

# **AGROMINERAIS PARA O BRASIL**

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL  
RIO DE JANEIRO, 2010

# AGROMINERAIS PARA O BRASIL

## EDITORES

---

Francisco Rego Chaves Fernandes  
Adão Benvindo da Luz  
Zuleica Carmen Castilhos

O conteúdo deste trabalho é de responsabilidade  
exclusiva do(s) autor(es)

**VERA LÚCIA DO ESPÍRITO SANTO SOUZA**  
Projeto Gráfico/Editoração Eletrônica

**GISELE ROSE DA SILVA**  
Assistente de Pesquisa

Foto Agrominerais: Verdete, Silanito, Fonolito, Amazonita, Verdete britado  
(da esquerda para a direita) – Sílvia Cristina Alves França e Gisele Rose da Silva.  
Agrícolas: milho, soja, feijão, arroz e cana-de-açúcar.

Centro de Tecnologia Mineral

Agrominerais para o Brasil/Eds. Francisco R. C. Fernandes, Adão B. da Luz,  
Zuleica C. Castilhos. - Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

380 p.: il.

1. Fertilizantes. 2. Agrominerais. 3. Agroindústria. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Fernandes, Francisco R.C. (Ed.). III. Luz, Adão B. (Ed.). III. Castilhos, Zuleica C. (Ed.).

ISBN 978-85-61121-61-7

CDD 668.62

# APRESENTAÇÃO

Com a edição deste livro conclui-se o Projeto AGROMINERAIS, coordenado pelo CETEM com financiamentos do CT-Mineral e FINEP.

No decorrer dos últimos 18 meses foi realizada intensa atividade de interação entre pesquisadores e professores das mais importantes instituições brasileiras. Foram realizadas Oficinas Temáticas muito concorridas, envolvendo a comunidade acadêmica, tecnológica, empresarial e organizações sociais. Ainda foram produzidos estudos prospectivos por especialistas renomados, nacionais e também internacionais das diferentes áreas do conhecimento envolvidas no tema. Destes últimos, foram elaborados quinze distintos capítulos para o atual livro sobre Agrominerais.

Acreditamos que com a edição deste livro e a sua divulgação simultânea na internet e no site do CETEM, estamos dando uma positiva contribuição à importante questão dos Agrominerais no Brasil.

Rio de Janeiro, Julho de 2010.

José Farias de Oliveira  
Diretor do CETEM



# SUMÁRIO

PREFÁCIO	<i>Francisco Rego Chaves Fernandes, Adão Benvindo da Luz e Zuleica Carmen Castilhos</i>	
CAPÍTULO 1	PANORAMA DOS AGROMINERAIS NO BRASIL: ATUALIDADE E PERSPECTIVAS <i>Yara Kulaif e Francisco Rego Chaves Fernandes</i>	01
CAPÍTULO 2	AGROMINERAIS: RECURSOS E RESERVAS <i>Antonio Fernando da Silva Rodrigues, David Siqueira Fonseca, Mathias Hider Ricardo Eudes Parahyba e Vanessa M. M. Cavalcante</i>	23
CAPÍTULO 3	ROTAS TECNOLÓGICAS CONVENCIONAIS E ALTERNATIVAS PARA A OBTENÇÃO DE FERTILIZANTES <i>Arthur Pinto Chaves</i>	45
CAPÍTULO 4	ROCHAS, MINERAIS E ROTAS TECNOLÓGICAS PARA A PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES ALTERNATIVOS <i>Adão Benvindo da Luz, Francisco E. Lapido-Loureiro, João Alves Sampaio, Zuleica Carmen Castilhos e Marcelo Soares Bezerra</i>	61
CAPÍTULO 5	MATERIAIS SILICÁTICOS COMO FONTES REGIONAIS DE NUTRIENTES E CONDICIONADORES DE SOLOS <i>Éder de Souza Martins, Álvaro Vilela de Resende, Claudinei Gouveia de Oliveira e Antonio Eduardo Furtini Neto</i>	89
CAPÍTULO 6	O MEIO AMBIENTE NA PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES FOSFATADOS NO BRASIL <i>Elvira Gabriela Dias e Roberto D. Lajolo</i>	105
CAPÍTULO 7	FOSFOGESSO: GERAÇÃO, DESTINO E DESAFIOS <i>Roberto Mattioli Silva e Marco Giuliatti</i>	125
CAPÍTULO 8	A INDÚSTRIA BRASILEIRA DE FERTILIZANTES (CADEIA NPK, ENXOFRE, ROCHA FOSFÁTICA E POTÁSSIO) - PROJEÇÕES DE 2010 A 2030 <i>Eduardo Soares Ogasawara, Yara Kulaif e Francisco Rego Chaves Fernandes</i>	145
CAPÍTULO 9	UM ESTUDO DAS PRINCIPAIS LAVOURAS PARA A PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS <i>Maria Helena M. Rocha Lima e Nilo da Silva Teixeira</i>	169
CAPÍTULO 10	O USO DA BIOMASSA COMO NOVA FONTE ENERGÉTICA MUNDIAL <i>Ângelo Bressan Filho</i>	189
CAPÍTULO 11	POLÍTICAS GOVERNAMENTAIS PARA OS BIOCOMBUSTÍVEIS <i>Ricardo Borges Gomide</i>	203

CAPÍTULO 12	INVENTÁRIO E CARTOGRAFIA DE RECURSOS AGROMINERAIS CONVENCIONAIS E ALTERNATIVOS DO TERRITÓRIO BRASILEIRO	
	<i>Gerson Manoel Muniz de Matos e Ivan Sérgio de Cavalcante Mello</i>	227
CAPÍTULO 13	ROCHAS E MINERAIS COMO FERTILIZANTES ALTERNATIVOS NA AGRICULTURA: UMA EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL	
	<i>Peter Van Straaten</i>	235
CAPÍTULO 14	BIOCOMBUSTÍVEIS NOS ESTADOS UNIDOS EM CONTEXTO DE MUDANÇA	
	<i>Joaquim Ramos Silva</i>	265
CAPÍTULO 15	A SITUAÇÃO ENERGÉTICA DA UNIÃO EUROPEIA E O CASO PARTICULAR DOS BIOCOMBUSTÍVEIS: DIAGNÓSTICO ACTUAL E PERSPECTIVAS	
	<i>Carla Guapo Costa</i>	277

# PREFÁCIO

Francisco Rego Chaves Fernandes  
Adão Benvindo da Luz  
Zuleica Carmen Castilhos

Este livro "Agrominerais para o Brasil" é um livro editado pelo Projeto Agrominerais coordenado pelo CETEM - Centro de Tecnologia Mineral do MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia, para atender a dois objetivos principais:

- abordar aprofundadamente o vasto conjunto de temas pertinentes aos Agrominerais com um enfoque centrado no Brasil;
- apresentar sugestões de linhas de ação, uma Agenda de Prioridades, para o desenvolvimento científico-tecnológico brasileiro sustentável.

Apresenta os principais resultados do Projeto "Estudo Prospectivo Relativo aos Agrominerais e Seus Usos na Produção de Biocombustíveis Líquidos com Visão de Longo Prazo (2035)", resultante de Oficinas temáticas que foram realizadas envolvendo algumas centenas de participantes. O projeto foi apoiado pelo CT-Mineral/Fundo Setorial Mineral e pela FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos, tem como coordenador o CETEM e como instituições co-executoras, a UFSCar/Rede Inter-universitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA), a Embrapa Cerrados/Rede de Pesquisa de Rochas Silicatadas de Fonte de Potássio, a CPRM-Serviço Geológico do Brasil (SGB) e o Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM/MME).

Agrominerais (tais como enxofre, minerais de potássio, rocha fosfática, calcário e turfa) é matéria-prima de origem mineral sendo insumo absolutamente indispensável para viabilizar a agricultura e a pecuária brasileiras, ou seja, é parte integrante da alimentação dos cidadãos brasileiros, da viabilização do agronegócio externo, e ainda, alavancando o nascente e pujante setor dos biocombustíveis.

O tema do livro foi desdobrado pelos editores, em quinze capítulos, cada um deles a cargo de um especialista de renomado conhecimento.

Inicia-se o livro "Agrominerais para o Brasil" com dois capítulos dedicados às Fontes Convencionais de Nutrientes (FCN). O primeiro, "*Panorama dos agrominerais no Brasil: atualidade e perspectivas*" traça um atualizado perfil dos fertilizantes convencionais (NPK): - uma complexa cadeia de múltiplos produtos e mercados; - uma caracterização geral desta indústria no Brasil e no mundo e um histórico deste setor industrial no Brasil, desde a sua fundação, destacando-se as consequências da sua privatização há dez anos. Finalmente, a atualidade, a qual apresenta grandes desafios, em que a oferta tem elevadíssima dependência das importações, atinge cerca de 80% do total dos nutrientes consumidos pelo Brasil e a especulação financeira se faz fortemente presente.

Logo em seguida: "*Agrominerais: recursos e reservas*" aprofunda o tema dos Agrominerais (minerais de potássio, fosfato, enxofre e calcário) no Brasil no segmento da pesquisa e lavra de recursos minerais, incluindo uma minuciosa apresentação da disponibilidade primária (ocorrências e jazidas minerais) em todo o território nacional. É também analisado para cada um dos recursos agrominerais, os aspectos de mercado e as relações de dependência e sustentabilidade entre o agronegócio e o mineralnegócio.

Um capítulo crítico: "*Rotas tecnológicas convencionais e alternativas para a obtenção de fertilizantes*", apresenta os diferentes produtos oferecidos no mercado brasileiro, tanto oriundos das Fontes Convencionais de Nutrientes (FCN) - os de alta solubilidade e concentração - como das Fontes Alternativas de Nutrientes (FAN) - rocha, termofosfatos e outros -, questionando-se aprofundadamente as vantagens e desvantagens de sua utilização no clima e solos tropicais brasileiros. Em conclusão, defende o autor, ser

altamente desejável o fortalecimento da pesquisa e desenvolvimento tecnológico das diferentes fontes alternativas de fertilizantes fosfatados, para atender às demandas crescentes, com o aproveitamento de quantidades enormes de minérios marginais inacessíveis pela tecnologia atual, mas que são: de interesse industrial, de conservação de recursos minerais e de minimização do impacto ambiental.

Dois capítulos são dedicados às Fontes Alternativas de Nutrientes (FAN). O primeiro "*Rochas, minerais e rotas tecnológicas para a produção de fertilizantes alternativos*" aprofunda a rochagem, ou seja, as técnicas de aplicação direta na agricultura de rochas moídas ou contendo finos naturais, como material fertilizante. Os autores realizaram uma detalhada busca, em todo o extenso território brasileiro, identificando e localizando as rochas e materiais fertilizantes alternativos, nos colocando ainda a par do estado da arte dos estudos tecnológicos visando o seu aproveitamento. No final sugerem uma agenda de prioridades para futuras pesquisas de desenvolvimento científico e tecnológico. Na continuação do tema, um novo capítulo, "*Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos*", destacando um novo paradigma, com a mudança de uso de matérias primas convencionais globalizadas para matérias primas alternativas regionais. Localiza também estes materiais (primários e secundários) abundantes no Brasil, justapõe as suas ocorrências com a localização das produções de cana-de-açúcar e soja, que são as duas principais fontes dos biocombustíveis, mostrando a ampla viabilidade do seu aproveitamento regional e finaliza elencando ainda um conjunto de vantagens decorrentes da sua utilização.

Dois capítulos são totalmente dedicados ao meio ambiente, que apresentam, no seu final, um elenco de sugestões, uma agenda de prioridades para implementação. O primeiro "*O meio ambiente na produção de fertilizantes fosfatados no Brasil*" dá-nos uma aprofundada e ilustrativa panorâmica dos diferentes e múltiplos impactos negativos no meio ambiente associados à cadeia produtiva dos fertilizantes fosfatados, que obrigatoriamente devem ser levados em consideração, no planejamento da ampliação da produção de agrominerais. A esperada ocorrência de tais impactos nos futuros empreendimentos torna necessário identificar as ações e medidas que, se implementadas, poderão atenuar este efeito, seja na lavra ou no beneficiamento dos minerais fosfáticos. Estes processos produtivos encontram-se todos no campo dos conflitos, seja pelo uso da terra ou da água e integrados no desenvolvimento sustentável no binômio: conservação e desenvolvimento econômico. Já na etapa de industrialização, o fosfogesso destaca-se como um importante problema, pois: "*constitui significativo passivo ambiental que, mantidas as atuais circunstâncias, deve continuar a crescer na razão direta da expansão da produção, em virtude da rota tecnológica adotada*". Os autores concluem que: "*o papel do desenvolvimento científico e tecnológico pode ser muito mais decisivo na solução dos problemas (...) deve ser tratado de modo amplo e transparente, envolvendo todos os atores interessados – empresas, instituições de ciência e tecnologia, organismos de governo, entidades não governamentais, sociedade civil – e incorporar como pressupostos os princípios de prevenção e precaução*".

O segundo capítulo: "*Fosfogesso: geração, destino, desafios*", centra e desenvolve o tema do rejeito complexo gerado na produção de ácido fosfórico, produto essencial na cadeia NPK dos fertilizantes, mas contendo, entre outros, metais pesados e minerais radiativos. A sua produção no Brasil iniciou-se em 1950 e para cada tonelada de ácido fosfórico geram-se seis toneladas de rejeito, o fosfogesso, gerando atualmente uma produção anual de 5 milhões de toneladas a sua produção anual. Os autores mostram que já atinge 50% a parcela do fosfogesso gerado no Brasil que é descartada no ambiente empurrado pelas empresas produtoras de ácido fosfórico, utilizado principalmente com finalidade agrícola. Neste particular, sem que haja uma avaliação do potencial impacto radiológico na população consumidora dos produtos agrícolas e sem provas da sua eficácia como fertilizante. Mostram ainda que existem pressões redobradas para a ampliação do seu descarte, como material de construção (por exemplo, para a população de baixa renda, ao abrigo do PAC do governo federal), sem que se aplique, nem o princípio da precaução, com seu consequente banimento, nem a proposição, pelos órgãos brasileiros competentes, de padrões e limites quantitativos das mensurações de risco principalmente quanto às emissões radiativas. Em contraste, no resto do mundo desenvolvido, nos Estados Unidos, União Europeia e Japão, os autores referem-se à rejeição deste material, para estradas junto de centros urbanos e habitados devido ao teor de radionuclídeos. Destaca-se nos EUA o banimento do uso do fosfogesso, feito pela *United States Environmental Protection*



Agency (USEPA) em 1992 citando a demolição de conjuntos habitacionais na Flórida, construídos nos anos 60.

Em "A indústria brasileira de fertilizantes (cadeia NPK, enxofre, rocha fosfática e potássio) - projeções de 2010 a 2030" é feito um exercício econométrico - rigoroso, através de sofisticada e adequada metodologia - onde são apresentados resultados de um exercício de projeção de longo prazo, das principais variáveis do mercado de fertilizantes minerais NPK do Brasil. Mostra a necessidade até 2030 de ampla ampliação da capacidade produtiva nacional da indústria do NPK, em todos os seus segmentos produtivos, para atender a um forte crescimento esperado do PIB brasileiro. Há uma expectativa de crescimento pujante do *agrobusiness*, o que significa a necessidade de novos empreendimentos agrominerais em grandes proporções, significando também vultosos investimentos, que até ao presente momento, a iniciativa privada ou estatal está longe de viabilizar. Comparados estes resultados com os obtidos num estudo da ANDA realizado em 2009, verifica-se que são muito semelhantes, apontando as necessidades adicionais em mais 50% da capacidade produtiva atual brasileira.

O tema de agrocombustíveis vem logo em seguida, desenvolvido em três capítulos concatenados: o primeiro trata da agricultura brasileira no que se refere às duas maiores produções direcionadas para biocombustíveis, a cana-de-açúcar e a soja; o segundo, sobre as políticas governamentais brasileiras para os biocombustíveis e, finalmente, o terceiro versa sobre o uso da biomassa como nova fonte energética mundial.

O capítulo "*Um estudo das principais lavouras para a produção de biocombustíveis*", é um texto positivo e afirmativo:

- o Brasil poderá expandir suas plantações tanto para a indústria de alimentos quanto de biocombustíveis (...) confirmando em 2030 um futuro promissor para os agentes envolvidos tanto com a cadeia produtiva do etanol
- o atual sucesso do carro *flex* é fruto dessa experiência adquirida desde a década de 70, com o lançamento do PROÁLCOOL, que incentivou o uso do álcool anidro misturado à gasolina até surgimento dos veículos *flex* em 2003.
- o grande desafio do Brasil é consolidar a liderança na utilização da bioenergia como combustível automotivo.

