

Protocolo de Avaliação Agronômica de Rochas e Produtos Derivados como Fontes de Nutrientes às Plantas ou Condicionadores de Solo



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

Documentos 143

Protocolo de Avaliação Agronômica de Rochas e Produtos Derivados como Fontes de Nutrientes às Plantas ou Condicionadores de Solo

Álvaro Vilela de Resende
Antonio Eduardo Furtini Neto
Éder de Souza Martins
Sandro Manuel Carmelino Hurtado
Claudinei Gouveia de Oliveira
Mariana Coelho de Sena

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Milho e Sorgo

Rod. MG 424 Km 45
Caixa Postal 151
CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG
Fone: (31) 3027-1100
Fax: (31) 3027-1188
Home page: www.cnpms.embrapa.br
E-mail: sac@cnpms.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Sidney Netto Parentoni
Secretário-Executivo: Elena Charlotte Landau
Membros: Flávia Cristina dos Santos, Flávio Dessaune Tardin, Eliane Aparecida Gomes, Paulo Afonso Viana, Guilherme Ferreira Viana e Rosângela Lacerda de Castro

Revisão de texto: Antonio Claudio da Silva Barros
Normalização bibliográfica: Rosângela Lacerda de Castro
Tratamento de ilustrações: Tânia Mara Assunção Barbosa
Editoração eletrônica: Tânia Mara Assunção Barbosa
Foto(s) da capa: Sandro Hurtado

1ª edição

1ª impressão (2012): on line

Todos os direitos reservados

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

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Milho e Sorgo**

Protocolo de avaliação agronômica de rochas e produtos derivados como fontes de nutrientes às plantas ou condicionadores de solo / Álvaro Vilela de Resende ... [et al.]. -- Sete Lagoas : Embrapa Milho e Sorgo, 2012.

30 p. : il. -- (Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1518-4277; 143).

1. Solo. 2. Condicionador do solo. 3. Fertilizante. I. Resende, Álvaro Vilela de. II. Série.

CDD 633.174 (21. ed.)

© Embrapa 2012

Autores

Álvaro Vilela de Resende

Eng.-Agro., DSc. Pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo,

alvaro@cpnms.embrapa.br

Antonio Eduardo Furtini Neto

Eng.-Agro., DSc. Professor DCS/UFLA,

afurtini@dcs.ufla.br

Éder de Souza Martins

Geólogo, DSc. Pesquisador da Embrapa Cerrados,

eder@cpac.embrapa.br

Sandro Manuel Carmelino Hurtado

Eng.-Agro., DSc. Bolsista DTI/CNPq,

sandroelbat@gmail.com

Claudinei Gouveia de Oliveira

Geólogo, DSc. Professor IG/UnB,

gouveia@unb.br

Mariana Coelho de Sena

Eng.-Agro., Fiscal Federal Agropecuário do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento,

mariana.sena@agricultura.gov.br

Apresentação

A dependência de importações de fertilizantes para garantir a reposição dos nutrientes retirados do solo com as colheitas dos produtos vegetais representa uma das principais fragilidades da agricultura brasileira. Assim, disponibilizar opções de diversificação de fontes de nutrientes, com base em matérias-primas locais, é uma meta para a pesquisa no País. São necessários esforços no sentido de viabilizar formas de exploração de ocorrências minerais pouco atrativas para a indústria tradicional de fertilizantes. Noutra vertente, em sintonia com os padrões de desenvolvimento reclamados pela sociedade moderna, a destinação de uma gama de resíduos de mineração, metalurgia e agroindústria pode ter a utilização agrícola como saída mais apropriada. Em todos os casos, essas potenciais novas fontes de nutrientes para a agricultura precisam ter sua eficiência agrônômica e segurança de uso avaliadas segundo procedimentos e critérios embasados cientificamente. Nesta publicação propõe-se uma sequência metodológica a ser seguida em etapas de experimentação em ambiente controlado e em campo, de forma a se comprovar a possibilidade de uso agrícola de produtos derivados de rochas. O protocolo sugerido também pode servir de referência e ser adaptado ao estudo de outras fontes de nutrientes ou condicionadores de solo de naturezas diversas.

Antonio Alvaro Corsetti Purcino

Chefe Geral

Embrapa Milho e Sorgo

Sumário

Introdução	9
Planejamento experimental e etapas a serem seguidas	11
Ensaio discriminatório em casa de vegetação	11
Escolha do substrato e planta teste	14
Definição dos tratamentos	16
Condições de controle e adubação básica	18
Avaliações	20
Experimentos de validação a campo	23
Escolha da área experimental e definição dos tratamentos	23
Avaliações	26
Considerações finais	28
Referências	29

Protocolo de Avaliação Agronômica de Rochas e Produtos Derivados como Fontes de Nutrientes às Plantas ou Condicionadores de Solo

Álvaro Vilela de Resende

Antonio Eduardo Furtini Neto

Éder de Souza Martins

Sandro Manuel Carmelino Hurtado

Claudinei Gouveia de Oliveira

Mariana Coelho de Sena

A utilização de produtos originados de rochas, também chamados de agrominerais, como opção para o fornecimento de nutrientes às culturas deve ser embasada em informações e critérios agronômicos resultantes de experimentação específica, conforme a natureza e constituição de cada produto. Propõe-se, nesta publicação, uma sequência metodológica a ser seguida em etapas de experimentação, de forma a permitir discriminar os efeitos no solo e a resposta vegetal à aplicação de rochas *in natura* ou submetidas a qualquer tipo de processamento prévio. Uma vez determinada a composição química total da rocha ou do produto derivado, estudos em casa de vegetação e a campo são necessários e complementares entre si, para determinação do potencial de uso como fertilizante ou condicionador de solo. O conhecimento da reatividade e taxa de solubilização dos constituintes minerais e da biodisponibilidade imediata e residual dos diversos elementos químicos presentes (nutrientes ou não) é fundamental para fins de eventual comercialização como insumo agrícola e também para o correto dimensionamento das recomendações de uso, com efetivo benefício ao agricultor.

