes de substratos orgânicos e inorgânicos têm sido estudados em escalas espaciais e temporais maiores. Nesses estudos, percebe-se um grau geralmente mais amplo de aceitação dos efeitos “sistêmicos” dos microrganismos nos padrões de mobilização de nutrientes, mas ainda sem um consenso sobre a contribuição quantitativa total desse processo em larga escala (LEAKE; READ, 2017; SMITS; WALLANDER, 2017).

O fornecimento e o transporte de C fotossinteticamente derivado de raízes e de hifas micorrízicas para substratos orgânicos e inorgânicos são processos biogeoquímicos fundamentais (JONES; NGUYEN; FINLAY, 2009), afetando tanto a decompo-

sição da MO quanto a intemperização dos minerais (esses dois processos influenciam um ao outro). Este fluxo de C e o papel das interações planta - microbioma - solo na rizosfera foram revistos sob uma perspectiva evolutiva (LAMBERS *et al.*, 2009). Diversos mecanismos são utilizados pelos microrganismos no processo de disponibilização de nutrientes para as plantas (Tabela 2).

A ideia de que microrganismos podem alterar rochas e minerais não é nova, fraturas biogênicas em vidro borossilicatado e silicatos cristalinos por fungos, como *Penicillium notatum* e *Aspergillus amstelodami*, foram demonstradas por Callot *et al.* (1987). Em florestas na Europa, a ocorrência generalizada de poros tubulares de origem biológica (3-10 µm de diâmetro) foi observada em minerais intemperizados presentes em solos argilosos e em rochas graníticas (JONGMANS *et al.*, 1997; BREEMEN *et al.*, 2000; LANDEWEERT *et al.*, 2001). Alguns desses poros foram encontrados ocupados

Tabela 2 - Mecanismos utilizados pelos microrganismos para disponibilização de diferentes nutrientes para as plantas

Nutriente	Mecanismos associados
Nitrogênio	Mineralização; nitrificação; desnitrificação; fixação biológica; atividade enzimática extracelular (protease e quitinase).
Fósforo	Mineralização; solubilização pela atividade da fosfatase extracelular ou ácidos orgânicos.
Potássio	Solubilização pela atividade de ácidos orgânicos.
Magnésio	Mineralização e solubilização pela atividade de ácidos orgânicos.
Ferro	Quelação; produção de sideróforos; transformações de oxirredução.
Zinco	Solubilização; absorção facilitada por fungos micorrízicos.
Cobre	Produção de carboxilase e compostos fenólicos; absorção facilitada por fungos micorrízicos.
Manganês	Transformações de oxirredução.
Enxofre	Transformações de oxirredução.

Fonte: Elaboração dos autores.

por hifas fúngicas. Supõe-se que foram formados por ação do intemperismo das hifas (possivelmente em associação com bactérias), liberando ácidos orgânicos e sideróforos. Diferentes métodos biomecânicos usados por fungos para penetrar as rochas têm recebido atenção. Outros estudos indicaram que fungos ectomicorrízicos (*Paxillus involutus*), quando em substratos sem K, conseguem separar diferentes camadas de minerais e acessar nutrientes até então indisponíveis (BONNEVILLE *et al.*, 2009). Os dados destes estudos sugerem a ocorrência de acidificação em microescala, mediada por hifas ligadas à superfície e posterior remoção de elementos químicos por ação fúngica. Entretanto, o significado quantitativo desses efeitos para as taxas totais de intemperismo ainda não está claro. Estudos comparativos, em florestas com espécies de ectomicorrizas ou micorrizas arbusculares (KOELE *et al.*, 2014), revelaram a presença de estruturas semelhantes a microtúneis em minerais em ambos os tipos de floresta, sugerindo que o intemperismo dos minerais pode ser causado pela acidificação da rizosfera por ambos os tipos de fungos, micorrízicos e saprotroficos.

Em solos antigos, altamente intemperizados, o P é o principal nutriente limitador do crescimento das plantas, enquanto o N é o principal nutriente limitador de crescimento em solos jovens. Os teores de P e

N mudam em função da idade do solo. Em solos mais jovens e de idade intermediária (como os encontrados em áreas de atividade geológica recente e em altas latitudes), com quantidades adequadas de nutrientes, os micélios de fungos são uma estratégia eficaz para a aquisição de nutrientes. Já a aquisição de nutrientes em solos pobres envolve, frequentemente, estruturas radiculares especializadas, estruturas simbióticas, tais como micorrizas ou nódulos radiculares (LAMBERS *et al.*, 2009).

ATIVIZAÇÃO DA BIOLOGIA DO SOLO

A solubilização de nutrientes pode ser impulsionada com a adição de microrganismos nos agroecossistemas, como, por exemplo, o aporte de biofertilizantes. De acordo com o Código de Fertilizantes, biofertilizante é um termo amplo usado para produtos que contêm microrganismos vivos ou dormentes, como bactérias, fungos, actinomicetos e algas, isoladamente ou em combinação, e que, quando aplicados, auxiliam na fixação do N atmosférico ou solubilizam/mobilizam elementos no solo, aumentando particularmente a disponibilidade de P, K e outros nutrientes (FAO, 2019).