No decorrer deste capítulo é-nos dado conhecer, tanto para a cana-de-açúcar como para a soja, estatísticas atualizadas e detalhadas sobre a área plantada - nacional e regional - , a estrutura industrial, as esperadas expansões da produção projetadas principalmente para os biocombustíveis, com a incorporação de novas áreas e ainda, os mercados para estes produtos.

O conhecimento referente às "*Políticas governamentais para biocombustíveis*" é de grande interesse e, neste capítulo, nos é dado conhecer as medidas governamentais, baseadas na plena convicção que existem externalidades positivas dos biocombustíveis em relação aos outros combustíveis fósseis, para consolidar a sua produção e uso no Brasil, baseada em suporte à agricultura e à instalação de unidades industriais de produção, à estruturação da cadeia logística e de abastecimento, à definição de normas e padrões de comercialização, ao consumo e à fabricação de veículos. Os diferentes instrumentos de política são também explanados, tal como a definição de mandatos para uso compulsório, políticas fiscais, creditícias e tributárias. Em seguida, listam-se as principais instituições do governo federal relativas aos biocombustíveis. Finalmente, em sua conclusão, o autor afirma que: "*É nítida a relevância da cana-de-açúcar como bem energético e estratégico para o país. Essa posição, conquistada ao longo de anos, serve como modelo para a consolidação do biodiesel no mercado brasileiro, assim como para o desenvolvimento de futuros biocombustíveis, a exemplo do bioquerosene e do biogás, ou mesmos de novas gerações tecnológicas*".

"O uso da biomassa como nova fonte energética mundial" trata intensivamente do uso de biomassa, dissecando o etanol como um novo produto para o mundo, a natureza do funcionamento da cadeia de produção sucroalcooleira no Brasil e a competição entre a produção de matérias-primas agrícolas e energéticas. Em relação a este último item, observa o autor que a utilização de matérias-primas agrícolas,

convencionais ou não, para a produção de combustível em grandes volumes traz, para os países que iniciam este tipo de programa, algumas consequências que não podem ser ignoradas. Observa ainda que: o atendimento deste novo tipo de demanda tende a provocar fortes desequilíbrios, que podem ser globais ou domésticos, nas relações econômicas, ambientais e sociais, que não podem ser desconsideradas pelas autoridades responsáveis pela gestão do novo programa. O autor apresenta uma visão otimista mas contendo algumas advertências em sua análise como mostra o subtítulo final do capítulo: O uso da biomassa como fonte energética é um movimento irreversível e de consequências imprevisíveis!

Um capítulo inteiro fecha o conjunto de capítulos que trata especificamente do Brasil e é dedicado ao "Inventário e cartografia de recursos agrominerais convencionais e alternativos do território brasileiro", com a produção de dois mapas do Brasil que podem ser consultados na internet e/ou em encarte de folha dupla no próprio livro. Os mapas versam sobre: - *Ambientes geológicos favoráveis para agrominerais fontes de P, K, Ca e Mg, direcionado à cartografia das fontes minerais convencionais para produção destes macronutrientes e - Insumos alternativos para a agricultura: rochas, minerais e turfa voltado para a cartografia de fontes alternativas, tais como rochas, minerais e substância húmica (turfa), para aplicação direta na agricultura, com destaque para os insumos utilizados na rochagem.*

Finalmente, três capítulos são inteiramente dedicados a estudos internacionais e foram diretamente encomendados a especialistas estrangeiros O primeiro sobre "*Rochas e minerais como fertilizantes alternativos na agricultura: uma experiência internacional*", onde o autor disserta sobre três fatores básicos que pesam no desempenho dos cultivos, além das características físico-químicas, (o fator rocha), existem as propriedades químicas e físicas dos solos (o fator solo) e finalmente as exigências e necessidades de nutrientes dos plantios (o fator plantio). Atualiza o conhecimento sobre as rochas e os minerais alternativos fertilizantes e relata as aplicações alternativas em um conjunto grande de países do mundo. Os outros dois capítulos são dedicados às questões que se prendem mais com a matriz energética e a produção de biocombustíveis na União Europeia e nos Estados Unidos. No capítulo dedicado à UE: "*A situação energética da União Europeia e o caso particular dos biocombustíveis: diagnóstico actual e perspectivas*", destaca-se que a par das controvérsias quanto à produção de biocombustíveis, no que se refere à segurança alimentar e à questão ambiental, existe uma grande dependência da UE em relação às principais importações das principais fontes de energias não-renováveis e perspectiva do seu agravamento no futuro, o que obrigou a um grande programa de reversão da matriz energética, através do incentivo às energias renováveis, com ênfase nos biocombustíveis, acompanhada de grande esforço de pesquisa e desenvolvimento, existindo aprofundada apresentação de sua meta e resultados parciais. Com "*Biocombustíveis nos Estados Unidos em contexto de mudança*", mostra-se a insustentabilidade do modelo energético dominante desde 1970, apoiado em fontes não-renováveis, como os combustíveis fósseis e o atual dilema dos EUA, o principal produtor e consumidor mundial. Para a transição para um novo modelo, que está em marcha desde o final da primeira década do século XXI, a transição para o uso maior de fontes renováveis como os biocombustíveis, exige-se pesados desafios de natureza tecnológica e de uma contribuição ativa para o combate ao aquecimento global ou a sua atenuação, diminuindo a emissão de gases do efeito estufa. O autor aponta que, no estágio atual da pesquisa tecnológica, a nascente indústria norte-americana de biocombustíveis baseado no milho não é competitiva, só sobrevive por barreiras à concorrência externa e subsídios aos seus produtores. Os biocombustíveis competitivos existem apenas em outros países que não os EUA (predominantemente no Brasil), mas a quebra das barreiras internas e as importações acabariam com o principal pilar da política energética deste país que é a independência energética.

O Brasil requer urgentes e vultosos investimentos industriais em todos os setores da cadeia produtiva dos Agrominerais, de forma que a demanda, incluindo a segurança alimentar brasileira, o programa de exportações do agronegócio e o acelerado desenvolvimento dos biocombustíveis não sejam inviabilizados. Hoje em dia, as decisões empresariais estão nas mãos da Vale e da Petrobrás, que detêm uma participação majoritária na cadeia convencional de NPK, após recentes aquisições das participações dos grupos multinacionais que dominaram a indústria brasileira no último decênio.

Acreditamos que terão uma excelente leitura todos aqueles que tenham acesso a este livro, especialistas do tema, alunos e professores, profissionais e leitores em geral, interessados em aprender ou aprofundar seus conhecimentos sobre os Agrominerais.

# ROCHAS E MINERAIS COMO FERTILIZANTES ALTERNATIVOS NA AGRICULTURA: UMA EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL<sup>1</sup>

PETER VAN STRAATEN<sup>2</sup>

## Introdução

Segundo estimativas do relatório anual da Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação (FAO) sobre segurança alimentar global, publicado em 2009, mais de um bilhão de pessoas, um sexto da população mundial, está subnutrida. Por outro lado, a produção de alimentos assim como a segurança alimentar dependem essencialmente de fatores biofísicos e de recursos naturais como a água e os solos, elementos essenciais para a vida na terra.

Para melhorar a fertilidade do solo, recorre-se à utilização de fertilizantes convencionais e, por razões econômicas e ambientais, ao uso de fontes alternativas de nutrientes, incluindo esterco, rochas e agrominerais, disponíveis nas proximidades das áreas de aplicações. Reforça-se assim a oferta de alimentação para humanos, de ração animal e de biocombustíveis.

A degradação física, química e biológica dos solos, na busca por suprimentos alimentares aliados a água, ao ar e à energia, ameaçam a segurança alimentar da população humana. A baixa fertilidade do solo é uma das causas da fome na África (Sanchez, 2002). Além disso, as mudanças ambientais a longo prazo, incluindo as alterações climáticas, terão implicações econômica-sociais e causarão sérios efeitos aos ecossistemas naturais, ao uso do solo e da água, à biodiversidade, à provisão de alimentos e à segurança alimentar.

É claro que a manutenção de solos saudáveis, bem nutridos e adequadamente tratados e, inclusive, os recursos como a água e a energia são cruciais para um desenvolvimento econômico-social e cultural sustentável.

Métodos de fertilização convencionais e não convencionais são praticados há décadas, a fim de aumentar a produção para a alimentação humana e ração animal. No entanto, nos últimos anos, surgiu um novo tipo de cultivo para a produção de combustíveis biológicos.

Os biocombustíveis são conhecidos por serem recursos renováveis derivados de produtos agrícolas, como a cana-de-açúcar e de outros cultivos que contêm açúcar e amido (milho e biomassas ricas em celulose, entre outros), e de plantas oleaginosas (óleo de palma, soja, canola, mamona, girassol, pinhão manso – *Jatropha curcas*) para a produção de bioetanol e de biodiesel, respectivamente. Os produtos agrícolas são considerados alternativas promissoras capazes de diminuir, lentamente, o suprimento de recursos naturais como os combustíveis fósseis não-renováveis. Na verdade, esses podem ser produzidos em regiões em que não há fontes convencionais de óleo e gás, fornecendo uma diversidade de recursos de combustíveis e usados em várias escalas, estimulando potencialmente a economia tanto de países desenvolvidos quanto de países em desenvolvimento.

Desde 1975, o Brasil produz matéria biológica renovável (cana-de-açúcar, soja, canola e milho) destinada à produção de biocombustível, o que pode ter efeitos benéficos para o meio ambiente, uma vez que as plantas absorvem CO<sub>2</sub> durante seu processo de crescimento. Entretanto, o cultivo dessas plantações requer fertilizantes à base de combustível, o que pode causar um balanço energético negativo, como é o caso do milho.

<sup>1</sup> Tradução de Denise Machado. E-mail: denisemachado@gmail.com

<sup>2</sup> D.Sc. University of Goettingen. Universidade de Guelph. E-mail: pvanstra@uoguelph.ca

Neste caso, há necessidade de mais energia para a produção de fertilizantes à base de nitrogênio, para os métodos de produção intensiva, para o transporte dos produtos agrícolas aos campos de processamento e para levar os biocombustíveis aos consumidores. Esses plantios requerem uma quantidade de energia fóssil maior do que a quantidade de biocombustível produzida

Novas tecnologias de conversão energética da biomassa incluem o uso de plantas perenes que crescem em terrenos agrícolas abandonados e degradados, como a grama (Sampson et al., 2008), restos de cultivos, restos de madeira e resíduos florestais ricos em celulose, além de matéria-prima à base de algas.

A utilização de pó de rochas e minerais como recursos multinutrientes para o desenvolvimento agrícola já havia sido testada no final do Século XIX (Hensel, 1890; 1894: 'bread from stones'). Recentemente, recebeu atenção de projetos de pesquisa, de conferências internacionais (Fyfe et al., 2006; van Straaten e Oram, 2009) e de publicações de livros, por exemplo, Rochagem, Agrominerais da África Subsaariana (van Straaten, 2002) e Agrogeologia: o Uso da Rochagem (van Straaten, 2007).

## Aumentos nos preços dos fertilizantes

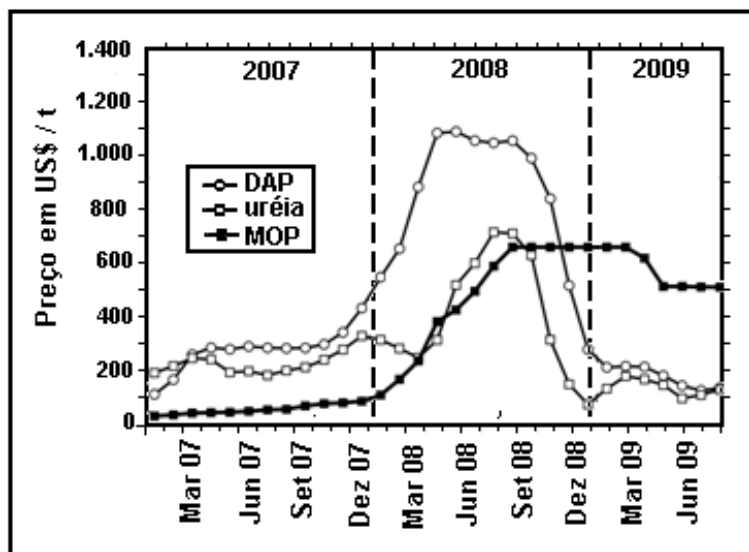
A produção industrial de fertilizantes, mais especificamente de fertilizantes à base de nitrogênio, consome quantidades significativas de recursos naturais não-renováveis, como o gás natural. Os fertilizantes à base de nitrogênio possuem o maior consumo de energia por unidade, com 44,5-54 GJ por tonelada de nitrogênio, em comparação com a produção de fertilizantes de potássio, que consome 7,1 GJ/t K, e 4,4-7,3 GJ/t P para a produção de fertilizantes à base de fósforo (Kongshaug, 1998). O gás natural é a principal matéria-prima para a produção de amônia, uréia e outros fertilizantes de nitrogênio. Desta forma, o preço dos fertilizantes está diretamente relacionado à oscilação dos preços dos recursos naturais não-renováveis.

Em 2008, pouco antes da recente recessão, o mundo experimentou drásticos aumentos nos preços dos fertilizantes. Os fertilizantes à base de nitrogênio, diretamente ligados ao preço e à disponibilidade do gás natural, sofreram alta no final de 2008. Em 2004, o preço da uréia era inferior a 200 US\$/t e, em agosto de 2008, atingiu o valor de 835 US\$/t. A rocha fosfatada, matéria-prima necessária à produção de fertilizantes à base de fósforo, subiu de menos de 50 US\$/t, em 2007, para 430 US\$/t, em 2008, devido à escassez de suprimentos causada pelo aumento da demanda de países como a Índia e a China. O preço do fosfato diamônico (DAP), um fertilizante à base de nitrogênio e fósforo, atingiu o valor de 1.200 US\$/t em meados de 2009, enquanto seu preço, em 2007, era de 400 US\$/t (Figura 1). Da mesma forma, os fertilizantes à base de potássio também sofreram, nos últimos anos, altas de preços, que foram de 200 US\$/t, em 2007, para 800 US\$/t, no final de 2008.

Durante os anos de recessão, os fertilizantes à base de nitrogênio e fósforo tiveram uma considerável queda de preços, ao contrário dos fertilizantes à base de potássio. Na maioria dos casos, os preços da matéria-prima são baseados na disponibilidade de combustíveis fósseis não-renováveis baratos e nos preços relativamente baixos de recursos não-renováveis de fosfato e potássio.

As perspectivas de longo prazo para a agricultura convencional de alta dependência de insumos, indicam que essa será fortemente impactada pela redução das disponibilidades de combustíveis fósseis, fertilizantes nitrogenados ("Pico do Petróleo", Royal Dutch Shell, 2008), minério de fosfato de alto teor e água para irrigação. Segundo Déry e Anderson (2007), Cordell *et al.* (2009), Vaccari (2009) e Gilbert (2009), as reservas mundiais de minério de fosfato de alto teor podem se esgotar entre 50 e 125 anos.

Em 2008, aproximadamente 161 milhões de toneladas de rochas fosfatadas foram explotadas de 15 bilhões de toneladas de reservas lavráveis. Segundo estimativas do *US Geological Survey* (USGS), os recursos mundiais são de 62 bilhões de toneladas. Projeções calculadas por pesquisadores indicam que o mundo somente poderá alcançar o "Pico do Fósforo", entre 2030 e 2040, se esforços mais intensos não forem feitos para conservar, converter, por exemplo, o fósforo encontrado na água residual (*waste water*) e no esterco e se não fizermos uso eficiente dos fertilizantes à base de fósforo (Cordell *et al.*, 2009; Gilbert, 2009).



Fonte: Manning, 2009.

Nota: DAP (fosfato diamônico), ureia, e MOP (muriato de potássio ou cloreto de potássio).

Figura 1 - Oscilação dos preços dos fertilizantes 2007-2009.

Em relação ao fósforo, mesmo que possamos prolongar e conservar os recursos, encontrar novos depósitos, reciclar grandes quantidades, conseguir reforçar o seu uso ou produzir fertilizantes à base de fósforo de baixo teor a preços elevados, no futuro, a segurança alimentar, a ração animal e a produção de biocombustíveis vão se deparar com o dilema geológico de recursos não-renováveis limitados. As previsões sobre quando o “Pico do Fósforo” acontecerá serão definidas com o passar dos anos, quando informações atualizadas estiverem disponíveis e mais pesquisa e desenvolvimento tenham passado por reciclagem. Nenhuma das previsões contestam que o “Pico do Petróleo” e o “Pico do Fósforo” acontecerão um dia, mas o momento em que acontecerão é incerto e passível de discussão entre geocientistas, políticos e a indústria. Além disso, há a ameaça das mudanças climáticas, que aciona a descoberta de métodos para reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa, principalmente o CO<sub>2</sub>. No final deste trabalho, há uma discussão sobre o intemperismo e o subsequente sequestro de carbono em alguns minerais e rochas silicáticas ricas em magnésio.

