

# **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. Lápido-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.

# ROTAS TECNOLÓGICAS CONVENCIONAIS E ALTERNATIVAS PARA A OBTENÇÃO DE FERTILIZANTES

ARTHUR PINTO CHAVES<sup>1</sup>

## Introdução

Desde tempos imemoriais, esterco, restos de plantas e de animais, tortas de grãos vegetais (resíduo da extração do óleo), farinha de ossos e de conchas, cinzas, entre outros materiais, são fontes importantes de fertilizantes. Modernamente, a compostagem de lixo reveste-se de importância fundamental, tanto como solução para o problema do lixo doméstico quanto, como fonte de adubo: os volumes de lixo gerados nas cidades são enormes e a sua disposição é um problema - a compostagem transforma-os em adubos, dando uma destinação mais adequada a eles. É importante ressaltar entretanto que a adubação tem duas funções diferentes:

- fornecer ao solo os nutrientes de que ele é deficiente;
- adequar às condições físicas de ventilação, drenagem e proliferação de microorganismos.

Esterco, tortas e composto orgânico só exercem esta segunda função. Não aportam os elementos químicos necessários.

As plantas, como seres vivos que são, precisam de diferentes elementos químicos para suas funções vitais. Nitrogênio, fósforo e potássio são essenciais para a vida. Cálcio e magnésio são necessários em doses relativamente elevadas. Por isto, este grupo de elementos é chamado de macronutrientes. O cálcio, o magnésio e o enxofre também atuam como corretivos de solos. Já o zinco, ferro, manganês, cobre, boro, molibdênio e cloro são necessários em quantidades menores e por isto são chamados de micronutrientes.

Todos estes elementos precisam ser adicionados ao solo e isto é feito através dos adubos. As matérias-primas para estes produtos são os fertilizantes e uma das vertentes tecnológicas são os fertilizantes solúveis, que aportam obrigatoriamente N, P e K e frequentemente os demais nutrientes, em receitas preparadas de acordo com as necessidades específicas do solo que irão adubar. As fontes de fósforo mais comuns são os fertilizantes fosfatados, apresentados em níveis de alta e baixa concentração.

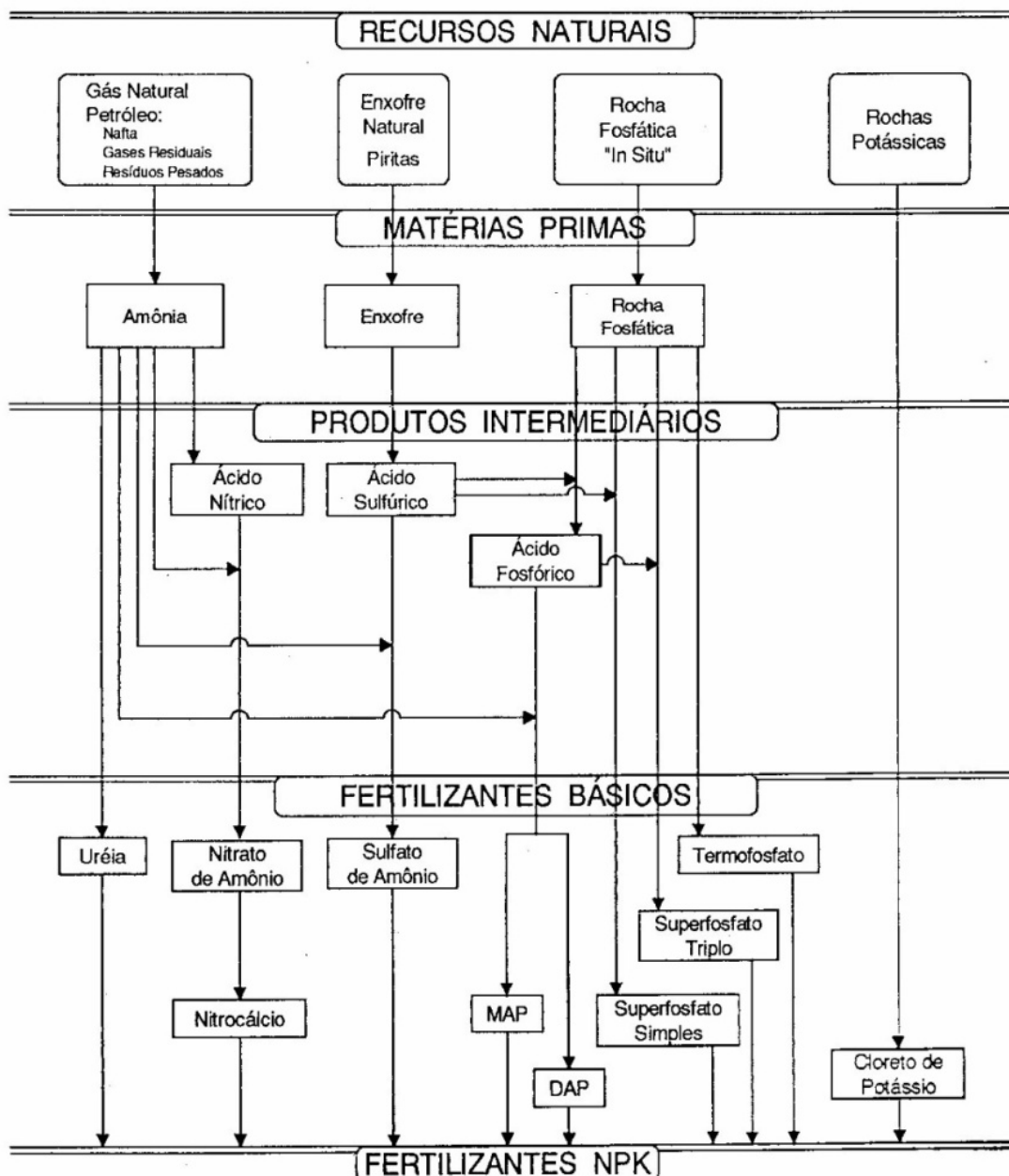
Os fosfatos solúveis de baixa concentração – super simples (SSP), e o fosfato parcialmente acidulado (FPA) - são fabricados fazendo reagir o produto do beneficiamento, concentrado fosfático com o ácido sulfúrico, em reações de longo tempo de duração (cura de produto). Os fosfatos ditos de alta concentração (monoamônio fosfato, MAP, triamônio fosfato, TAP, superfosfato triplo, TSP, e triplo simples, TSP) são feitos reagindo o mesmo concentrado fosfático com ácido fosfórico, para a obtenção de produto com alto conteúdo do fósforo.

Outra vertente, que será examinada adiante são fertilizantes de baixa solubilidade, como os termofosfatos.

O potássio é adicionado na forma de cloreto de potássio.

A Figura 1 esquematiza a cadeia produtiva, as matérias-primas e os produtos a que nos referimos.

<sup>1</sup> D.Sc Professor Escola Politécnica (USP) Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo. E-mail: apchaves@usp.br



Fonte: IBAFOS (1991).

