

## Impacto ambiental das emissões aéreas de usinas termoeletricas - emissões de SO<sub>2</sub> -

MÁRIO EPSTEIN\*

### 1) Introdução

Dentro do seu plano energético para o ano 2010, a Eletrobrás<sup>1</sup> prevê a construção entre 1990 e 2001 de 12 novas usinas termoeletricas a carvão, com potências oscilando entre 50 e 350Mw. Além destas usinas a combustível sólido, já há planos para a construção, por outras concessionárias de energia elétrica, de usinas que utilizam resíduos semi-sólidos de refinarias de petróleo (resíduos da torre de vácuo). Todas essas usinas são emissoras de enxofre, que pode causar danos ao meio-ambiente. Neste estudo revisamos os principais impactos ambientais causados pelas emissões de compostos de enxofre, principalmente na queima do carvão<sup>2,3</sup>.

### 2) Origem das emissões

Se o carvão fosse composto apenas de carbono, oxigênio e hidrogênio, as termoeletricas a carvão emitiriam apenas vapor d'água e gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e não produziriam poluição ambiental no seu entorno (o efeito estufa é de longo prazo e não está plenamente confirmado). No entanto, além dos elementos citados os carvões contêm altos teores de sílica, ferro, enxofre e alumínio, e baixos teores de praticamente todos os elementos da tabela periódica<sup>4</sup>

Ao queimarmos o carvão, parte dos elementos se volatiliza e sai para a atmosfera junto com parte da matéria inorgânica liberada sob a forma de finas partículas de pó (cinzas volantes). Atualmente, as emissões de compostos de enxofre são as que mais problemas têm trazido para as termoeletricas a carvão.

O enxofre é um constituinte natural de todos os combustíveis fósseis. Durante a combustão, a maior parte dele é convertida em compostos sulfurosos gasosos. Praticamente 95% do S orgânico presente no carvão e mais de 99% do S presente nos combustíveis líquidos são convertidos nestes compostos gasosos e lançados na atmosfera, se não houver equipamento de controle de emissões.

Ao ser queimado, o enxofre forma uma série de óxidos (SO, SO<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, S<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, SO<sub>4</sub>, mas apenas o dióxido (SO<sub>2</sub>), o trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) e o íon sulfato têm importância como poluentes. O SO<sub>3</sub> se combina rapidamente com água, formando ácido sulfúrico. Devido ao seu baixo ponto de orvalho, esta mistura ácida produz sérios danos em chaminés não tratadas convenientemente. Na presença de metais ou amônia, o ácido reage formando sulfatos metálicos, de amônia ou mistos.

Estudos realizados em termoeletrica a carvão mostram que de 92 a 94% do enxofre emitido pela chaminé aparece na forma de SO<sub>2</sub>, menos do que 1% na forma de SO<sub>3</sub> e até 3% na forma de SO<sub>4</sub> (sulfatos). Medidas indiretas (baixa eficiência de remoção por equipamentos antipoluição) permitem inferir que o SO<sub>3</sub> apresenta-se na forma de aerossol ou partículas muito finas, com diâmetro da ordem de décimos de microns.

Os sulfatos têm dimensões de alguns microns, podendo ser captados em grande parte por precipitadores eletrostáticos. Sua origem é a oxidação catalítica do SO<sub>2</sub> na superfície do material particulado (MP) volante. Este MP contém na sua superfície metais que produzem o SO<sub>3</sub>, o qual reage com metal formando o sulfato metálico.

\* Instituto de Física - UFRGS - Caixa Postal 15051 - 91500 Porto Alegre - RS

<sup>1</sup> Eletrobrás - Centrais Elétricas Brasileiras S.A.; PLANO 2010 - Relatório Executivo; Ministério das Minas e Energia (1987).

<sup>2,3</sup> Yeager, K.E. & S.B. Batvch; Environmental issues affecting coal technology; a perspective on US trends. In "Ann. Rev. Energy" 12,471 (1987).

OECD; Environmental Effects of Energy Systems; edited by Organization for Economic Cooperation and Development, Paris (1983).

<sup>4</sup> Amdur, M.O. et al.; Coal combustion aerosols as SO<sub>2</sub>: An interdisciplinary analysis; Environmental Science & Technology, 20,138 (1986).

O  $\text{SO}_2$  é um gás incolor com cheiro irritante. É altamente solúvel em água: 11,3 g/100 ml comparado com 0,169g/100 ml para o  $\text{CO}_2$ . Em contato com a água ele forma o ácido sulfuroso ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ). No ar limpo, o  $\text{SO}_2$  se oxida lentamente para  $\text{SO}_3$ . Esta oxidação é mais rápida na presença de aerossóis aquosos na atmosfera. Íons de metais pesados em solução catalisam a reação, que cessa quando o aerossol torna-se ácido. A amônia presente na atmosfera neutraliza o ácido, formando bissulfito que rapidamente se oxida para sulfato. Se a quantidade de amônia na atmosfera for suficiente, teremos a total neutralização do ácido, caso contrário haverá um resíduo ácido que aparecerá na próxima chuva.

