

sintéticos, a partir da valorização, desenvolvimento e incorporação de conhecimentos e tecnologias com base na ecologia, ecofisiologia, na bioquímica e na própria agronomia.

Nesse sentido, a busca por fontes de nutrientes, compostos e microrganismos de ocorrência regional, adaptados às condições locais dos sistemas produtivos, que auxiliem no desenvolvimento e na proteção das plantas, é de grande importância para a agricultura como um todo e, em especial, para a agricultura de base orgânica.

**Fontes alternativas de nutrientes para as plantas:** a busca por novas fontes de nutrientes inclui tanto as descobertas de novos depósitos minerais quanto o aproveitamento de resíduos orgânicos (esterco, resíduos vegetais diversos, etc.) e inorgânicos (rejeitos da mineração), desde que essas fontes sejam comprovadamente eficientes para uso na agricultura e seguras do ponto de vista ambiental e da produção de alimentos. Além disso, o uso desse tipo de insumo deve ser preferencialmente regional, de forma a minimizar os custos com transporte. Dentre as recentes descobertas de fontes de nutrientes identificadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM; Serviço Geológico do Brasil) no Rio Grande do Sul estão as rochas carbonatíticas (fontes de fósforo), além de calcários, andesitos, basaltos, e diversas rochas com teores significativos de potássio (7% a 14%  $K_2O$ ).

No que se refere à disponibilidade de coprodutos de processos agroindustriais e da mineração, são escassos os dados referentes às quantidades disponíveis de rejeitos e coprodutos, mas algumas estimativas indicam que o uso de coprodutos orgânicos poderia suprir boa parte da demanda de fertilizantes. No caso dos rejeitos da mineração, não existem estimativas globais das quantidades geradas, devido ao grande número de empresas nesse setor e à variabilidade dos recursos minerais por elas explorados. De qualquer forma, no País existem inú-

meras empresas que extraem rochas para construção civil, para uso na agricultura (calcários, fosfatos, etc.) ou outras finalidades, e que geram grande quantidade de coprodutos, atualmente considerados passivos ambientais, mas que poderiam ser reaproveitados como fontes de nutrientes.

Contudo, esses coprodutos devem atender à legislação vigente e apresentar eficiência agronômica satisfatória. Nem todo pó de rocha pode ser utilizado na agricultura; alguns apresentam concentrações inadequadas de elementos tóxicos, ou não apresentam respostas agronômicas satisfatórias como, por exemplo, aumento da produtividade das culturas e/ou melhoria das características do solo. Assim, todo e qualquer pó de rocha, para ser considerado um fertilizante, ou remineralizador, ou corretivo, ou condicionador de solo, deve passar por avaliações criteriosas de alguma instituição de pesquisa credenciada no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e, posteriormente, ter seu registro aprovado pelo referido ministério.

Na Embrapa Clima Temperado, a linha de pesquisa sobre fontes alternativas de nutrientes é relativamente recente, tendo iniciado em 2003 com a colaboração de diversas instituições parceiras. Os trabalhos realizados visam a prospecção, a caracterização, o desenvolvimento e a avaliação da eficiência agronômica, da segurança ambiental e dos alimentos dessas novas fontes de nutrientes.

A forma de avaliação das matérias-primas e dos produtos obtidos da combinação de diferentes matérias-primas de interesse, aqui denominadas matrizes fertilizantes complexas, considera três pilares básicos: eficiência agronômica, segurança ambiental e segurança dos alimentos. O protocolo de avaliação inclui diversas etapas, com variados graus de complexidade, conforme detalhado em publicação no âmbito do III Congresso Brasileiro de Rochagem, em 2016.

Diversas matérias-primas e matrizes fertilizantes estão em avaliação pela equipe de pesquisa e alguns trabalhos contendo dados parciais desses estudos já foram publicados. Além disso, os resultados de pesquisa de algumas das matrizes fertilizantes mais promissoras foram encaminhados ao MAPA pelas empresas detentoras das matérias-primas e estão com o processo de pedido de registro em andamento. Espera-se que num futuro próximo os agricultores tenham à sua disposição insumos eficientes, de baixo custo e que possam ser utilizados sem restrição nos sistemas produtivos de base orgânica.

**Microrganismos como promotores do crescimento de plantas:** a agricultura intensiva demanda um adequado suprimento de nutrientes que atuam como componentes estruturais das células vegetais ou como importante parte no processo fotossintético e no metabolismo das plantas. Na rizosfera, macro e micronutrientes sofrem um equilíbrio dinâmico e complexo de solubilização, disponibilidade e transporte, grandemente influenciado pelos microrganismos associados às raízes. As interações planta-microrganismos na rizosfera são, por outro lado, determinantes na garantia da fertilidade do solo e da sanidade e produtividade de plantas.