#### NECESSIDADES DOS CULTIVOS

O cultivo de culturas de alimentação para humanos, de ração animal e de produtos agrícolas necessários à produção de biocombustíveis (etanol e biodiesel) requer solos de boa qualidade, com quantidades adequadas de nutrientes, de água suficiente e de energia para plantar e processar essas culturas. Uma compilação sobre a origem, o *habitat* ambiental e as necessidades nutritivas das principais culturas de alimentos encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Cultivos anuais, origem e *habitat*, necessidades nutritivas para a produção de alimentação para humanos e de ração animal.

Cultivo	Origem	Condições climáticas de crescimento do <i>habitat</i> original	Condições de fertilidade do solo do <i>habitat</i> original	Necessidades nutritivas	Reação do solo (pH)
Culturas anuais de alimentos					
Trigo, cevada	Fértil Crescente Oriente Médio	Fria, sazonal	Ca elevado, Solos vulcânicos	Moderada	5.5-8, ideal 6-7
Milho	México	Quente	Solos calcários	Elevada	5-8, ideal 6-7
Arroz (com casca)	China	Quente, úmida	Moderada	N elevado	4-8, ideal 5-6.5
Batata	Andes	Fria, sazonal	Moderada	Potássio elevado	
Feijão	Andes, Mesoamérica	Quente	Moderada, matéria orgânica elevada	Moderada	5.5-7.5, ideal 6-7
Soja	China	Fria, sazonal	Elevada	Moderada	ideal 6-6.8
Sorgo, milheto	África Central, China	Quente e seca, sazonal, árido, resistente	Moderada	N elevado	
Culturas de alimentos perenes					
Banana	Sudeste da Ásia	Quente, precipitação constante	Moderada, matéria orgânica elevada	N, K elevados	4-8, ideal 6-7.5
Árvores frutíferas, por exemplo, cítricos, mamão, papaia	China (cítricos), Mesoamérica (mamão, papaia)	Subtropical - tropical	Moderada	Elevado	
Vegetais	Variada	Temperado a tropical	Elevado	Elevado	6-6.5

Em contraste com os cultivos anuais, a cultura perene e as árvores requerem tempo de crescimento maior e precisam de nutrientes por um período de tempo prolongado. Por isso, necessitam que os nutrientes sejam liberados de forma mais lenta, por exemplo, de rochas e minerais.

Com base nos dados das Tabelas 1 e 2, pode-se observar que a maioria dos cultivos de alimentação para humanos e de ração animal são culturas anuais e muitos dos cultivos para a produção de biocombustível são perenes e apresentam crescimento lento. Algumas culturas fornecem, simultaneamente, alimentação para humanos, ração animal e biocombustíveis, como, por exemplo, a soja, mas a sua extração causa outras preocupações (Smaling *et al.*, 2008). Na América do Norte, as mudanças nas preferências alimentares para uma dieta à base de carne fez com que o uso do solo passasse de uma cultura de cultivo de alimentos para pastagem.

Tabela 2 - Culturas de biocombustível: origem e condições ambientais de crescimento.

Cultura	Origem	Condições climáticas de crescimento do habitat original	Condições de fertilidade do solo do habitat original	Necessidades nutritivas	Reação do solo (pH)
Cana-de-açúcar	Nova Guiné	Quente, chuva o ano inteiro	Baixas	N, K elevados	4.5-8.5, ideal 6.5
Óleo de Palma	Costa Oeste da África	Quente, chuva o ano inteiro	Baixas, requer K e Mg	N, K, Mg, B	Moderada
Canola	Leste Mediterrâneo		Ca elevado	P, K, Ca, Mg	6.5-7
Soja	China Central	Fria, sazonal	Ca elevado	P, K, Ca	5-7, ideal 6
Pinhão manso (jatropha curcas)	Mesoamérica	Quente, seco, árido tolerante	Baixas	Baixas	
Árvores para biomassa	Variada	Variadas	Geralmente baixas	Baixas	Geralmente baixas

As culturas anuais e perenes produzem ótimas colheitas quando são providas de doses suficientes de nutrientes na forma de fertilizantes ou esterco, quando os solos são submetidos à calagem para a correção do pH e por meio da adição de pesticidas e água em quantidade e qualidade adequadas. Essas culturas são, em grande parte, dependentes de nutrientes externos, como N, P, K, Ca, Mg, S e de micronutrientes, que são recursos nutritivos de origem geológica que se tornarão mais raros e mais caros no futuro. Uma relação dos nutrientes das plantas e de suas principais funções está ilustrada na Tabela 3.

Todos os cultivos necessitam de nutrientes suficientes, de condições climáticas adequadas, além de luz e água para se desenvolver. À exceção do nitrogênio, todos os nutrientes necessários às plantas são de origem geológica. Até mesmo a produção industrial de fertilizantes de nitrogênio requer matéria-prima geológica, nesse caso, o gás natural.

Para a produção convencional de fertilizantes, a maioria desses recursos geológicos nutritivos tem que ser modificada para que esses se tornem solúveis e disponíveis às plantas. A seguir, serão enfocados os recursos geológicos nutritivos que não são convertidos em fertilizantes convencionais, mas que são rochas e minerais alternativos usados diretamente ou que são parcialmente modificados para a produção de alimentação para humanos, de ração animal e de biocombustíveis.

Tabela 3 - Nutrientes das plantas, funções nas plantas, fontes de nutrientes naturais e fontes de nutrientes geológicos.

Nutriente	Função nas plantas	Fontes de nutrientes naturais	Nutrientes geológicos
Nitrogênio	Crescimento vegetativo, essencial para a fotossíntese, blocos de construção das proteínas	Matéria orgânica, esterco, fixação biológica de nitrogênio (FBN)	Depósitos naturais de nitrato (Chile) Gás natural como matéria-prima para a síntese de amônia em fertilizantes de nitrogênio
Fósforo	Armazenamento e transferência de energia, necessário para o desenvolvimento da raiz e sementes	Minerais primários, fontes orgânicas de P	Rocha fosfática, principal mineral = apatita
Potássio	Compõe os fluidos das células internas, promove e regula a ativação enzimática, suporta o transporte de carboidratos, aumenta a eficiência do uso de água, resiste aos efeitos de aridez e doenças	Minerais primários, argilas e resíduos orgânicos	Silicatos de potássio: flogopita e biotita; feldspatóides como leucita e nefelina; glauconita; ilita; K-feldspato. Sais de potássio: silvita, carnalita, kainita e langbeinita
Enxofre	Nos aminoácidos, proteínas e óleos	Predominantemente matéria orgânica	Anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), Gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Pirita e Marcasita ( $\text{FeS}_2$ ), S elementar ( $\text{S}^0$ )
Cálcio	Compõe a parede celular	Mineral primário, adsorvido em argila e matéria orgânica	Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ); Dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ); Gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ); Silicatos de Cálcio
Magnésio	Crucial para a fotossíntese; formação de enzimas	Mineral primário, adsorvido em argilas e matéria orgânica	Dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ); Magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ); Silicatos de Magnésio
Micro-nutrientes	Essencial para as enzimas	Com exceção dos boratos, a partir de depósitos de metais	Principalmente silicatos máficos; sulfetos metálicos; boratos

As rochas e minerais necessários à agricultura podem ser divididos nas categorias descritas a seguir:

- rochas e minerais fontes de nutrientes: nesse grupo são incluídos todos os recursos geológicos para a fabricação de fertilizantes solúveis convencionais por meio de reações com produtos químicos, além daqueles recursos geológicos que podem ser modificados utilizando-se ferramentas físicas, bioquímicas e biológicas simples, com uso de tecnologias apropriadas e materiais disponíveis no local. Os recursos geológicos incluem: rochas fosfáticas, silicatos de potássio, carbonatos de Ca e Mg, silicatos de Ca e Mg, gipsita e micronutrientes minerais, como os boratos.
- rochas e minerais para a melhoria física dos solos e meios de crescimento. Incluem materiais como: vermiculita, perlita, pedra-pome, e argilas para solos arenosos.
- minerais como transportadores de nutrientes e pesticidas, tais como: perlita, pedra-pome, vermiculita e zeólita.
- aditivos para ração animal, como por exemplo: bentonita, zeólita.
- meios de crescimento com auxílio de casa de vegetação.



- material geológico para sequestro de carbono.

A seguir, serão estudados os materiais geológicos “alternativos”, rochas e minerais, que podem fornecer nutrientes por meio de processos acelerados de liberação de nutrientes e de processos alternativos de modificação física, bioquímica e biológica. Entretanto, não iremos tratar dos processos de agrominerais que levam aos fertilizantes convencionais. Ao final deste capítulo daremos algumas idéias sobre o uso potencial de minerais para o sequestro de carbono na agricultura e silvicultura.

### **Rocha Fosfática (RF)**

O fósforo é essencial para o crescimento adequado das raízes e para o desenvolvimento de frutas e sementes. Ao contrário do nitrogênio, o fósforo ocorre nas formas orgânica e mineral, sendo extraído de rochas como a apatita ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ ). Enquanto a matéria-prima para a nutrição de culturas à base de ferro é a mesma dos fertilizantes solúveis de fósforo, o tratamento das rochas fosfáticas é diferente. A forma mais fácil de fertilização à base de fósforo consiste na aplicação direta de rocha fosfática com seu componente mineral principal, a apatita. As rochas fosfáticas são lavradas, britadas e moídas antes de serem incorporadas aos solos. Entretanto, apenas pouquíssimas rochas fosfáticas são próprias para a aplicação direta devido a parâmetros químicos e mineralógicos. Em geral, as rochas fosfáticas sedimentares são mais reativas do que as fosfáticas ígneas e, quanto mais velhas forem as rochas fosfáticas sedimentares, menor a sua reatividade.

A eficiência agrônômica da rocha fosfática para aplicação direta é determinada:

- pela natureza da rocha fosfática (fator rocha).
- pelas condições do solo (fator solo).
- pelo tipo de plantio a ser cultivado (fator plantio).
- pelas práticas de manejo do solo (fator manejo).

A maior eficiência agrônômica será alcançada quando todos esses quatro fatores atingirem seus níveis ideais (van Straaten, 2007). A composição química e mineralógica é crucial à reatividade das rochas fosfáticas (Hammond *et al.*, 1986; Van Kauwenbergh, 1993). Há poucas rochas fosfáticas no mundo, com reatividade suficiente que as tornem economicamente viáveis para a aplicação direta. A maior parte delas requer algum tipo de beneficiamento, concentração física e subsequente modificação para que sejam agronomicamente eficazes.

### **MODIFICAÇÃO DA ROCHA FOSFÁTICA**

Existem vários processos de modificação cujo objetivo é fazer com que nutrientes de rocha fosfática de baixa reatividade tornem-se mais disponíveis às plantas. Na Tabela 4, estão relacionadas as técnicas de modificação física, química e biológica que são estudadas e testadas com apatita-fosfato de cálcio, o principal mineral encontrado nas rochas fosfáticas.

Essas técnicas de modificação de rocha fosfática servem como modelo para modificação de outras rochas e minerais, tais como os silicatos potássicos.

Tabela 4 - Processos de modificação de rochas fosfáticas.

Tipo de Modificação	Método
Modificação física	Moagem fina
Modificação físico-química	Ativação mecânica
Modificação química	Processos térmicos
	Acidulação
	Acidulação parcial
	Mistura com enxofre elementar acidificante
	Lixiviação em pilha
	Blendagem e granulação
	Troca iônica – por exemplo, com zeólitas
Modificação biológica	Compostagem
	Mistura com adubação verde
	Biossolubilização com micro-organismos
	Uso de pó de coco – ( <i>coir dust</i> )
	Inoculação micorrízica

As técnicas de modificação que fazem com que mais fósforo se torne disponível a partir de rochas fosfáticas não-reativas são descritas em detalhes por van Straaten (2007). Para a execução de todas as técnicas de modificação, há importantes pré-condições, como a britagem e a moagem fina, realizadas por meio de vários processos como britagens primária e secundária, seguidos de moagens com barras e bolas em moinhos semi-autógenas (SAG) ou, no caso de processos de baixa tecnologia, com a utilização de moinhos de bolas locais ou outro equipamento de moagem.

Lim *et al.* (2003) mostraram que a moagem com bolas induziu reações físicas e químicas em rochas fosfáticas com moagem fina. Novas técnicas de moagem usando rolos de alta pressão (HPGR) constituem outras rotas potenciais para aumentar a disponibilidade de fósforo a partir de rocha fosfática, devido à sua alta eficiência energética e à capacidade de induzir microfaturas e a liberação dos componentes minerais (Daniel e Morrell, 2004). Até agora, nenhuma rocha fosfática ou outros materiais geológicos ricos em nutrientes foram testados com esse tipo de moagem. Essas técnicas são promissoras, todavia se faz necessário o desenvolvimento de pesquisas nessa área.

Outras técnicas importantes de modificação de rocha fosfática incluem processos térmicos que resultam nos termofosfatos, incluindo o fosfato de Rhenania, fosfato magnésiano fundido (FMP- *Fused Magnesium Phosphate*) e os fosfatos de alumínio (Al) calcinados.

Dentre as outras técnicas de modificação com considerável futuro, estão a blendagem e compactação de rochas fosfáticas, a dissolução microbiológica melhorada e o uso de micorrizas para reforçar a absorção de fósforo pelas plantas (van Straaten, 2007).

#### FONTES ALTERNATIVAS DE FOSFATO

A apatita, fosfato de cálcio, é a fonte mais comum de fósforo para a produção de fertilizantes à base de fósforo, sua aplicação direta e modificação de rocha fosfática. Outras fontes de fósforo são os fosfatos de Al e Fe, por exemplo, a crandallita e a millisita, encontradas em ambientes com intemperismo tropical.

Entretanto, as fontes de Al e P não são muito solúveis e contêm Al, que é tóxico ao ambiente de raiz. Por essa razão, tais fontes são, em grande parte, impróprias à aplicação direta em sua forma original. Entretanto, os fosfatos aluminosos podem ser calcinados, por exemplo, em reator de leito fluidizado, para aumentar o grau e a solubilidade, sendo usados em solos alcalinos em campos de arroz inundados (van Straaten, 2007). No Senegal, os fosfatos aluminosos da região de Thiès são calcinados e concentrados a 34% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e vendidos como ração animal (van Straaten, 2002).

Uma tecnologia relativamente recente está ligada à recuperação de fósforo da água residual (*waste water*). O fósforo é recuperado na forma de estruvita (MgNH<sub>4</sub>PO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O), um hexahidrato de magnésio amônio e fosfato (MAP), que contém aproximadamente 12% de P (27,5% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 5,7% de NH<sub>4</sub>-N e 9,5% de Mg (Forrest et al., 2008). A estruvita pode ser recuperada por precipitação controlada do esgoto municipal ou água residual, lixiviados de aterros sanitários, lixo industrial, esterco bovino e urina humana (Battistoni et al., 1997; Schuiling e Anrade, 1999; Adnan et al., 2003; Forrest et al., 2008). Em várias estações de tratamento de água residual no Canadá, Estados Unidos, Japão, Holanda, Alemanha e Itália, a estruvita recuperada é comercializada e vendida como adubo de liberação lenta ambientalmente amigável. No Japão, vários reatores de leito fluidizado estão produzindo a pleno vapor e a estruvita recuperada foi vendida, em 2001, pelo preço de US\$ 250/t (Forrest et al., 2008). Várias usinas de recuperação de estruvita estão em construção em diversos países.

O fosfogesso é um subproduto da indústria de fertilizantes superfosfatados, mas com baixíssimos teores de fósforo. O fosfogesso, normalmente, contém menos de 0,5% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e, por ser relativamente solúvel, é usado principalmente na correção física dos solos, para diminuir a formação de selo em solos sódicos e para reduzir a toxicidade por Al em subsolos ácidos (Keren e Shainberg, 1981; Sumner, 1993).