Figura 1 – Rede produtiva de fertilizantes.

O primeiro produto da rota química é a fabricação de ácido fosfórico,  $H_3PO_4$ , onde o teor de  $P_2O_5$  é de 72,5%. O ácido fosfórico pode ser fabricado por via metalúrgica, reduzindo o fósforo em fornos elétricos de redução, hidratando-o em seguida, ou por via química, mediante o ataque da rocha por um ácido que desloque o íon fosfato. Todos os fertilizantes fosfatados de alta solubilidade são produzidos a partir do ácido fosfórico.

### Matérias-primas

O nitrogênio pode ser obtido a partir do ar. Como gás elementar ele é inerte e por isto precisa ser transformado em amônia. O gás natural é a fonte do hidrogênio, que é passado sobre catalisador de níquel para ser retirado. O nitrogênio do ar é injetado numa autoclave onde, na presença de outro catalisador é

feita a síntese da amônia. O nitrogênio pode ser utilizado na forma de nitrato de amônia, nitrato de sódio, nitrofosfatos, fosfato de amônia e uréia.

A síntese da uréia é feita pela reação



que é feita em autoclaves, a alta temperatura e pressão.

O nitrato de amônia é obtido pela combustão da amônia, o que produz ácido nítrico, seguida da reação deste ácido com a amônia:



O sulfato de amônio é obtido pela reação do ácido sulfúrico com a amônia:



A fluorapatita é o principal mineral de minério das rochas fosfáticas. Sua composição é  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F})$ . Nota-se que o teor de fósforo é geralmente expresso em  $\text{P}_2\text{O}_5$ , entidade que nem sequer figura nesta fórmula, cujo teor de  $\text{P}_2\text{O}_5$  é de 42%.

O flúor pode ser substituído por hidroxila (hidróxiapatita) ou por cloro (cloroapatita). O Ca pode ser substituído parcialmente por Mg, Na, Mn e outros. É muito frequente a presença de  $\text{U}_3\text{O}_8$  na rede cristalina da apatita.

A apatita ocorre em minérios de origem ígnea, onde os grãos geralmente estão melhor cristalizados e por isto são mais puros, e em minérios de origem sedimentar, onde os grãos são mistos com calcita, dolomita, limonita e argilas. Nestes a cristalização é pior e às vezes, criptocristalina, e o minério é chamado de colofanita.

Sendo cristalizada, a apatita tem baixa solubilidade. Para que o fósforo contido nela possa ser aproveitado pelas plantas, ele precisa ser colocado numa forma solúvel. Isto é feito de duas formas:

- pirometalurgicamente, isto é, fundindo as apatitas e resfriando-as rapidamente, de modo a impedir a recristalização;
- quimicamente, sintetizando um outro fosfato de alta solubilidade.

Já a colofanita é mais solúvel e pode ser aplicada diretamente ao solo. A maior diferença parece estar na substituição do ânion  $\text{PO}_4^{3-}$  por  $\text{CO}_3^{2-}$ , que desestabiliza a estrutura cristalina, aumentando a solubilidade, no caso do fosfato de origem sedimentar.

Aqui aparece um detalhe importante: quem na realidade solubiliza o fosfato presente no solo não é a água, mas os ácidos húmicos. Isto é, as raízes lançam no solo ácidos orgânicos capazes de dissolver os elementos químicos dos quais o vegetal se nutre. Por isto existem dois parâmetros de avaliação: a solubilidade em água e a solubilidade em outras soluções, como por exemplo, a solução de ácido cítrico a 2%, que representam melhor o comportamento do fertilizante no solo.

O potássio é obtido principalmente do cloreto de potássio, que ocorre na natureza na forma de minérios em depósitos sedimentares. No Brasil existe apenas uma mina e importamos 95% da quantidade consumida.

Alternativamente, minerais contendo potássio, como os verdetes e feldspatos, vêm sendo utilizados na aplicação direta. Como se tratam de silicatos de potássio, este elemento faz parte da estrutura molecular do mineral, sendo necessário quebrá-la para trazê-lo a uma forma de solubilidade elevada. A primeira idéia é fazê-lo por abertura com ácido fluorídrico, entretanto os custos são proibitivos. As rotas metalúrgicas são alternativas atraentes, seja na técnica de fabricação de termofosfatos, seja através da fusão com cloretos de metais alcalino-terrosos e solubilização do cloreto de potássio formado (Lacombe, 2009).

## Questionamento do modelo de fertilização adotado no Brasil

A Figura 2 mostra o mapa da Terra com a linha do Equador e os trópicos de Câncer e Capricórnio. Verifica-se que as terras do hemisfério norte estão muito mais ao norte do que estão ao sul as terras do hemisfério sul. Especialmente, vários países europeus e norte-americanos estão em latitudes mais altas que as brasileiras. No hemisfério sul, os países desenvolvidos - Argentina, África do Sul e Austrália, também estão em latitudes mais altas (mais ao sul) que o Brasil.

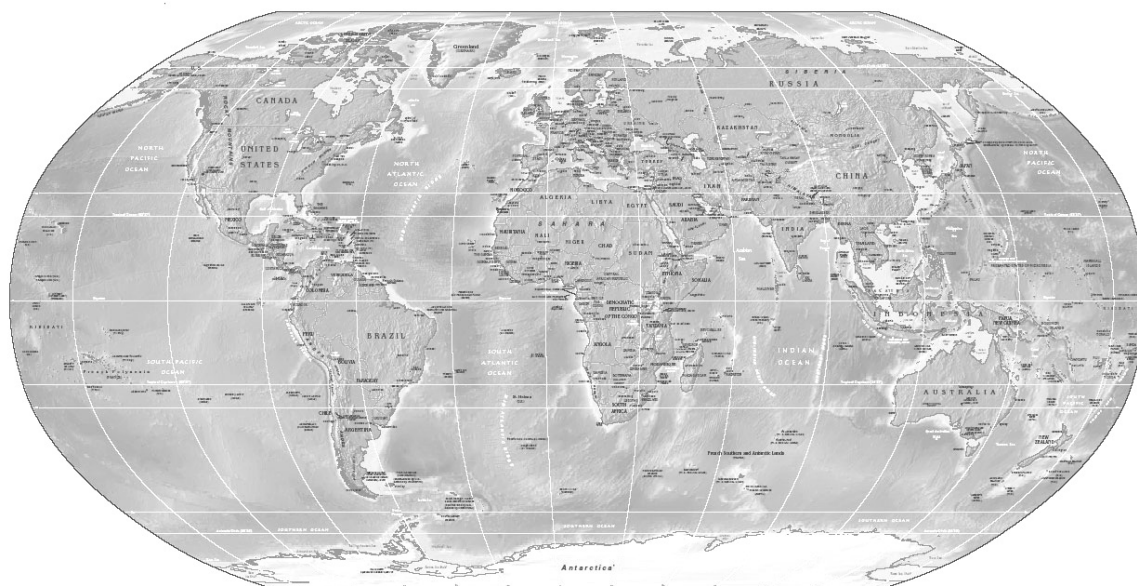


Figura 2 - O Brasil e os países desenvolvidos em relação à latitude.