Introdução

É cada vez maior o leque de opções de produtos de base mineral, rochas ou seus resíduos derivados de atividades de mineração ou processos industriais, ofertados aos agricultores como fontes

alternativas de nutrientes e como condicionadores de solo em diferentes regiões do Brasil. A grande diversidade geoquímica desses produtos, sendo a maioria ainda sem enquadramento específico na legislação de fertilizantes do Ministério da Agricultura (MAPA), leva a situações em que não é possível dar garantias de eficiência técnica ou econômica ao usuário final.

Em geral, os derivados de rochas não têm pureza, concentração e solubilidade de nutrientes comparável aos fertilizantes tradicionais disponíveis no mercado, para os quais as características de reatividade e de teores totais e solúveis dos nutrientes contidos são bem estabelecidas e tem-se garantia de homogeneidade, decorrente da “purificação” realizada durante o seu processamento industrial.

Face ao exposto, ressalta-se que a pesquisa agronômica envolvendo produtos derivados de rochas, com maior ou menor grau de processamento físico-químico-biológico e mistura com outros compostos minerais ou orgânicos, difere largamente da pesquisa com fertilizantes tradicionais, que têm constituição muito menos complexa, fornecem um ou poucos nutrientes e, conseqüentemente, têm dinâmica mais simples no sistema solo-planta.

Permanecem ainda muitos questionamentos e controvérsias envolvendo desde os aspectos filosóficos até as práticas complementares para potencializar os benefícios da utilização de fontes não convencionais de nutrientes. Para desmistificar o tema em questão, é preciso identificar as opções que apresentam viabilidade técnico-econômica e prover critérios para sua utilização racional, sendo imprescindível a realização de estudos abrangentes, que compreendam o maior número de variáveis possível e permitam discriminar relações de causa e efeito resultantes da aplicação de rochas e seus derivados, que aqui serão tratados de modo genérico pela sigla FAN (Fontes Alternativas de Nutrientes) ou agrominerais.

A ideia central é que cada FAN a ser testada, dadas suas características mineralógicas e químicas peculiares, pressupõe a definição de um protocolo experimental personalizado, com a avaliação de tratamentos específicos, estabelecidos caso a caso. A seguir são sugeridos etapas e procedimentos metodológicos que

visam assegurar maior confiabilidade na avaliação agronômica de FANs, minimizando o risco de interpretações e conclusões equivocadas.

Planejamento experimental e etapas a serem seguidas

O estudo agronômico deve envolver, numa primeira etapa, ensaios de incubação e cultivo de plantas teste em vasos, sob ambiente controlado, em casa de vegetação. Numa segunda etapa, deve avançar com experimentos a campo, englobando as culturas de interesse. Na primeira etapa, busca-se comparar um grande número de tratamentos, quantos forem necessários, a fim de evidenciar os efeitos mais proeminentes da FAN sobre os atributos do solo e na nutrição e desenvolvimento vegetal (Tabela 1). Em casa de vegetação é possível constatar, por exemplo, que uma dada rocha tem boa capacidade de liberação de potássio e zinco, apresenta algum benefício como corretivo da acidez do solo, não disponibiliza elementos químicos indesejáveis, mas não fornece fósforo e enxofre às plantas. Esses ensaios iniciais são considerados “discriminatórios”. Na segunda etapa, os tratamentos a campo são planejados em número mais restrito, visando confirmar os efeitos principais da aplicação do produto derivado de rocha e definir a quantidade a utilizar, considerando a melhor relação benefício/custo para a cultura a ser explorada. Esses experimentos são considerados de “validação”.

Nos próximos itens, são propostos procedimentos e cuidados básicos nas avaliações agronômicas pertinentes a essas duas etapas, os quais devem ser comuns a qualquer estudo de FAN.

Ensaios discriminatórios em casa de vegetação

Os tratamentos iniciais dos ensaios discriminatórios, conduzidos em vasos sob casa de vegetação, devem ser definidos a partir do conhecimento detalhado da constituição mineralógica e química do material. Normalmente, as primeiras informações utilizadas referem-se à composição química total de elementos maiores e traços. Análises adicionais de fracionamento químico ou dissolução parcial

podem dar indicativos prévios de maior ou menor facilidade de solubilização das partículas e liberação dos elementos constituintes das rochas. Nesse sentido, tem-se utilizado, com relativo sucesso, o método de extração parcial por ataque sulfúrico empregado originalmente para caracterizar a mineralogia da fração argila de solos tropicais, mas que também serve como indicador do potencial de intemperismo na caracterização de minerais de rochas (RAIJ; VALADARES, 1974).

A possível presença de elementos indesejáveis nas rochas (ex: metais pesados, sódio, alumínio e outros), que apresentem risco de prejudicar o equilíbrio físico-químico-biológico do solo, provocar fitotoxicidez, ou de contaminar o ambiente e os alimentos, deve ser considerada desde o início. Caso os teores totais forneçam indícios de tal possibilidade, análises e avaliações específicas deverão ser efetuadas buscando caracterizar se haverá de fato liberação do elemento indesejável pela rocha, se este terá atividade no solo ou se será bioacessível. É preciso certificar a conformidade do produto a ser testado, de acordo com a Instrução Normativa N^o 27 do Ministério da Agricultura (BRASIL, 2006), que trata dos limites máximos de contaminantes em fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes. Em alguns casos, a ausência de riscos de elementos indesejáveis será provada somente ao final do ensaio exploratório de avaliação agronômica, podendo ainda requerer ensaios complementares.

Tabela 1. Exemplo de tratamentos para discriminação do potencial agronômico de um derivado de rocha como fonte de nutrientes (ênfase ao potássio) e corretivo de solo.