#### EXEMPLOS DA UTILIZAÇÃO E PESQUISA DE ROCHA FOSFÁTICA

##### **Burkina Faso**

Com solo semiárido, o Burkina Faso é um país localizado na África Ocidental e se estende pelo Deserto do Saara. Como vários outros países daquela região, o país possui pequenos depósitos de fosfato neoproterozóico de origem sedimentar. Atualmente, o país fornece cerca de 3.000 t de rocha fosfática e moída do Burkina (RFB), como aplicação direta de fertilizante à base de fosfato para produtores agrícolas locais. A reatividade e o rendimento de resposta à aplicação da rocha fosfatática do Burkina são baixos, especialmente para o milho. A aplicação de rocha fosfática do Burkina Faso em plantações de feijão-caupi, uma cultura leguminosa indígena dependente da colonização por micorriza, proporcionou uma resposta positiva (Muleba e Coulibaly, 1999).

Uma técnica interessante e própria para a economia de água e dos nutrientes de rocha fosfática natural nessa região semiárida é o sistema zaï (Bonzi et al., 2007). O zaï é uma técnica de coleta de água praticada em partes semiáridas da África Ocidental em que buracos cavados na terra armazenam água durante as chuvas. Bonzi et al. (2007) mostraram que a adição de grãos finamente moídos de rocha fosfática do Burkina aos buracos zaï aumentaram a solubilidade da rocha fosfática do Burkina, com o passar do tempo. Os maiores rendimentos registrados nos campos zaï são em parte devidos à adição de matéria orgânica (cinco t/ha), o que provavelmente aumenta a disponibilidade e o uso de nutrientes pelos cultivos, podendo aumentar a solubilidade das rochas fosfáticas naturais devido à liberação de ácidos orgânicos advindos da matéria orgânica (Bonzi et al., 2007).

##### **China**

Na República Popular da China, há muitas fontes de fósforo sedimentar (fosforita): 15,7 bilhões de toneladas (Naiming et al., 2009), a maioria delas situadas nas províncias de Hubei, Hunan, Sichuan, Guizhou e Yunnan. Aproximadamente 65 milhões de toneladas de fosforita foram extraídas em 2008 (Chen, comunicação pessoal, 2009). Nesse país, a maior parte das rochas fosfáticas são transformadas em fertilizantes à base de fósforo. Quantidades menores são usadas nos fosfatos de magnésio fundido e na aplicação direta.

Uma pesquisa restrita de fosfato microbiológico com *aspergillus niger* é conduzida em Kuming, província de Yunnan, para reforçar a decomposição química de apatita.

### **Tanzânia e Quênia**

Os fosfatos disponíveis no local são extraídos em Minjingu, nordeste da Tanzânia. A maior parte da rocha fosfática biológica e sedimentar finamente moída de Minjingu (Minjingu RF) é usada na aplicação direta na Tanzânia, substituindo a grande quantidade de fertilizantes importados de fósforo. Em 2008, o Governo da Tanzânia importou grande quantidade dessa rocha fosfática reativa, e cerca de 30.000 t foram vendidas aos pequenos fazendeiros no sul do país, a preços subsidiados.

As rochas fosfáticas de Minjingu também são exportadas para países vizinhos, incluindo o Quênia, onde são misturadas a outros agrominerais e fertilizantes à base de nitrogênio e distribuídas a pequenos produtores (Seward, 2009). Em 2008, a Athi River Mining Ltd, empresa local, acondicionou a mistura em sacos de 1 kg e os vendeu aos fazendeiros locais, a preços não subsidiados.

Como parte das tentativas de manejo melhorado de fertilidade do solo para o pequeno produtor no Quênia, outro pacote para produtores agrícolas de baixa-renda foi testado no final dos anos 90. Esse pacote de baixo custo para o pequeno produtor no oeste do país, chamado PREP-PAC (Woomer *et al.*, 2003, Ruto *et al.*, 2007), consiste em 2 kg de rocha fosfática sedimentar finamente moída disponível no local (Minjingu RF), 200 g de uréia, sementes de vários legumes com fixação simbiótica de nitrogênio, inoculante de rizóbio, *gum arabic seed adhesive* e cal para a pelotização das sementes. A embalagem contém instruções de uso em inglês e *suahili* e é usada em terrenos pequenos e inférteis (25 m<sup>2</sup>), no oeste do Quênia, sendo produzida a um custo de 0,56 centavos de dólar por pacote.

Karanja *et al.* (2001) demonstraram que a rocha fosfática do Minjingu inoculada com micorriza arbuscular melhorou a absorção de fósforo pelas plantas e aumentou significativamente a produção de mudas de árvores de espécies agroflorestais, especialmente em solos ácidos e com baixo teor de fósforo.

### **Índia**

Os depósitos de rocha fosfática da Índia são limitados e poucos são próprios à aplicação direta, como, por exemplo, as rochas fosfáticas de Mussoorie, no norte do país. Outros depósitos estão localizados na Bengala Ocidental e no Rajastão. Devido à elevada demanda, a maior parte dessas rochas usadas na Índia, para a produção de fertilizantes à base de fósforo, é importada.

Sharma *et al.* (2009) conduziram testes de campo usando fertilizantes convencionais à base de fósforo (Fosfato Diamônico - DAP) e fontes locais de rocha fosfática, nesse caso, a rocha sedimentar do Mussoorie, norte da Índia. Eles mediram a relativa eficácia agronômica do fosfato diamônico (DAP) em comparação com a rocha do Mussoorie (RFM) isolada e inoculada com bactérias solubilizadoras de fósforo (BSP) (RFM+BSP). A aplicação de fósforo aumentou significativamente a produtividade desse sistema, caracterizando a maior eficácia agronômica já alcançada por DAP e RFM+BSP.

### **Sri Lanka**

O depósito de rocha fosfática de Eppawela é a única fonte local de fósforo do Sri Lanka. A usina de processamento em Eppawela produz cerca de 45.000 t/ano (Dr. Udawatte, comunicação pessoal, 2009). A produção inteira é usada em aplicações diretas no Sri Lanka. Do total, 20.000 a 25.000 t da rocha relativamente não-reativas são aplicadas em cultivos de chá como fertilizante de manutenção, e o resto é utilizado no cultivo de culturas perenes, como a borracha e o coco. Apenas uma pequena tonelagem é usada na produção de fertilizantes orgânicos.

### **Malásia**

A Malásia possui solos altamente intemperizados, ácidos e com baixo teor de nutrientes, principalmente de fósforo. A área plantada com culturas, especialmente óleo de palma, excede a de cultura de alimentos numa relação de 10:3. Em 2000, a Malásia importou 2 milhões de toneladas de rocha fosfática reativa, principalmente da Jordânia, Tunísia, Carolina do Norte (EUA) e de rocha fosfática de baixa reatividade das Ilhas Natal.

Testes usando rocha fosfática moída em culturas perenes, como cacau, árvores florestais, pimenta, borraça, óleo de palma e plantações de frutas, assim como em culturas anuais de arroz, milho e leguminosas, como a soja, amendoim e mucuna, são relatados por Yusdar e Hanafi (2001). Eles mostraram as diferentes respostas das fontes de fósforo em variadas culturas e concluíram que o uso de rochas fosfáticas compara-se ao uso de fontes solúveis de fósforo em culturas perenes. Porém, em culturas anuais, o uso de rochas fosfáticas foi menos eficiente do que o uso de fontes solúveis de fósforo. Em todos os casos, o efeito residual da aplicação de rocha fosfática em culturas subsequentes foi considerável.

Zin *et al.* (2001) demonstraram a eficiência das rochas fosfáticas reativas no crescimento de óleo de palma e mostraram que as fontes solúveis de fósforo foram mais eficientes nas mudas e nos estágios iniciais de crescimento. O uso de rochas fosfáticas reativas foi bastante eficiente em relação às fontes solúveis de fósforo na produção de óleo de palma madura.

### **Nigéria**

Os recursos agrogeológicos da Nigéria incluem rochas fosfáticas sedimentares de baixo teor no norte do país (van Straaten, 2002). Ainda assim, a maior parte dos fertilizantes de fósforo e potássio da Nigéria é importada.

Uma nova e interessante abordagem em relação ao problema de reforço da disponibilidade do fosfato à base de rochas fosfáticas pouco reativas ou não-reativas tem a ver com o uso de métodos biológicos na rotação de culturas milho-legumes. Testes de campo na Nigéria mostraram que os legumes herbáceos ou em grãos mobilizam o fósforo das rochas fosfáticas de baixa reatividade, e a cultura de milho que precede esses legumes se beneficia da plantação anterior (Vanlauwe *et al.*, 2000).

### **Zâmbia**

Situado no centro-sul da África, esse país é dotado apenas de depósitos de fosfato de baixo teor e baixa reatividade, principalmente de origem ígnea. Como a aplicação direta dessas rochas fosfáticas não-reativas é ineficiente, pesquisadores decidiram pela modificação desses fosfatos. Uma técnica de processamento considerada tecnicamente eficiente é a acidulação parcial (PAPR), mas, por várias razões, tal técnica não teve comercialização.

Fazer com que os legumes solubilizem parcialmente as rochas fosfáticas e que as culturas ou arbustos subsequentes utilizem o fósforo disponível tem sido o princípio de um experimento de Munsanje (2007). Rocha fosfática moída de Chilembwe, Zâmbia Oriental, foi aplicada ao redor de árvores fixadoras de N (*Faidherbia albida*), e o fósforo da rocha fosfática foi absorvido pela cultura subsequente de *Tithonia diversifolia*, que é uma “planta fertilizante” que libera nutrientes facilmente numa taxa de N, P e K: 4% - 0,4% - 4%, respectivamente. Essa técnica integrada de manejo de nutrientes ainda está em caráter experimental.

### **Zimbabwe**

Uma empresa deste país explora rocha fosfática ígnea de baixa reatividade de sua mina em Dorowa e produz fertilizantes solúveis de ferro de alta qualidade, principalmente para uso na agricultura de larga escala.

Ao longo dos últimos anos, van Straaten e Fernandes (1995), Dhliwayo (1999) e Tagwira (2001) buscaram uma abordagem original para produzir fertilizantes à base de fósforo de baixo custo em “áreas comuns” para pequenos produtores que não podem custear fertilizantes convencionais à base de fósforo. A pesquisa aplicada, levada a efeito na Universidade de Zimbábue, produziu uma mistura de fosfato pelotizado que consiste em 30 a 50% de rocha fosfática do depósito local de fosfato de Dorowa e 10 a 50% de TSP também produzido no local. Essas misturas de fósforo com propriedades acidificantes são pelotizadas e, em seguida, incorporadas ao esterco bovino. A compostagem indicou uma resposta de cultura reforçada. Tal intervenção resultou em aumentos na produção de milho à razão de 2 a 4 (Dhliwayo, 1999; Tagwira, 2001). Esse método é atualmente usado por centenas de produtores com poucos recursos nas pequenas fazendas do Zimbábue Oriental (Mbwera pers. comm. 2009).

### SILICATOS DE POTÁSSIO

A principal fonte de potássio em fertilizantes são os sais solúveis de potássio encontrados em depósitos de evaporitos. Entretanto, esses depósitos não estão distribuídos de modo uniforme mundo afora. O Canadá, a Rússia, a Bielorrússia e a Alemanha são os maiores produtores de cloreto de potássio (*potash*), seguidos por Israel, Jordânia e Estados Unidos. Na América do Sul e na Ásia, apenas poucos depósitos são explorados. A China e a Índia, duas das nações emergentes, quase não possuem depósitos de cloreto de potássio. Também não existem minas em exploração desse mineral na África, e os depósitos conhecidos são muito poucos.

A China importou, aproximadamente, 6 milhões de toneladas de cloreto de potássio em 2008, e o governo está colocando, como prioridade máxima, a busca por métodos para aumentar a liberação de potássio das fontes locais, incluindo o feldspato e a illita (Sheng e He, 2005; Lian *et al.*, 2008).

### FONTES ALTERNATIVAS DE POTÁSSIO

Enquanto a rocha fosfática é a matéria-prima dos fertilizantes, convencionais e não convencionais, à base de fósforo, a fertilização alternativa à base de potássio é baseada em silicatos de potássio, especialmente o feldspato, a biotita, a flogopita, a muscovita e rochas portadoras dos feldspatóides leucita e nefelina, assim como os sedimentos ricos em argila, especificamente a illita. Fontes alternativas de silicato de potássio são encontradas em grandes quantidades nos sedimentos ricos em illita, em vulcânicos ultrapotássicos e de flogopita/biotita associados com rochas intrusivas ultramáficas metamorfizadas, inclusive nos estéries (*wastes*) resultantes de operações de lavra de vermiculita e carbonatito.

A concentração de potássio (%K<sub>2</sub>O) nos minerais portadores, em depósitos de sal estratificado, evaporitos, varia de 17 a 63%. A carnallita (KCl · MgCl · 6H<sub>2</sub>O) contém 17% de K<sub>2</sub>O equivalente, a kainita (4KCl.4MgSO<sub>4</sub>.11H<sub>2</sub>O), 19% e a langbeinita (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.2MgSO<sub>4</sub>), 22%. A silvita (ou MOP, ‘muriático de potássio’ em jargão industrial) contém a maior porcentagem de K<sub>2</sub>O, com 63%. As porcentagens de K<sub>2</sub>O em alguns minerais de silicatos potássicos são muito menores e menos solúveis (Tabela 5).

Tabela 5 - Minerais silicatados portadores de potássio e suas concentrações de potássio.

Mineral	Fórmula química	% K <sub>2</sub> O
Leucita	KAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	20-21
Feldspato potássico	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	8-15
Biotita	K(Mg,Fe) <sub>3</sub> (Al,Fe <sup>3+</sup> )Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	7-10
Flogopita	K(Mg,Fe) <sub>3</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>	7-11
Muscovita	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>	7-11
Glauconita	(K,Na)(Fe <sup>3+</sup> Al,Mg) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	6-8
Illita (mica, argila)	(K,H <sub>3</sub> O)(Al,Mg,Fe) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> [(OH) <sub>2</sub> ,(H <sub>2</sub> O)]	4-8

Elevadas concentrações de mica potássica preta são encontradas nas ultramáficas intrusivas metamorfizadas, em muitos países com basamento geológico, como, por exemplo, no Malawi (Morel, 1988). Esses

glimmeritos (do vocábulo alemão *glimmer* – mica) são compostos quase totalmente por flogopita ou mica biotita. Algumas amostras contêm pequenas quantidades de nefelina e apatita. No Malawi, os glimmeritos em Kapirikamodzi ocorrem na forma de corpos com centenas de metros de largura, com mais de 1,2 km de extensão (Morel, 1988). As análises químicas dos glimmeritos no Malawi mostram 8,5 a 9,5% de  $K_2O$ ; 21,5 a 24% de  $MgO$ ; 0,1 a 2,4% de  $CaO$  e baixas concentrações de  $Na_2O$  (0,4 a 0,6%). As concentrações de Ni e Ba são elevadas, sendo que as de Ni atingem cerca de 800 mg/kg e as de Ba figuram entre 3.500 e 4.000 mg  $kg^{-1}$ . O elemento-traço (as relações de  $CaO$  e  $Mg/Fe$ ) indica que essas rochas são derivadas de peridotitos, harzburgitos ou kimberlitos.

As altas concentrações de flogopita são descritas com base nas fases de substituição hidrotérmica em mica-piroxênios, por exemplo em Bukusu, Uganda, Dorowa, Zimbabue (Heinrich, 1980), em Kovdor, Rússia (Krasnova, 2001), Siilinjärvi, Finlândia e Phalaborwa, na África do Sul. Em muitos carbonatitos associados a piroxênios, grandes quantidades de flogopita têm sido encontradas. Durante a extração, grandes quantidades desses recursos são jogados fora como rejeitos, como, por exemplo, na África do Sul e Rússia (Krasnova, 2001).

Os recursos de flogopita descartados no complexo de Phalaborwa excederam 1.500 milhões de toneladas. Processos de acidulação foram testados nesses “rejeitos” pelo Banco de Desenvolvimento Industrial do Governo da África do Sul (*IDC - Industrial Development Corporation*) e pela Foskor (produtora estatal de fosfato, controlada pelo IDC), no final dos anos 90. Entretanto, problemas técnicos impediram a produção de alumina, magnésia e sulfato potássico em escala industrial. Tal fato assemelha-se aos esforços fracassados, na Finlândia, do rejeito de flogopita, no complexo de carbonatito, em Siilinjärvi. Entretanto, novos experimentos realizados na Finlândia mostraram uma alta recuperação de potássio desses rejeitos de flogopita, por tratamento térmico (Aitta *et al.*, 1985).

#### ROCHAS VULCÂNICAS RICAS EM POTÁSSIO

Rochas vulcânicas moídas finamente foram classificadas por Le Bas *et al.* (1986) com base em sua composição química. Nota-se que os foiditos, tefritos e basanitos são subsaturados em sílica com concentrações variadas de álcalis. Os fonolitos e os foiditos contêm as maiores concentrações de  $Na_2O$  e  $K_2O$  combinados, normalmente acima de 12%.