A concentração do  $\text{SO}_2$  é dada em ppm (partes por milhão) ou  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (micro-gramas/ $\text{m}^3$  de ar) (1 ppm = 2620  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Em todo o mundo são emitidos anualmente 100 milhões de toneladas de  $\text{SO}_2$ . Nos EUA, as emissões são de 27 milhões de toneladas, sendo que as termoeletricas são responsáveis por 2/3 destas emissões. Os diversos usos do carvão nos EUA (termoeletricas e indústrias) produzem uma emissão de 19,5 milhões de toneladas de  $\text{SO}_2$ . A contribuição percentual das emissões da geração de eletricidade em relação às emissões globais vem diminuindo devido às medidas de controle das emissões impostas pelo governo americano.

É importante notar que o impacto ambiental das emissões aéreas de poluentes ocorre em duas escalas bem distintas. O impacto local depende tanto das emissões próximas quanto da altura da chaminé. Uma fábrica com pequena emissão mas com uma chaminé baixa pode causar um impacto local mais forte do que uma termoeletrica com chaminé elevada. A fábrica produz uma alta concentração de poluentes aéreos a nível do solo enquanto que as emissões da usina sofrem uma grande dispersão e diluição antes de atingir o ambiente da superfície terrestre.

O impacto em escala estadual não depende das características das chaminés mas somente das emissões globais na região. É o caso das emissões no nordeste dos EUA que causam chuva ácida no Canadá.

### 3) Sulfatos

Como veremos adiante, muitos dos efeitos ambientais atribuídos ao  $\text{SO}_2$ , na realidade, são devidos aos sulfatos originados do dióxido de enxofre emitido pelo homem<sup>5</sup>.

Os sulfatos artificiais observados na atmosfera aparecem de duas formas. Se são emitidos pelas chaminés já na forma de sulfatos (incluindo ácido sulfúrico), eles são chamados de poluentes primários. Se aparecem na atmosfera a partir de reações químicas sofridas pelo  $\text{SO}_2$ , eles são chamados de poluentes secundários.

Experimentos com animais têm mostrado que os sulfatos são extremamente mais irritantes ao trato respiratório do que o  $\text{SO}_2$ . O ácido sulfúrico possui o maior poder de dano, seguido pelos sulfatos metálicos. Dentre estes, os de metais de transição são os mais tóxicos.

O ácido sulfúrico livre e os sulfatos metálicos estão presentes na razão de 3 a 5% dos sulfatos nas grandes cidades americanas. Nas proximidades de grandes fontes de  $\text{SO}_2$ , esta proporção pode ser bem maior. Medidas têm mostrado que o sulfato de amônia, que compõe mais de 80% dos sulfatos atmosféricos, tem pouco efeito tóxico.

Por ser um principalmente poluentes secundários, os sulfatos podem aparecer em altas concentrações a centenas de quilômetros das fontes poluidoras. Como consequência, é bastante difícil reduzir as concentrações ambientais de sulfatos, devido ao desconhecimento das fontes que os emitiram. Medições realizadas no Canadá mostram que uma redução nas emissões de  $\text{SO}_2$  resulta em uma redução parcial no teor de sulfatos na atmosfera, o que parece mostrar que há vários fatores que interferem na relação  $\text{SO}_2$  - sulfatos.

### 4) Origem dos sulfatos primários

Todas as evidências indicam que os sulfatos originam-se quimicamente da oxidação do  $\text{SO}_2$  na presença de catalisadores e de oxidantes fotoquímicos.

Na formação de sulfatos primários, a presença de catalisadores tem um papel fundamental. Detectou-se que a queima de óleo combustível produz de 5 a 10 vezes mais sulfatos primários do que a queima de carvão com o mesmo teor de enxofre. A razão é a presença de vanádio e níquel que servem

<sup>5</sup> Utell, M.J.; Effects of inhaled acid aerosols on lung mechanics: Na analysis humanexposure studies; Environmental Health Perspectives, 63,39 (1985).

de catalisadores para a reação. O material particulado resultante da queima de óleo contém na sua superfície 20 vezes mais sulfatos e 10 vezes mais ácido sulfúrico livre do que no material particulado lançado na queima de carvão. Medidas mostram que a oxidação do  $\text{SO}_2$  em sulfatos ocorre basicamente na superfície do material particulado submicrônico, que possui uma área por peso muito maior do que a das partículas micrônicas. A oxidação é mais intensa na presença de vanádio e esta combinação de partículas submicrônicas e vanádio é encontrada principalmente nas centrais termoeletricas operadas a óleo.