Tratamentos	Dose de K aplicada via rocha (mg kg ⁻¹)	Outras adições (via reagentes p.a.)			Micronutrientes
		Corretivo de acidez (CaCO ₃ +MgO)	Fonte solúvel de P (NH ₄ H ₂ PO ₄)	Fonte solúvel de K (KCl)	
1. Completo (calagem+todos os nutrientes via reagentes p.a.)		+	+	+	+
2. Controle absoluto (solo virgem)		-	-	-	-
3. Controle somente com calagem (CaCO ₃ e MgO)		+	-	-	-
4. Completo – calagem (CaCO ₃ e MgO)		-	+	+	+
5. Completo – potássio (+K)		+	+	-	+
6. Completo – fósforo (+P)		+	-	+	+
7. Completo – enxofre (-S)		+	+	+	-
8. Completo – micronutrientes (-micros)		+	+	+	-
9. Somente rocha na dose 100K (dose equivalente a 100 mg/kg de K)	100	-	-	-	-
10. Rocha dose 100K – calagem + outros nutrientes	100	-	+	+	+
11. Rocha dose 100K + calagem – outros nutrientes	100	+	-	-	-
12. Rocha dose 100K + calagem – fósforo + outros nutrientes	100	+	-	+	+
13. Rocha dose 100K + calagem – enxofre + outros nutrientes	100	+	+	+	-
14. Rocha dose 100K + calagem – micro + outros nutrientes	100	+	+	+	-
15. Rocha dose 50K + calagem – potássio + outros nutrientes	50	+	+	-	+
16. Rocha dose 100K + calagem – potássio + outros nutrientes	100	+	+	-	+
17. Rocha dose 150K + calagem – potássio + outros nutrientes	150	+	+	-	+
18. Rocha dose 300K + calagem – potássio + outros nutrientes	300	+	+	-	+
19. Rocha granulometria fina dose 100K + calagem – potássio + outros nutr.	100	+	+	-	+

Escolha do substrato e planta teste

Como protocolo geral para ensaios exploratórios de avaliação agronômica, sugere-se a utilização de substrato que facilite a detecção dos possíveis efeitos benéficos e prejudiciais da aplicação do produto em teste. Normalmente, um solo representativo da região, mas que não tenha sido cultivado anteriormente, se presta bem a essa finalidade. Estes autores têm utilizado, com bons resultados, solo coletado na camada de 0-20 cm de profundidade, em áreas sob vegetação nativa de Cerrado, tomando-se o cuidado de raspar a superfície e descartar a zona de acúmulo da serapilheira, que é mais rica em matéria orgânica e nutrientes, além de mais heterogênea. Alternativamente, pode-se utilizar o solo de camadas mais profundas, caso haja presença de grande quantidade de matéria orgânica, raízes ou cinzas remanescentes de incêndios na porção superficial do perfil. Dependendo dos objetivos do estudo ou da região, pode ser interessante trabalhar com mais de um tipo de solo (ex: diferentes classes de solo ou solos de granulometria contrastante). Obviamente, a escolha de solo que apresente baixa disponibilidade de um nutriente alvo facilitará a comprovação do fornecimento de tal nutriente pelo produto em teste.

Após a coleta, recomenda-se que o solo seja seco ao ar, peneirado em malha de 4 mm de abertura e homogeneizado. Nesse momento, uma amostra deve ser separada para análises laboratoriais visando caracterizar a condição original de fertilidade do solo. É conveniente que se estabeleçam os tratamentos de forma individualizada para cada parcela experimental (vaso), como garantia da aplicação das quantidades corretas de rocha, nutrientes e outros aditivos, além da melhor homogeneização. Vasos sem furos, com capacidade para cerca de 3 dm³ de substrato, são adequados aos ensaios discriminatórios.

Normalmente, conjuga-se uma fase inicial do ensaio, constituída de um período de incubação e amostragem de solo para caracterização dos efeitos mais imediatos dos tratamentos, com a fase de cultivo para avaliação das respostas utilizando uma planta teste. A fase de incubação pode durar cerca de 30 dias. Quando se utilizam reagentes p.a. (para análise) para se estabelecer as condições de controle do ensaio e sabe-se de antemão que a rocha apresenta certa solubilidade, um período mais curto de incubação,

de 15 a 20 dias, é suficiente.

Alguns pesquisadores têm realizado estudos com várias amostragens durante longos períodos de incubação (até 180 dias ou mais) objetivando traçar uma curva de dissolução da rocha ou liberação de nutrientes com o tempo. Contudo, a ausência de um dreno constante para os produtos da dissolução (ausência de planta) pode prejudicar essa avaliação. Ocorre que, com as reações de solubilização inicial da rocha, parece haver uma saturação relativamente rápida do ambiente de dissolução, o que acaba por limitar a continuidade de tais reações. Ao que tudo indica, uma vez que os solos tropicais têm baixa densidade de cargas (dreno fraco), a planta deve ter papel preponderante ao atuar como dreno, absorvendo os nutrientes liberados e deslocando o equilíbrio do sistema em favor da continuidade das reações de solubilização.

A espécie vegetal usada como planta teste deve apresentar características que facilitem o manejo em vasos, tenha rusticidade, porte moderado, rápido desenvolvimento e elevada absorção de nutrientes. Preferência tem sido dada ao milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), espécie de crescimento radicular vigoroso, reconhecida pela elevada capacidade de absorção e ciclagem de nutrientes (SANZONOWICZ; MIELNICZUK, 1985; ROSOLEM et al., 2005; TORRES; PEREIRA, 2008). O milheto mostra-se sensível à deficiência de nutrientes e responde visivelmente aos fatores que conferem fertilidade ao solo, inclusive quando se trata de melhorias sutis da fertilidade decorrentes da aplicação isolada de determinadas rochas (Figura 1). Entre 45 e 50 dias após a semeadura, as plantas de milheto cultivadas em vasos iniciam a emissão de inflorescências, ocasião apropriada para se proceder ao corte da parte aérea para determinação da produção de matéria seca e dos teores e conteúdos de nutrientes. Essas três variáveis, juntamente com os resultados de análises químicas do solo, permitem inferências consistentes sobre o potencial agronômico de FANs. Uma sequência de dois cultivos de milheto possibilita evidenciar o efeito imediato e dá um indicativo do efeito residual do produto em estudo.