As rochas vulcânicas finamente moídas, ricas em potássio, encontram-se em várias partes do mundo: na África (Uganda, Ruanda, República Democrática do Congo e Camarões), na Europa (Itália, Alemanha, Espanha), na Ásia (principalmente Indonésia), nas Américas (EUA, México), na Austrália e na Antártica (Gupta e Fyfe, 2003). Na Figura 2 ilustram-se as quantidades totais de álcalis e sílica nas rochas vulcânicas, mas não se evidenciam:

- os minerais nos quais esses íons ocorrem.
- as concentrações relativas de sódio e potássio.
- a disponibilidade para as plantas de outros cátions e suas relações catiônicas.

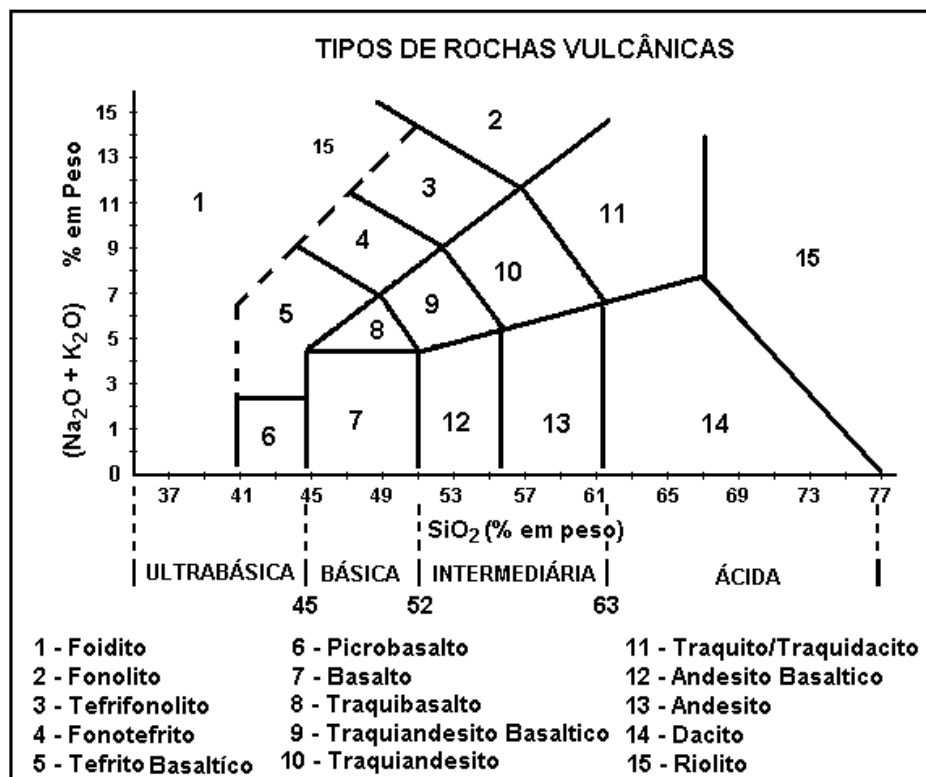


Figura 2 - Classificação química das rochas vulcânicas com base no álcali total x teor de sílica (Le Bas *et al.*, 1986).

Portanto, por razões práticas, é importante analisar não apenas as composições químicas totais, mas também a disponibilidade desses cátions nos extratores que simulam as condições de solo. Também é importante observar que a granulometria do material vulcânico, assim como a quantidade de material vítreo dessas rochas vulcânicas moídas têm um papel fundamental na disponibilidade de cátion para as plantas. Certamente, a moagem fina fornecerá áreas de superfície maiores para a liberação de nutrientes. Entretanto, os pequenos produtores geralmente reclamam da dificuldade de manusear materiais pulverulentos (pó) em suas terras.

#### COMPLEXOS ALCALINOS

Muitos tipos de rochas ricas em K e Na ocorrem nos complexos alcalinos, como, por exemplo, no complexo de Poços de Caldas, em Minas Gerais, e nos complexos intrusivos e extrusivos de carbonatito e kimberlito.

Devido aos altos teores de K e baixos teores de Na, as rochas ígneas ultramáficas e as máficas ultrapotássicas são de grande interesse, incluindo os kamafugitos (por exemplo, uganditos), os leucititos ultrapotássicos, os kimberlitos e os kimberlitos micáceos, assim como os shoshonitos (Mitchell e Bergman, 1991). Outras rochas ultrapotássicas também importantes são os lamproitos com razão molar de  $K_2O/Na_2O$ , normalmente acima de 3. Os lamproitos são rochas pretas finamente moídas com fenocristais de biotita, flogopita, anfibólio e piroxênio, mas não feldspato, que está localizado na massa moída. Esses ocorrem comumente como *sills* e diques e considera-se que derivem de fontes mantélicas (Mitchell e Bergman, 1991). A distribuição de lamproitos em relação ao kimberlito é mostrada na Figura 3.



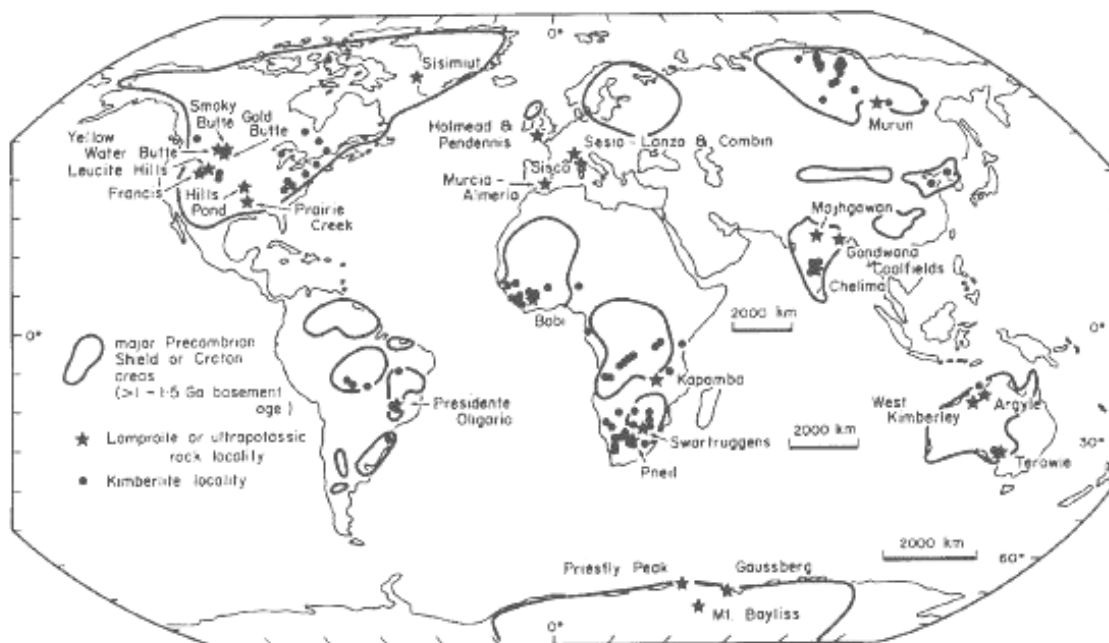


Figura 3 - Distribuição de lamprófiros em relação às províncias de kimberlito (Condie, 1986).

Considerando os altos teores de potássio e de outros elementos nutritivos, por exemplo, magnésio, muitos desses tipos de rocha alcalina complexa também poderiam ser usados como fertilizantes de rocha total (*whole rock*).

À exceção das rochas ultramáficas ultrapotássicas, em Presidente Olegário, (Mata da Corda, Minas Gerais), não se teve registro do uso dessas rochas para fins agrícolas. Rochas moídas dessa região foram usadas para aplicação agrícola por Theodoro e Leonardos (2006).

### Utilização de rochas alternativas ricas em potássio

Até agora, poucas foram as publicações de pesquisa sobre as aplicações de mica na agricultura: Goldschmidt, 1954; Weerasuriya et al., 1993; Bakken et al., 1997 e 2000. Testes de campo na Noruega, realizados por Bakken et al. (1997 e 2000), utilizando várias rochas e rejeitos portadores desse macronutriente, mostraram que quantidades consideráveis de potássio estão disponíveis às plantas. Todavia, o silicato potássico de maior perspectiva é um concentrado de biotita (da produção de feldspato em Lillesand, na Noruega), a partir da nefelina nos complexos alcalinos, assim como alguns advindos de epidoto xisto.

Entretanto, a maior parte dos cientistas concluiu que a taxa de intemperismo da rocha e dos produtos minerais é bastante lenta para reabastecer o potássio consumido pelas plantas. Enquanto as micas em forma de folha liberaram quantidades consideráveis de potássio, a liberação desse nutriente contido na rede cristalina de silicatos foi insignificante e indisponível.

Atualmente, existe pouca aplicação direta desses tipos de rochas alternativas, exceto pelo pequeno uso de fonolito na horticultura, silvicultura e nos mercados orgânicos.

No final do século XIX, arenitos glauconíticos de silicato potássico de Nova Jersey foram usados nos Estados Unidos na correção de solos portadores de potássio de liberação lenta e de baixo teor (5 a 8%). Nos idos de 1860, a taxa anual de produção de arenitos glauconíticos era quase 1 milhão de toneladas. Hoje, os arenitos glauconíticos não são mais usados na correção de solo, mas utilizados, principalmente, na purificação de água (Markewicz e Lodding, 1983).

Há reservas consideráveis de glauconita em diversos países, incluindo Austrália, Brasil, Indonésia, Israel, Lituânia, Nova Zelândia, Rússia, África do Sul e Venezuela (Dooley, 2006). Atualmente, a Índia está lançando uma grande campanha de desenvolvimento dos recursos locais de glauconita. A principal pesquisa sobre as rochas alternativas ricas em potássio tem como foco aumentar a liberação desse macronutriente das micas pretas trioctaédricas e de outros silicatos potássicos.

## Pesquisa sobre a liberação de potássio com base em mica

Por várias décadas, pesquisadores tentam achar mecanismos para a liberação de potássio dos silicatos. Um grupo de pesquisadores está usando métodos biológicos para reforçar a liberação de potássio, especialmente a partir dos filossilicatos biotita e flogopita. Filossilicatos di e trioctaédricos contêm potássio como cátion intercambiável. Esse íon  $K^+$  compensa a carga negativa que surge a partir da substituição de cátion de  $Al^{3+}$  por  $Si^{4+}$ .

Por razões químicas e estruturais, a mica dioctaédrica (por exemplo, a muscovita) é menos prontamente intemperizada do que as micas trioctaédricas biotita e flogopita. A dissolução de feldspato tem sido, na verdade, sem êxito, algo inerente às ligações do potássio na rede cristalina da muscovita.

Enquanto a rocha fosfatada é basicamente composta pelo mineral apatita, um fosfato, os minerais de potássio de uso potencial na aplicação direta e na forma modificada são os silicatos. As modificações das rochas fosfáticas e dos silicatos de potássio são, portanto, diferentes em termos de mineralogia e estabilidade mineral. Entretanto, algumas das técnicas usadas para a quebra de apatita também têm que ser aplicadas aos silicatos potássicos, como por exemplo, técnicas microbiológicas.

A seguir, será feita uma atualização da pesquisa sobre a liberação de potássio contido em silicatos, com especial ênfase na pesquisa e desenvolvimento desses silicatos nos países em que esse macronutriente é importado, atualmente, em alta escala, particularmente a Índia e a China. Por exemplo, a China importou 6 milhões de toneladas de cloreto de potássio em 2008, e o governo está colocando como prioridade máxima a busca por métodos para aumentar a liberação de potássio das fontes locais, incluindo o feldspato e a illita (Sheng e He, 2005; Lian *et al.*, 2008).

### DISSOLUÇÃO DOS SILICATOS DE POTÁSSIO POR TRATAMENTO QUÍMICO

Outra rota de liberação de potássio contido em silicatos é a dissolução química nos processos industriais. Nascimento (2004) demonstrou que a dissolução química do feldspato de potássio é possível usando ácidos (HCl,  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ) e soluções alcalinas (NaOH) como agentes de lixiviação.

### MODIFICAÇÃO BIOLÓGICA DOS SILICATOS POTÁSSICOS

Boyle *et al.* (1974) chegaram a demonstrar a eficácia da intemperização da biotita por ácidos cítricos e oxálicos, produzidos pelo metabolismo biológico e exsudação de raiz. Semelhantemente, Song e Huang (1988) demonstraram a taxa reforçada de liberação de potássio das micas portadoras de potássio, quando tratadas com ácidos cítricos e oxálicos. A sequência de liberação de potássio com base em silicatos por meio do tratamento com ácidos cítricos e oxálicos foi biotita>microclina>muscovita. Os ácidos cítricos e oxálicos são ligantes fortes que reforçam a liberação de potássio da biotita/flogopita. O ferro forroso da biotita na posição octaédrica pode ser complexado com oxalatos (ou citrato) levando à quebra de biotita e liberação de potássio da estrutura mineral. A complexação do íon Fe na biotita leva à liberação reforçada de potássio.

O ácido oxálico é geralmente encontrado na rizoesfera das plantas. Por exemplo, folhas de plantas de chá (*Camellia sinensis*) contêm alta concentração de ácido oxálico. Concentrações significativas de ácido oxálico também são encontradas nas folhas verdes de ruibarbo, carambola, salsinha, amaranto, espinafre, acelga, cacau e *tithonia diversifolia* (Ikerra *et al.*, 2007). O ácido oxálico também pode ser produzido por fungos, por exemplo, *Aspergillus*. Rossi (1978) mostrou que *Aspergillus niger*, *Scopulariopsis brevicaule* e *Penicillium expansum* lixiviaram entre 21 e 27% do potássio contido numa amostra de leucita ( $KAlSi_2O_6$ ) da

Itália Central. Suspeita-se que os ácidos orgânicos, a acidulação ou a combinação dos dois foi responsável pela liberação de potássio da leucita.

Berthelin *et al.* (1991), Hinsinger e Jaillard (1993) e Hinsinger *et al.* (1993) estudaram a liberação de potássio da flogopita e da biotita no ambiente de raiz. Eles forneceram evidência de que as raízes de canola (*brassica napus*) e azevém (*lolium perene*) podem transformar a flogopita em vermiculita, liberando potássio (e Mg) das micas para a canola. As raízes e rizoosfera das plantas foram os agentes lixiviantes biológicos ativos que transformaram a flogopita e a biotita em vermiculita, com a concomitante liberação de potássio.

A transformação microbianamente mediada de flogopita em vermiculita foi descrita por Bigham *et al.* (2001). O intemperismo da mica trioctaédrica, como a flogopita, pode ser promovida por micro-organismos que excretam ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como, por exemplo, o ácido oxálico (Boyle *et al.*, 1974). A transformação de flogopita em vermiculita e uma camada mista de flogopita-vermiculita com a bactéria acidofílica oxidante de Fe *thiobacillus ferrooxidans* foi demonstrada por Bigham *et al.* (2001).

Em um experimento de laboratório, Lian *et al.* (2008) mostraram que a adição de *aspergillus fumigatus*, comumente encontrado em pilhas de compostagem (*compost heaps*), à folhelhos moídos como rocha hospedeira rica em potássio reforçou a liberação de potássio. Pesquisas realizadas na Índia (Basak e Biswas, 2009) mostraram que o rejeito de mica formado principalmente por muscovita estável inoculada com *bacillus mucilaginosus*, aumentou a liberação de potássio das bordas das micas e aumentou o crescimento da cultura teste do capim-sudão. O uso de micro-organismos contidos em minerais silicatados, na liberação reforçada de potássio, também foi alcançado pela inoculação de ilita da área de Nanjing, na China, com o *Bacillus edaphicus* (Sheng e He, 2006), resultando no crescimento reforçado do trigo. O aumento na taxa de liberação de potássio é causado pela liberação dos ácidos oxálicos e tartáricos das bactérias.

Weerasuriya *et al.* (1993) trataram o rejeito, finamente moído, de flogopita lixo, proveniente das minas de pegmatito, no Sri Lanka, com ácido nítrico e sulfúrico. O processo de acidulação libera até 65% de K e Mg, cerca de 13% de Ca e 15 a 100% de Mn e Zn da mica flogopita. Nos estudos de raio-X, eles descobriram que na mica tratada há redução dos picos de mica, os difratogramas de raio-X assemelham-se a materiais de baixa cristalinidade, com uma banda na região de 7 Å, parecendo caulinita desordenada. Os pesquisadores relataram que a aplicação de uma quantidade pequena (200 kg/ha) de mica flogopita granular não-higroscópica e acidulada resultou em um aumento na produção de arroz de mais de 41%, em comparação com as taxas recomendadas de aplicação de MOP/KCl e dolomita (Weerasuriya *et al.*, 1993).