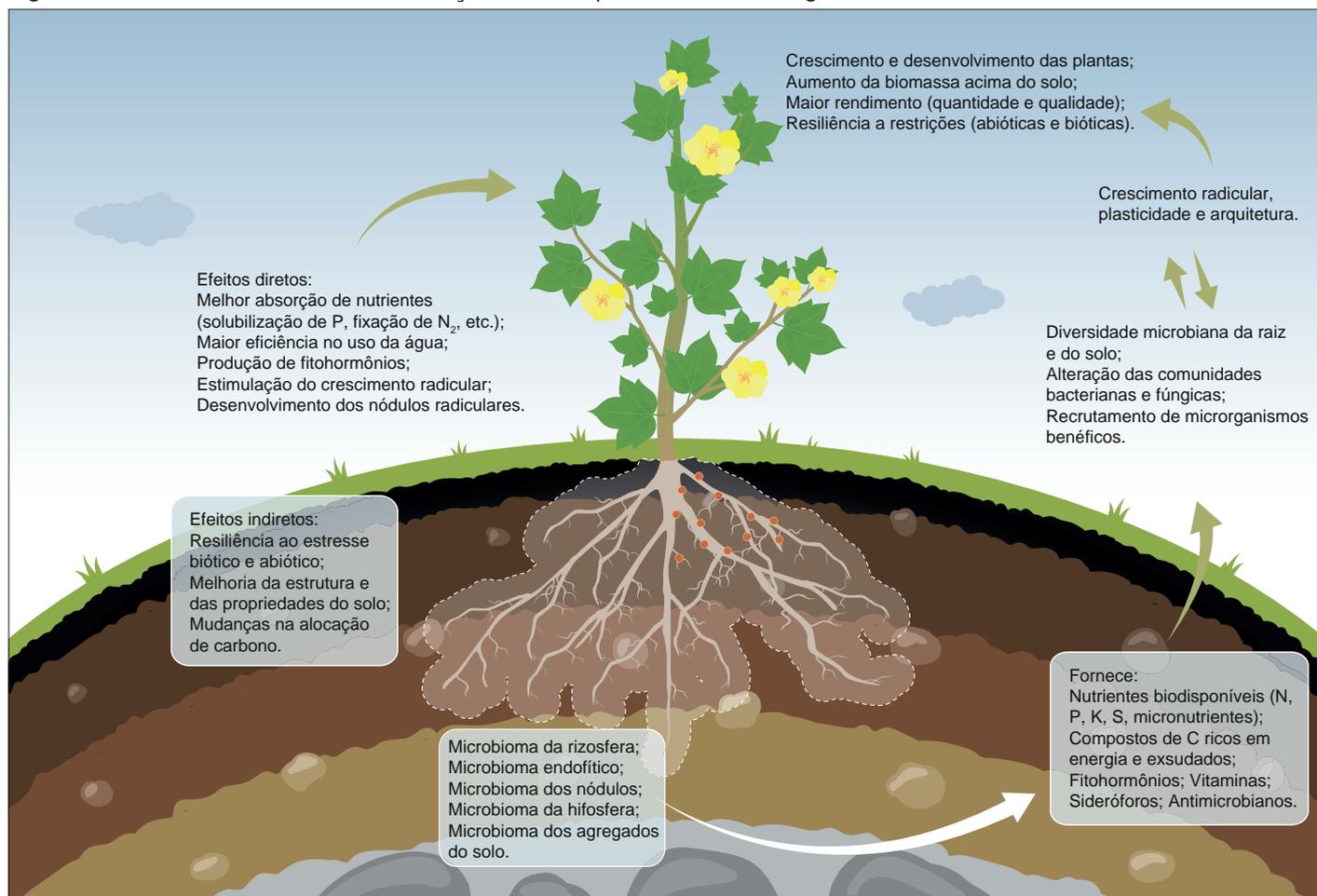
O mercado global de biofertilizantes foi estimado em 1.254 milhão de dólares em 2016 (FAO, 2022). De acordo com o Global Biofertilizers Market, a Europa e

a América Latina são atualmente os principais consumidores de biofertilizantes, seguidos pela China e Índia (SOU-MARE *et al.*, 2020). No mercado mundial de biofertilizantes, a fixação de N é amplamente predominante (79%). Em contraste, os biofertilizantes solubilizantes de fosfato representam apenas 14% do total (SOU-MARE *et al.*, 2020). O uso associado desses dois insumos com potencial para aumentar o rendimento dos cultivos pode levar a sinergismos que melhorem a qualidade do solo.

Embora os microrganismos e a planta hospedeira sejam importantes para a eficácia no uso de biofertilizantes, as propriedades e o manejo do solo, principalmente o teor de MO, serão determinantes para o estabelecimento e atuação destes microrganismos nos Sistemas de Produção.

A atividade biológica constrói a estrutura física do solo, como também depende da manutenção desta estrutura para o pleno funcionamento de diversos serviços ecossistêmicos. Alguns dos efeitos diretos são: a melhoria na absorção de nutrientes, a eficiência de uso da água, a produção de fitormônios e o crescimento radicular. O ambiente formado no entorno da raiz (rizosfera) com a presença de bactérias fixadoras de N, bactérias solubilizadoras de P e fungos micorrízicos, favorece a disponibilização de nutrientes (N, P, K, S, micronutrientes) e a produção de fitormônios, vitaminas etc. (Fig. 9).

Figura 9 - Processos envolvidos na interação entre as plantas e os microrganismos no solo



Fonte: Adaptado de FAO (2022).