Por isto, o clima brasileiro é diferente do dos países desenvolvidos. Se o clima afeta o temperamento dos povos, a cultura, os hábitos de vestir, a arquitetura, os relacionamentos sociais, afeta também os solos e a agricultura.

Com efeito, nas latitudes elevadas, existem quatro estações bem definidas, o inverno é frio e o verão é quente. Na maior parte do Brasil, situada entre o Equador e o Trópico de Capricórnio, existem apenas duas estações - uma quente e seca e outra quente e úmida. As temperaturas médias são muito mais elevadas que nos países desenvolvidos e a precipitação atmosférica, muito mais intensa.

Outrossim, na estação úmida, chove muito. Ubatuba, SP, recebe 2.400 mm anuais de precipitação, toda ela na forma de chuvas. E estas costumam ser torrenciais no auge da estação chuvosa, modelo que se repete por todo o Brasil. Isto é importante para a nossa consideração porque nas latitudes altas, a precipitação predominante é na forma de neve: esta cai, acumula-se sobre o solo ou no alto das montanhas, e derrete-se lentamente, mantendo o solo úmido e o suprimento de água (a partir das geleiras ou neves eternas), bastante regular durante o resto do ano.

Como resultado, nas regiões quentes, como a em que o Brasil está, os minerais, especialmente os dos solos, são lixiviados, dissolvidos, remobilizados e alterados com intensidade muito maior que nas regiões temperadas, onde estão os países desenvolvidos.

Em conseqüência, os solos adquirem características bem definidas e bastante diferentes, como mostra a Tabela 1. Em princípio, portanto, as práticas agrícolas e de manejo dos solos precisam ser necessariamente diferentes.

A atividade agrícola brasileira, o tão festejado *agrobusiness*, é extremamente importante para a economia nacional e para o balanço comercial. Ela é totalmente dependente da correção dos solos e da adubação,

tanto orgânica como química. A tradição agrônômica brasileira é a de uso de fertilizantes fosfatados de elevada solubilidade em água e rápida liberação de nutrientes. Exceção a este modelo são as colônias japonesas, principalmente no Estado de São Paulo, que dão preferência aos termofosfatos. Lembrando que o Japão é um país de reconhecida tradição agrônômica e que os descendentes de japoneses no Brasil, no imaginário comum, estão íntima e indissolúvelmente associados à atividade agrícola, é de se questionar o porque desta prática diferenciada.

Tabela 1 - Principais características de solos tropical e temperado (*apud* Oba *et al.*, 2000).

Tropicais	Temperados
predomínio de caulinita	predomínio de montmorilonita
mais profundos	mais rasos
pequena capacidade de troca de cátions	elevada capacidade de troca de cátions
mais pobre em Si	mais rico em Si
mais rico em Al e Fe	mais pobre em Al e Fe
pouca fixação de K e NH <sub>4</sub>	apreciável capacidade de fixar K e NH <sub>4</sub>
elevada capacidade de fixar P	pequena capacidade de fixar P
mais ácido	menos ácido
friável	pegajoso
mais grumoso em estado natural	estrutura menos grumosa
decompõe rapidamente a matéria orgânica	decompõe lentamente a matéria orgânica
raramente acumula húmus	pode acumular húmus em quantidade
possui microvida muito ativa	possui microvida pouco ativa
sofre facilmente erosão por chuvas torrenciais	raramente ocorre erosão pelas chuvas fracas
sofre superaquecimento	é muito frio
necessita proteção contra insolação direta	necessita ser aquecido
baixa capacidade de retenção de água	alta capacidade de retenção de água

A primeira idéia que vem à nossa mente é aquela já apresentada em publicações anteriores, de que se "transplantou o modelo das indústrias existentes nos países desenvolvidos, todos eles localizados em regiões temperadas. Este modelo, evidentemente, atende às condições de suas matérias-primas, climas e solos, não as nossas. Ou seja, importou-se um modelo estrangeiro sem uma reflexão mais detida sobre a sua aplicabilidade à realidade brasileira!" (Chaves e Oba, 2004, Oba *et al.*, 2000).

O saudoso Prof. Valarelli (Valarelli *et al.*, 1999) comentava que a produção de fertilizantes fosfatados no Brasil foi montada nos moldes das indústrias existentes em zonas temperadas, cujos processos e solos são distintos dos que ocorrem em climas tropicais e onde os minérios são diferentes (a origem sedimentar predomina para as mineralizações naturais, enquanto no Brasil a origem ígnea responde por mais de 90% das reservas e da produção), e aí estaria a origem de muitos dos problemas de perdas de fósforo nas várias etapas da sua utilização, desde a lavra até o beneficiamento e aplicação dos fertilizantes.

Desta situação advêm problemas econômicos como o desperdício de minério (apenas cerca de 8% do fósforo presente nos minérios é assimilado pelas plantas, segundo Rieder, 1986 e Fusaro *et al.*, 1987, ambos *apud* Barros, 1997) e ambientais como a eutrofização e poluição de corpos d'água e também a poluição de solos (por um lado, a perda de grande parte do fósforo nos fertilizantes causa o aumento desequilibrado de seus teores nas águas, eutrofizando-as; por outro lado, elementos nocivos em certos tipos de apati-

tas são também liberados no meio ambiente com a dissolução dos fertilizantes, causando aumento de seus teores tanto nos corpos d'água como nos solos).

O uso intensivo dos fertilizantes fosfatados, como ocorre no Brasil, e as características naturais dos minérios brasileiros obrigam a aplicação de processos complexos e caros para o beneficiamento da matéria-prima, além de causar impactos ao ambiente e de desprezar enormes quantidades de material com teores não suficientemente altos de  $P_2O_5$ , mas que poderiam ser aproveitados por vias alternativas.

O objetivo desta colocação é provocar uma meditação mais detida acerca destas afirmações e refletir sobre a aplicabilidade de fertilizantes aos solos brasileiros, dentro duma perspectiva mais ampla que a mera produtividade agrícola imediata. Isto é feito tomando em consideração as colocações do Prof. Alfredo Scheid Lopes em parecer solicitado pela ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos a respeito de nossas considerações anteriores (Lopes, 2005).