Para testar a eficácia dos biofertilizantes de rochas, Stamford *et al.* (2006) conduziram estudos de campo na estação experimental de Carpina, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Brasil, usando: rocha fosfática natural de Irecê, na Bahia, com 25% de P; concentrado de biotita de Santa Luzia, na Paraíba, com 10% de K) e enxofre elementar (importado) inoculado com *acidithiobacillus*. O estudo mostrou que aplicações de *acidithiobacillus* + enxofre + concentrado de biotita (biotitito) + RF a uma taxa de P<sub>120</sub>K<sub>80</sub> aumentou o N na matéria seca de caule de cana-de-açúcar, em comparação à aplicação de fertilizantes químicos (na mesma taxa de TSP + KCl) na produção de cana-de-açúcar. Os pesquisadores concluíram que os biofertilizantes de rocha a partir de rochas naturais (RF como fonte de P e biotita como fonte de K) mais enxofre elementar inoculado com *acidithiobacillus* podem ser usados como alternativas para os fertilizantes à base de P e K na cana-de-açúcar cultivada em solos ácidos, com baixa disponibilidade de fósforo e potássio.

Para as culturas que requerem recursos de potássio de liberação lenta, como o óleo de palma, o abacaxi, o coco e a banana e, talvez, a cana-de-açúcar, o uso de rochas com alta concentração de silicatos de potássio, como a biotita e a flogopita (de rejeitos), pode ser uma fonte útil de liberação desse macronutriente, em especial quando técnicas de modificação microbiológicas são empregadas.

Glimmeritos altamente concentrados e outros tipos de rochas ricas em biotita ou flogopita, associados a rochas alcalinas devem ser investigados em relação ao seu potencial usando ácido e técnicas de modificação microbiana.

#### COMPOSTAGEM DOS SILICATOS DE POTÁSSIO

Um outro mecanismo de liberação de potássio em compostos foi descrito por Nishanth e Biswas (2008). Os pesquisadores estudaram a eficácia de compostagens enriquecidas, preparadas com talo de arroz, rochas fosfáticas locais (do Rajastão), rejeito de mica (muscovita) e, ainda, bioinoculante (*aspergillus awamori*) na produção e consumo de nutrientes pelo trigo. O efeito casa de vegetação foi conduzido em solos com baixa matéria orgânica, baixo fósforo e potássio moderado. O estudo em casa de vegetação foi conduzido com solos de baixo conteúdo de matéria orgânica e fósforo, porém com potássio moderado. A aplicação de compostos enriquecidos com bioinoculantes resultou em uma produção de biomassa, consumo e recuperação de fósforo e potássio disponíveis, significativamente maior do que os compostos preparados sem o bioinoculante. Os pesquisadores afirmam que o uso de compostos enriquecidos poderia reduzir a confiança nos fertilizantes químicos onerosos, especialmente o potássio.

#### OUTRAS REAÇÕES COM SILICATOS DE POTÁSSIO

Zhou e Huang (2008) estudaram que a cinética e os mecanismos do fosfato monoamônico (MAP) induziram a liberação de potássio de silicatos de potássio selecionados, especificamente a biotita, a muscovita e microclínio. Os resultados mostraram altas taxas de liberação desse nutriente, com base em biotita e baixas taxas de liberação de potássio da muscovita e microclínio. Eles atribuíram a taxa melhorada de liberação de potássio a partir da biotita, à complexação de ortofosfatos (a partir da solução  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ) com Al, Fe e Mg nos minerais, com subsequente liberação de potássio. O efeito combinado dos íons e prótons de fosfato foi responsável pela alteração dos silicatos de potássio e o principal mecanismo para a liberação de potássio. Isto pode ter algum significado prático, já que uma alta concentração de fósforo próxima aos fertilizantes de fosfato pode induzir à liberação de potássio contido em silicatos de potássio, por exemplo, a biotita.

#### CARBONATOS DE CA E MG

As formas minerais mais comumente usadas das fontes de Ca e Mg para fins agrícolas são os carbonatos, como, por exemplo, calcários sedimentares (sendo a calcita o principal mineral de Ca) e as rochas dolomíticas (com a dolomita sendo o principal mineral de Ca e Mg). Outras formas naturais da ocorrência dos carbonatos de Ca e Mg incluem os carbonatos ígneos, os carbonatos metamórficos (mármore), marga, calcrete e magnesita.

A marga é uma calcita misturada com várias quantidades de argila e matéria orgânica. Sua coloração varia do tom esbranquiçado ao amarelo. É um material de grão fino encontrado, principalmente, em ambientes de pequeno lago de água doce ou em áreas pantanosas e lacustres, nas sucessões sedimentares.

As fontes de cálcio e magnésio são encontradas em muitos ambientes e apenas alguns poucos países apresentam escassez deles. Em muitos casos, porém, esses carbonatos estão localizados a alguma distância dos solos em que serão aplicados. Rochas contendo altas proporções desses minerais, por exemplo, serpentinitos, anfíbolitas, piroxenitos ou tufos vulcânicos, geralmente, são fontes alternativas de cálcio e magnésio. Um exemplo de outra fonte alternativa desses nutrientes são os tufos pozolânicos na Ruanda, que contêm um total de  $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$  de 18 até 30%. Esses recursos de milhões de toneladas são atualmente considerados como fontes alternativas de cálcio e magnésio para o cultivo de alimentos. Uma lista dos minerais alternativos, como fontes de desses nutrientes mais enxofre, está relacionada na Tabela 6.

Tabela 6 - Formas minerais naturais de cálcio, magnésio e enxofre.

Mineral		CaO%	MgO%	S%
não silicatos				
Calcita	$\text{CaCO}_3$	56		
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	30,4	21,9	
Anidrita	$\text{CaSO}_4$	41,2		23,5
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	32,6		18,6
Apatita	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$	55,8		
Magnesita	$\text{MgCO}_3$		48	
Kieserita	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$		29	23
Sal de Epsom	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$		16	13
silicatos				
Diopsídio (clinopiroxênio diopsídio)		25,9	18,6	
Epídoto		23,2		
Anortita (plagioclásio rico em Ca)		20,1		
Hornblenda (anfíbólio)		14,9	13,0	
Tremolita (anfíbólio)		13,8	24,8	
Actinolita (anfíbola)		13,3	19,1	
Forsterita (olivina)			57,3	
Serpentina			36-44	
Enstatita (piroxênio rico em Mg)			40	
Clorita			20-36	
Talco			32	
Flogopita			29	
Vermiculita			20-24	

## Minerais de enxofre

A concentração de enxofre nas rochas varia muito. As rochas ígneas, como as ultramáficas, contêm, em média, 2.850 mg S/kg, basaltos 520 mg S/kg e granitos 300-400 mg S/ kg. A maior parte do enxofre está contida em rochas sedimentares, como os folhelhos, que contêm até 2.400 mg de enxofre por kg da rocha. As três principais substâncias naturais sólidas portadoras desse elemento são: o próprio enxofre elementar ( $\text{S}^0$ ), os sulfetos ( $\text{S}^{2-}$ ) e os sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). O enxofre elementar natural contém normalmente mais de 90% de S, os sulfetos, como a pirita, contêm 53% e os sulfatos, como a gipsita e a anidrita, contêm geralmente de 18 a 23% de S.

Nos sistemas agrícolas, o enxofre é suprido por adição de fases minerais naturais contendo o elemento no estado sólido, tais como enxofre elementar, gipsita ou pirita, ou por meio de formas modificadas, tais como fertilizantes manufaturados. Os fertilizantes que contêm enxofre incluem o sulfato de amônio  $(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)$ , os superfosfatos simples (SSP), os superfosfatos triplos (TSP) e a uréia revestida com enxofre (SCU).

Enquanto o uso do enxofre elementar está confinado, principalmente, à sua aplicação como fungicida e pesticida, a utilização da gipsita ou anidrita na agricultura tem a função de reduzir a toxicidade por alumínio nos solos ácidos e o encrostamento em solos alcalinos e salinos (Sumner, 1993; Wallace, 1994). A gipsita, um mineral portador de cálcio bastante solúvel, é usada, principalmente, no cultivo de amendoim e outras leguminosas que dependem de uma fonte estável de cálcio, facilmente acessível.

No Quênia, uma mistura de uréia e 30% de gipsita é usada como fertilizante de cobertura, sendo aplicada, principalmente, em culturas de milho e vegetais (P. Seward, com pess. 2009).

Além da gipsita que ocorre naturalmente, há também grandes quantidades de subprodutos denominados de gesso, obtidos a partir de vários processos. O fosfogesso é um subproduto resultante da produção de ácido fosfórico para os fertilizantes superfosfatados, do gesso formado durante a dessulfurização dos gases de combustão (FGD), da combustão de carvão portador de S e de minérios de sulfeto. Nos últimos anos, muitas das fontes do subproduto gesso se tornaram concorrentes no mercado de gipsita natural. Na agricultura, estas formas de gipsita natural são, geralmente, preferidas por causa de sua pureza e alta solubilidade (Keren e Shainberg, 1981).

## Minerais portadores de micronutrientes

Normalmente, os micronutrientes são aplicados aos fertilizantes ou diretamente ao solo, em pequenas quantidades, ou aplicados na forma de pulverização foliar. As taxas de aplicação são específicas mas encontram-se apenas na razão kg/ha. Com exceção do boro, que é lavrado como borato, a maior parte dos micronutrientes usados na agricultura é derivada de subprodutos da lavra de minerais metálicos.

As alternativas para a maioria dos fertilizantes micronutrientes são a aplicação de rochas máficas, que contêm uma gama de micronutrientes, como, por exemplo, o basalto.

As argilas marinhas são portadoras comuns de boro. O uso de folhelhos pretos (que contêm uma gama de metais) deve ser feito somente após análise, já que esses também podem conter metais prejudiciais aos solos, como é o caso do chumbo.

## Zeólitas

As zeólitas constituem um grupo de minerais aluminossilicatos hidratados, cristalinos com sítios de carga negativa em sua estrutura. As estruturas das zeólitas são abertas e preenchidas naturalmente com água e positivamente carregadas com íons para neutralidade elétrica. As zeólitas naturais são particularmente úteis na agricultura por causa de sua grande porosidade, alta capacidade de troca catiônica e seletividade para cátions  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{K}^+$ , assim como a estabilidade física (Mumpton, 1984). Essas podem ser usadas como carreadoras de nutrientes (por exemplo,  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{K}^+$ ) como um meio com íons nutrientes trocáveis livres. Algumas zeólitas naturais contêm quantidades consideráveis de  $\text{K}^+$  trocável, que podem reforçar o crescimento de plantas em vasos.

Hershey *et al.* (1980) forneceram dados sobre o efeito de liberação lenta de potássio contido em zeólitas. Entretanto, o uso principal de zeólitas naturais na agricultura é para a troca, armazenamento e liberação lenta de amônia ( $\text{NH}_4^+$ ). Demonstrou-se que a zeólita, com sua seletividade específica por  $\text{NH}_4^+$ , pode captar esse cátion do esterco de currais, de compostos ou do  $\text{NH}_4^+$  dos fertilizantes portadores de amônio e armazená-lo, temporariamente, nos espaços vazios internos, antes da liberação lenta (Mumpton; 1977 e 1999).

As zeólitas naturais são encontradas em mais de 50 países. Essas são extraídas na China (como aditivo para cimento), em Cuba (para a horticultura), no Japão (para controle de odores e como aditivo para solo de liberação lenta), na Coreia do Sul, Hungria, Grécia, Turquia, Austrália, Nova Zelândia e Estados Unidos (como aditivo para ração animal e substrato para solos em campos de golfe).

## Rocha silicatada

Surge um novo paradigma de pensamento em relação ao manejo de nossos recursos mais vitais (água e solos), para a produção de alimentos. Uma sugestão seria fazer a melhor ligação entre os cultivos e as propriedades inerentes aos solos e que desenvolva práticas de manejo do solo que precisem de menos ou de outras fontes externas de nutrientes e água.

Fertilizantes multinutrientes de rocha silicatada oferecem, potencialmente, fontes de nutrientes geológicos de baixo custo para sistemas agrícolas de pouco uso de insumo. O uso de rochas silicatadas, localmente disponíveis para correção de solo, se tornou atrativo nos últimos anos para produtores agrícolas que tentam seguir práticas de correção do solo mais sustentáveis e para os produtores de países em desenvolvimento que não podem custear os fertilizantes químicos. Keller (1948) foi um dos primeiros cientistas, nas últimas décadas, a promover uma estratégia baseada nos processos geológicos naturais de longo prazo que liberem, lentamente, os nutrientes para os solos. A intenção dessa estratégia é a correção de solo “o mais parecido possível com os princípios seguidos pela natureza” (Keller, 1948).

As vantagens e desvantagens das aplicações de rocha silicatada são descritas por van Straaten (2006). Os avanços recentes sobre a compreensão dos processos de intemperismo geoquímico, da química dos exudatos de raízes, do ciclo de nutrientes e dos processos bioquímicos nos solos, levaram a um melhor entendimento da cinética de dissolução, ciclo de nutrientes e processos bioquímicos nas superfícies de raiz. Entretanto, a eficácia da aplicação de fertilizantes de rochas silicatadas aos solos e culturas anuais é normalmente em função da baixa solubilidade geral da maioria das rochas em uma forma não modificada. Alguns tipos de rochas, porém, se prestam à dissolução melhorada, especialmente aquelas que foram formadas sob regimes de alta temperatura e que são subsaturadas em sílica, por exemplo, as rochas vulcânicas como: os fonólitos, as rochas portadoras de nefelina e leucita, as rochas vulcânicas máficas, como os basaltos e os olivina-basaltos, vidro vulcânico e cinzas vulcânicas e rochas ultramáficas ultrapotássicas. Uma forma relativamente barata é utilizar esses materiais advindos dos “rejeitos” de outras indústrias, como, por exemplo, as partículas finas, que são atualmente descartadas das indústrias de construção usando basalto ou diabásio ou outros tipos de rocha máfica.

Uma das restrições do uso das rochas silicatadas nos solos está relacionada à necessidade de aplicação de grandes quantidades de rocha moída nos terrenos agrícolas (von Fragstein *et al.*, 1988; Harley e Gilkes, 2000). Entretanto, as rochas silicatadas já provaram ser úteis em alguns sistemas agrícolas e condições climáticas, em particular nas condições tropicais, sob regimes climáticos úmidos (Leonardos *et al.*, 1987, 2000; Harley e Gilkes, 2000; Theodoro e Leonardos, 2006). Porém, os minerais e as rochas de silicato vulcânicas não liberam apenas uma variedade de nutrientes e micronutrientes aos solos, por causa de seu pH alto (8-10), essas também podem ser utilizadas como rochas de calagem (von Fragstein *et al.*, 1988; Hildebrand, 1991; Fakengren-Gerup e Tyler, 1992).

O pH das rochas fonolíticas moídas atingem valores superiores a 10, basalto variando o pH de 8 a 10 e o dos granitos de 7 a 10 (von Fragstein *et al.*, 1988). Keller e Reesman (1963) e Keller *et al.* (1963) mostraram que o pH da polpa de rocha do glacial moreno era alcalino, com uma variação de 8,2 a 9,4. Esses materiais de rochas naturais devem, portanto, ser considerados como promissores materiais de calagem, com liberação lenta de nutrientes. Hildebrand e Schack-Kirchner (2000) demonstraram a eficácia de rocha basáltica moída em comparação com materiais de calagem em solos de floresta ácida. Para atingir boas taxas de liberação de nutrientes, 6 t/ha de finos de basalto foram aplicadas, fornecendo cálcio e potássio para a nutrição, em longo prazo, de árvores no norte da Floresta Negra, na Alemanha (Hildebrandt e Schack-Kirchner, 2000).

A aplicação de 10 t/ha de rocha fonolítica aumentou a concentração de cálcio em solos de floresta ácida e aumentou o seu pH. Porém, a alta taxa de aplicação de rocha fonolítica rica em sódio também resultou em altas taxas de liberação desse nutriente, o que pode, potencialmente, causar o seu aumento na água subterrânea e contribuir para a perda de estabilidade estrutural dos solos (von Wilpert e Lukes, 2003).