Vários microrganismos têm sido utilizados em lavouras comerciais com o intuito de aumentar a eficiência na disponibilização de nutrientes às plantas cultivadas (Tabela 3).

A maioria dos microrganismos não vive em culturas puras de células únicas dispersas em solução do solo, estes agregam-se em interfaces – em superfícies de raízes, MO, rochas e minerais – formando biofilmes ou tapetes microbianos (FLEMMING; WINGENDER, 2010; FLEMMING *et al.*, 2016). Os biofilmes consistem em uma matriz hidratada de substâncias poliméricas extracelulares produzidas pelos organismos. Esta matriz pode ser responsável por 90% da massa seca do biofilme e fornece um suporte estrutural para a aderência às superfícies e para a coesão do biofilme. A matriz isola microrganismos da solução

do solo, mantendo-os próximos uns dos outros e das superfícies do substrato, concentrando agentes de intemperismo e permitindo a comunicação célula-célula. Isso permite a formação de populações microbianas que vivem em sinergia com a produção, o acúmulo, a retenção e a estabilização de enzimas extracelulares por meio de interações de ligação com polissacarídeos, absorção de compostos orgânicos e íons inorgânicos, e atividade redox (LIU; LIAN, 2019).

A retenção de água do biofilme mantém um microambiente hidratado, protegendo-o contra dessecação. Proteínas e polissacarídeos podem fornecer uma barreira protetora contra outros microrganismos. Tais comunidades microbiológicas são conhecidas por penetrarem nos substratos minerais e induzirem mudanças químicas

e físicas que contribuem para o intemperismo, como no caso da cianobactéria *Nostoc punctiforme* e a ascomycete *Knufia petricola*, responsáveis pela dissolução e pela lixiviação de diferentes minerais.

Há um crescente reconhecimento de que a atividade biológica do solo é importante, se não crítica, à produção agrícola. Contudo, se o Sistema não promover condição para o estabelecimento dos microrganismos, a estratégia de complementar quaisquer deficiências biológicas com fertilizantes ou corretivos biológicos não irá resolver as causas de um mau funcionamento do solo (STIKA, 2016).

Os Sistemas de Produção continuarão dependendo de medidas paliativas se não houver a criação de um bom hábitat para a atuação dos microrganismos, a restauração da cadeia alimentar e a promoção da biodi-

Tabela 3 - Microrganismos com ação de solubilização para diversos nutrientes minerais essenciais para a nutrição equilibrada das plantas cultivadas

Microrganismo	Solubilização	Fonte
<i>Acidithiobacillus ferroxidans</i>	PO ₄ , K, Fe, S	Lian <i>et al.</i> (2002) e Vidyalakshmi; Paranthaman e Bhakyaraj (2009).
<i>Azospirillum brasiliense</i>	N, PO ₄ , Zn, Fe	Tahir <i>et al.</i> (2013) e Ribeiro <i>et al.</i> (2020b).
<i>Azospirillum formosense</i>	N, PO ₄ , Zn, Fe	Ribeiro <i>et al.</i> (2020b).
<i>Azospirillum lipoferum</i>	N, PO ₄ , Zn, Fe	Ribeiro <i>et al.</i> (2020b).
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	PO ₄ , K, Zn, Fe	Gamez <i>et al.</i> (2020).
<i>Bacillus aryabhatai</i>	PO ₄ , K, Zn	Ramesh <i>et al.</i> (2014) e Mehmood <i>et al.</i> (2021).
<i>Bacillus circulans</i>	K	Lian <i>et al.</i> (2002).
<i>Bacillus edaphicus</i>	K	Lian <i>et al.</i> (2002).
<i>Bacillus licheniformis</i>	PO ₄ , K, Fe,	Parmar, Mehta e Kunt (2016), Goswami <i>et al.</i> (2014) e Lim e Kim (2009).
<i>Bacillus megaterium</i>	PO ₄ , K, Zn, Fe, Mn	Han e Lee (2005); Han, Supanjani e Lee (2006). Amalraj, Maiyappan e Peter (2012), Bhatt e Maheshwari (2020).
<i>Bacillus pumilus</i>	Zn	Jha (2019).
<i>Bacillus subtilis</i>	PO ₄ , K, Fe, Zn	Parmar, Mehta e Kunt (2016) e Ahmad, Chen e Dong (2017).
<i>Enterobacter hormaechei</i>	K	Lian <i>et al.</i> (2002).
<i>Paenibacillus glucanolyticus</i>	K	Lian <i>et al.</i> (2002).
<i>Pantoea phytobeneficialis</i>	N, PO ₄ , Zn	Nascimento <i>et al.</i> (2020).
<i>Pantoea cypripedii</i>	N, PO ₄	Singh <i>et al.</i> (2021).
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	N, PO ₄	Vyas e Gulati (2009).
<i>Pseudomonas oryzae</i>	N, PO ₄	Nascimento (2018).
<i>Pseudomonas palleroniana</i>	N, PO ₄ , K, Zn, Fe	Gamez <i>et al.</i> (2020).
<i>Pseudomonas thivervalensis</i>	N, PO ₄ , Zn	Nascimento <i>et al.</i> (2021).
<i>Nitrospirillum amazonense</i>	N, PO ₄ , Zn, Fe	Ribeiro <i>et al.</i> (2020b).
<i>Rhizobium leguminizarum</i>	N, PO ₄	Halder e Chakrabarty (1993).
<i>Rhizobium tropici</i>	N, PO ₄ , Zn	Ribeiro <i>et al.</i> (2020b).
<i>Streptomyces</i>	PO ₄	Subhashini e Kumar V. (2014).
<i>Trichoderma asperellum</i>	PO ₄ , K, Zn, Cu, Mn, Fe	Aishwarya <i>et al.</i> (2020).
<i>Trichoderma harzianum</i>	PO ₄ , K, Zn, Cu, Mn, Fe	Aishwarya <i>et al.</i> (2020).
<i>Trichoderma koningiopsis</i>	PO ₄ , K, Zn, Cu, Mn, Fe	Aishwarya <i>et al.</i> (2020).