Detectou-se, experimentalmente, que o teor de ácido sulfúrico e demais sulfatos primários numa pluma proveniente da queima de óleo está diretamente ligado à presença de catalisadores e ao excesso de  $\text{O}_2$  na combustão. Eles mostraram que, diminuindo o teor de  $\text{O}_2$ , reduz-se consideravelmente a formação de ácido sulfúrico. (Em contrapartida, o teor de material particulado na pluma aumenta.)

### 5) Sulfatos secundários

Experimentos e medições realizados nos últimos anos mostram que a formação de sulfatos secundários por oxidação do  $\text{SO}_2$  na atmosfera deve-se à presença de catalisadores e, principalmente, de oxidantes fotoquímicos. A velocidade de oxidação do  $\text{SO}_2$  é bastante acelerada durante os dias de intensa insolação, no verão, quando os processos fotoquímicos são mais intensos. Durante o inverno e nas primeiras horas da manhã no verão, a razão de oxidação é inferior a 0,5% do  $\text{SO}_2$  por hora. Nos dias ensolarados de verão, esta razão passa para 1-3%/hora, devido provavelmente aos radicais livres produzidos fotoquimicamente nas reações entre  $\text{NO}_x$  e hidrocarbonetos lançados por chaminés. As reações fotoquímicas com  $\text{NO}_x$  podem levar a altas concentrações de ozônio,  $\text{O}_3$ , aumentando a razão de formação de sulfatos.

### 6) Impacto sobre a saúde humana

É preciso esclarecer que não há na literatura uma unanimidade de opiniões a respeito dos efeitos do  $\text{SO}_2$  sobre a saúde humana. Isto porque, enquanto plantas podem ser submetidas a altas concentrações de poluentes, os efeitos sobre o homem só podem ser constatados de maneira indireta: por estudos epidemiológicos ou por experimentos com animais.

O efeito aparente do  $\text{SO}_2$  sobre o homem e os animais é o aumento na frequência da respiração, aumento da resistência ao fluxo de ar, diminuição do volume de ar aspirado, irritação aguda do trato respiratório superior e da conjuntiva e agravamento dos casos de asma e problemas cardiopulmonares.

Concentrações de  $\text{SO}_2$  iguais às encontradas nas grandes cidades por si só causariam pouco efeito sobre a respiração. Isto faz com que vários pesquisadores pensem que o  $\text{SO}_2$  não é o poluente que deveria ser monitorado. Ou seja, que o  $\text{SO}_2$  é apenas uma manifestação de problemas causados por outro(s) poluente(s).

Estudos têm mostrado que os efeitos respiratórios são produzidos pelos sulfatos e pelo ácido sulfúrico. Estes dois compostos produzem inflamações das vias respiratórias e diminuem a velocidade de remoção do muco acumulado no sistema respiratório.

De observações em locais contaminados com  $\text{SO}_2$  conclui-se que<sup>6</sup>:

1. Os sulfatos são muito mais tóxicos que o  $\text{SO}_2$ . A oxidação do  $\text{SO}_2$  para sulfatos em laboratório aumentou sua toxidez em 20 vezes.

2. Nem todos os sulfatos são irritantes no mesmo grau: se o tamanho da partícula for o mesmo, em ordem decrescente de toxidez temos: ácido sulfúrico, sulfato de amônia e zinco, sulfato de zinco e sulfato de amônia.

3. O tamanho das partículas de sulfato é o fator crítico na determinação do grau de irritação. Por exemplo, para partículas de 0,8 microns (milionésimo do metro) o ácido sulfúrico é duas vezes mais tóxico que o sulfato de amônia e zinco.

Este último, no entanto, sob a forma de partículas de 0,3 microns é três vezes mais tóxico do que o ácido sulfúrico na forma de spray de 0,8 microns. Existem duas hipóteses para explicar o efeito do  $\text{SO}_2$  (ou seus derivados) sobre a resistência ao fluxo pulmonar. O primeiro mecanismo é a liberação de substâncias bronco-constritivas por reação química no trato inferior. Experimentos in vivo e in vitro mostraram que, na presença de ácido sulfúrico e de sulfatos, o  $\text{SO}_2$  provoca a liberação de histamina no trato respiratório inferior. O segundo mecanismo proposto é o do estímulo de receptores no trato

<sup>6</sup> Donagi, A.E. et al.; Epidemiological monitoring near a coal-fired Power Plant in Israel; JAPCA, 33,986 (1983).

respiratório superior. O  $\text{SO}_2$  absorvido nesta região, que é anatomicamente isolada do trato inferior, irá produzir um aumento na resistência do fluxo no pulmão por estimulação do nervo vago. Este efeito pode ser cessado interrompendo-se ou bloqueando-se este nervo.