Os resultados dos testes com rochas silicáticas moídas aplicadas em solos, em condições de climas temperados e muito secos, mostrou, consistentemente, que as rochas graníticas e outros materiais de rochas ricas em sílica não são eficazes para atender as demandas de nutrientes da maior parte das culturas agrícolas. Por outro lado, o uso de rochas silicáticas vulcânicas moídas possui liberação potencial de nutrientes para os solos e para efeitos de calagem, especificamente para culturas de longo prazo, árvores e restauração da paisagem.

Consistentemente, experimentos com rochas silicáticas máficas moídas, como os basaltos, demonstram taxas de dissolução maiores e uma melhor eficácia em climas tropicais do que em climas temperados (d'Hotman de Villiers, 1961; Leonardos *et al.*, 1987 e 1991; Gillman, 1980, e Gillman *et al.*, 2000 e 2002; Theodoro e Leonardos, 2006). Os regimes de temperaturas altas e umidade maior ainda aumentam as reações entre os minerais e a solução do solo. Os solos tropicais são geralmente ácidos e com baixas concentrações de nutrientes resultantes de intenso intemperismo e lixiviação. Esses solos são, portanto, mais receptivos à adição de materiais de calagem e reabastecimento de nutrientes por meio da aplicação de rochas silicáticas máficas do que em condições de clima temperado.

Entretanto, a fim de reforçar a dissolução de minerais e rochas, várias técnicas de modificação de baixo custo estão sendo testadas atualmente. Muitos desses processos, por exemplo, a ativação mecânica (Priyono e Gilkes, 2004; Priyono, 2005) e o uso de processos microbiológicos são semelhantes aos aplicados aos silicatos potássicos. Técnicas potenciais de modificação da rocha total estão listadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Processos de modificação da rocha total.

Tipo de modificação	Método
Modificação física	Ativação mecânica
Modificação físico-química	Processo térmico
Modificação química	Acidulação com ácidos sulfúricos e orgânicos
Modificação biológica	Compostagem
	Biossolubilização com micro-organismos

## A utilização de rochas silicáticas totais na Europa

Atualmente, o mercado para a aplicação de rochas silicáticas multinutrientes é pequeno na Europa Central, como, por exemplo, na Alemanha, Áustria e Suíça, no Reino Unido, na Holanda e Escandinávia. Uma pesquisa recente sobre as empresas que vendem rochas silicáticas totais (*whole rocks*) incluem, principalmente, as empresas que produzem diabásio e basalto para utilização na construção civil. Para essas empresas, o “rejeito” moído de suas operações é vendido como corretivo para pastagem, florestas, pomares, para o cultivo de plantas medicinais e para aditivos em compostagens. Esses grãos moídos finos também são vendidos para utilização em tanques de esterco líquido. Afirma-se que a elevada área de superfície dos materiais acelera a aeração no esterco líquido, reduz os odores de amônia e enriquece os esterco com nutrientes. Algumas das empresas afirmam que a produção de biogás é reforçada devido à aceleração do processo de biodegradação. Outras empresas promovem os produtos de basalto como sendo úteis por causa de seu “reforço da fertilidade do solo, riqueza de nutrientes especialmente magnésio, propriedades de estímulo de crescimento, melhoria na qualidade de frutas e vegetais, e como materiais que reduzem os odores em estábulos e tanques de esterco líquido”.



As taxas de aplicação recomendadas para os tanques de esterco líquido são: 10 kg/m<sup>3</sup> de esterco líquido e 0,5 kg por animal por dia no estábulo e 2 a 3 kg/10 t de esterco de curral. Na Suíça, rochas e minerais alternativos utilizados como corretivos são listados pelo Instituto de Pesquisa para a Agricultura Biológica para as fazendas bio-suíças e incluem materiais como: rochas fosfáticas, dolomitas, calcários de margas, kieseritas, sulfatos de K-Mg, enxofre, bentonitas, rochas de ração (*stonemeal*) e zeólitas. A venda desses materiais basálticos é obviamente direcionada para um mercado específico, com vendas pequenas (de até centenas de t/ano) para as comunidades de fazendas ecológicas na Alemanha, Áustria, Suíça e Escandinávia.

## A aplicação de rocha total para o sequestro de carbono

### O AUMENTO DO SEQUESTRO DE CARBONO POR MEIO DE UMA COMBINAÇÃO DE ROCHAS MOÍDAS INTEMPERIZADAS E O PLANTIO DE CULTURAS E ÁRVORES

A lavra, britagem e moagem, assim como o processamento e transporte de rochas e seus produtos, requerem o uso de energia e produzem CO<sub>2</sub>. Por outro lado, o cultivo de culturas e árvores absorve CO<sub>2</sub>. Obviamente, quanto maior a produção de culturas e árvores, maior será a absorção de CO<sub>2</sub>. O objetivo do uso da “rochagem” é retirar uma quantidade maior de CO<sub>2</sub> da atmosfera do que aquela que é produzida pela lavra, britagem e transporte de rochas e minerais. O uso de rejeitos de rochas (*wastes rocks*) já lavradas e moídas, como, por exemplo, as rochas máficas da indústria de construção de estradas ou de outras indústrias da mineração de minerais industriais, tornou-se adequado para alcançar esse objetivo.

A utilização de silicatos de cálcio e magnésio moídos, por exemplo, basaltos ou dunitos portadores de olivina, pode aumentar o sequestro de carbono por meio de intemperismo forçado desses silicatos, por exemplo, olivina (Schuiling e Krijgsman, 2006; Chen et al., 2006; Hangx e Spiers, 2009). A princípio, o intemperismo dos minerais citados, em condições ambientais, abrange uma reação que remove o CO<sub>2</sub> da atmosfera por meio da neutralização ácida carbônica, de acordo com a seguinte reação (Schuiling e Krijgsman, 2006; Hangx e Spiers, 2009):



Schuiling e Krijgsman (2006), Hangx e Spiers (2009) calcularam que a incorporação de rochas máficas moídas, por exemplo, rochas ricas em olivina, em solos ácidos, pode ter efeitos positivos e substituir a calagem. Em ambientes tropicais com temperaturas elevadas e solos ácidos, um maior sequestro de carbono é previsto durante essa reação (Hangx e Spiers, 2009). Estes últimos pesquisadores afirmam que as taxas de reação para a olivina, espalhada em solos nos trópicos, poderia ser de até 200 a 600 vezes mais rápida do que em ambientes temperados.

O sequestro de carbono pode ser aumentado ainda mais, quando a técnica do uso de rochas moídas e de minerais, para o sequestro de carbono por meio de intemperismo, é combinada com o reforço de nutrientes no plantio de culturas e árvores. A previsão é de que a combinação do intemperismo mineral dos silicatos de cálcio e magnésio com o cultivo forçado de plantas fará com que mais CO<sub>2</sub> seja sequestrado do que em cada etapa isolada. Uma forma possível de forçar a reação de intemperismo da olivina, piroxênio ou rochas vulcânicas máficas, como o basalto ou silicatos ricos em magnésio, é por meio do uso de plantas que contêm uma alta necessidade de cálcio e magnésio, especialmente, as culturas de leguminosas. Com a utilização dessas plantas, Mg, Fe e Ca são retirados da reação (lei da ação das massas) fazendo com que a quebra dessas rochas e minerais seja forçada e ao mesmo tempo force o crescimento e futuro sequestro de CO<sub>2</sub>.

É claro que estudos mais amplos sobre o intemperismo e o cultivo de plantas precisam ser conduzidos a fim de medir a quantidade de CO<sub>2</sub> sequestrado pelas taxas de intemperismo acelerada e pelo consumo de CO<sub>2</sub> pelas plantas. É crucial quantificar o balanço de CO<sub>2</sub> usando dados de entrada de energia das atividades, tais como a britagem e o transporte de rochas e minerais, assim como o ganho de energia e captura de CO<sub>2</sub>.

## Conclusões e previsões

A atual crise econômica somada ao aumento nos preços dos fertilizantes e aos desafios ambientais exigem um conjunto de abordagens novas. Uma delas inclui o uso de rochas e minerais alternativos, ricos em nutrientes, na produção de alimentos, ração animal e biocombustível.

Rochas e minerais alternativos ricos em nutrientes são aqueles que não sofrem reações com substâncias químicas industriais nem modificações para formar fertilizantes químicos. Esses minerais e rochas incluem as rochas fosfáticas, silicatos potássicos, várias rochas portadoras de cálcio, magnésio e enxofre e fertilizantes de silicatos de rocha total (*whole rock*). Na forma não processada, esses minerais e rochas liberam nutrientes lentamente.

A aplicação direta ao solo de rochas e minerais moídos, ricos em nutrientes, é mais apropriada nas plantas com crescimento lento, tais como as árvores frutíferas perenes, nos produtos florestais e na maior parte dos plantios de biocombustíveis. Entretanto, pequenos produtores também relataram bons resultados com o uso de rocha combinada com outros nutrientes mais solúveis.

A utilização de pequenas embalagens de recursos multinutrientes contribuiu para o aumento da segurança alimentar em diversos países. Os processos microbiológicos exercem um papel de fundamental importância nesses resultados, já que, por meio deles, os nutrientes são liberados de rochas e minerais alternativos diferentemente menos solúveis. A moagem fina preconiza os processos de modificação associados à necessidade de esforços para aumentar as áreas de superfície desses minerais e rochas diferentemente não-reativos.

Atualmente, há esforços no sentido de modificar rochas e minerais ricos em nutrientes, com o uso de recursos disponíveis no local, micro-organismos e ácidos orgânicos produzidos por micro-organismos para o aumento da liberação de nutrientes, em várias partes do mundo, principalmente, nos países afetados por elevações íngremes e o alto custo dos fertilizantes convencionais. Há pesquisas em andamento para identificar os tipos de rochas mais apropriados e disponíveis no local e os meios de modificação, para desenvolver métodos que aumentem a produção de alimentos, de ração animal e de biocombustíveis.

A maior parte das técnicas de modificação foram até agora direcionadas às rochas fosfáticas, porque o fósforo, junto com o N, é um elemento limitador de nutrientes, crucial para o desenvolvimento da maioria das culturas. Mais e mais esforços estão a caminho na busca por fertilizantes alternativos à base de potássio, já que este está cada vez mais caro.

As tentativas para transformar as futuras culturas de alimentos, ração animal e biocombustíveis exigem abordagens mais ecológicas e econômicas. Grupos internacionais de pesquisa fornecem exemplos sobre o uso de materiais alternativos e de processos alternativos de modificação.

A efetividade de rocha aplicada no desempenho dos cultivos não depende apenas das características químicas e mineralógicas dos minerais e rochas (o fator rocha), mas depende também das propriedades químicas e físicas dos solos (o fator solo) e das exigências/necessidades de nutrientes dos plantios (o fator plantio).

O futuro repousa no delineamento e no uso ambiental e economicamente correto dos recursos alternativos de minerais e rochas adaptados às exigências dos solos e das culturas. As produções anuais para a alimentação humana e de ração animal, assim como as culturas perenes de alimentos (como os cultivos de frutas, por exemplo) precisam de toda nossa atenção para aumentar a segurança alimentar e serem sucedidas por culturas perenes para a produção de biocombustíveis. Mais esforços devem ser direcionados para o uso de rochas alternativas para o sequestro de carbono, a fim de reduzir os efeitos negativos das emissões de carbono que causam as alterações climáticas. Os recursos minerais são finitos, portanto, o seu uso deve se dar de forma inteligente e sustentável.

## Glossário

**Compostagem** – Mistura em fermentação de certos restos ou dejetos agrícolas ou urbanos, de maneira a recuperar os elementos ricos em minerais e matéria orgânica, que em seguida são incorporados às terras agrícolas como fertilizante agrícola.

**Exudato** – Bot. Líquido expedido, natural ou acidentalmente, um vegetal, em forma de gotas.

**Marga** – Rocha sedimentar de textura muito fina, friável, constituída de uma mistura de argila e calcário (entre 35 e 65%). A rocha é utilizada como nutriente agrícola, dada a presença, entre seus componentes fertilizantes, principalmente, de cal e potássio.

**Micoriziza** - Associação simbiótica entre o micélio de certos fungos e as raízes de certas espermatófitas, a qual envolve troca de nutrientes entre as duas espécies

**Mucuna** – Designação comum às plantas do gênero mucuna, também conhecidas como mucunã e mucuná. Nativas de regiões tropicais, algumas são cultivadas como ornamentais, outras como forrageiras, poucas como medicinais.

**Rizóbio** – Gênero de bactérias fixadoras do nitrogênio atmosférico, que vivem em simbiose nas raízes das leguminosas, formando nodosidades e permutando as proteínas pelos glicídios elaborados pela planta verde.

## Referências bibliográficas

- Adnan A, Koch FA and Mavricic DS (2003). Pilot-scale study of phosphorus recovery through struvite crystallization—examining the process feasibility. *J. Envir. Engin. Sci.* 2:315-324.
- Aitta E, Leskelä M, Lajunen LHJ, Jyrkäs K, and Seppälä E, (1986). Thermal treatment of phlogopite and muscovite with calcium and magnesium compounds. *J. Chem. Techn. and Biotech.* 36:169-177.
- Altieri MA (2009). The ecological impacts of large-scale agrofuel monoculture production systems in the Americas. *Bull. Sci. Techn. Soc.* 29:236-244.
- Bakken AK, Gautneb H, Sveistrup T and Myhr K (2000). Crushed rocks and mine tailings applied as K fertilizers on grassland. *Nutr. Cycl. Agroecos.* 56:53-57.
- Bakken AK, Gautneb H, and Myhr K (1997). The potential of crushed rocks and mine tailings as slow-releasing K fertilizers assessed by intensive cropping of Italian ryegrass in different soil types. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 47:41-48.
- Basak BB and Biswas DR (2009). Influence of potassium solubilizing microorganisms (*Bacillus mucilaginosus*) and waste mica on potassium uptake by sudan grass (*Sorghum vulgare Pers.*) grown under two Alfisols. *Plant Soil* 317:235-255.
- Battistoni P, Fava G, Pavan P, Musacco A and Cecechi F (1997). Phosphate removal in anaerobic liquors by struvite crystallization without adding of chemicals: Preliminary results. *Water Research* 31:2925-2929.
- Berthelin J, Leyval C, Laheurte F and de Giudici P (1991). Involvement of roots and rhizosphere microflora in the chemical weathering of soil minerals. In: Atkinson D ed. *Plant root growth - An ecological perspective.* British Ecol. Soc., Blackwell Sci Publ. pp. 187-200.
- Bigham JM, Bhatti TM, Vuorinen A, and Tuovinen OH (2001). Dissolution and structural alteration of phlogopite mediated by proton attack and bacterial oxidation of ferrous iron. *Hydrometallurgy* 59:301-309.
- Blum JD, Klaue A, Nezat CA, Driscoll CT, Johnson CE, Siccama TG, Eagars C, Fahey TJ and Likens GE (2002). Mycorrhizal weathering of apatite as an important calcium source in base-poor forest ecosystems. *Nature* 417:729-731.

- Bonzi M., Lompo F, Ouandaogo N and Sedogo MP (2007). Promoting uses of indigenous phosphate rock for soil fertility recapitalization in the Sahel: State of the knowledge on the survey of the rock phosphates of Burkina Faso. *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa: Exploring the Scientific Facts*. Arusha, Tanzania, 17-21 Sept 2007.
- Boyle JR., Voight GK and Sawhney BL (1974). Chemical weathering of biotite by organic acids. *Soil Science* 117:42-45.
- Chen ZY O'Connor WK, and Gerdemann SJ (2006). Chemistry of aqueous mineral carbonation for carbon sequestration and explanation of experimental results. *Environ Progr* 25:161-165.
- Condie K.C. (1989). *Plate Tectonics and Crustal Evolution*. Pergamon Press, New York.
- Cordell D., Drangert J.O., White S (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environ Change* 19:292-305.
- Daniel M J. and Morrell, S. (2004). HPGR model verification and scale-up. *Minerals Engineering* 17:1149-1161.
- Déry P. and Anderson B. (2007). Peak phosphorus. *Energy Bulletin*, 08/13/2007. [www.energybulletin.net/node/33164](http://www.energybulletin.net/node/33164)
- D'Hotman de Villiers (1961). Soil rejuvenation with crushed basalt in Mauritius. *Int. Sugar J.* 63:363-364.
- Dhliwayo D. (1999). Evaluation of the agronomic potential and effectiveness of Zimbabwe (Dorowa) phosphate rock – based on phosphate fertilizer materials. PhD thesis, University of Zimbabwe, 248p.
- Dooley J.H. (2006). Glauconite. In: Carr DD (Editor) *Industrial minerals and rocks*, 6<sup>th</sup> edition. Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., Littleton, Col, USA, pp.495-506.
- Fakengren-Gerup U. and Tyler G. (1992). Changes since 1950 of mineral pools in the upper C-horizon of Swedish deciduous forest soils. *Water Air Soil Poll* 64:495-501.
- Forrest AL, Fattah KP, Mavinic DS and Koch FA (2008). Optimizing struvite production for phosphate recovery in WWTP. *J Environm Engin* May 2008: 395-402.
- Fyfe W.S, Leonardos OH, and Theodoro SH (2006). Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution. *An Acad Bras Cienc* 78:715-720.
- Gilbert N. (2009). Phosphorus - The disappearing nutrient. *Nature* 461:716-718.
- Gillman G.P. (1980). The effect of crushed basalt scoria on the cation exchange properties of a highly weathered soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:465-468.
- Gillman G.P., Burkett DC and Coventry RJ (2002). Amending highly weathered soils with finely ground basalt rock. *Appl. Geochem.* 17:987-1001.
- Gillman G.P., Burkett DC and Coventry RJ (2000). A laboratory study of application of basalt dust to highly weathered soils: effects on soil cation chemistry. *Aust. J. Soil Res.* 39:799-811.
- Goldschmidt VM (1954). *Geochemistry*. Oxford University Press, UK, 730p.
- Gupta A.K, and Fyfe WS (2003). *The young potassic rocks*. Ane Books, New Delhi, India, 370p.
- Hammond L.L., Chien SH and Mokwunye AU (1986). Agronomic evaluation of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. *Adv. Agron.* 40:89-140.
- Hammond L.L., Chien SH, Roy AH and Mokwunye AU (1989). Solubility and agronomic effectiveness of partially acidulated phosphate rocks as influenced by their iron and aluminum oxide content. *Fert. Res.* 19:93-98.
- Hangx SJT and Spiers CJ (2009). Coastal spreading of olivine to control atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: a critical analysis of viability. *Intern J Greenhouse Gas Contr* (in press).