versidade no solo. Uma das estratégias para garantir um habitat saudável, que permita o estabelecimento dos organismos, é manter o solo com uma cobertura permanente, diversificada e com raízes vivas, o maior tempo possível. O monitoramento da saúde do solo permite ajustes no processo de planejamento e de tomada de decisões, visando à ativação da biologia do solo.

MÉTRICAS PARA AVALIAR A SAÚDE DO SOLO

A qualidade do solo é muitas vezes vista como uma característica abstrata, que não pode ser definida, por depender

de fatores externos, como: práticas de uso, manejos, interações ecossistêmicas e ambientais, prioridades socioeconômicas, dentre outros. Historicamente, as percepções do que constitui um bom solo variam de acordo com as prioridades individuais para a sua função e o uso da terra (DORAN; SAFLEY, 1997).

A qualidade do solo pode ser representada por um conjunto de propriedades físicas, químicas e biológicas que, juntas, fornecem recursos para o crescimento das plantas e para a atividade biológica, regulam e particionam o fluxo e o armazenamento da água, e regulam a formação e

a destruição de compostos perigosos para o meio ambiente (LARSON; PIERCE, 1991 *apud* DORAN; SAFLEY, 1997). Os termos, qualidade do solo e saúde do solo, são frequentemente usados de forma intercambiável na literatura científica e na imprensa. Saúde é definida como “a condição de um organismo, ou de uma de suas partes, para desempenhar suas funções vitais normalmente ou adequadamente” (WEBSTER’S THIRD NEW INTERNATIONAL DICTIONARY, 1986 *apud* DORAN; SAFLEY, 1997). Segundo Doran e Safley (1997), a saúde do solo pode ser definida como,

a capacidade contínua do solo de funcionar como um sistema vital, dentro dos limites do ecossistema e do uso da terra, para sustentar a produtividade biológica, promover a qualidade do ambiente, do ar e da água e manter plantas, animais e a saúde humana.

O desafio é definir quantitativamente o estado de saúde do solo e sua avaliação.

Segundo Liu *et al.* (2006), a MO é um dos indicadores centrais da saúde do solo, por relacionar com plantas vivas, biomassa, exsudatos, resíduos vegetais e microrganismos. A biomassa microbiana, definida como parte da MO constituída por organismos vivos, é o indicador mais eficiente sobre mudanças no ecossistema do solo comparada ao teor de C orgânico (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Esta responde às flutuações sazonais de umidade e temperatura e ao gerenciamento de resíduos. Além de serem determinantes da ciclagem de nutrientes e das transformações da MO, os microrganismos participam da estruturação do solo, da solubilização de nutrientes e das associações mutualísticas com plantas e animais, afetam a composição da atmosfera e a retenção de água no solo, e produzem hormônios vegetais, uma variedade de enzimas e outros compostos com efeitos variados no solo (TÓTOLA; CHAER, 2002). Portanto, a quantificação da biomassa e da atividade microbiana associada a outras métricas, como a densidade aparente e a resistência à penetração, além das análises químicas, permitiriam uma avaliação sistemática do manejo adotado para atingir parâmetros de sustentabilidade (REGANOLD *et al.*, 1993; SPARLING, 1997; MADER *et al.*, 2002). No entanto, essas análises estão fora da rotina laboratorial acessada pelos produtores rurais e são muito dispendiosas.

Várias enzimas que participam da mineralização da MO são utilizadas como indicadores biológicos da qualidade do solo, pela relação com a atividade biológica, pela fácil medição e pela resposta rápida às mudanças no manejo (BANDICK; DICK, 1999). Todos os organismos

vivos no solo contribuem para uma ampla variedade de enzimas, que podem ser excretadas de uma célula viva ou liberadas na solução do solo a partir de células mortas. As enzimas livres formam complexos com coloides húmicos e podem-se estabilizar na superfície das partículas de argila ou MO e permanecer ativas por tempo variável (TABATAI; BOYD; MORTLAND *apud* TÓTOLA; CHAER, 2002). As propriedades químicas, físicas e biológicas do solo afetam a sobrevivência da difusão enzimática e a proporção do produto que está disponível para ser assimilado pelas células produtoras (WALLEENSTEIN; BURNS, 2011).