Outras culturas também podem ser usadas como planta teste. É o caso quando o foco principal da pesquisa for o de investigar especificamente a capacidade de resposta de uma dada cultura.

Contudo, é mais coerente e produtivo que este tipo de estudo seja conduzido com tratamentos direcionados e em menor número, definidos quando já se tem um conhecimento básico sobre a FAN, ou seja, após se avaliar os resultados do ensaio discriminatório.

Definição dos tratamentos

Alguns fatores primários a serem considerados referem-se ao fato de que os efeitos agronômicos costumam ser bastante influenciados pela granulometria do produto de rocha, pelo tipo de solo e condições de acidez inicial, e pela espécie vegetal utilizada. Assim, nos estudos em casa de vegetação normalmente busca-se uma avaliação preliminar da eficiência agronômica da FAN, conduzindo um ou mais experimentos com diversas combinações de tratamentos.

Em parte, a granulometria determina a taxa de liberação dos nutrientes de rochas moídas. Os materiais mais finos serão mais facilmente dissolvidos. A granulometria a ser utilizada dependerá de aspectos de viabilidade econômica do processo de cominuição, mas nessa etapa preliminar da avaliação agronômica sugere-se homogeneizar e padronizar o material para um tamanho de partículas abaixo de 2 mm. Esse é o enquadramento de referência usado para o calcário agrícola. Uma outra possibilidade é se avaliar tratamentos constituídos pela fração menor que 0,3 mm, a qual corresponde à granulometria do calcário tipo *filler*.

São recomendáveis tratamentos que permitam contrastar possíveis efeitos do produto de rocha sobre o pH e a liberação de cálcio e magnésio para o solo (ação neutralizante da acidez), além da disponibilização dos outros nutrientes. Um exemplo de tratamentos discriminatórios, com os respectivos contrastes, é mostrado na Tabela 1. A necessidade de inclusão de outros tratamentos poderá ser constatada de acordo com as informações prévias provenientes dos resultados de composição química total e de mineralogia da rocha a ser testada.

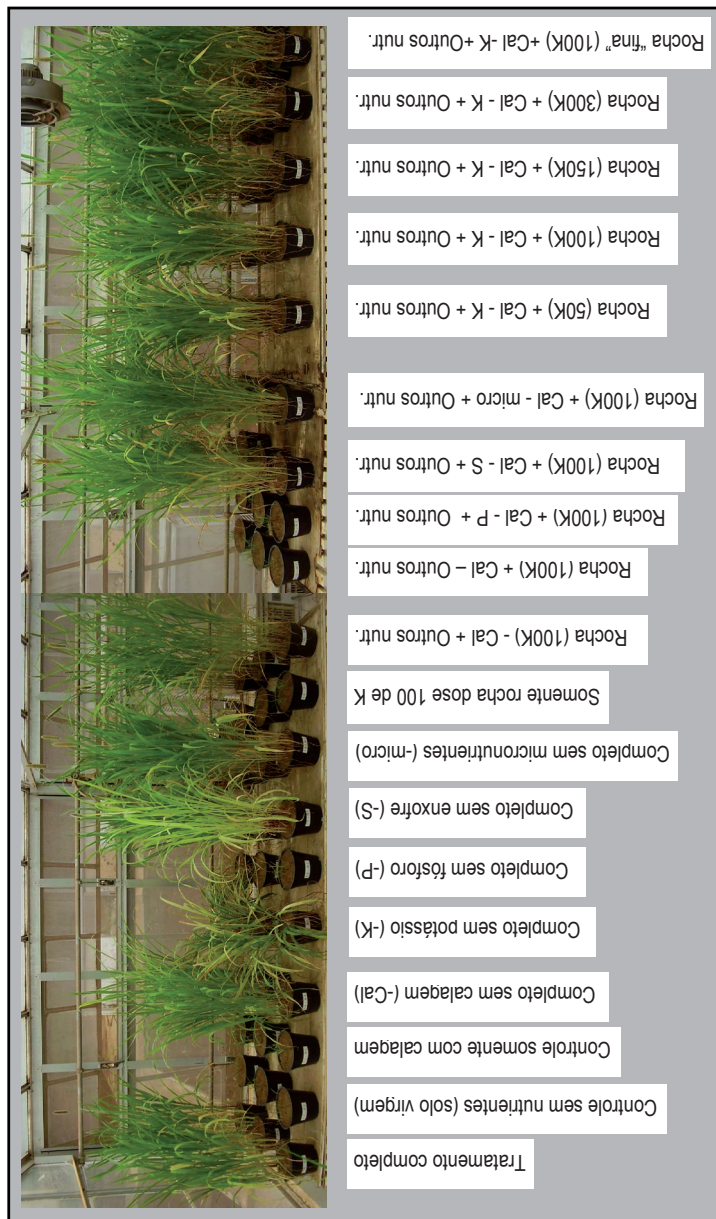


Figura 1. Parcelas com milho aos 56 dias após a semeadura, em resposta a tratamentos para discriminação dos efeitos da aplicação de um derivado de rocha, o qual disponibilizou principalmente potássio (K), enxofre (S), cálcio (Ca) e micronutrientes (Fotos e composição: Sandro Hurtado). Para detalhes dos tratamentos, vide Tabela 1.

Conhecendo-se qual nutriente deverá ter maior relevância agronômica, devem ser definidos tratamentos específicos nos quais se varie a dose da fonte a ser aplicada, desde zero até uma dose supostamente muito alta. A comparação de pelo menos quatro doses, além de revelar eventuais benefícios ou prejuízos resultantes da aplicação de maiores quantidades da FAN, permite ajustar modelos de regressão e ter ideia da dosagem que otimizará a resposta vegetal (máxima eficiência técnica) naquelas condições experimentais. Essas variações quantitativas são muito úteis também na determinação do impacto da aplicação da FAN sobre a disponibilidade do nutriente no solo, estudos de extratores e simulações preliminares de relação benefício/custo. Entretanto, cabe ressaltar que resultados obtidos em ambiente de vasos não são extrapoláveis como recomendações de uso da FAN no campo, daí a necessidade dos experimentos de validação em sistemas abertos com a cultura de interesse comercial.