### 7) Estudos epidemiológicos

Os conhecimentos sobre as reais causas que produziram grande número de mortes nos episódios de poluição do ar são baseados em especulações levantadas a posteriori, pois durante os episódios foram medidos apenas  $\text{SO}_2$  e MP<sup>7</sup>.

Um fato significativo foi a detecção de altas concentrações de sulfato de zinco e sulfato de amônia e zinco nos filtros de aparelhos de ar-condicionado que operavam durante o episódio de Donora, Pennsylvania, em 1948. Neste episódio 6.000 pessoas tiveram de ser atendidas devido a problemas respiratórios, sendo que 20 morreram.

No caso de episódios, a combinação de  $\text{SO}_2$  e MP em níveis acima de  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  cada um durante 24 horas tem sido o fator que determina o aparecimento de excesso de mortalidade e admissão em hospitais. Estudos epidemiológicos mostram que estes níveis são  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (24h) para MP e  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (24h) para  $\text{SO}_2$ .

A Organização Mundial da Saúde corrobora estes números e cita dados que mostram o aparecimento de sintomas respiratórios para concentrações médias anuais de  $\text{SO}_2$  e MP acima de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

O papel do material particulado e dos catalisadores na transformação do  $\text{SO}_2$  em sulfatos tóxicos é demonstrado dramaticamente pelo seguinte exemplo. Em dezembro de 1952 um aumento considerável nas concentrações diárias de  $\text{SO}_2$  e material particulado ( $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) em Londres causou a morte de 4.000 pessoas em uma semana. Em 1962 a concentração de  $\text{SO}_2$  atingiu novamente o valor de 1952, mas a de particulados foi bastante mais baixa ( $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Como resultado morreram 700 pessoas em uma semana. Hoje em dia, com os níveis de material particulado bastante mais reduzidos devido a controles rígidos sobre as fontes, os picos de  $\text{SO}_2$  similares ao acontecido em 1952 não estão mais associados a excessos de mortalidade na capital inglesa.

Estudos epidemiológicos realizados com crianças mostram que há uma clara correlação entre infecções no trato respiratório inferior e níveis de poluição. Diversas observações mostram que efeitos adversos são observados quando a concentração média anual de  $\text{SO}_2$  ultrapassa  $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Outros estudos concluem que altas concentrações de  $\text{SO}_2$  e sulfatos produzem efeitos em crianças principalmente após no mínimo três anos de exposição à atmosfera poluída. Em geral os estudos mostram que a relação entre poluição e saúde envolve um grande número de fatores tais como existência simultânea de mais de um poluente, condições sócio-econômicas e hábitos de fumo, sendo pois muito difícil determinar com certeza a influência de um poluente qualquer.

Estudos epidemiológicos em New York concluíram que, embora altos níveis de  $\text{SO}_2$  e MP estejam associados a índices elevados de mortalidade e morbidez, não há relação entre curtos períodos de poluição por  $\text{SO}_2$  e ataques de asma.

Nos episódios de poluição do ar, as crianças e os idosos são os mais afetados, principalmente os que já sofrem de problemas cardíacos ou respiratórios (bronquite). Durante as altas concentrações de poluentes, geralmente a morte de doentes cardíacos dá-se em maior número nos primeiros dias, caindo drasticamente nos dias posteriores. Nos doentes do trato respiratório, as mortes só ocorrem a partir do segundo ou terceiro dia, aumentando com o tempo.

É interessante notar que os problemas de ataque de asma não estão correlacionados com a concentração de  $\text{SO}_2$  e sim com a concentração de sulfatos. A mudança de temperatura provoca mais ataques de asma do que altas concentrações de  $\text{SO}_2$  isolado ( $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de ar). No entanto, bastam  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de sulfatos durante 24 horas para que se inicie uma epidemia de asma. Por esse motivo há uma tendência nos EUA para criar um padrão de qualidade do ar para sulfatos menores que 10 microns.

### 8) Impacto sobre bens materiais

O dióxido de enxofre presente na atmosfera é a maior causa de corrosão de metais expostos ao ar. Experiências em laboratórios demonstram claramente uma relação linear entre a quantidade de metal corroído num dado período de tempo e a concentração de  $\text{SO}_2$ . Mesmo metais não-ferrosos como o

<sup>7</sup> Schenker, M.B. et al.; Health effects of air pollution ...; Archives of Environmental Health, 38,325 (1983).

zinco, que é usado na galvanoplastia para proteger o ferro, são atacados pelo  $\text{SO}_2$ , embora em menor escala<sup>8,9</sup>.