Como parte dos esforços para incorporar análises microbianas em análises de rotina comercial do solo no Brasil, foi desenvolvida uma tecnologia para avaliar os níveis das enzimas β -glucosidases e arilsulfatase nos solos, denominada Bioanálise do Solo (BioAs) (MENDES *et al.*, 2021). As β -glucosidases são carboxidrolases envolvidas na conversão de celobiose em glicose, uma importante fonte de energia para as comunidades microbianas do solo, as arilsulfatases são enzimas da classe das esterases envolvidas na hidrólise de sulfatos de éster a sulfato, uma das principais fontes de enxofre (S) para absorção pelas plantas (CHAER *et al.*, 2023). Este sistema de avaliação contém uma tabela de interpretação dos dados das enzimas com níveis críticos (baixos, moderados e adequados) a partir de equações matemáticas com base nas relações dos teores de enzimas, nos teores de C orgânico do solo e na acumulação relativa de produção de culturas anuais, como o milho e a soja (LOPES *et al.*, 2018).

A celulose, forma mais abundante de C fixo, é um polímero quimicamente simples, porém estruturalmente complexo e insolúvel, composto de cadeias lineares de unidades de glicose. Fungos são os principais degradadores da celulose, empregando uma bateria de enzimas hidrolíticas extracelulares, incluindo endo-1,4- β -glucanase ou endocelulase, celobio-hidrolase ou exo-

celulase e β -glucosidase. Vários estudos examinaram a distribuição de enzimas em relação ao tamanho do agregado, utilizando uma nova abordagem para demonstrar que a atividade da β -glucosidase estava concentrada em torno das raízes das plantas (WALLEENSTEIN; BURNS, 2011).

A arilsulfatase está envolvida na mineralização do enxofre (S). Este processo fornece S inorgânico (ACOSTA-MARTÍNEZ; PÉREZ-GUZMÁN; JOHNSON, 2019). A disponibilidade de C no solo é um fator-chave para as transformações de S no solo. A arilsulfatase abiótica pode persistir em associação com os compostos húmicos do solo, uma vez que a atividade da arilsulfatase foi altamente correlacionada com a MO (TABATABAI; BREMNER, 1972; ABRAMYAN; GALSTYAN, 1987; APPYH; AHENKORAH, 1989; SPEIR; ROSS, 1990). Estudos indicam que o desligamento do sulfato dos compostos orgânicos está correlacionado com um coeficiente metabólico mais baixo e mais estabilizado, portanto um solo com menos estresse. Por essa razão, a arilsulfatase tem demonstrado uma relação com a qualidade dos solos em que se aplica o índice de qualidade com base nessa enzima e na celulase. Esse indicador tem, portanto, potencial para verificar o efeito de remineralizadores sobre a qualidade global dos solos.

O uso dessas duas enzimas pode auxiliar os agricultores no monitoramento da capacidade produtiva do solo, envolvendo as propriedades químicas, físicas e biológicas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O avanço do conhecimento em Ciências Agrárias, o desenvolvimento de novos insumos e de novas tecnologias por empresas do setor e por agricultores, bem como os condicionantes econômicos e sociais, têm ocasionado um aumento no uso de remineralizadores e de bioinsumos. No entanto, ainda está no início a integração dessas técnicas, condicionadas por ambiente e condições locais, além de serem, até o momento, pouco estudadas. É necessário

que a pesquisa continue explorando os mecanismos envolvidos nos efeitos desses insumos e, principalmente, suas interações. Os pesquisadores e os órgãos de pesquisa devem atentar para as tecnologias desenvolvidas e/ou adotadas pelos produtores agrícolas, visto que estes também apresentam inovações. Também é importante que as avaliações dos remineralizadores, e das combinações com bioinsumos vão além da simples valorização do aumento de rendimentos. Deve-se considerar ainda a sustentabilidade da produção e os serviços ecossistêmicos gerados, sendo uns dos aspectos de avaliação da qualidade global dos solos, para a qual já existem indicadores para certos cultivos e regiões.