Condições de controle e adubação básica

Corretivos de solo e fertilizantes comerciais frequentemente apresentam nutrientes diversos como contaminantes, por isso não devem ser usados nos ensaios discriminatórios, sob pena de influenciar ou mascarar os efeitos da FAN em estudo. O emprego de reagentes p.a. é recomendado para a composição dos tratamentos controle, contrastes e da adubação básica nos tratamentos envolvendo a FAN. É oportuno alertar que o fornecimento de nutrientes para o cultivo de plantas em vasos não segue a mesma lógica das adubações realizadas no campo. Tendo em vista a intensa proliferação de raízes num restrito volume de solo do vaso, a planta teste demandará maior quantidade de nutrientes para expressar desenvolvimento satisfatório. Por isso, em geral, as quantidades de N, P, K e micronutrientes a serem aplicadas em vasos é cerca de cinco vezes maior do que seria usual na adubação de campo. Por essa razão, as doses ótimas de FANs obtidas em ensaios de vasos não são diretamente extrapoláveis para a instalação da cultura no campo. Ou seja, ensaios em vasos não substituem experimentos de calibração de respostas à adubação em ambiente aberto (condições de lavoura).

A correção da acidez do solo nos ensaios discriminatórios deve ser feita com base no cálculo para elevar a saturação por bases

(SOUSA; LOBATO, 2004) a 70%, ou mesmo a 80% para solos coletados sob vegetação nativa (nunca cultivados), fazendo uso de uma mistura de carbonato ou óxido de cálcio e magnésio, na forma de reagentes p.a., para uma relação Ca:Mg de 3 ou 4:1. A quantidade da mistura em pó, correspondente a cada vaso, deve ser adicionada diretamente ao solo, homogeneizando-se em seguida.

As quantidades dos diversos nutrientes a serem fornecidos na adubação básica podem variar, mas a falta de algum deles representa risco para a qualidade do trabalho de pesquisa. Nos estudos de FANs em solos argilosos tem-se como referência a aplicação de 100; 250; 200; 30; 0,5; 2,0; 3,0; 4,0 e 0,25 mg kg⁻¹ de N, P, K, S, B, Cu, Mn, Zn e Mo, respectivamente. Para solos argilosos de cerrado não tem sido necessário o fornecimento de ferro. Essas quantidades se aproximam daquelas indicadas por Novais et al. (1991) para pesquisas de fertilidade do solo em ambiente de vasos. Em cobertura para o milho, devem ser realizadas duas aplicações de 100 mg kg⁻¹ de N durante a fase de crescimento vegetativo nos tratamentos com vigor satisfatório, restringindo-se a uma aplicação no caso dos tratamentos com forte restrição ao desenvolvimento das plantas, como por exemplo naqueles sem adição de nutrientes imprescindíveis ao crescimento normal das plantas (vide crescimento muito reduzido nos tratamentos sem P – Figura 1). Os reagentes utilizados na adubação básica ou de cobertura são aplicados dissolvidos em água deionizada.

Os corretivos de acidez e as soluções de nutrientes da adubação básica são adicionados e misturados ao solo de forma sequencial. Em seguida, os vasos devem ser umedecidos para dar início ao processo de incubação, que, conforme já destacado, irá durar de 15 a 30 dias. Após esse período, é feita a amostragem do solo para o monitoramento das alterações químicas promovidas pelos tratamentos e realiza-se a semeadura da planta teste.

Os vasos podem ser dispostos segundo um delineamento inteiramente casualizado, efetuando-se rodízios periódicos visando variar sua posição no interior da casa de vegetação. É conveniente trabalhar com pelo menos quatro repetições. A irrigação dos vasos deve ser feita quando necessário, de modo a propiciar condições ótimas para reação da FAN e desenvolvimento da planta teste.

Em geral, é adequado manter a umidade a 80% da capacidade de campo do substrato. É importante que se utilize água deionizada ou destilada na irrigação. Outros detalhes e sugestões de procedimentos para a aplicação dos tratamentos e condução de ensaios em vasos podem ser consultados em Novais et al. (1991).

Devido à variabilidade nas proporções de minerais e elementos químicos constituintes da rocha, bem como a incerteza sobre o seu grau de solubilidade, é mais seguro basear-se no teor total do nutriente alvo presente na FAN para o cálculo das quantidades a serem aplicadas no ensaio. Deve-se atentar ainda para eventual necessidade de conversões, tais como transformações das formas de P_2O_5 e K_2O para P e K.

Avaliações

As principais variáveis dependentes a serem mensuradas são os efeitos da aplicação da FAN na disponibilidade do nutriente alvo no solo, na produção de matéria seca da planta teste e no teor do nutriente e seu acúmulo na matéria seca. No caso de ensaio em vasos com capacidade para três dm^3 de substrato, cerca de 15 plantas de milho devem ser mantidas após desbaste, visando potencializar o efeito dreno-planta dos produtos da dissolução da FAN e garantir massa seca suficiente às análises de tecidos mesmo naqueles tratamentos que apresentarem menor crescimento (vide diferenças de crescimento entre tratamentos na Figura 1).

Amostragens do solo nos vasos devem ser executadas ao final do período de incubação dos tratamentos (caracterização inicial dos efeitos nos atributos do solo) e após os dois cultivos sequenciais. As análises normalmente empregadas referem-se às determinações de rotina para estudos de fertilidade do solo, cujas metodologias são descritas em Silva (1999).