Sobre cabos elétricos de cobre o  $\text{SO}_2$  provoca o aparecimento de uma camada superficial de sulfato de cobre, que é extremamente resistente à penetração de poluentes no seu interior<sup>10</sup>. Esta camada protetora, no entanto, é prejudicial quando aparece sobre contatos elétricos, que têm sua resistividade alterada. (A camada esverdeada que aparece nos fios na região costeira é devida não ao sulfato de cobre mas ao cloreto de cobre. Um grande problema que as indústrias sofrem em regiões com alta concentração de  $\text{SO}_2$  é o aparecimento de finas camadas de sulfatos sobre contatos de computadores e outros aparelhos eletrônicos, prejudicando seu funcionamento. Desta forma, contatos sensíveis que operam aparelhos importantes através de microcorrentes devem ser construídos de ouro, platina ou paládio.

Pinturas em superfícies (carros, casas) têm sido bastante danificadas pelo  $\text{SO}_2$ . Em regiões poluídas, é bastante mais freqüente a necessidade de repintar superfícies, pois o  $\text{SO}_2$  ataca tintas residenciais, principalmente as que contêm silicatos de alumínio e/ou magnésio ou carbonato de cálcio. As tintas à base de nitrocelulose/acrílico não são atacadas.

A fadiga de metais devido ao  $\text{SO}_2$  foi observada pelas empresas de telefonia do Japão quando, após altas concentrações do poluente em 1968, as molas dos relés, construídas com aço ou níquel-prata, sofreram quebras em número considerável.

Cores em tecidos de lã não são atacadas pelo  $\text{SO}_2$ , que apenas afeta a resistência da fibra. Muitas fibras têxteis são enfraquecidas pelo  $\text{SO}_2$ . Danos a meias de nylon têm sido noticiados em todo o mundo.

Construções e obras de arte também são atacadas pelo  $\text{SO}_2$  e pelo ácido sulfúrico que dele resulta. O Obelisco de Cleópatra, gigantesco monumento transferido de Alexandria para Londres, sofreu mais deterioração nos 80 anos na poluída capital inglesa do que nos mais de 3.000 anos em que esteve no ar (então) limpo do Egito.

O efeito altamente nocivo do  $\text{SO}_2$  sobre o couro natural já é conhecido desde 1843, quando Faraday mostrou ser ele o responsável pela deterioração de assentos de cadeiras num clube de Londres.

## 9) Impacto sobre a vegetação

Os primeiros estudos sobre efeitos de poluentes na vegetação referiam-se ao  $\text{SO}_2$ . Isto porque florestas ao redor de usinas de beneficiamento de cobre eram completamente devastadas num raio de vários quilômetros, devido ao dióxido de enxofre<sup>11,12,13</sup>.

Os efeitos deste poluente sobre as plantas podem ser visíveis ou sutis. Os visíveis aparecem na forma de pigmentação anômala, mudanças morfológicas ou necrose. O embranquecimento das folhas é causado pelo  $\text{SO}_2$ , sendo um fenômeno facilmente observado na alfafa<sup>14</sup>.

Os efeitos sutis são mais difíceis de serem detectados. Problemas como menor crescimento e produção só podem ser detectados se houver plantas-controle que cresçam na mesma região mas protegidas da poluição<sup>15</sup>.

Em pequenas concentrações, o  $\text{SO}_2$  pode estimular o crescimento das plantas (provavelmente devido à pobreza de S no solo).

<sup>8,9</sup> Lodge, J.P.; Materials damage by environmental pollutants: Data requirements; The American Statistician, 39,412 (1985).

Cheng, R.J. & R. Castillo; A study of marble deterioration at City Hall, Schenectady, NY. JAPCA, 34,15 (1984).

<sup>10</sup> Silvers, A. & C. Hakkarinen; Materials damage from air pollutants; EPRI Journal, September 1987, p58.

<sup>11,12,13</sup> Goldstein, R.; Response of vegetation to interacting stresses. EPRI Journal, October 1987, p36.

Prinz, I3.; Effects of air pollution on forests; JAPCA, 3913 (1985).

Chevone, B.I. et al; Direct effects of atmosphere sulfate deposition on vegetation; JAPCA, 36,813 (1986).

<sup>14</sup> Jacobson, J.S. & R.E. Showman; Field survey of vegetation during a generation in the Ohio River valley; JAPCA, 34,48 (1984).

<sup>15</sup> Effects of  $\text{SO}_2$  and  $\text{O}_3$  on crops; EPRI Journal, April 1987, p50.