REFERÊNCIAS

- ABRAMYAN, S.A.; GALSTYAN, A.S. Regulation of the activity of sulfur-metabolism enzymes in soil. **Pochvovedeniye**, v.9, p.61-70, 1987.
- ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; PÉREZ-GUZMÁN, L.; JOHNSON, J.M.F. Simultaneous determination of β -glucosidase, β -glucosaminidase, acid phosphomonoesterase, and arylsulfatase activities in a soil sample for a biogeochemical cycling index. **Applied Soil Ecology**, v.142, p.72-80, Oct. 2019.
- AHMAD, Z. *et al.* Isolated *Bacillus subtilis* strain 330-2 and its antagonistic genes identified by the removing PCR. **Scientific Reports**, v.7, n.1, p.1777, May 2017.
- AISHWARYA, S. *et al.* Biosolubilization of different nutrients by *Trichoderma* spp. and their mechanisms involved: a review. **International Journal of Advances in Agricultural Science and Technology**, v.7, n.6, p.34-39, June 2020.
- ALBRECHT, W.A. **Albrecht's foundation concepts**. 2.ed. Austin: ACRES, 2011. 515p. (The Albrecht Papers, 1).
- AMALRAJ, E.L.D.; MAIYAPPAN, S.; PETER, A.J. In vivo and in vitro studies of *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* on nutrient mobilization, antagonism and plant growth promoting traits. **Journal of Ecobiotechnology**, v.4, n.1, p.35-42, 2012.
- APPIAH, M.R.; AHENKORAH, Y. Arylsulfatase activity of different latosol soils of Ghana cropped to cocoa (*Theobroma cacao*) and coffee (*Coffea canephora* var. *robusta*). **Biology and Fertility of Soils**, v.7, n.2, p.186-190, Jan. 1989.
- BANDICK, A.K.; DICK, R.P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biology and Biochemistry**, v.31, n.11, p.1471-1479, Oct. 1999.
- BHATT, K.; MAHESHWARI, D.K. Zinc solubilizing bacteria (*Bacillus megaterium*) with multifarious plant growth promoting activities alleviates growth in *Capsicum annuum* L. **3Biotech**, v.10, n.2, p.11-20, Feb. 2020. Article 36.
- BONNEVILLE, S. *et al.* Plant-driven fungal weathering: early stages of mineral alteration at the nanometer scale. **Geology**, v.37, n.7, p.615-618, July 2009.
- BRASIL. Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. Altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, v.150, n.240, p.1,11 dez. 2013. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=1&ata=11/12/2013>. Acesso em: 19 maio 2022.
- BREEMEN, N. van *et al.* Mycorrhizal weathering: a true case of mineral plant nutrition? **Biogeochemistry**, v.49, n.1, p.53-67, 2000.
- CALLOT, G. *et al.* Biogenic etching of microfractures in amorphous and crystalline silicates. **Nature**, v.328, p.147-149, 1987.
- CHAER, G.M. *et al.* Evaluating C trends in clayey Cerrado oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β -glucosidase activities. **Applied Soil Ecology**, v.183, Mar. 2023. Article 104742.
- COTRUFO M.F. *et al.* The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? **Global Change Biology**, v.19, n.4, p.988-995, Apr. 2013.
- DORAN, J.W.; SAFLEY, M. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In: PANKHURST, C.; DOUBE, B.M.; GUPTA, V.V.S.R. **Biological indicators of soil health**. Wallingford: CAB International, 1997. cap.1, p.1-28. Disponível em: <https://www.isprambiente.gov.it/files/biodiversita/>
- Pankhurst_1997_Biological_indicators.pdf. Acesso em: 19 maio 2022.
- FAO. **Soils for nutrition: state of art**. Rome: FAO, 2022. 78p. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cc0900en/cc0900en.pdf>. Acesso em: 19 maio 2022.
- FAO. **Status of the world's soil resources: Main Report**. Rome: FAO, 2015. 607p. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>. Acesso em: 19 maio 2022.
- FAO. **The International Code of Conduct for the sustainable use and management of fertilizers**. Rome: FAO, 2019. 43p. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/CA5253EN>. Acesso em: 19 maio 2022.
- FAO. **World food and agriculture**. Rome: FAO, 2020. 351p. (FAO. Statistical Yearbook, 2020). Disponível em: <https://www.fao.org/3/cb1329en/CB1329EN.pdf>. Acesso em: 19 maio 2022.
- FERNANDES, M.S.; SOUZA, S.R. de; SANTOS, L.A. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. 2.ed. São Paulo: SBCS, 2018. 670p.
- FLEMMING, H.C.; WINGENDER, J. The biofilm matrix. **Nature Reviews Microbiology**, v.8, n.9, p.623-633, Sept. 2010.
- FLEMMING, H.C. *et al.* Biofilms: an emergent form of bacterial life. **Nature Reviews Microbiology**, v.14, p.563-575, Sept. 2016.
- GAMEZ, R.M. *et al.* Complementary dynamics of banana root colonization by the plant growth-promoting Rhizobacteria *Bacillus amyloliquefaciens* Bs006 and *Pseudomonas palleroniana* Ps006 at spatial and temporal scales. **Microbial Ecology**, v.80, n.3, p.656-668, Oct. 2020.
- GOSWAMI, D. *et al.* Screening of PGPR from saline desert of Kutch: growth promotion in *Arachis hypogea* by *Bacillus licheniformis* A2. **Microbiological Research**, v.20, n.169, n.1, p.66-75, Jan. 2014.
- HALDER, A.K.; CHAKRABARTTY, P.K. Solubilization of inorganic phosphate by *Rhizobium*. **Folia Microbiology**, v.38, n.4, p.325-330, August 1993.
- HAN, H.S.; LEE, K.D. Phosphate and potassium solubilizing bacteria effect on mineral uptake, soil availability and growth of eggplant. **Research Journal of Agriculture and Biological Sciences**, v.1, n.2, p.176-180, 2005.
- HAN, H.S.; SUPANJANI; LEE, K.D. Effect of co-inoculation with phosphate and potassium solubilizing bacteria on mineral