Os argumentos colocados contra a utilização de fertilizantes de alta solubilidade no Brasil são principalmente os seguintes:

- a fabricação destes fertilizantes exige concentrados fosfáticos de teor elevado de  $P_2O_5$  e de baixos teores de  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$  e  $Al_2O_3$ . Isto marginaliza muitas jazidas e viabiliza apenas algumas, assim mesmo à custa de grandes perdas de mineral de fosfato durante o processo de concentração. Ou seja, grandes volumes das reservas estão destinados a serem rejeitos de beneficiamento ou então são considerados estéreis ou minérios marginais, não passíveis de aproveitamento.
- a sua fabricação implica na importação de enxofre ou ácido sulfúrico com evidente ônus para a balança comercial. O Brasil importa 90% do enxofre que usa, sendo 70% a parcela utilizada na fabricação de ácido sulfúrico para atender às indústrias de fertilizantes (Pini e Chaves, 2001).
- a fabricação de ácido fosfórico, principal insumo da fabricação de fertilizantes solúveis, tem elevado impacto ambiental devido à geração de 4,5 t de fosfogesso para cada tonelada de ácido fosfórico produzido. Este fosfogesso tem utilização apenas parcial, como corretivo de solos, e é acumulado junto às usinas, inutilizando enormes áreas de terreno que poderiam ter utilização mais proveitosa.
- a elevada solubilidade do fertilizante fosfatado faria com que a maior parte dele fosse solubilizada logo pela primeira chuva. Apenas pequena parte dele seria aproveitada pelos cultivares, a maior parte sendo arrastada pelas águas de superfície ou aprofundando-se no solo.
- o fosfato dissolvido e arrastado iria poluir os cursos d'água e o lençol freático. A poluição dos cursos d'água seria facilitada pela compactação dos solos tropicais. "Acredita-se mesmo que a agricultura seja hoje a atividade industrial mais agressiva às águas de superfície e subterrâneas no Brasil" (Oba et al., 2000, Sanchez e Uehara, 1980). O sinal mais evidente deste efeito seria a eutrofização e subsequente morte dos cursos d'água.
- nas condições prevalentes nos solos tropicais ocorreria rápida retrogradação dos fosfatos adicionados. Eles reagiriam com o ferro e alumínio dos solos, formando fosfatos pouco solúveis, inaproveitáveis pelas plantas. Ou então, retornariam à forma de apatita, também pouco solúvel.

Como conseqüência disto tudo, o aproveitamento pelas plantas do fósforo contido nos fertilizantes aplicados seria inferior a 15 %.

Os argumentos a favor consideram a eficiência agrônômica do fertilizante, ou seja, o comportamento dos cultivares, no curto prazo, imediatamente após a aplicação. Em experimentos agrônômicos controlados verifica-se que os fertilizantes fosfatados com alta solubilidade em água (SSP, TSP, MAP e DAP) e os termofosfatos, estes altamente solúveis em ácido cítrico, apresentam elevada eficiência agrônômica. Os fosfatos parcialmente acidulados e os fosfatos naturais de origem sedimentar apresentam média eficiência, ao passo que os fosfatos naturais brasileiros, de origem vulcânica, têm baixa eficiência agrônômica (Goedert e Sousa, 1984, citado em Lopes, 2005).



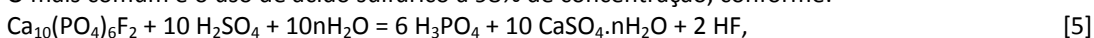
Outro estudo (Goedert *et al.*, 1991, citado em Lopes, 2005) mostrou que os superfosfatos simples e triplo, de alta solubilidade em água, se comportaram, para a média de quatro anos, num patamar semelhante aos termofosfatos fundido e calcinado.

A fixação do fósforo pelo solo, ou seja, a reação dos  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$  não é um fenômeno totalmente irreversível e, grande parte do fósforo "fixado" pode, com o passar dos anos voltar a ser disponível para as plantas. Isto ocorre, principalmente, quando se adota a rotação de culturas e se escolhem espécies eficientes em extrair fósforo. Num experimento levado a cabo por Sousa e Lobato, 2004, durante 22 anos, com culturas anuais, a recuperação de fósforo foi de 44% e, quando foram introduzidas pastagens, de 85% (Lopes, 2005).

A poluição dos cursos d'água pelo escoamento superficial e erosão dos solos adubados decorreria, principalmente, do fosfato aderido às partículas de solo arrastadas para dentro do curso d'água. Isto seria fruto, basicamente de práticas agrícolas impróprias praticadas no passado. A preservação e manutenção da mata ciliar e de faixas de gramíneas ao longo dos cursos d'água e as boas práticas de conservação do solo seriam suficientes para minimizar este impacto (Lopes, 2005).

### Obtenção de ácido fosfórico por processo químico

O ácido fosfórico é produzido mediante a reação de ácido sulfúrico, nítrico ou clorídrico e rocha fosfática. O mais comum é o uso de ácido sulfúrico a 98% de concentração, conforme:



onde  $n = 0, 0,5$  ou  $2$ , conforme o número de moléculas de hidratação do sulfato de cálcio (fosfogesso).

Quando  $n = 2$ , o processo é chamado de di-hidrato, quando  $n = 0,5$ , de hemi-hidrato. Existe ainda um processo misto chamado de hemi-di-hidrato. A diferença entre eles está na operação de cristalização do gesso.

Reação e cristalização – A reação acima é provocada no reator. O sulfato de cálcio ou fosfogesso cristaliza-se e o ácido fosfórico permanece em solução.

Filtragem - a polpa contendo fosfogesso é filtrada para a remoção do ácido fosfórico contido. Num primeiro trecho do filtro retira-se a solução de ácido fosfórico na concentração em que foi produzida no reator. Num segundo trecho, a torta é lavada com água, para retirar o restante do ácido ainda retido entre as partículas de gesso. Esta solução é diluída e retorna ao reator.

O processo di-hidrato fornece um produto (ácido fosfórico) com cerca de 30% de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . O processo hemi-hidrato, com teor superior a 40%. As recuperações são respectivamente de 98% e 95% do  $\text{P}_2\text{O}_5$  contido. O processo misto otimiza os resultados em termos tanto de teor como de recuperação. A torta da filtragem é o fosfogesso e é descarregada como rejeito.

Concentração - a solução de ácido fosfórico obtida no processo di-hidrato precisa ser concentrada, o que é feito por evaporação da água, aumentando o teor para cerca de 52%  $\text{P}_2\text{O}_5$ . No processo di-hidrato, eventualmente esta etapa pode ser eliminada.

A Figura 3 esquematiza ao processo.

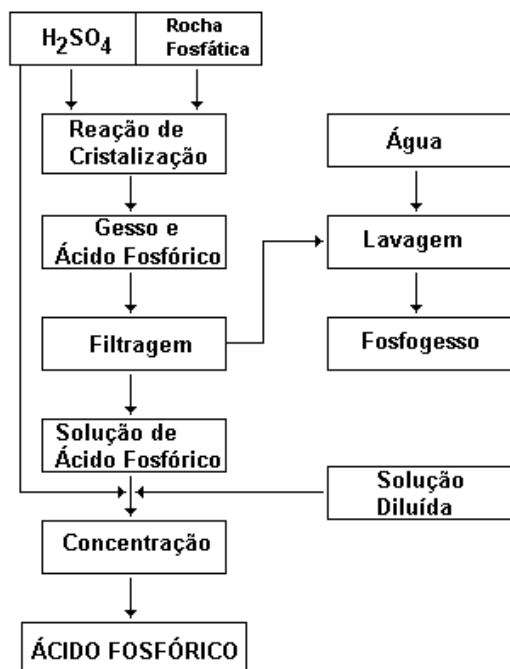
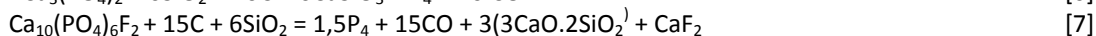
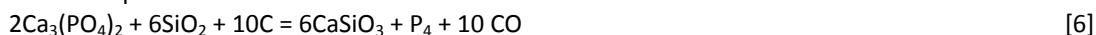


Figura 3 – Fabricação de ácido fosfórico via úmida.