Para o nutriente alvo (ex: P ou K), é conveniente que se faça a quantificação da disponibilidade no solo por mais de um extrator, num estudo a parte, visto que FANs podem conter o nutriente em formas mais ou menos recalcitrantes e extratores distintos apresentam diferente força extratora. Daí a importância de se verificar qual procedimento analítico apresenta melhor correlação

com a resposta da planta em termos de absorção do nutriente e crescimento. Em outras palavras, é preciso identificar qual método de análise de solo expressará de forma mais confiável a biodisponibilidade do nutriente adicionado pela aplicação de uma determinada FAN. Esse aspecto está relativamente bem definido no que tange ao P proveniente de fosfatos naturais oferecidos ao agricultor no mercado brasileiro. Mas não se pode dizer o mesmo para o fósforo e outros nutrientes fornecidos via FANs, ainda pouco estudadas.

As avaliações no material vegetal constituem-se da determinação da produção de massa seca da parte aérea e, eventualmente, das raízes, após a secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até atingir peso constante. Posteriormente, o material é moído e amostras são submetidas a análises químicas de tecidos, de acordo com metodologias descritas em Malavolta et al. (1997), para quantificação dos teores de nutrientes. Multiplicando os dados de matéria seca pelos teores de nutrientes, calcula-se o conteúdo ou acúmulo destes na planta.

Devido à ocorrência do efeito de diluição de nutrientes nos tecidos vegetais (JARREL; BEVERLY, 1981), a interpretação de resultados experimentais apenas com base nos teores ou concentrações presentes na planta é insuficiente para se concluir sobre a liberação de nutrientes pelas FANs ou qualquer fertilizante, sendo indispensável informar os dados de acúmulo dos nutrientes. Este, sim, permite inferir sobre as quantidades absorvidas pela planta, o que dá ideia clara do que foi disponibilizado pelo produto em teste. Apesar de simples, essa abordagem muitas vezes não é considerada nas publicações.

Um segundo cultivo sequencial de milho no mesmo substrato, sem nova adubação básica de semeadura (uma adubação de cobertura com N pode ser necessária), tem possibilitado detectar os efeitos residuais de médio prazo dos tratamentos com FANs. Em estudos de fontes alternativas de potássio, é comum que a absorção do nutriente no segundo cultivo seja maior nos tratamentos com essas fontes em comparação à fonte solúvel de referência (cloreto de potássio). Ocorre que grande parte do K

prontamente disponível do cloreto de potássio é absorvido pelas plantas do primeiro cultivo, sem haver incrementos proporcionais na produção de matéria seca (consumo de luxo). Há, portanto, um esgotamento rápido do K aplicado como fertilizante solúvel. Já o K de fontes alternativas, de liberação gradual, não é tão intensamente absorvido pelas plantas do primeiro cultivo, mas a taxa de suprimento se mantém relativamente constante e garante a absorção para crescimento razoável do segundo cultivo (RESENDE et al., 2006a). Com cultivos sucessivos, pode-se demonstrar o expressivo efeito residual de algumas FANs, o que constitui um diferencial positivo pelo menor risco de perdas de K por lixiviação em ambientes propensos à ocorrência desse processo.

Quando pertinente, as variáveis mensuradas devem ser submetidas a tratamentos estatísticos apropriados. Análises de variância, teste de comparação de médias e ajuste de modelos de regressão são os procedimentos mais comuns. Contrastes específicos também podem ser estabelecidos entre grupos de tratamentos. Ainda, dada a maior complexidade das interações e os efeitos múltiplos no solo e nas plantas, resultantes da aplicação de FANs, pode ser interessante usar técnicas de análise multivariada, como a Análise de Componentes Principais.

Com as devidas adaptações a partir da literatura, alguns cálculos podem ser adotados para se avaliar a eficiência de FANs quanto à liberação de nutrientes no solo, ao seu aproveitamento pela planta e à resposta em produtividade. Sugestões de índices de eficiência são descritas na Tabela 2. O mais relevante é o Índice de Eficiência Agronômica (IEA), o qual normalmente constitui um requisito fundamental nos trabalhos de pesquisa que visam fornecer suporte técnico aos pedidos de registro de fertilizantes junto ao Ministério da Agricultura. Abordagens análogas às aqui expostas, tomando como exemplo o caso do potássio, podem ser empregadas no teste de FANs cujo objetivo é evidenciar a chance de uso como fonte de fósforo ou outro nutriente de interesse, ou, ainda, como corretivo da acidez ou condicionador de solo .

No caso de estudos que envolvem curvas de resposta a doses de FAN em comparação a doses de uma fonte solúvel, pode-se

determinar o Índice de Equivalência da FAN à fonte referência (GOEDERT; LOPES, 1987). Para isso, a partir dos modelos de resposta, estimam-se quais devem ser as doses da fonte solúvel e da FAN necessárias para se alcançar uma dada produtividade.

Experimentos de validação a campo

Após a etapa dos ensaios discriminatórios, a finalização dos testes de viabilidade técnica deve ocorrer em sistema aberto, com ambiente edafoclimático mais próximo possível da realidade de manejo agrícola da região potencial consumidora da FAN. Pouco adianta se provar a eficiência fertilizante de uma FAN se os pré-requisitos para essa eficiência forem muito discrepantes das condições vigentes no dia-a-dia da atividade agropecuária regional. Assim, é preciso planejar com cuidado os experimentos de validação a campo.

Escolha da área experimental e definição dos tratamentos

Costuma haver diferenças marcantes nas respostas a FANs em ambientes não cultivados anteriormente (áreas recém-abertas) e ambientes já corrigidos e adubados (lavouras cultivadas há mais tempo). Enquanto na primeira situação podem parecer nítidos os efeitos da FAN na melhoria da fertilidade do solo e no aumento da produtividade, em comparação ao tratamento controle sem corretivos e fertilizantes, na segunda situação pode-se não detectar ganhos pela aplicação da FAN em relação a esse tratamento controle. Portanto, o pesquisador precisa considerar tanto os condicionantes que eventualmente poderão levar à falsa impressão de boa eficiência quanto aqueles que poderão mascarar os benefícios do produto em teste.