- uptake and growth of pepper and cucumber. **Plant, Soil and Environment**, v.52, n.3, p.130-136, 2006.
- HIGASHIKAWA, F.S. *et al.* Conceito de fertilidade do solo em SPDH. In: FAYAD, J.A. *et al.* (org.) **Sistema de Plantio Direto de Hortaliças**: método de transição para um novo modo de produção. 2.ed. Florianópolis: EPAGRI, 2019. cap.5, p.87-105. Disponível em: <http://estaticog1.globo.com/2020/06/26/folheto Hortaliças.pdf>. Acesso em: 19 maio 2022.
- JHA, Y. The importance of zinc-mobilizing rhizosphere bacteria to the enhancement of physiology and growth parameters for paddy under salt-stress conditions. **Jordan Journal of Biological Sciences**, v.12, n.2, p.167-173, June 2019.
- JONES, D.L.; NGUYEN, C.; FINLAY, R.D. Carbon flow in the rhizosphere: carbon trading at the soil-root interface. **Plant and soil**, v.321, n.1/2, p.5-33, Aug. 2009.
- JONGMANS, A.G. *et al.* Rock-eating fungi. **Nature**, v.389, p.682-683, 1997.
- KOELE, N. *et al.* Ecological significance of mineral weathering in ectomycorrhizal and arbuscular mycorrhizal ecosystems from a field-based comparison. **Soil Biology and Biochemistry**, v.69, p.63-70, Feb. 2014.
- KOUR, D. *et al.* Potassium solubilizing and mobilizing microbes: biodiversity, mechanisms of solubilization, and biotechnological implication for alleviations of abiotic stress. In: RASTEGARI, A.A.; YADAV, A.N.; YADAV, N. (ed.). **New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering**: trends of microbial biotechnology for sustainable agriculture and biomedicine systems: diversity and functional perspectives. Amsterdam: Elsevier, 2020. cap.11, p.177-202.
- LAMBERS, H. *et al.* Plant-microbe-soil interactions in the rhizosphere: an evolutionary perspective. **Plant and soil**, v.321, n.1/2, p.83-115, Aug. 2009.
- LANDEWEERT, R. *et al.* Linking plants to rocks: ectomycorrhizal fungi mobilize nutrients from minerals. **Trends in Ecology & Evolution**, v.16, n.5, p.248-254, May 2001.
- LEAKE, J.R.; READ, D.J. Mycorrhizal symbioses and pedogenesis throughout earth's history. In: JOHNSON, N.C.; GEHRING, C.; JANSÁ, J. (ed.). **Mycorrhizal mediation of soil**: fertility, structure, and carbon storage. [Amsterdam]: Elsevier, 2017. cap.2, p.9-33.
- LEPSCH, I.F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 425p.
- LIAN, B. *et al.* A comprehensive review of the mechanism of potassium releasing by silicate bacteria. **Acta Mineralogica Sinica**, v.22, n.2, p.179-183, 2002.
- LIM, J.H.; KIM, S.D. Synergistic plant growth promotion by the indigenous auxin-producing PGPR *Bacillus subtilis* AH18 and *Bacillus licheniformis* K11. **Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry**, v.52, n.5, p.531-538, Oct. 2009.
- LIU, H.; LIAN, B. Quantitative evaluation of different fractions of extracellular polymeric substances derived from *Paenibacillus mucilaginosus* against the toxicity of gold ions. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v.175, p.195-201, 2019.
- LIU, X. *et al.* Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation: a review. **Plant Soil and Environment**, v. 52, n.12, p.531-543, 2006.
- LOPES A.A.C. *et al.* Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v.12, p.72-82, Mar. 2018.
- MADER, P. *et al.* Soil fertility and biodiversity in organic farming. **Science**, v.296, n.5573, p.1694-1697, May 2002.
- MASTERS, N. **For the love of soil**: strategies to regenerate our food production systems. Monee, IL: Printable Reality, 2019. 301p.
- MENDES, I. de C. *et al.* **Tecnologia BioAS**: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2021. 50p. (Embrapa Cerrado. Documentos, 369).
- MEENA, V.S. *et al.* Potassium-solubilizing microorganism in evergreen agriculture: an overview. In: MEENA, V.S. *et al.* (ed.). **Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture**. New Delhi: Springer India, 2016. cap.1, p.1-20.
- MEHMOOD, S. *et al.* Alleviation of salt stress in wheat seedlings via multifunctional *Bacillus aryabhatai* PM34: an in-vitro study. **Sustainability**, v.13, n.14, p.8030, July 2021.
- MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2.ed. atual. e ampl. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729p.
- NASCIMENTO, F.X. *et al.* Genomic analysis of the 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase-producing *Pseudomonas thivervalensis* SC5 reveals its multifaceted roles in soil and in beneficial interactions with plants. **Frontiers in Microbiology**, v.12, Sept. 2021. Article 752288.
- NASCIMENTO, F.X. *et al.* The extreme plant-growth-promoting properties of *Pantoea phytobeneficialis* MSR2 revealed by functional and genomic analysis. **Environmental Microbiology**, v.22, n.4, p.1341-1355, Apr 2020.
- NASCIMENTO, F.X.I. **Promoting plant growth using ACC deaminase-producing bacteria**: insights into plant-bacterial interactions and agricultural and biotechnological applications. 2018. 441f. Tese (Doutorado em Biotecnologia e Biociências) – Centro de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- PARMAR, K.B.; MEHTA, B.P.; KUNT, M.D. Isolation, characterization and identification of potassium solubilizing bacteria from rhizosphere soil of maize (*Zea mays*). **International Journal of Science Environment and Technology**, v.5, n.5, p.3030-3037, 2016.
- PIKUL JUNIOR, J.L. *et al.* Organic matter and water stability of field aggregates affected by tillage in South Dakota. **Soil Science Society of America Journal**, v.73, n.1, p.197-206, Jan. 2009.
- RAMESH, A. *et al.* Phosphorus mobilization from native soil P-pool upon inoculation with phytate-mineralizing and phosphate-solubilizing *Bacillus aryabhatai* isolates for improved P-acquisition and growth of soybean and wheat crops in microcosm conditions. **Agricultural Research**, v.3, n.2, p.118-127, June 2014.
- REGANOLD J.P. *et al.* Soil quality and financial performance of biodynamic and conventional farms in New Zealand. **Science**, v.260, n.5106, p.344-349, 1993.
- RIBEIRO, I.D.A. *et al.* Use of mineral weathering bacteria to enhance nutrient availability in crops: a review. **Frontiers in Plant Science**, v.11, Dec. 2020a. Article 590774.
- RIBEIRO, N.V.D.S. *et al.* Genetic diversity and growth promoting characteristics of diazotrophic bacteria isolated from 20 genotypes of *Brachiaria* spp. **Plant and Soil**, v.451, n.1/2, p.187-205, 2020b.