## Obtenção de ácido fosfórico por processo metalúrgico

O fósforo elementar pode ser obtido pela redução eletrotérmica em forno elétrico, pela redução da rocha fosfática (concentrado) na presença de um redutor e de escorificantes. A reação simplificada que representaria o processo é:



O redutor é coque ou antracito, de carbono fixo alto e baixo teor de materiais voláteis. O fósforo elementar volatiliza-se e sai com os outros gases ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}$ ) e com a poeira arrastada. Um precipitador eletrotático é necessário para reter as partículas sólidas. Os gases são condensados na ausência de oxigênio e o fósforo elementar é recolhido, no estado líquido, em tanques de condensação.

Se o processo é feito na presença de ar, o fósforo se oxida a pentóxido de fósforo e em seguida é reagido com água para resultar o ácido fosfórico (Beraldo, 1986):



Os demais metais presentes no banho são também oxidados ou reduzidos, formando uma escória sobre-nadante e uma fase de ferro-fósforo fundido.

A Figura 4 esquetiza o processo.

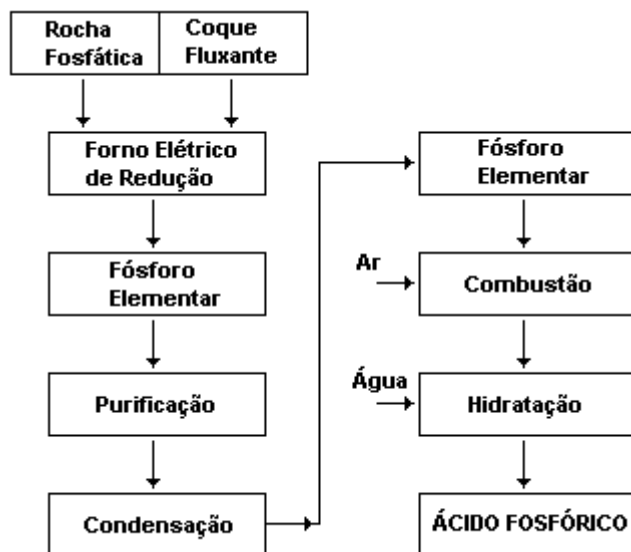


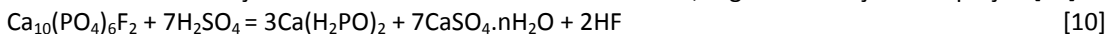
Figura 4 - Processo pirometalúrgico.

## Fosfatos solúveis

Os fosfatos solúveis de baixa concentração – super simples (SSP), e o fosfato parcialmente acidulado (FPA) - são fabricados fazendo reagir o produto do beneficiamento, concentrado fosfático com o ácido sulfúrico, em longo tempo de duração (cura de produto). Os fosfatos ditos de alta concentração (mono-amônio fosfato, MAP, triamônio fosfato, TAP, o superfosfato triplo (TSP) e triplo simples, TSP) são feitos reagindo o mesmo concentrado fosfático com ácido fosfórico, para a obtenção de produto com alto conteúdo do fósforo.

Os fertilizantes solúveis ou superfosfatos são o superfosfato simples (SSP), o superfosfato triplo (TSP) e o fosfato parcialmente acidulado (FPA).

O SSP é obtido da reação da rocha fosfática com ácido sulfúrico, segundo a reação da Equação [10].



Ela é feita em misturadores onde o ácido é adicionado à rocha fosfática, moída entre 100 e 150# Tyler (149 e 100  $\mu\text{m}$ ). A reação é lenta e, uma vez completada, o produto vai curando lentamente. Ele pode ser vendido então na granulometria em que está (SSP granulado) ou após moagem (SSP em pó). A Figura 5 esquematiza este processo.

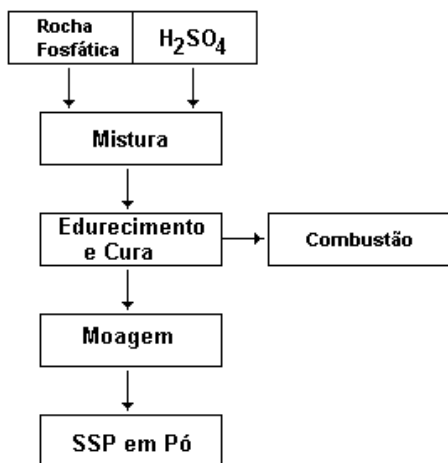
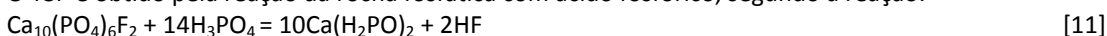


Figura 5 – Fabricação de SSP.

O SSP deve ter 18 % mínimo de  $P_2O_5$  solúvel em solução neutra de citrato de amônio, mínimo de 16% solúvel em água e conter 18 a 20% de Ca e 10 a 12% de S.

O TSP é obtido pela reação da rocha fosfática com ácido fosfórico, segundo a reação:

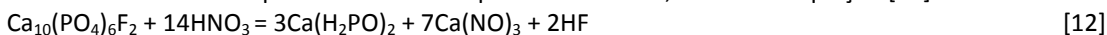


O processo de fabricação é semelhante ao anterior e o produto é vendido nas mesmas formas.

O TSP deve ter 41% mínimo de  $P_2O_5$  solúvel em solução neutra de citrato de amônio, mínimo de 37% solúvel em água e conter 12 a 14% de Ca.

O FPA segue o mesmo processo de fabricação que o SSP, empregando, porém, metade do ácido sulfúrico consumido no processo do SSP, para a mesma quantidade de rocha. O FPA deve ter 20% mínimo de  $P_2O_5$  total, com um mínimo de 9% solúvel em solução de ácido cítrico e conter 25 a 27% de Ca, 0 a 6% de S e 0 a 2% de Mg.

Nos nitrofosfatos o ataque da rocha é feito pelo ácido nítrico, conforme equação [12].



O nitrato de cálcio é um sal higroscópico, que precisa ser eliminado, o que pode ser feito de diferentes maneiras. Na Figura 6 está esquematizado um fluxograma onde esta remoção é feita por cristalização e filtração.