Os efeitos benéficos de microrganismos às plantas dependem de sinalização química e nutricional sofisticada, bem como de fatores relacionados ao solo e ao clima. As raízes das plantas liberam substâncias que afetam a composição de comunidades de microrganismos da rizosfera, levando ao estabelecimento de uma comunidade microbiana específica. Simbiose acontece entre as espécies vegetais e os microrganismos do solo, incluindo as rizobactérias promotoras do crescimento de plantas (PGPR) e os fungos promotores do crescimento de plantas (PGPF), considerados bioestimulantes.

As informações acumuladas têm mostrado a eficácia de *Trichoderma* spp. como PGPF, uma vez que sua aplicação no solo, sementes ou superfícies de plantas pode aumentar a solubilidade de nutrientes e/ou sua disponibilidade às raízes e distribuição na planta. Tais propriedades benéficas são explicadas por meio da modulação da arquitetura radicular decorrente do incremento no desenvolvimento radicular e produção de fito-hormônios, ou mediante mecanismos de fitoestimulação, que incluem: a exsudação de ácidos orgânicos e enzimas que contribuem para a solubilização e redução de ferro insolúvel ( $\text{Fe}^{3+}$ ) para solúvel ( $\text{Fe}^{2+}$ ), aumentando a capacidade da raiz em obter ferro assimilável pelas plantas; o aumento à tolerância a seca; a expressão de proteínas de defesa em plantas; a solubilização de fósforo e aumento da resistência às condições adversas.

A Embrapa Clima Temperado vem direcionando esforços de pesquisa no sentido da inserção dos bioestimulantes de base microbiana (PGPF e PGPR) no contexto da agricultura sustentável como complemento à nutrição de plantas. A seleção de linhagens adequadas ao propósito e à espécie vegetal tem sido foco de sua atuação no desenvolvimento de biofertilizantes, notoriamente para arroz, trigo, milho e soja.

O desenvolvimento de práticas sustentáveis de nutrição de plantas, tal qual o uso de fertilizantes orgânicos e/ou organominerais enriquecidos com microrganismos funcionais (PGPR ou PGPF), pode vir a ser, no futuro, uma estratégia interessante para decrescer a especificidade e degeneração da microbiota do solo associada a plantas em monocultivo, comuns com o uso da nutrição convencional, de modo a minimizar a deterioração do solo pelo uso desses fertilizantes.

## Matrizes fertilizantes complexas

**Utilização de rejeitos da mineração na compostagem:** resultados de estudos anteriores desenvolvidos pela Embrapa Clima Temperado e instituições parceiras demonstraram que algumas rochas podem diminuir as perdas de nutrientes e a emissão de gases de efeito estufa em processos de compostagem. Em função disso, foi conduzido um estudo na Estação Experimental Cascata da Embrapa Clima Temperado, para avaliar os efeitos de três tipos de rochas sobre o processo de compostagem e o acúmulo de nutrientes no composto orgânico produzido. Na compostagem foram utilizados resíduos da filetagem de peixes, casca de tungue, serragem e as rochas xisto retornado, granodiorito e basalto amigdalóide a zeólita em duas proporções (5% e 10% m/m) (Figura 24).



**Figura 24.** Matérias-primas utilizadas no processo de compostagem e produto final obtido.

A compostagem foi realizada em células de alvernaria com capacidade de aproximadamente 1,5 m<sup>3</sup> e a temperatura das pilhas foi monitorada diariamente, em intervalos de 30 minutos, até atingir temperatura próxima à ambiente.

Os resultados demonstraram que o processo de compostagem foi adequado em todos os tratamentos avaliados, pois ao final do período experimental o composto orgânico gerado apresentou relação C/N, temperatura e umidade adequadas. Quando comparados à testemunha (sem adição de rejeitos da mineração), todos os tratamentos com a adição de rochas apresentaram fase termofílica (temperaturas entre 50 °C e 65 °C) significativamente mais longa e maiores quantidades de potássio, magnésio e ferro no produto final. O tratamento com xisto retornado também apresentou maior acúmulo de enxofre. Adicionalmente, todos os tratamentos apresentaram perdas de C entre 30% e 39% do total de C adicionado, exceto o tratamento contendo 10% de xisto retornado, em que observou-se maior preservação do C, sendo a perda em torno de 15%.