SATTAR, A. *et al.* Perspectives of potassium solubilizing microbes in sustainable food production system: a review. **Applied Soil Ecology**, v.133, p.146-159, Jan. 2019.

SCHELLER, E. **Plant nutrition in organic agriculture**. [S.l.: s.n., 1998]. 62p. Apostila distribuída em Seminário no Instituto Biodinâmico, em Botucatu, SP, em 1998.

SMITS, M.M.; WALLANDER, H. Role of mycorrhizal symbiosis in mineral weathering and nutrient mining from soil parent material. In: JOHNSON, N.C.; GEHRING, C.; JANSA, J. (ed.). **Mycorrhizal mediation of soil: fertility, structure, and carbon storage**. [Amsterdam]: Elsevier, 2017. cap.3, p.35-46.

SINGH, R.K. *et al.* Root-derived endophytic diazotrophic bacteria *Pantoea cyripedii* AF1 and *Kosakonia arachidis* EF1 promote nitrogen assimilation and growth in sugarcane. **Frontiers in Microbiology**, v.12, Dec. 2021. Article 774707.

SOMARE, A. *et al.* Exploiting biological nitrogen fixation: a route towards a sustainable agriculture. **Plants**, v.9, n.8, p.1011, 2020.

SPARLING, G.P. Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health. In: PANKHURST, C.; DOUBE, B.M.; GUPTA, V.V.S.R. (ed.). **Biological indicators of soil health**. Wallingford: CAB INTERNATIONAL, 1997. cap.5, p.97-1. Disponível em: <https://www.isprambiente.gov.it/files/>

biodiversita/Pankhurst_1997_Biological_indicators.pdf. Acesso em: 19 maio 2022.

SPEIR, T.W.; ROSS, D.J. Temporal stability of enzymes in a peatland soil profile. **Soil Biology and Biochemistry**, v.22, n.7, p.1003-1005, 1990.

STIKA J. **A Soil Owner's Manual: how to restore and maintain soil health**. Moone, IL: CreateSpace Independent, 2016.

SUBHASHINI, D.V.; KUMAR V., A. Phosphate solubilising *Streptomyces* spp. obtained from the rhizosphere of *Ceriops decandra* of *Corangi mangroves*. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v.84, n.5, p.560-564, May 2014.

TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.M. Distribution of total and available sulfur in selected soils and soil profiles. **Agronomy Journal**, v.64, n.1, p.40-44, Jan./Feb. 1972.

TAHIR, M. *et al.* Isolation and identification of phosphate solubilizer *Azospirillum*, *Bacillus* and *Enterobacter* strains by 16S rRNA sequence analysis and their effect on growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Australian Journal of Crop Science**, v.7, n.9, p.1284-1292, 2013.

TÓTOLA M.R.; CHAER, G.M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Tópicos em Ciência do Solo**. [São Paulo]: SBPC, 2002. v.2, p.195-276.

STRAATEN, P. van. Distribution of agromineral resources in space and time: a global geological perspective. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.57, 2022. Article e01453.

VASSILEVA, M. *et al.* Rock phosphate solubilization by free and encapsulated cells of *Yarrowia lipolytica*. **Process Biochemistry**, v.35, n.7, p.693-697, 2000.

VIDYALAKSHMI, R.; PARANTHAMAN, R.; BHAKYARAJ, R. Sulphur oxidizing bacteria and pulse nutrition: a review. **World Journal of Agricultural Sciences**, v.5, n.3, p.270-278, 2009.

VYAS, P.; GULATI, A. Organic acid production in vitro and plant growth promotion in maize under controlled environment by phosphate-solubilizing fluorescent *Pseudomonas*. **BMC Microbiology**, v.9, 2009. Article 174.

WALLEENSTEIN, M.D.; BURNS, R.G. Ecology of extracellular enzyme activities and organic matter degradation in soil: a complex community-driven process. In: DICK, R.P. (ed.). **Methods of soil enzymology**. Madison: Soil Science Society of America, 2011. cap.2, p.35-55. (SSSA. Book Series, v. 9).

XIAO, B.; LIAN, B.; SHAO, W. Do bacterial secreted proteins play a role in the weathering of potassium-bearing rock powder? **Geomicrobiology Journal**, v.29, n.6, p.497-505, 2012.



Manejo de doenças causadas por fungos do gênero *Neocosmospora*

Neste livro são abordados temas relacionados com o manejo de doenças causadas por espécies do fungo *Neocosmospora*, até recentemente conhecidas como um complexo de espécies de *Fusarium solani*. Esses fungos são responsáveis por perdas relevantes em diferentes culturas agrícolas, ao causarem especialmente podridões radiculares e tombamento de plantas.

Acesse gratuitamente na Livraria EPAMIG, em Difusão de Tecnologia!

www.livrariaepamig.com.br