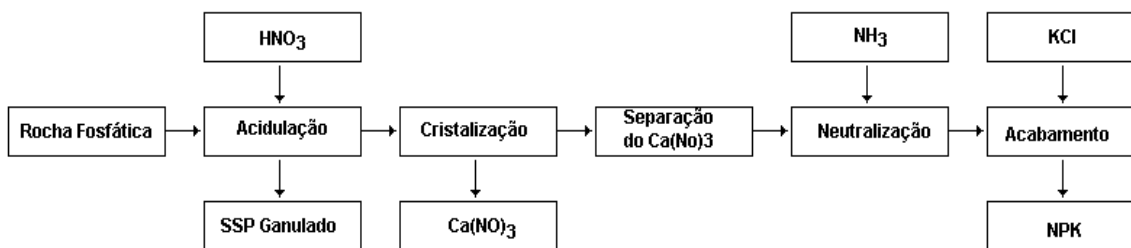


Figura 6 – Fabricação de nitrofosfato.

O produto deve ter 14% N mínimo, 18% mínimo de  $P_2O_5$  solúvel em solução neutra de citrato de amônio, mínimo de 16% solúvel em água e conter 8 a 10% de Ca.

## Fertilizantes alternativos

O fertilizante alternativo mais imediato seria a rocha fosfática finamente pulverizada ou, correspondentemente, a adição de ossos moídos, cascas de ovo e outros aditivos naturais. Esta prática é entusiasticamente apoiada pelos partidários da agricultura orgânica, mas o seu efeito fertilizante é considerado pelos partidários da adubação intensiva, muito restrito. O estudo já referido de Goedert e Sousa, 1984, mostrou que apenas os fosfatos de origem sedimentar podem ser utilizados. Isto se explica por serem eles compostos do mineral colofanita, variedade amorfa ou mal cristalizada do fosfato de cálcio. As apatitas, minerais presentes nos fosfatos de origem magmática, são muito bem cristalizadas e por isto resistentes à solubilização, exceto por ácidos muito enérgicos como o sulfúrico, que não ocorrem nos solos.

Os termofosfatos são produtos obtidos através do tratamento térmico de rochas fosfatadas, com ou sem adição de outros materiais (Pini e Chaves, 2001). Ocorre uma transformação física que destrói a estrutura cristalina da apatita, permitindo a sua solubilização pelos ácidos húmicos. A sua fabricação não demanda insumos importados como o enxofre.

Como, adicionalmente, os termofosfatos têm caráter alcalino, auxiliam na correção da acidez do solo. A Tabela 2 mostra a economia de calcário dolomítico decorrente do uso de termofosfatos em solos ácidos.

Tabela 2 - Efeito da correção parcial de acidez do solo

Fertilizantes	Equivalente em CaCO <sub>3</sub>	Fertilizantes	Equivalente em CaCO <sub>3</sub>
Superfosfatos	zero	MAP	-650
Hiperfosfatos	+100	DAP	-700
Termofosfatos	+500	-	-

Fonte: Serrana.com.br/informes.htm, referido em Pini e Chaves, 2001.

O significado do equivalente em CaCO<sub>3</sub> é a quantidade de calcário necessária para neutralizar a adição de 1,0 t de cada fertilizante: para neutralizar 1 t de MAP são necessários 650 kg de calcário (além do calcário necessário para corrigir a acidez do solo). Já a adição de 1 t de termofosfato implica na economia de 500 kg de calcário dolomítico nesta correção.

Os termofosfatos utilizam fornos metalúrgicos para quebrar a estrutura cristalina da apatita e tornar o fosfato nela contido solúvel e acessível à planta. A principal característica destes produtos é que o fosfato está insolúvel em água, embora disponível aos vegetais (solúvel em ácido cítrico). Tratam-se de fertilizantes de liberação lenta e têm caráter alcalino, no máximo neutro, sendo por isto recomendados para solos ácidos (Ibrafos, 1991).

Cekinski et al. (1986) comentam que estas características podem constituir vantagem para solos ácidos e clima tropical, como é o caso brasileiro. Entretanto, para climas temperados e solos alcalinos - como é a predominância das regiões de primeiro mundo, a resposta é menos satisfatória, o que causou o seu insucesso comercial nessas regiões.

Três são os processos principais de fabricação e os produtos correspondentes: termofosfato magnesiano fundido, fosfato Rhenânia e fosfato desfluorizado.

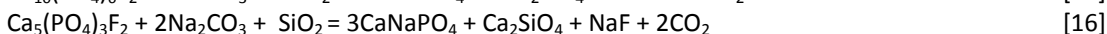
O termofosfato fundido é preparado num forno elétrico de redução, gera uma pequena quantidade de ferro-fósforo e a escória metalúrgica, que é o termofosfato. A formulação desejada é obtida a partir da composição química do minério fosfático e duma fonte de magnésio além dos escorificantes usuais. A estrutura cristalina da apatita é destruída e o silicato de magnésio gerado interfere no processo de recristalização. O vazamento do ferro-fósforo é feito separadamente do termofosfato. Este é lançado em água fria (*quenching*) para impedir a recristalização da apatita e fraturá-lo. A seguir o termofosfato é desaguado, secado, moído e ensacado. O produto desejado deve ter 17% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mínimo e 14% solúvel em ácido cítrico, 7% Mg mínimo e 18 a 20% Ca.

O termofosfato desfluorizado é obtido por calcinação (em fornos de calcinação) acima de 1.200°C em presença de sílica e vapor d'água. As reações mostradas abaixo (Beraldo, 1986, Ibrafos, 1991) geram uma solução sólida de fosfato tricálcico e silicato de cálcio:



O produto desejado deve ter 21% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mínimo e 20% solúvel em ácido cítrico e 0,1% Mg máximo. Um pequeno teor de flúor é essencial para sua utilização como complemento de ração animal.

O fosfato Rhenânia é obtido pela calcinação duma mistura de rocha fosfática, barrilha e sílica. O processo ocorre segundo as reações descritas pelas Equações 15 e 16 (Beraldo, 1986).



O produto desejado deve ter 28 a 30% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total, todo ele solúvel em ácido cítrico.

A título de curiosidade, o IPT desenvolveu, em 1973, um processo de obtenção de termofosfato em máquina de sínter, potencialmente mais barato. Infelizmente, as pesquisas não foram continuadas.

Nos termofosfatos fundidos, o principal constituinte é o fosfato tricálcico. Eles são fabricados pelo contacto do leito de fusão com vapor d'água ou por resfriamento rápido em água (*quenching*), o que acarreta a desfluorização da fluorapatita e a sua solidificação numa estrutura vítrea, não mais cristalina e por isto, acessível ao ataque ácido.

O termofosfato magnésiano fundido é obtido pela fusão de misturas de rochas fosfáticas e silicatos de magnésio (como o talco) a temperaturas da ordem de 1500°C.

O termofosfato Rhenânia e os outros termofosfatos calcinados são obtidos pela calcinação de rochas fosfáticas misturadas a barrilha e a sílica. O fosfato solúvel formado é a renanita, CaNaPO<sub>4</sub>. No Japão e Inglaterra, a adição de ácido fosfórico e sais de sódio à rocha fosfatada e subsequente calcinação gera uma mistura de fosfato tricálcico e renanita.