- Harley AD and Gilkes RJ (2000). Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 56:11-36.
- Heinrich EW (1980). *The geology of carbonatites.* Krieger Publ Co, Huntington, New York, 585p.
- Hensel J (1890). *Das Leben.* (in German) Verlag Boericke und Tafel, Leipzig, Germany.
- Hensel J (1894). *Bread from stones.* AJ Tafel (editor) Philadelphia, USA.
- Hershey DR, Paul JL and Carlson RM (1980). Evaluation of potassium-enriched clinoptilolite as a potassium source for potting media. *Hortscience* 15:87-89.
- Hildebrand EE (1991). The spatial heterogeneity of chemical properties in acid forest soils and its importance for tree nutrition. *Water Air Soil Poll* 54:183-191.
- Hildebrand EE and Schack-Kirchner H (2000). Initial effects of lime and rock powder application on soil nutrient chemistry in a dystic Cambisol – results of model experiments. *Nutr Cycl Agroecosyst* 56:69-78.
- Hinsinger P (1998). How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. *Adv. Agr.* 64:225-265.
- Hinsinger P, Elsass F, Jaillard B and Robert M (1993). Root-induced irreversible transformation of a trioctahedral mica in the rhizosphere of rape. *J. Soil Sci.* 44:535-545.
- Karanja NK, Mwendwa KA, Okalebo JR, and Zapata F (2001). Effects of phosphate rock fertilization and arbuscular mycorrhizae inoculation on the growth of agroforestry tree seedlings. In: Rajan SSS and Chien SH (eds.) *Direct application of phosphate rock and related appropriate technology – latest developments and practical experiences: Proceedings of an international meeting, IFDC, Muscle Shoals, Alabama USA, Special Publications IFDC-SP-37:353-366.*
- Keller WD (1948). Native rocks and minerals as fertilizers. *Sci. Monthly* 66:122-130.
- Keller WD, Balgord WD and Reesman AL (1963). Dissolved products of artificially pulverized silicate minerals and rocks. *J. Sediment. Petrol.* 33:191-204.
- Keller WD and Reesman AL (1963). Glacial milks and their laboratory-simulated counterparts. *Geol. Soc. Am. Bull.* 74:61-76.
- Keren R and Shainberg I (1981). Effects of dissolution rate on the efficiency of industrial and mined gypsum in improving infiltration of a sodic soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:103-107.
- Kongshaug G (1998). Energy consumption and greenhouse gas emissions in fertilizer production. *Proc. IFA Techn Conf. Marrakesh, Morocco. IFA, Paris,* pp. 272-289.
- Krasnova N (2001). The Kovdor phlogopite deposit, Kola Peninsula, Russia. *Can Min* 39:33-44.
- Le Bas MJ, Le Maitre RW, Streckeisen A, and Zanetti B (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali – silica diagram. *J Petrol* 27:745-750.
- Leonardos OH, Fyfe WS and Kronberg BI (1987). The use of ground rocks in laterite systems: an improvement to the use of conventional soluble fertilizers. *Chem. Geol.* 60:361-370.
- Leonardos OH, Theodoro SH and Assad ML (2000). Remineralization for sustainable agriculture: A tropical perspective from a Brazilian viewpoint. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 56:3-9.
- Lian B, Wang B, Pan M, Liu C and Teng HH (2008) Microbial release of potassium from K-bearing minerals by thermophilic fungus *Aspergillus fumigatus*. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72:87-98.
- Lim HH, Gilkes RJ and McCormick P (2003). Beneficiation of rock phosphate fertilizers by mechano-milling. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 67:177-186.

- Manning DAC (2009). Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. *Agron Sustain Dev* DOI: 10.1051/agro/2009023
- Markewicz FJ and Lodding W (1983). Glauconite. In: Lefond SJ (editor) *Industrial Minerals and Rocks*, 4th edition. AIME, New York, pp. 679-690.
- Mitchell RH and Bergman SC (1991). *Petrology of lamproites*. Plenum Press, New York, 447p.
- Morel SW (1988). Malawi glimmerites. *J Afr Earth Sci* 7:987-997.
- Muleba N and Coulibaly M (1999). Effects of phosphorus fertilizer sources on cowpea and subsequent cereal productivity in semi-arid West Africa. *J Agric Sci* 132:45-60.
- Mumpton FA (1999). La roca magica: Use of natural zeolites in agriculture and industry. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 96:3463-3470.
- Mumpton FA (1984). *Flammae et fumus proximi sunt: The role of zeolites in agriculture and aquaculture*. In: Pond WG and Mumpton FA (eds.) *Zeo-agriculture: Use of natural zeolites in agriculture and aquaculture*. Westview Press, Boulder, Colorado, USA, pp. 3-27.
- Munsanje K (2007). Directly applied Chilembwe phosphate rock for enhanced leaf concentration in *Tithonia diversifolia*. Unpubl. MSc. thesis, University of Guelph, 194p.
- Naiming Z, Bolong W and Lixia M (2009). Conditions and problems of phosphate resource utilization. In: van Straaten P and Oram N (eds.) *Proceedings of the Second International Rocks for Crops Conference*, Nairobi and Kisumu, Kenya, July 15-20, 2007. University of Guelph, Guelph, Canada, pp.133-144.
- Nascimento M (2004). Desenvolvimento de método para extração de potássio a partir de feldspato potássico. Ph.D. thesis, Univ. Fed. Rio de Janeiro, Brazil, 113 p.
- Nishanth B and Biswas DR (2008). Kinetics of phosphorus and potassium release from rock phosphate and waste mica enriched compost and their effect on yield and nutrient uptake by wheat (*Triticum aestivum*). *Biores Techn* 99:3342-3353.
- Pimentel D (2003). Ethanol-fuels: energy balance, economics and environmental impacts are negative. *Natural Resources Research* 12:127-134.
- Priyono J (2005). Effects of high energy milling on the performance of silicate rock fertilizers. Ph.D. Thesis, The University of Western Australia.
- Priyono J and Gilkes RJ (2004). Dissolution of milled-silicate rock fertilisers in the soil. *Austr. J. Soil Res.* 42:441-448.
- Richardson AE (2001). Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. *Aust. J. Plant Physiol.* 28:897-906.
- Royal Dutch Shell (2008). Shell energy scenarios 2050. Shell International BV. [www.shell.com/scenarios](http://www.shell.com/scenarios)
- Rossi G (1978). Potassium recovery through leucite bioleaching: possibilities and limitations. In: Murr LE, Torma AE and Brierley JA (eds.) *Metallurgical applications of bacterial leaching and related microbiological phenomena*. Acad Press New York, pp. 297-319.
- Ruto EC, Okalebo JR, Othieno CD, Kipsat MJ, and Bationo A, (2009). Effectiveness of "Prep-Pac" soil fertility replenishment product on nutrient uptake and yields of diversified maize-legume intercrops in a Ferralsol of Western Kenya. In: van Straaten P and N Oram (editors) *Proceedings of the Second International Rocks for Crops Conference*, Nairobi and Kisumu, Kenya, July 15-20, 2007, University of Guelph, Guelph, Canada, pp 46-63.
- Sampson R, Lem, CH Stamler SB, and Dooper J (2008). Developing energy crops for thermal applications: Optimizing fuel quality, energy security and GMG mitigation. In: Pimentel D (editor) *Biofuels, solar and wind energy systems*. Springer-Science, pp 397-425.

- Sanchez (2002). Soil fertility and hunger in Africa. *Science* 295:2019-2020.
- Sanchez PA, Shepherd KD, Soule MJ, Place FM, Buresh RJ and Izac NA (1997). Soil fertility replenishment in Africa: an investment in natural resource capital. In: Buresh RJ, Sanchez PA and Calhoun F (eds.) Replenishing soil fertility in Africa. *SSSA Special Publ.* 51:1-46.
- Schneider KD, van Straaten P, Orduna RM, Glasauer S, Trevors J, Fallow D and Smith PS (2009). Comparing phosphorus mobilization strategies using *Aspergillus niger* for the mineral dissolution of three phosphate rocks. *J. Appl. Microbiol.* Jul 13.
- Schuilting RD and Anrade A (1999). Recovery of struvite from calf manure. *Environm Techn* 20:765-768.
- Schuilting RD and Krijgsman J (2006). Enhanced weathering: an effective and cheap tool to sequester CO<sub>2</sub>. *Climate change* 74: 349-354.
- Seward P., (2009). Methods to make 'rocks' more accessible to small-holder farmers: Experiences of FIPS-Africa in Kenya. In: van Straaten P and Oram N (editors) *Proceedings of the Second International Rocks for Crops Conference, Nairobi and Kisumu, Kenya, July 15-20, 2007.* University of Guelph, Guelph, Canada, pp. 323-330.
- Sharma SN, Prasad R, Shivay YS, Dwivedi MK, Kumar S, Davari MR, Tram M, and Kumar D (2009). Relative efficiency of diammonium phosphate and Mussoorie rock phosphate on productivity and phosphorus balance in a rice-rapeseed-mungbean cropping system. *Nutr Cycl Agroecosyst* DOI10.1007/s10705-0099284-2
- Sheng XF, and He LY (2006). Solubilization of potassium-bearing minerals by a wildtype strain of *Bacillus edaphicus* and its mutants and increased potassium uptake by wheat. *Canadian J Microbiol* 52:66-72.
- Smaling EMA, Roscoe R, Lesschen JP, Bouman AF and Comunello E (2008). From forest to waste: Assessment of the Brazilian soybean chain, using nitrogen as marker. *Agric Ecosyst Environ* 128:185-197.
- Song SK and Huang PM (1988). Dynamics of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:383-390.
- Smyth TJ and Sanchez PA (1982). Phosphate rock dissolution and availability in Cerrado soils as affected by sorption capacity. *Soil Sci Soc Am J* 46:339-345.
- Stamford NP, Lima RA, Santos CRS and Dias SHL (2006). Rock biofertilizers with *Acidithiobacillus* on sugarcane yield and uptake in a Brazilian soil. *Geomicrobiol J* 23:261-265.
- Sumner M (1993). Gypsum and acid soils: The World scene. *Advances in Agronomy* 51:1-32.
- Swaby RJ (1975). Biosuper-biological superphosphate. In: McLachlan KD (editor) *Sulphur in Australasian agriculture.* Sydney University Press, Sydney, Australia, pp. 213-220.
- Tagwira F (2001). Potential of Dorowa Phosphate Rock as a low cost fertilizer for smallholder farmers in Zimbabwe. In: Rajan SSS and Chien SH (eds.) *Direct application of phosphate rock and related appropriate technology – latest developments and practical experiences: Proc intern meeting, IFDC, Muscle Shoals, AL USA, Spec Publ IFDC-SP-37:397-406.*
- Theodoro SH and Leonardos OH (2006). The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. *An. Acad. Bras. Ciênc.* 78:721-730.
- Vaccari DA (2009). Phosphorus: a looming crisis. *Scientific American* June 2009, 54-59.
- Van Kauwenbergh SJ (1995). Mineralogy and characterization of phosphate rock. In: Dahanayake K, Van Kauwenbergh SJ Hellums DT (eds.) *Application of phosphate rock and appropriate technology fertilizers in Asia – What hinders acceptance and growth.* Proceed. Int. workshop Institute of Fundamental Studies, Kandy, Sri Lanka, pp29-47.

- Vanlauwe B, Diels J, Sanginga N, Carsky RJ, Deckers J, and Merckx R (2000). Utilization of rock phosphate on a representative toposequence in the Northern Guinea savanana zone of Nigeria: response by maize to previous herbaceous cropping and rock phosphate treatment. *Soil Biol Biochem* 32:2079-2090.
- van Straaten P (2007). *Agrogeology – the use of rocks for crops*. Enviroquest, Cambridge, Canada, 440p.
- van Straaten P (2006). Farming with rocks and minerals: Challenges and opportunities. *Ann. Acad. Bras. Ciênc.* 78:731-747.
- van Straaten P (2002). *Rocks for crops: Agrominerals of sub-Saharan Africa*. ICRAF, Nairobi, Kenya, 338p.
- van Straaten P and N Oram (editors, 2009). *Proceedings of the Second International Rocks for Crops Conference, Nairobi and Kisumu, Kenya, July 15-20, 2007*. University of Guelph, Guelph, Canada, 344p.
- van Straaten P and Fernandes TRC (1995): *Agrogeology in Eastern and Southern Africa: a survey with particular reference to developments in phosphate utilization in Zimbabwe*. In: Blenkinsop TG and Tromp PL (eds.) *Sub-Saharan Economic Geology*. Geol. Soc. Zimbabwe Spec. Publ. 3, Balkema Publishers, Netherlands, pp. 103-118.
- von Fragstein P, Pertl W and Vogtmann H (1988). Verwitterungsverhalten silikatischer Gesteinsmehle unter Laborbedingungen (in German). *Z. Pflanzenern Bodenk* 151:141-146.
- von Wippert K and Lukes M (2003). Ecochemical effects of phonolite rock powder, dolomite and potassium sulfate in a spruce stand on an acidified glacial loam. *Nutr Cycl Agroecosyst* 65:115-127.
- Wallace A (1994). Use of gypsum on soil where needed can make agriculture more sustainable. *Commun. Soil Sci. Plant Anal* 25:109-116.
- Wallander H (2000). Uptake of P from apatite by *Pinus sylvestris* seedlings colonised by different ectomycorrhizal fungi. *Plant Soil* 218:249-256.
- Weerasuriya TJ, Pushpakumara and Cooray PI (1993). Acidulated pegmatitic mica: A promising new multi-nutrient mineral fertilizer. *Fert. Res.* 34:67-77.
- Woomer PL, Okalebo JR, Maritim HK, Obura PA, Mwaura FM, Nekesa P, and Mukhwana EJ (2003). PREPAC: a nutrient replenishment product designed for smallholders in western Kenya. *Agric Ecos Env*, 100 (2-3): 295-303.
- Yusdar H and Hanafi M (2001). Use of phosphate rock for perennial and annual crops cultivation in Malaysia: A review. In: Rajan SSS and Chien SH (eds.) *Direct application of phosphate rock and related appropriate technology – latest developments and practical experiences: Proceedings of an international meeting, IFDC, Muscle Shoals, Alabama USA, Special Publications IFDC-SP-37:78-91*.
- Zhou JM and Huang PM (2008). Kinetics and mechanisms of monoammonium phosphate-induced potassium release from selected potassium-bearing minerals. *Can. J. Soil Sci*, 799-811.
- Zin ZZ, Khalid HA, Tarmizi M, and Hamdan AB (2001). Use of phosphate rock fertilizers for oil palm in Malaysia. In: Rajan SSS and Chien SH (eds.) *Direct application of phosphate rock and related appropriate technology – latest developments and practical experiences: Proceedings of an international meeting, IFDC, Muscle Shoals, Alabama USA, Special Publications IFDC-SP-37:92-99*.