O  $\text{SO}_2$  influi também na reprodução de vegetais. Concentrações de 0,3 ppm durante uma hora inibem a polinização em pereiras. Efeito semelhante ocorre com pinheiros. Efeitos sobre a soja também são reportados.

Em relação a culturas próprias da região, a soja e o trigo são sensíveis ao  $\text{SO}_2$ , enquanto que o milho, o girassol, o algodão e o tabaco são beneficiados por concentrações de  $\text{SO}_2$  da ordem das que aparecem em torno das termoeletricas. Este último fenômeno deve-se à grande necessidade de enxofre dessas culturas; para as quais o poluente é um fertilizante.

Quanto a cinturões verdes que possam ser instalados na região, é importante evitar o uso das diversas espécies de pinus, pois essas são as árvores mais sensíveis ao  $\text{SO}_2$ .

O uso de plantas sensíveis ao  $\text{SO}_2$  como monitores é generalizado nos EUA e na Europa, utilizando-se principalmente alface e flores ornamentais.

Experiências realizadas em laboratórios mostram que plantas sensíveis ao  $\text{SO}_2$  sofrem um decréscimo de 5% no seu crescimento se elas forem expostas durante uma hora a uma concentração do poluente de no mínimo 0,5 a 2,0 ppm. Este dado (0,5 ppm - 1 h) é utilizado para estabelecer níveis máximos do poluente permitidos no ar. É observado também que quanto maior o tempo de exposição menor é a concentração a que a planta pode ser submetida sem graves danos. É amplamente aceito o conceito de que abaixo de 0,2 ppm de  $\text{SO}_2$  (572  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a maior parte das plantas não sofre danos mesmo após longa exposição. No entanto, no mesmo artigo é citado um trabalho no qual é sugerido que este nível mínimo deve estar por volta de 0,02 ppm, que é o máximo suportado por alguns musgos.

A sensibilidade das plantas ao  $\text{SO}_2$  depende das condições climatológicas, do solo e da idade das plantas entre outros fatores.

#### **10) Impacto sobre animais**

Concentrações de  $\text{SO}_2$  cem vezes superiores às concentrações ambientais são necessárias para matar pequenos animais. Concentrações cinquenta vezes superiores às ambientais produzem pouco efeito sobre animais de grande porte. O gado possui alta resistência ao  $\text{SO}_2$ . Os sulfatos, no entanto, podem causar problemas, principalmente ao gado gordo cujas reservas respiratórias ficam diminuídas devido à gordura.

#### **11) Impacto sobre a visibilidade**

A visibilidade atmosférica também é afetada por emissões de  $\text{SO}_2$ , embora o problema aqui seja bastante mais complicado. A gradual oxidação do  $\text{SO}_2$  faz com que aumente a concentração de sulfatos na atmosfera. Aerossóis contendo sulfatos têm dimensão da ordem de 0,1 - 1,0 microns. Como a luz visível tem comprimento de onda com estas dimensões, a luz é fortemente espalhada pelos sulfatos, diminuindo a visibilidade. (Os nitratos produzem o mesmo efeito.) A razão de transformação do  $\text{SO}_2$  para sulfatos é bastante variável, mas estimativas podem ser feitas tomando-se o valor de 0,2 a 1,5%/hora. Isto faz com que a bruma numa região seja causada por  $\text{SO}_2$  emitido a centenas ou milhares de quilômetros do local, tornando bastante difícil a identificação das fontes poluidoras.

Convém lembrar que o poder espalhador dos aerossóis está relacionado com a umidade do ar e sua composição química.

Observações realizadas na Califórnia mostram que a atividade humana contribui primariamente para a formação de partículas submicrônicas, entre 0,1 e 1,0 microns. Partículas maiores de 10 microns são, na sua maioria, de origem natural. Este fato é muito importante, pois partículas menores que 1 micron são extremamente eficientes no espalhamento da luz e os sulfatos são, na sua maioria, partículas menores que 1 micron. Estima-se que em Los Angeles os sulfatos são responsáveis por mais de 50% do processo de espalhamento da luz na atmosfera, vindo daí a pouca visibilidade na região. Em Los Angeles há uma relação direta entre a presença de aerossóis no ar, principalmente sulfatos e nitratos, e a degradação da visibilidade. Foi constatada também uma relação entre a concentração máxima de ozônio durante o dia e o teor de sulfatos responsáveis pela perda de visibilidade. Esta correlação é mais acentuada em dias com umidade relativa do ar superior a 70% e mostra o caráter fotoquímico da geração de sulfatos. Em Detroit, os sulfatos são responsáveis por 65% da perda da visibilidade no verão.

Numa pesquisa da Organização Mundial da Saúde, foi observada uma perda de visibilidade para concentrações de  $\text{SO}_2$  e MP acima de 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , umidade do ar acima de 50% e alta temperatura.