O processo Humifert (Oba, 2000, Oba *et al.*, 2000, Sternicha, 1988) é um processo alternativo de produção de fertilizante organo-fosfatado: baseia-se no ataque de fosfatos naturais brutos, minérios marginais ou fosfatos secundários não utilizáveis pela tecnologia do ácido fosfórico) pelo ácido nítrico e na utilização do nitrogênio do ar como fonte primária do reagente ácido. Produzem-se óxidos nítricos que, em contacto com a umidade da mistura fosfato+materia orgânica, transformam-se em ácido nítrico nascente na própria superfície das partículas de fosfato. Este fertilizante nitro-fosfatado é fixado sobre matérias orgânicas como turfas, bagaços, palhas etc.

O reator transforma o nitrogênio do ar em ácido nítrico em contacto com a umidade da mistura. O ácido nítrico ataca a apatita e também a matéria orgânica, gerando ácidos húmicos. Estes ácidos atuam no sentido de auxiliar a solubilização da apatita, de modo que a quantidade de ácido para dissolver o P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> do mineral é inferior à estequiometricamente necessária.

O produto da reação é um fertilizante fosfatado que aporta também nitratos e matérias orgânicas pré-humificadas. Ensaio agrônomico em casa verde mostraram uma assimilação maior que aquelas indicadas pelas análises em ácido cítrico a 2%.

Sua importância reside na possibilidade de diminuição dos custos através do aproveitamento de materiais fosfáticos marginais ou rejeitos de beneficiamento e nos benefícios ambientais decorrentes da diminuição da produção de rejeitos nas minas e também do aproveitamento de rejeitos orgânicos.

## Especificações desejadas para a rocha

Evidentemente, os processos químicos descritos acima exigem matéria-prima com especificações bem definidas em termos de teor de fosfato e de impurezas prejudiciais a eles. Estes valores variam conforme o processo e o projeto da usina. É preciso lembrar que muitas usinas usam a mesma instalação para produzir SSP e TSP, alternando entre uma rota e outra. Passamos a examinar estas especificações (Albuquerque, 1996).

### TEOR DE $P_2O_5$

Quanto maior este teor, mais lucrativo será o processamento. Geralmente, é exigido o teor mínimo de 32%, tanto para TSP como para SSP, mas ele varia, dependendo do teor dos elementos nocivos, sendo aceitos, em determinados casos, valores de até 28%. É preciso distinguir o  $P_2O_5$  contido na apatita daquele contido em fosfatos secundários (crandallita, gorceixita, por exemplo), que não é recuperado no processo. Para FPA pode-se tolerar rocha com teores mais baixos.

### TEOR DE $CaCO_3$

Os carbonatos reagem com os ácidos, aumentando o seu consumo. Por isto, para a fabricação de ácido fosfórico, procura-se manter a relação  $P_2O_5/CaCO_3$  entre 1,3 e 1,5, podendo-se entretanto aceitar até 1,7, porém à custa do consumo elevado de ácido.

### MgO E $R_2O_3$

$R_2O_3$  ( $Fe_2O_3$  e  $Al_2O_3$ ) e MgO, além de diluírem o minério, formam complexos com o ácido fosfórico. Estes produtos consomem o ácido fosfórico, diminuindo o rendimento do processo (para cada 1% de  $R_2O_3$  há uma perda de 2% de  $P_2O_5$ ) e aumentam a viscosidade do produto, fazendo com que impurezas sólidas sejam retidas. Além disso, esses precipitam muito lentamente, o que vai acabar acontecendo nos tanques de armazenamento ou nos veículos de transporte.

Geralmente limita-se a relação  $R_2O_3/P_2O_5$  a 0,1% e o MgO a 1%.

Para a produção de FPA pode-se tolerar  $R_2O_3/P_2O_5$  até 0,2%.

É importante salientar esta limitação no teor de  $R_2O_3$  para a química dos fosfatos solúveis. Isto limita a capacidade de certas rochas atenderem a esta exigência e eventualmente, porções significativas duma jazida, mesmo tendo teores de  $P_2O_5$  aceitáveis, passam a ser consideradas minérios marginais. O saudoso Dr. Gildo A.S.C. Albuquerque (Albuquerque, 1996) apresenta a Figura 5, que relaciona a perda de recursos nas jazidas brasileiras em função deste parâmetro. Note-se que para 3%  $R_2O_3$ , a perda é de 50%.

Evidentemente, os fosfatos de alta concentração exigem matéria-prima (concentrados fosfáticos) com especificações bem definidas e mais elevadas em termos de teor de fósforo e de reduzido conteúdo de impurezas prejudiciais à especificação dessas matérias-primas. Estes valores variam conforme o processo e o projeto da usina.

Já para os termofosfatos, gerados em processo metalúrgico, as especificações da rocha fosfática são mais frouxas, especialmente no que se refere ao  $R_2O_3$ . O fluxante deve ser uma fonte de magnésio. O fosfato Rhenânia aceita um leito com teor de sílica mais elevado.

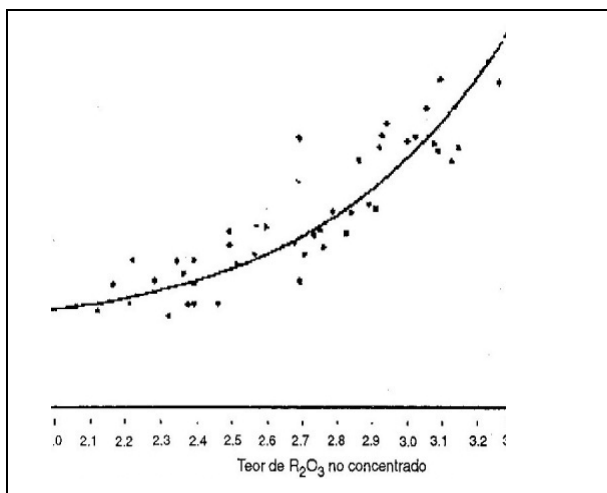


Figura 7 - Perdas decorrentes do teor de  $R_2O_3$ .

### Matéria orgânica

A matéria orgânica no processo causa problemas de formação de espuma no reator, com perdas de  $P_2O_5$ . Eventualmente é necessário calcinar a rocha que tenha estes materiais.

### Natureza da apatita

A flúorapatita é  $Ca_{10}(PO_4)_6F_2$ , mas, como mencionado, o flúor pode ser substituído por hidroxila (hidróxia-apatita) ou por cloro (cloroapatita), o Ca, parcialmente por Mg, Na, Mn ou outros e é relativamente frequente a presença de  $U_3O_8$  na rede cristalina da apatita.

Tudo isto se constitui em problemas. O flúor vai formar ácido fluorídrico, o cloro, ácido clorídrico, que atacam tanques e tubulações. No caso da fluorapatita, a presença de sílica diminui a extensão do problema, pois a sílica reage com o ácido fluorídrico.