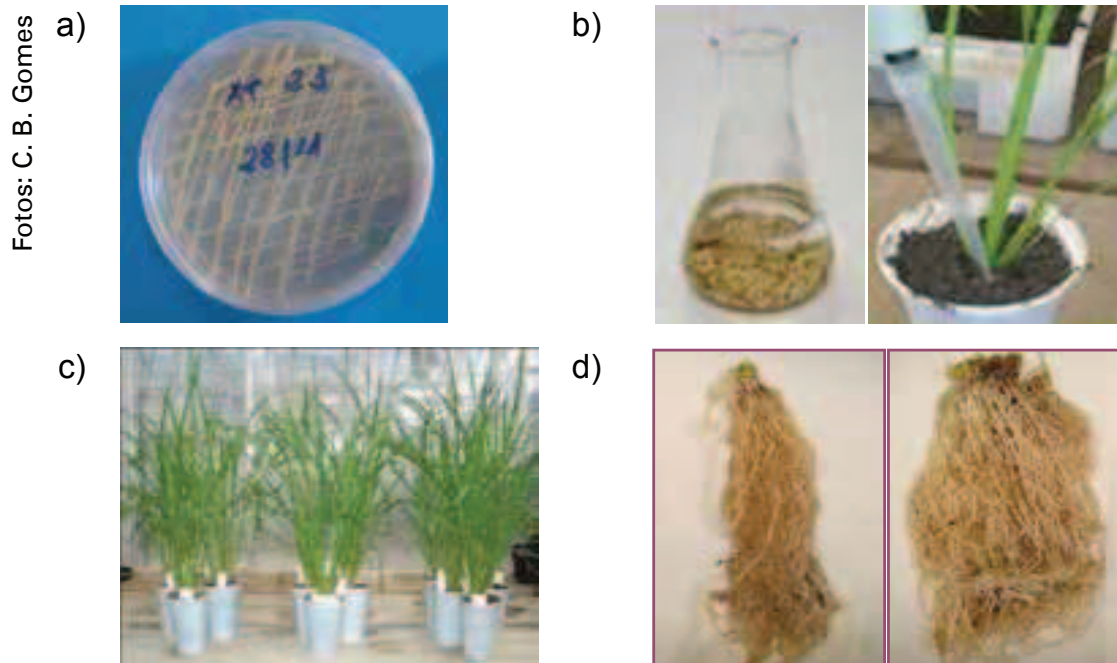
### **Desenvolvimento de matrizes fertilizantes complexas contendo microrganismos de interesse:**

a Embrapa Clima Temperado vem desenvolvendo estudos na linha de pesquisa sobre matrizes fertilizantes complexas desde 2005, quando se iniciou a prospecção de microrganismos de interesse em folhelho pirobetuminoso (xisto), no intuito de desenvolver insumos que fossem não apenas fornecedores de nutrientes às plantas, mas que pudessem contribuir de alguma forma para resistência das culturas às pragas e doenças, ou torná-las mais tolerantes aos estresses abióticos, ou ainda torná-las mais eficientes no uso dos nutrientes disponíveis no solo. Nesses estudos foram obtidos mais de 400 isolados de microrganismos, os quais foram submetidos a testes bioquímicos, testes in vitro e experimentos em condições controladas com diversas culturas para



seleção de rizobactérias com elevado potencial para promoção de crescimento, e/ou biocontrole de pragas, e/ou indução de resistência das plantas, e/ou solubilização de fosfatos. Até o momento, as rizobactérias selecionadas foram avaliadas em arroz irrigado, azevém, soja, pimenteira, mamoneira, figueira, tomateiro, morangueiro e cana-de-açúcar, e as formas de inoculação dos microrganismos foram a microbiolização de sementes e a injeção direta do inoculante ao solo após a germinação/brotação das sementes/colmos/estacas (Figura 25). Os efeitos mais relevantes observados foram: a) maior massa seca de parte aérea e de raízes e significativa diminuição do fator de reprodução de nematoides nas plantas inoculadas com os microrganismos de interesse (em experimentos em condições controladas); e b) maior produtividade de grãos de arroz irrigado (cultura avaliada em condições de campo durante quatro safras consecutivas).

Atualmente, estão sendo realizados estudos para introdução dessas rizobactérias, e também do fungo *Trichoderma*, em matrizes fertilizantes à base de coprodutos agroindustriais e da mineração, ou seja, nesses estudos as rochas e/ou os resíduos orgânicos estão sendo avaliados não apenas como fornecedores de nutrientes, mas também como suportes para os microrganismos. Além disso, estudos de prospecção de microrganismos considerando diversos tipos de solo, rochas e plantas de ambientes extremos estão em andamento.



**Figura 25.** Etapas dos testes in vivo com microrganismos isolados da rocha folhelho pirobotuminoso (xisto) na cultura do arroz irrigado: isolamento dos microrganismos de interesse (a); introdução dos isolados na semente ou no solo – microbiolização (b); avaliação do desenvolvimento da parte aérea das plantas provenientes das sementes microbiolizadas (c); avaliação das raízes das plantas testemunha e previamente microbiolizadas com os microrganismos de interesse(d).