Os efeitos óticos devidos ao  $\text{SO}_2$  e aos sulfatos não devem ser confundidos com alterações na atmosfera devidas a outros poluentes. O espalhamento da luz provocado pelos sulfatos reduz a visibilidade, que é a capacidade de distinguirmos objetos de cores diferentes situados a grande distância. O efeito é diferente do efeito do terpeno emitido pelas coníferas, que, ao reagir com o ozônio, forma partículas de 0,1 microm e provoca uma névoa azulada. A cor alaranjada do céu, por outro lado, é provocada pelos óxidos de nitrogênio.

Como as termoeletricas são as maiores fontes de sulfatos na atmosfera, é recomendado que, antes da implantação de qualquer nova usina, seja analisada a visibilidade da região a ser afetada. Esta última pode ser medida por fotografias, contraste, telefotometria ou transmissometria. Estas medidas servirão como proteção às usinas em projeto, pois efeitos atmosféricos negativos já podem estar ocorrendo devido a outras fontes de poluição situadas a centenas de quilômetros da usina.

## 12) Chuvas ácidas

Como a chuva é um dos mais eficientes mecanismos de limpeza da atmosfera e o  $\text{SO}_2$  é solúvel em água, tem-se observado em zonas industriais um sensível decréscimo no pH das chuvas. Este fenômeno foi observado na costa nordeste dos EUA, no sul da Noruega e na Holanda<sup>16</sup>. Neste último país, foram observadas precipitações com pH inferior a 4,0, tendo sido observada uma forte correlação entre a emissão anual de  $\text{SO}_2$  na Holanda e o pH das chuvas. No caso da Noruega, a origem do  $\text{SO}_2$  parece ser a Inglaterra e a Alemanha, tratando-se então de um caso de poluição internacional. Existem também fortes evidências de que os sulfatos servem de núcleos de condensação, provocando um sensível aumento no nível de precipitação de uma região<sup>17</sup>.

A chuva ácida provoca danos tanto pela mortandade de seres vivos sensíveis a meios ácidos (sapos e peixes, por exemplo), quanto pelos efeitos corrosivos sobre bens materiais. Centenas de lagos no nordeste dos EUA e na Noruega estão praticamente mortos devido à acidez da chuva e este fenômeno está se alastrando rapidamente. Ao medir a acidez da chuva no Cabo Canaveral para determinar o impacto do lançamento de foguetes sobre o pH das precipitações, descobriu-se que o pH da chuva na região já era da ordem de 4,5 quando o normal seria 5,5.

Os efeitos da chuva ácida sobre as plantas podem ser visíveis ou sutis<sup>18</sup>. Os visíveis aparecem na forma de pigmentação anômala, mudanças morfológicas ou necrose. O embranquecimento das folhas é causado pelo  $\text{SO}_2$ , sendo um fenômeno facilmente observado na alfafa.

Os efeitos sutis são mais difíceis de serem detectados. Problemas como menor crescimento e produção só podem ser detectados se houver plantas-controle que cresçam na mesma região mas protegidas da poluição.

Alguns efeitos das chuvas ácidas são prontamente verificados em campos. Ao cair sobre as folhas a chuva provoca, inicialmente, uma mancha bronzeada visível em poucas horas, ocorrendo no dia seguinte pontos de necrose bifaciais.

A lesão foliar por chuva ácida caracteriza-se pelo embranquecimento das folhas. Isto afeta o aspecto visual do vegetal, diminuindo seu valor de venda.

Entre as culturas sensíveis à chuva ácida temos a alfafa, o centeio, a aveia, a soja e o trigo. Entre as flores temos a áster, a violeta e a zínia. Entre as árvores temos a macieira, o olmo, a pêra e, principalmente, os pinheiros, maiores vítimas da chuva ácida. Das plantas de jardim são sensíveis à chuva ácida o feijão, o brócoli, a cenoura, a alface, o espinafre, o pepino e o tomate.

Alguns efeitos das chuvas ácidas são sutis e só aparecem após vários anos. O principal efeito é a redução da taxa de crescimento das florestas. O desenvolvimento das florestas nativas na Escandinávia e no noroeste dos EUA sofreu grande declínio entre 1950 e 1970.

A chuva ácida afeta a germinação de sementes de coníferas, afeta a disponibilidade de nitrogênio no solo, faz diminuir a respiração do solo e aumenta a lixiviação de nutrientes presentes no solo original.

<sup>16</sup> Alcamo, J. et al.; Acidification in Europe: A simulation Model for Evaluating Control Strategies; published by International Institute for Applied Systems Analysis, Austria (1988).