### Processo metalúrgico

A especificação da rocha para a fabricação de fósforo elementar ou ácido fosfórico via eletrometalúrgica, e também dos termofosfatos, é muito mais flexível, pois os processos metalúrgicos são muito mais robustos que os químicos em termos de qualidade da matéria-prima. Isto porque, dentro do forno de redução, ocorre a fusão das matérias-primas, a redução dos metais e a escorificação dos óxidos (daí a necessidade dos fluxantes, que são as substâncias adicionadas com o propósito de formar a escória adequada). Os óxidos de ferro vão ser reduzidos e produzir uma liga ferro-fósforo que entretanto não é uma perda de processo, pois o ferro-liga tem valor comercial e será utilizado na fabricação de aços de usinagem fácil.

Da mesma forma, o cálcio e o magnésio presentes são escorificados mediante a correta dosagem de sílica, a sílica e a alumina são escorificadas mediante a correta dosagem de calcário.

## Conclusão

O modelo de fertilização implantado no Brasil é questionado por muitos do ponto de vista agrônomo, função de serem fertilizantes de alta solubilidade que poderiam ser levados pelas águas das chuvas torrenciais em prejuízo da sua assimilação pelas plantas, constituindo-se ademais num foco de poluição dos cursos d'água. Existem argumentos de peso contrários a esta afirmação.

Do ponto de vista de demanda de matérias-primas minerais, exige concentrados de rocha fosfática de elevado teor de  $P_2O_5$  e sérias limitações quanto às impurezas e contaminantes presentes.



A pesquisa e o desenvolvimento de fontes alternativas de fertilizantes fosfatados para atender as demandas crescentes da agricultura brasileira desperta imenso interesse. Isto não só pela possibilidade de fornecer alternativas ao modelo vigente, como também pela possibilidade de aproveitar quantidades enormes de minérios marginais (pobres ou contaminados), inacessíveis pela tecnologia atual.

É uma linha de pesquisa que merece todo o apoio dada a sua importância industrial, de conservação de recursos minerais e de minimização do impacto ambiental.

## Referências bibliográficas

- ALBUQUERQUE, G.A.S.C. A produção de fosfato no Brasil: uma apreciação histórica das condicionantes envolvidas. Rio de Janeiro, Cetem. Série Estudos e Documentos n. 31, 1996.
- BARROS, L. A. F. Flotação da apatita da jazida de Tapira, MG. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 106p, 1997.
- BERALDO, J.L. Concentração de fosfato. Curso ministrado para a Petrobrás, 1986. xerox.
- CEKINSNI, E.; PEREIRA, S.C.C.; GUARDANI, R.; GIULIETTI, M. Aspectos gerais da produção de termofosfatos. ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, II. Anais. São Paulo, Ibrafos
- CHAVES, A.P.; OBA, C.A.I.; Críticas ao modelo brasileiro de fertilizantes fosfatados de alta solubilidade. Rio de Janeiro, CETEM, Série Estudos e Documentos, nº. 63, 2004.
- CHESNIN, L. Cálcio, magnésio, enxofre e os micronutrientes. *In*: Manual de fertilizantes, São Paulo, IPT / Cefer, 1980, p.73-94.
- ESTEBAN, F.S.; SINTONI, A. Desenvolvimento de tecnologia na concentração de rocha fosfática de baixo teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Encontro Nacional de Rocha Fosfática, 1 - Anais. Brasília, Ibrafos, 1979.
- GOEDERT, W.J.; REIN, T.A.; SOUSA, D.M.G. de. Avaliação agrônômica de fontes de fósforo para a região dos cerrados. *In*: Relatório técnico anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, Planaltina, Embrapa-CPAC, 1991, p. 155-89.
- GOEDERT, W.J.; SOUSA, D.M.G. de. Uso eficiente de fertilizantes fosfatados. *In*: ESPINOSA, W; OLIVEIRA, A.J. de (Ed.) Anais do simpósio sobre fertilizantes na agricultura brasileira. Brasília, Embrapa-DEP, 1984, p. 68-75.
- IBRAFOS. A indústria de fertilizantes fosfatados no Brasil. São Paulo, Ibrafos, 1991.
- KLEIN, C.; HURLBURT, C.S. Manual of Mineralogy. J.Wiley, N. York, 1977, p.434
- LACOMBE, L.A.; DEQUECH, R. Produção de cloreto de potássio a partir de concentrados silicatados da região de Quartel de S. João - MG. Brasil Mineral, n. 287 (ago. 2009), p. 136-141.
- LOPES, A.S. Parecer técnico agrônômico sobre o trabalho: "Críticas ao modelo brasileiro de fertilizantes fosfatados de alta solubilidade de autoria de Arthur Pinto Chaves e Carlos Ikeda Oba", CETEM, série Estudos e Documentos, nº 63, 25p., 2004. Parecer fornecido à ANDA, 2005.
- MENDES, C.M.; OLIVEIRA, L.T.; SILVEIRA, R.C. Perspectivas de produção de fósforo elementar, ácido fosfórico alta pureza e termofosfato magnesiano fundido. Encontro Nacional de Rocha Fosfática, III, Anais. 1986.
- OBA, C.A.I.; LACOUT, J.L.; CHAVES, A.P. Novo fertilizante organo-fosfatado viabiliza materiais fosfatados marginais. Brasil Mineral, n. 183 (maio 2000), p. 60-4.
- OBA, C.A.I. Aproveitamento de materiais fosfáticos marginais para a produção de fertilizantes organo-fosfatados. São Paulo, EPUSP, Tese de Doutorado, 2000.
- PINI, R.A.; Fabricação de termofosfato utilizando fosfogesso. São Paulo, EPUSP, Tese de Doutorado, 2001.

- PINI, R.A.; CHAVES, A.P. Fabricação de termofosfato utilizando fosfogesso. São Paulo, Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI,151, 2001.
- SANCHEZ, P.A.; UEHARA, G. - Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. The role of phosphorus in agriculture, Madison, American Society of Agronomy. p.471-514, 1980.
- SLACK, A.V. Os produtos fertilizantes. *In*: Manual de fertilizantes, São Paulo, IPT / CEFER, 1980, p. 53-73.
- SOUSA, D.M.G., REIN, T.A., LOBATO, E. & SOARES, W.V. - Eficiência agrônômica de fosfatos naturais reativos na região dos cerrados. *In*: Congresso Brasileiro de Ciências do Solo. Embrapa/UnB/SBCS. p.27, 1999.
- STERNICHA, F. Matière organique accroissant la proportion de phosphore assimilable dans les engrais chimiques classiques et dans les phosphates naturels. Brevet no. 13177, 1988.
- VALARELLI, J.V., FIGUEIRA, J.L.G., HYPOLITO, R., BAILLIF, P., TOURAY, J.C. & SCHULTZ-GUTTLER, R.A. - 1999 - Estudo experimental da fixação do fósforo em minerais de solo. Acad. Bras. de Ciências, 71(4-1):729-742.