Independentemente do ambiente escolhido para validação, é preciso prever dois tratamentos que podemos chamar de “controle negativo” e “controle positivo”. Qualquer que seja o estado de fertilidade na área experimental antes da aplicação dos tratamentos, é necessário incluir um tratamento sem nenhum aporte de corretivos ou fertilizantes (controle negativo) e outro que represente o manejo tradicional da adubação com as fontes convencionais para a cultura na região (controle positivo).

Tabela 2. Opções de cálculo para avaliação da eficiência de novas fontes de nutrientes, tomando-se o potássio como exemplo de nutriente alvo.

Variável de eficiência	Unidade	Fórmula de cálculo*	Referência
Eficiência relativa de liberação de K no solo pela FAN – EL	%	$EL = \frac{(K \text{ disponível no tratamento com FAN})}{(K \text{ disponível no tratamento com KCl})} \times 100$	-
Eficiência da FAN na produção da planta teste – EP	mg mg ⁻¹	$EP = \frac{\text{Produção de massa seca pela planta teste}}{K \text{ aplicado na forma de FAN}}$	Moll et al. (1982)
Eficiência de absorção do K da FAN pela planta teste – EA	mg mg ⁻¹	$EA = \frac{K \text{ acumulado pela planta teste}}{K \text{ aplicado na forma de FAN}}$	Moll et al. (1982)
Eficiência de utilização do K da FAN pela planta teste – EU	mg mg ⁻¹	$EU = \frac{\text{Produção de massa seca pela planta teste}}{K \text{ acumulado na planta teste}}$	Moll et al. (1982)
Eficiência agrônômica relativa da FAN – ER	%	$ER = \frac{(K \text{ acumulado no tratamento com FAN})}{(K \text{ acumulado no tratamento com KCl})} \times 100$	-
Índice de eficiência agrônômica da FAN – IEA	%	$IEA = \frac{(\text{Produção com FAN} - \text{Produção do Controle})}{(\text{Produção com KCl} - \text{Produção do Controle})} \times 100$	Goedert e Lopes (1987)

* KCl: Cloreto de potássio, tratamento referência para adubação potássica. Controle: tratamento sem fornecimento de K ("completo – K").

Nos experimentos a campo torna-se complicado, do ponto de vista operacional, avaliar tantos tratamentos quanto se consegue nos ensaios de casa de vegetação. De antemão, deve-se ter muito claros os contrastes imprescindíveis num trabalho de validação. Os tratamentos normalmente envolvem alguma variação de doses da FAN e combinações com fontes convencionais, além dos controles negativo e positivo. Os tratamentos típicos para a validação de fontes de potássio são listados na Tabela 3. A mesma lógica se aplica a outros nutrientes alvos. Os tratamentos com doses de FAN são importantes para que se possam dimensionar as recomendações agronômicas de uso, calibradas pela resposta produtiva e econômica das culturas. Dada a maior variabilidade observada na composição química e no comportamento agronômico das FANs, é recomendável se utilizar preferencialmente quatro ou mais repetições nos experimentos de campo.

Em virtude das especificidades inerentes a algumas fontes, além dos tratamentos básicos, outros podem ser incluídos visando comparar, por exemplo, os efeitos de diferentes granulometrias do produto, da presença de nutrientes secundários na composição do agromineral e de formas de aplicação. No caso de rochas multinutrientes ou com efeito condicionador do solo, pode ser interessante verificar o efeito de tratamentos com sua aplicação isolada (sem nenhum outro corretivo ou fertilizante) ou combinada com uma redução parcial de todos os insumos usados no manejo tradicional (menores doses de calcário e fertilizantes NPK).

Em geral, as FANs não apresentam pronta solubilização como os fertilizantes convencionais. Por isso, têm sua reatividade e eficiência aumentadas quando utilizadas como pó fino, à semelhança dos fosfatos naturais disponíveis no mercado. Também são menos concentradas em nutrientes e, por esse motivo, sua aplicação costuma ser baseada no teor total e não no teor solúvel do nutriente alvo. As quantidades a serem distribuídas na lavoura são elevadas, da ordem de várias toneladas por hectare. Em função desses aspectos, a forma usual de aplicação é a lanço em área total.

A opção por experimentos em ambientes caracterizados como “áreas de abertura para uso agrícola”, que ainda receberão operações de preparo do solo, pode ser oportuna para a validação de FANs que apresentam solubilidade imediata mais limitada e

que expressam efeito corretivo da acidez. Sua aplicação seguida de revolvimento e incorporação ao solo favorecerá as reações de solubilização e permitirá melhorar a fertilidade numa maior espessura do perfil de exploração radicular.

Experimentos em ambientes já cultivados, de fertilidade construída e, especialmente, sob sistema de plantio direto, deverão requerer mais tempo para que os efeitos dos agrominerais se tornem evidentes. Uma vez que não há preparo periódico do solo, a aplicação antecedendo eventuais operações de subsolagem é desejável, pois isso promoverá alguma incorporação e facilitará o contato com os componentes do solo, estimulando as reações de solubilização. Também o cultivo englobando rotação com plantas de cobertura de crescimento robusto, notadamente gramíneas como milheto e braquiária, deverá originar um ambiente mais propício à solubilização e mobilização dos nutrientes para baixo no perfil.

Avaliações

As avaliações a serem feitas nos experimentos de validação são basicamente as mesmas descritas no item sobre os ensaios discriminatórios, acrescidas da mensuração da colheita do produto comercial (grãos, frutos, etc.) da cultura em foco. Destaca-se a importância de se estabelecerem as curvas de resposta para disponibilidade do nutriente alvo no solo e de produtividade em função de quantidades crescentes da FAN, bem como identificar as tendências dessas respostas ao longo do tempo com cultivos sucessivos. Também deve ser calculado o Índice de Eficiência Agronômica (Tabela 2). Uma vez integradas, essas informações permitirão definir as recomendações de dosagem para o uso como insumo agrícola.

Tabela 3. Sugestões de tratamentos para experimentos de validação de FANs, tomando-se o potássio como exemplo de nutriente alvo.