<sup>17</sup> Lefohn, A.S. & S.V. Krupa; Acidic precipitation: A technical amplification of NAPAP's finding, JAPCA, 38,766 (1988).

<sup>18</sup> Babich, H. et al.; Acid precipitation: causes and consequences; Environment, 22,6 (1980).

As concentrações de enxofre nas chuvas ácidas necessárias para reduzir o crescimento das plantas são bastante inferiores às concentrações necessárias para produzir efeitos visíveis. É possível, portanto, que os danos às folhas não sejam observados mas o crescimento seja retardado.

O mecanismo pelo qual a chuva ácida retarda o crescimento é bastante complexo. O contato direto da chuva com as folhas faz com que sejam arrastados nutrientes indispensáveis ao desenvolvimento da planta. A acidificação do solo afeta sua química e bioquímica. Metais como alumínio e manganês são lixiviados e entram em contato com as raízes, para as quais são tóxicos. O cálcio e o magnésio do solo são transformados em sulfatos insolúveis, o que restringe suas disponibilidades para as raízes.

Os efeitos mais notáveis das chuvas ácidas são sobre rios e lagos<sup>19</sup>. Lagos não poluídos contêm dissolvidos bicarbonatos de cálcio e magnésio, que funcionam como tampões contra oscilações bruscas de pH. As chuvas ácidas têm destruído a capacidade dos lagos de manter o pH constante, pois os bicarbonatos são substituídos por sulfatos, resultando numa crescente acidificação dos lagos. Cerca de 10.000 lagos suecos foram acidificados para pH abaixo de 6,0 e 5.000 lagos para pH abaixo de 5,0. O pH dos grandes lagos suecos já diminuiu de 1,8 unidades desde 1930, o que se refletiu na população de peixes.

Na América do Norte<sup>20</sup> as primeiras observações sobre acidificação de lagos correu em Sudbury, Canadá, na década de 60. Ao ser ampliada uma beneficiadora de metais, os peixes de um lago a 65 km desapareceram completamente, ao mesmo tempo em que o pH do lago caiu para menos de 4,0. Na década de 70, a chaminé foi elevada para 400m de altura, solucionando o problema. De 150 lagos da região, 33 foram classificados de criticamente ácidos (pH menor que 4,5) e 7 como em perigo (pH entre 4,5 e 5,5). Nas montanhas próximas a Nova York, ma pesquisa recente mostrou que mais de 50% dos lagos acima de 600m têm pH abaixo de 5,0 e não contêm peixes. O desaparecimento gradual dos peixes é atribuído ao efeito do ácido sobre os ovos, que requerem meio neutro para se desenvolver, e à mudança no conteúdo de sal na água. Os peixes exigem um conteúdo mínimo de sal para se desenvolverem e o ácido retira estes sais da água.

Outras espécies também são alteradas pelas chuvas ácidas. Bactérias, algas invertebrados também são reduzidos, interferindo na decomposição da matéria orgânica depositada nos fundos dos lagos e no ciclo formador de nutrientes. Sem em estes nutrientes não há vida abundante no meio aquático.

As chuvas ácidas também provocam a dissolução de elementos tóxicos e contrações elevadas de Al, Mn, Zn, Cd, Pb, Cu e Ni têm sido encontradas em lagos acidificados. Estes metais produzem danos aos peixes, por vezes levando-os à morte.

É preciso deixar claro que há grande divergência na comunidade científica sobre o verdadeiro efeito das chuvas ácidas sobre o meio-ambiente. Assim sendo, fatos citados acima são passíveis de mudanças nas suas interpretações, na medida em que novos estudos são divulgados.

### 13) Conclusões

Do estudo acima vemos que as emissões de dióxido de enxofre na queima de combustíveis fósseis pode ser uma fonte importante de impacto ambiental sobre meio-ambiente. Várias soluções foram encontradas para minimizar este impacto, entre elas maior geração de hidroeletricidade, busca de carvões com menores teores de enxofre, instalação de filtros controle meteorológico. Uma análise mais profunda destas alternativas aparecerá em outro artigo desta série.

<sup>19</sup> Newman, J.R. & R.K. Schreiber; Effects of acidic deposition and other energy emissions on wildlife; Veterinary and Human Toxicology, 27,394 (1985).

<sup>20</sup> Wright ft.F.; Acidification of lakes in the eastern US and southern Norway: a comparison; Environmental Science & Technology, 22,178 (1988).

**Abstract**

The environmental impact of the emissions of  $\text{SO}_2$  by coal-fired power plants is reviewed. This study is necessary since the Brazilian Government plans to build until 2001, twelve new thermoelectrics power stations, in addition to the pressure from other countries and international organizations to stop the construction of new hydroelectric power plants in the Amazonic Forest area.