Tratamentos	Outras adições	
	Calcário/gesso	Adubação convencional com os outros nutrientes
1. Controle negativo (sem qualquer aplicação de corretivos e fertilizantes, correspondendo ao solo na sua condição inicial)	-	-
2. Controle positivo (aplicação de corretivos e cloreto de potássio, conforme o manejo padrão para a cultura na região)	+	+
3. Controle sem potássio (aplicação de corretivos e adubação normal, exceto com potássio)	+	+
4. FAN na dose equivalente a 60 kg ha ⁻¹ de K ₂ O (com calagem e adubação normal com os outros nutrientes)	+	+
5. FAN na dose equivalente a 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O (com calagem e adubação normal com os outros nutrientes)	+	+
6. FAN na dose equivalente a 240 kg ha ⁻¹ de K ₂ O (com calagem e adubação normal com os outros nutrientes)	+	+
7. FAN na dose equivalente a 360 kg ha ⁻¹ de K ₂ O (com calagem e adubação normal com os outros nutrientes)	+	+
8. 50% de FAN + 50% de cloreto de potássio para compor a dose de 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O (com calagem e adubação com os outros nutrientes)	+	+
9. 30% de FAN + 70% de cloreto de potássio para compor a dose de 120 kg ha ⁻¹ de K ₂ O (com calagem e adubação com os outros nutrientes)	+	+

Além dos aspectos de eficiência técnica, uma análise econômica comparativa deve ser realizada de modo a posicionar a FAN considerando-se os componentes diferenciais de custo em relação ao fertilizante convencional, tais como os gastos com frete e aplicação na lavoura. Em última instância, o somatório dos custos do material *per se*, do transporte e da sua aplicação, confrontado com a receita em produto colhido, é que irá determinar o raio de viabilidade de uso da FAN, ou seja, até que distância do local de produção haverá vantagem competitiva desta em relação à fonte convencional. Essa abordagem regionalizada precisa ser observada no tocante ao desenvolvimento agronômico e de mercado para cada jazimento de FAN, tal como ocorre na mineração de calcário agrícola (RESENDE et al., 2006b). Na maioria dos casos, o custo de transporte será o principal fator determinante do potencial mercado consumidor.

Considerações finais

Cabe aqui uma reflexão acerca da eficiência agronômica de derivados de rochas. Ao adotar rigidamente o conceito de Índice de Eficiência Agronômica, em relação ao suprimento de um nutriente de forma isolada, por vezes se concluirá que a fonte alternativa não tem competitividade com o fertilizante convencional. Por outro lado, ao calcular o Índice de Eficiência Agronômica baseado na resposta em produtividade, a conclusão poderá ser que a fonte alternativa é tão ou mais eficiente que a convencional. O que à primeira vista parece uma incongruência, sugere a necessidade de uma interpretação mais voltada para a eficiência global resultante da inclusão da FAN no ambiente de produção.

Vários trabalhos vêm demonstrando que os ganhos de produtividade decorrem não apenas do efeito de um único nutriente presente no agromineral, mas de todos os produtos da solubilização e suas interações com o meio. Daí a importância de se difundir um conceito de Eficiência Global, ponderada pelos efeitos principal e secundários da FAN. O grande desafio é quantificar e valorar esses efeitos secundários, responsáveis pelo que se poderia chamar de benefícios indiretos ao sistema de produção. O efeito residual da FAN e sua contribuição para a redução de custos das adubações de manutenção são outros diferenciais que não podem ser esquecidos.

A variável econômica deve ser considerada em todos os casos. Dificilmente, um agromineral vai substituir totalmente um fertilizante concentrado solúvel num primeiro momento, mas há que se buscar a possibilidade de substituição parcial, sem perda de produtividade e com algum ganho econômico para o agricultor.

Referências

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa nº 27, de 5 de junho de 2006**. Disponível em: <<http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=consultarLegislacaoFederal>>. Acesso em: 16 ago. 2011.

GOEDERT, W. J.; LOPES, A. S. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados para culturas anuais, perenes, pastagens e reflorestamento. In: SEMINÁRIO SOBRE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO, 1987, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Ibrafos, 1987. p. 24-49.

JARREL, W. M.; BEVERLY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**, New York, v. 34, p. 197-224, 1981.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MOLL, R. H.; KAMPRATH, E. J.; JACKSON, W. A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, New York, v. 74, p. 562-564, 1982.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A. J.; GARRIDO, W. E.; ARAÚJO, J. D.; LOURENÇO, S. (Coord.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: EMBRAPA-SEA, 1991. p. 190-253. (EMBRAPA-SEA. Documentos, 3).

RAIJ, B. van; VALADARES, J. M. A. S. **Análise dos elementos maiores de rochas, argilas e solos**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1974. 32 p. (Boletim Técnico, 16).

RESENDE, A. V.; MACHADO, C. T. T.; MARTINS, E. S.; SENA, M.

C.; NASCIMENTO, M. T.; SILVA, L. C. R.; LINHARES, N. W. Rochas como fontes de potássio e outros nutrientes para culturas anuais.

Espaço e Geografia, Brasília, v. 9, n. 1, p. 135-161, 2006a.

RESENDE, A. V.; MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, C. G.; SENA, M. C.; MACHADO, C. T. T.; KINPARA, D. I.; OLIVEIRA FILHO, E. C. Suprimento de potássio e pesquisa de uso de rochas “in natura” na agricultura brasileira. **Espaço e Geografia**, Brasília, v. 9, n. 1, p. 19-42, 2006b.

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S. Potassium leaching from millet straw as affected by rainfall and potassium rates. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 36, p. 1063-1074, 2005.

SANZONOWICZ, C.; MIELNICZUK, J. Potassium distribution in the soil profile as affected by crop, fertilizers and fertilizer management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, n. 1, p. 45-50, 1985.

SILVA, F. C. (Org.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 81-96.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. Dinâmica do potássio nos resíduos vegetais de plantas de cobertura no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1609-1618, 2008.

Embrapa

Milho e Sorgo



Ministério da
**Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA