

Título do capítulo CAPÍTULO 2
POLUIÇÃO DO AR

Autores (as) João Baptista Galvão Filho

DOI

Título do livro MEIO AMBIENTE: ASPECTOS TÉCNICOS E
ECONÔMICOS

Editores (as) Sergio Margulis

Volume

Série

Cidade

Editora Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea)

Ano 1990

Edição 1ª

ISBN

DOI

© Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – **ipea** 1990

As publicações do Ipea estão disponíveis para *download* gratuito nos formatos PDF (todas) e EPUB (livros e periódicos). Acesse: <http://repositorio.ipea.gov.br>

As opiniões emitidas nesta publicação são de exclusiva e inteira responsabilidade dos autores, não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada ou do Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão.

É permitida a reprodução deste texto e dos dados nele contidos, desde que citada a fonte. Reproduções para fins comerciais são proibidas.

*João Baptista Galvão Filho**

A Terra é coberta por uma camada de ar de aproximadamente 800 quilômetros de espessura. A força da gravidade atrai cerca de seis quatrilhões de toneladas de ar para a Terra. Aproximadamente metade deste ar se concentra nos primeiros seis quilômetros do espaço terrestre e mais de 99% de todo o ar se localiza numa faixa de 40 quilômetros. Como se pode perceber, os restantes 760 quilômetros são formados por uma atmosfera extremamente rarefeita.

O ar é invisível, sem odor e sem gosto. É uma mistura de nitrogênio (78,1%), oxigênio (20,9%), variando as quantidades de vapor d'água, uma pequena quantidade de dióxido de carbono (0,03%) e outros gases residuais. Na primeira camada deste grande cobertor de ar vive o homem. O ser humano é dependente desse ar e cada indivíduo respira cerca de 22 mil vezes por dia. Se esse cobertor de ar fosse removido, o homem não sobreviveria mais do que cinco minutos.

Entretanto, o homem tem usado este recurso precioso para descartar grande parte dos resíduos poluidores de suas atividades. Se esses contaminantes têm efeitos adversos, tais como deterioração da saúde humana, redução da visibilidade, danos às plantas e materiais, eles são denominados poluentes. A poluição do ar é definida como a presença de um ou mais contaminantes na natureza, em quantidades que podem

* Engenheiro químico (FEI), Sanitarista (USP), Mestre em Ciências de Engenharia Ambiental (Universidade de Cincinnati, EUA), diretor da ECP – Engenharia de Controle da Poluição Ltda.

causar dano ao homem, animais, plantas ou propriedades, ou interferir negativamente no bem-estar das pessoas, na vida das plantas e animais, no meio físico ou na propriedade. Outra definição conceitual é: poluição do ar é a presença ou lançamento no ar de matéria e energia que podem vir a danificar os usos desse recurso natural, previamente definidos pela comunidade que dele se vale. Quando o homem polui sua atmosfera, ele pode causar um dano maior a outros ambientes que não aquele imediato. Alguns poluentes podem percorrer centenas de quilômetros a partir de sua emissão original e interagir com outros poluentes nesse caminho. A atmosfera não é capaz de efetuar uma dispersão imediata dos poluentes nas proximidades de seu lançamento. Somente depois de decorrido algum tempo, e em função das condições meteorológicas, é que estarão estes mais ou menos distribuídos uniformemente na atmosfera.

2.1 – A Meteorologia e sua Relação com a Poluição do Ar

No começo da história do homem, a natureza podia tomar conta das suas próprias poluições naturais, tal como a erupção de um vulcão ou a queima de uma floresta. Havia ventos suficientes, chuvas e correntes de ar para dispersar estes poluentes. Entretanto, como o homem aumentou o volume dos seus poluentes, esta autodepuração natural do ar não se pôde manter, e a poluição aumentou, atingindo os níveis atuais.

Vários fatores devem ser levados em conta na determinação do atual estágio do problema da poluição do ar: tipos e quantidades de poluentes produzidos pelas atividades comunitárias; topografia; condições do tempo, como velocidade e direção do vento, luz solar, precipitação, nuvens, neblina, umidade relativa, temperatura, aumento ou diminuição da temperatura do ar com o aumento da altitude, bem como o nível de poluição existente nas massas de ar que chegam ao local de estudo. Num mesmo local, o ar pode parecer um dia poluído e outro dia limpo, embora esteja ocorrendo emissão da mesma quantidade de poluentes. Condições de ventos ou precipitação de chuva podem ajudar a dispersão dos poluentes. Entretanto, ventos fracos ou poluições estáveis podem permitir, mesmo com quantidades pequenas de poluentes, o seu acúmulo na atmosfera.

Tempo regular (sistema de alta pressão) e tempestades (sistema de baixa pressão) usualmente movem-se num padrão de comportamento de oeste para leste, com velocidade de cerca de 30 a 45 quilômetros por

hora. A essas velocidades, a maior parte dos poluentes do ar serão diluídos e levados para longe. Entretanto, quando o sistema de alta pressão torna-se estacionário, há muito pouco vento para afastar os poluentes.

Os poluentes aumentam quando ocorre uma inversão térmica. Normalmente, a temperatura do ar decresce com o aumento da altitude. Entretanto, durante uma inversão térmica, a temperatura do ar aumenta com a altitude. Os poluentes emitidos em condições normais são mais quentes e menos densos que o ar a sua volta. Como resultado, eles sobem e são dispersados. Em uma situação de inversão, os poluentes sobem somente até o ponto em que encontrem um ar mais quente do que eles. Quando essa camada de ar quente está a baixa altitude, os poluentes se concentram próximo do nível do solo, porque não podem penetrar na camada de ar quente.

Existe um tipo de inversão térmica facilmente reconhecível, chamada inversão noturna, que pode ser vista nas manhãs claras e calmas. Este tipo de inversão é formada durante a noite quando o solo perde calor mais rapidamente do que o ar. O solo torna-se mais frio que o ar acima dele e o resfria. Nas manhãs em que essa inversão ocorre, é comum a existência de orvalho, geadas ou neblina. Nesses dias, se observarmos a fumaça que sai de uma chaminé ou do escapamento de um carro, verificaremos que ela demora a se dispersar. Esta situação usualmente desaparece pelo meio da manhã, em geral depois das 10 horas, quando o Sol aquece a Terra e o calor destrói essa inversão.

A topografia pode ter uma influência importante no vento e na dispersão ou acumulação dos poluentes. Consideremos uma cidade em um vale. O ar frio que é formado nas partes altas, à noite, flui para o fundo do vale pela manhã. Como resultado, o ar próximo do chão estará mais frio que o ar cima dele. Nestes casos, temos a inversão térmica. Existem alguns formatos de topografia que podem ter um efeito variável na poluição do ar. O topo das montanhas geralmente tem melhores condições de vento, e nos locais próximos do mar geralmente formam-se brisas marinhas. Os ventos fortes nos topos das montanhas produzem condições que dispersam os poluentes enquanto a natureza complexa da brisa marinha pode até resultar em um aumento da concentração dos poluentes.

2.2 – Os Poluentes do Ar

Os poluentes do ar gerados pelo homem são emitidos diretamente na atmosfera (poluentes primários) ou são formados na atmosfera por

reações químicas envolvendo poluentes primários (poluentes secundários). Durante sua transformação química em poluente secundário, o composto químico pode mudar de estado inofensivo para um outro que pode ser danoso em altas concentrações, como, por exemplo, de óxido para dióxido de nitrogênio. Os poluentes do ar também são produzidos pela natureza. Exemplo: pólenes, esporos, bactérias, poeiras do chão, sal marinho, gases e material sólido resultantes de erupção vulcânica e fumaça de queima de florestas. Os poluentes do ar são usualmente divididos em dois grupos maiores: *particulados* e *gases*. Recentemente, uma terceira forma de poluição, em estado líquido, tem sido reconhecida, a *chuva ácida*.

Os *particulados* são suspensões, existentes no ar, de substâncias fixas, sólidas e/ou líquidas. Existem dois termos para designá-los: partículas e aerossóis. As partículas referem-se somente às substâncias sólidas. Os aerossóis podem ser tanto líquidos como substâncias sólidas suspensas no ar. Alguns exemplos de *particulados* são: fuligem, partículas do solo, gotas oleaginosas, poeiras, névoas ácidas, fumaça, fumos e neblina. Os *particulados* podem ser produzidos em decorrência de queima incompleta, moagem, corte, perfuração, etc.

Na atmosfera, os *particulados* ocorrem com vários tamanhos e formas. Usualmente são classificados em *particulados finos* – aqueles com diâmetro menor que 2,5 μ (que é 25 mil vezes menor do que um centímetro) – e *particulados grosseiros*: os que são maiores do que 2,5 μ . Os *particulados finos* são mais importantes porque podem ser inalados pelo homem e por animais, entrando nos pulmões. Em trabalhos de engenharia ambiental, consideram-se *particulados finos* aqueles abaixo de 10 μ . Também os *particulados finos* (0,3–1,0 μ) são responsáveis pela redução da visibilidade. Os *particulados finos* são formados primariamente pela combustão incompleta e/ou reações químicas de poluentes primários na atmosfera. São leves em peso e podem persistir na atmosfera por dias.

Os *particulados grosseiros* são formados primariamente pela suspensão de poeiras do solo, processos de moagem e brisa marinha. Causam menos problemas que os *particulados finos*, uma vez que a gravidade faz sua deposição no solo em poucas horas. Entretanto, aqueles *particulados grosseiros* que se encontram entre 2,5 a 15 μ de diâmetro podem ser importantes do ponto de vista da saúde das pessoas com problemas respiratórios e que sempre respiram pela boca. As pessoas que respiram normalmente pelo nariz não são prejudicadas por esses *particulados*, que são bloqueados na passagem nasal. Os *particulados* reduzem a visibilidade e a absorção e a dispersão da luz. É o caso do nevoeiro em muitas áreas urbanas, que pode causar redução de luz do

Sol. Também a dispersão de luz devida aos particulados pode produzir um céu avermelhado que, algumas vezes, é visto no nascer do Sol, ou no crepúsculo.

O segundo grupo de poluentes do ar é composto por *gases*. Embora apenas uma percentagem relativamente pequena de gases na atmosfera seja poluente, eles exercem um papel importante porque são perigosos e possuem efeitos desagradáveis. Alguns poluentes gasosos são liberados na atmosfera por meio de processo de combustão. Outros são liberados por processo de vaporização (mudança de um líquido para o estado gasoso) ou são formados por reações químicas na atmosfera. Os principais poluentes gasosos na atmosfera podem ser categorizados como gases que contêm *carbono*, *enxofre*, *nitrogênio* e *ozônio*.

Os gases que contêm *carbono* são os poluentes do tipo monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos, hidrocarbonetos oxigenados. O monóxido de carbono é tóxico, sem cor, sem odor e é o resultado da combustão incompleta de combustíveis. Os hidrocarbonetos são uma classe de compostos formados pela combustão incompleta e pela evaporação da gasolina, óleo combustível e solvente. São compostos de carbono e hidrogênio em várias proporções. Os hidrocarbonetos oxigenados são compostos que contêm oxigênio em adição ao carbono e ao hidrogênio. Alguns deles são formados pela combustão ao passo que outros são poluentes secundários, formados de reações químicas entre hidrocarbonetos e oxigênio na presença da luz solar. Muitos dos hidrocarbonetos e hidrocarbonetos oxigenados são carcinogênicos. Um exemplo de hidrocarboneto carcinogênico é o benzeno, existente em refinarias e petroquímicas.

O principal poluente que contêm *enxofre* é o dióxido de enxofre (SO₂). Quando os combustíveis que contêm enxofre são queimados, o enxofre tira o oxigênio do ar e produz dióxido de enxofre, o qual, em altas concentrações, é um gás irritante. O dióxido de enxofre reage com os materiais na atmosfera para formar partículas de ácido sulfúrico e partículas de sais de sulfato. Perigoso, o ácido sulfúrico é um poluente altamente corrosivo. É comum, em períodos de estagnação do ar, a formação de dióxido de enxofre e ácido sulfúrico em altas concentrações, produzindo sérios problemas pulmonares. Episódios críticos, como o de Donora, na Pensilvânia (EUA), em 1948, e em Londres, na Inglaterra, em 1952, causaram altos índices de mortalidade. Na Grande São Paulo, em 1976, iniciou-se um processo que decreta estados de atenção e de alerta, prevenindo contra a ocorrência de episódios críticos semelhantes. O controle de grandes quantidades de materiais particulados, cerca de 1.500 toneladas por dia, e também do dióxido de enxofre, possibilitam uma melhoria acentuada na qualidade do ar na capital paulista.

Os outros poluentes do ar que contêm enxofre são mercaptanas (carbono, enxofre e composto de hidrogênio) e sulfeto de hidrogênio (H_2S), os quais podem ser produzidos pela decomposição de matéria orgânica. As mercaptanas e o sulfeto de hidrogênio não são poluentes comuns, mas, quando estão presentes, podem ser distinguidos pelo seu odor característico de repolho e ovo podre.

Os gases que contêm nitrogênio são poluentes que incluem o óxido nítrico e o dióxido de nitrogênio. O óxido nítrico é sem cor, relativamente não perigoso e é produto da queima de combustíveis a altas temperaturas. Mas ele pode reagir com átomos de oxigênio para formar o dióxido de nitrogênio. Essa reação ocorre especialmente na presença e em condições de formação do *smog* fotoquímico. O dióxido de nitrogênio tem o odor ligeiramente doce e cor marrom amarelada. Em concentrações altas, pode parecer marrom. As duas maiores fontes de geração de dióxido de nitrogênio são a combustão em fontes estacionárias na indústria, seja para a geração de energia, seja para o aquecimento de ambientes, e também a combustão proveniente dos veículos automotores. Os óxidos de nitrogênio são os principais componentes requeridos na formação do *smog* fotoquímico e da chuva ácida.

Além do óxido nítrico e do dióxido de nitrogênio, existem alguns compostos orgânicos hydrogenados. Um exemplo é o nitrato de peroxiacetila, comumente conhecido como PAN, que é formado de reações químicas e *smog* fotoquímico. O PAN é um fitóxido, isto é, causa danos às plantas.

O *ozônio* é um gás composto de três átomos de oxigênio, enquanto o oxigênio que utilizamos para nossa respiração contém dois átomos de oxigênio. O ozônio é um gás sem cor com um característico cheiro de ar fresco, em geral percebido durante as tempestades com trovoadas. Ele ocorre na atmosfera naturalmente, mas também pode ser formado por reações químicas envolvendo os óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos, na presença de luz solar e perto da superfície da Terra. As reações químicas que envolvem a luz solar são chamadas de reações fotoquímicas.

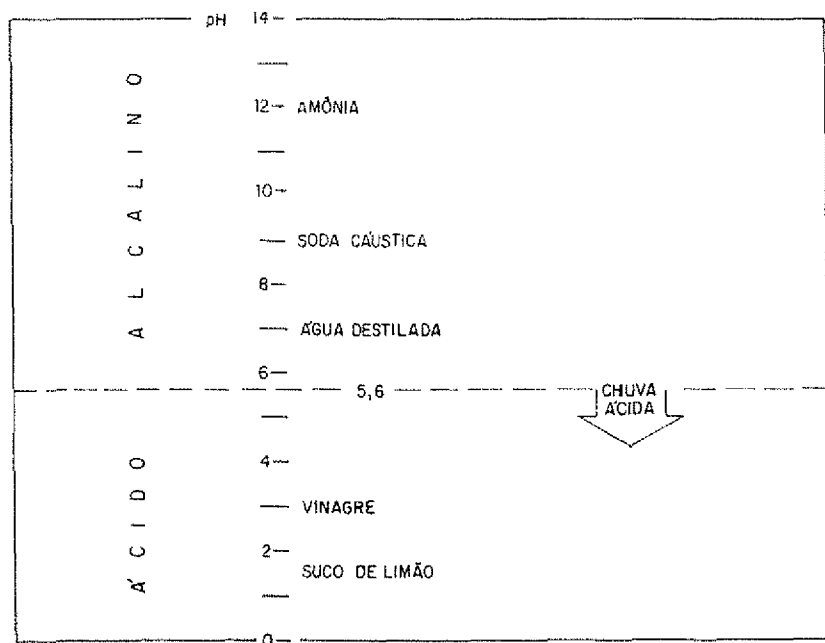
Existem três fontes naturais de ozônio. A principal delas está na estratosfera, onde a produção de ozônio ocorre com a reação fotoquímica da luz ultravioleta com o oxigênio. O ozônio estratosférico é frequentemente trazido da superfície da Terra, por correntes de ar, e pode-se constituir em uma grande quantidade de ozônio, observado ao nível do solo. O ozônio é também produzido por relâmpagos, mas essa é uma fonte menor. Há uma terceira maneira de produzir-se ozônio: reações fotoquímicas que envolvem óxido de nitrogênio e hidrocarbonetos naturalmente emitidos pela vegetação. Exemplos de hidrocarbonetos naturais são os terpenos, compostos químicos produzidos pelas árvores co-

níferas. Em média, o ozônio produzido naturalmente representa mais da metade das concentrações de ozônio medidas.

O ozônio é um constituinte muito importante do *smog* fotoquímico. Durante os meses de verão, quando a luz solar é mais forte, o ozônio produzido pelas reações fotoquímicas pode ser significativamente maior do que aquele produzido por fontes naturais.

A *chuva ácida* ou a precipitação ácida tem recentemente recebido muita atenção devido ao impacto ecológico severo que pode causar em áreas bastante extensas. Em decorrência da queima de enormes quantidades de combustíveis fósseis – tais como carvão e óleo –, são descarregadas anualmente na atmosfera milhões de toneladas de compostos de enxofre e óxido de nitrogênio. Através de uma série complexa de reações químicas, estes poluentes podem ser convertidos para ácidos, os quais podem retornar à terra como componentes de uma chuva.

A acidez é medida em unidades de pH. O símbolo pH representa a concentração de íons de hidrogênio carregados eletricamente em uma solução. A escala abaixo mostra o pH de alguns componentes.



A chuva que cai através de uma atmosfera limpa tem um pH de 5,6 a 7 unidades de pH. A chuva ácida tem um pH abaixo de 5,6. Em geral, quanto mais baixo o pH, mais poluída e mais corrosiva a chuva se tornará.

Centenas de lagos nos Estados Unidos e na Escandinávia se tornaram tão ácidos que não mais abrigam vida aquática. Mais de 90 lagos do Estado de Nova York, na região de Adirondacks, já não possuem mais peixes por causa das condições ácidas. No Brasil, uma das poucas regiões onde se mediu chuva ácida foi Cubatão (a outra foi a região carbonífera do sul de Santa Catarina). No centro-leste dos Estados Unidos, os números de pH chegam aos valores de 4 a 4,2.

A chuva ácida vem contribuindo para a destruição dos monumentos de pedras em todo o mundo. Suspeita-se de seus efeitos adversos na agricultura e nas florestas, que, todavia, não foram ainda completamente documentados.

2.3 – Fontes de Poluição do Ar

Os poluentes do ar originam-se principalmente da combustão incompleta de combustíveis fósseis, para fins de transporte, aquecimento e produção industrial. Entretanto, em adição aos processos de combustão, a poluição do ar é causada por vaporização (a mudança do líquido para o estado gasoso), atrito (operações de redução de tamanho, tais como moagem, corte, perfuração, etc.), combustão de materiais residuais, reações químicas na atmosfera envolvendo poluentes primários e redundando na formação de poluentes secundários. Em menor extensão, há fontes naturais, como polinização e vulcões.

As principais categorias de fontes de poluição do ar originárias de atividades humanas são: transporte, combustão e fontes estacionárias, processos industriais e resíduos sólidos. Estas fontes de poluição são classificadas como fontes móveis e estacionárias.

O atual sistema de transporte baseia-se na queima de combustíveis; conseqüentemente, a poluição do ar é um subproduto. Entre estas fontes de poluição contam-se automóveis, ônibus, caminhões, aviões, equipamentos de fazenda, trens, navios, etc. Por seu grande número, os automóveis são a principal fonte desta categoria. Nos Estados Unidos, desde 1963, quando o sistema de ventilação positiva do cárter foi instalado, os automóveis têm sido projetados com equipamentos de con-

trole da poluição do ar, o que proporcionou uma diminuição das emissões dos tanques de gasolina, carburadores, alívios do cárter e do cano de escapamento. Para estes controles trabalharem efetivamente, é necessário que o motor seja regulado e o carburador esteja ajustado adequadamente. De um motor regulado inadequadamente, resultarão altas emissões de monóxido de carbono e de hidrocarbonetos, além de uma baixa economia de combustível. O carburador controla a relação ar/combustível do veículo. Se a relação ar/combustível for muito alta, quantidades maiores de óxido de nitrogênio serão emitidas, enquanto uma relação ar/combustível baixa aumentará a quantidade de monóxido de carbono e de hidrocarbonetos, bem como o consumo de combustível. Carros mal mantidos significam alto consumo de combustível, desperdício de dinheiro e maior emissão de poluentes.

A combustão incompleta é a maior causa da poluição do ar, embora a combustão completa resulte na emissão de compostos não danosos de dióxido de carbono, vapor de água e cinzas. Nenhum processo de combustão é completo. Alguns poluentes são ainda liberados quando se queima carvão e óleo em termelétricas, fábricas, veículos a gasolina, lixo em incineradores e queima de vegetação. Entretanto, se não mais se queimassem combustíveis no mundo, a maior parte do fornecimento de eletricidade e do transporte paralisaria, principalmente nos países frios, onde a necessidade de aquecimento é prioritária.

Os processos industriais têm uma grande participação na poluição do ar. Diante da tremenda diversidade dos produtos das indústrias, seus processos geram uma grande taxa de poluentes. As principais indústrias que contribuem para a poluição do ar são as indústrias de petróleo e combustíveis, as de produtos químicos e a metalurgia. As emissões provenientes da queima de resíduos sólidos são relativamente pequenas, mas tendem a ter aumentada a sua importância por causa dos problemas da destinação de resíduos sólidos.

2.4 – Efeitos da Poluição do Ar

2.4.1 – Sobre a Saúde Humana

A poluição do ar pode afetar o homem e seu ambiente de diversas formas. Quando a concentração dos poluentes do ar aumenta, sem que este seja adequadamente disperso pela ação da meteorologia, da topo-

grafia e de outros fatores, sérios problemas de saúde acabam ocorrendo. Alguns episódios agudos ocorreram no passado: por exemplo, no vale do Rio Meuse, na Bélgica, em 1930; em Donora, na Pensilvânia, em 1948; em Londres, na Inglaterra, em 1952; e na cidade de Nova York, em 1966. Em cada caso, uma inversão térmica manteve os poluentes próximos da superfície da terra, causando mais morbidade e mortalidade do que o usual, especialmente entre os mais velhos e naqueles já possuidores de condições cardiológicas e pulmonares deficitárias.

Embora as estimativas de mortalidade devida à poluição do ar variem de 0,1% a 10%, mesmo o efeito de 0,1% da poluição do ar corresponderia a 15 mil mortes anuais. Estes dados são indicativos da poluição norte-americana e estimados pela Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos. No Brasil, tais informações não existem e, principalmente nas grandes cidades, deveriam ser levantadas. As pessoas que vivem nas áreas urbanas correm maior risco por estarem mais expostas aos poluentes do ar que podem afetar o seu bem-estar.

O trato respiratório é afetado pela poluição do ar. A cília do nariz e das superfícies internas que levam até os pulmões pode coletar as partículas maiores dos poluentes. Entretanto, as partículas menores e os gases são capazes de entrar nos pulmões. Quando respiramos, os alvéolos transformam o oxigênio em dióxido de carbono. A poluição pode causar, em algum desses alvéolos, o aumento do seu volume, alterando sua resiliência de tal forma que a respiração fica mais difícil. Os poluentes do ar podem também diminuir ou até parar a ação das cílias, que normalmente carregam muco e os poluentes coletados no trato respiratório. O muco pode engrossar ou aumentar, e as vias respiratórias podem ficar entupidas. Os problemas de respiração podem **aparecer** por causa de uma ou mais dessas reações. Também os microorganismos e outros materiais estranhos podem não ser suficientemente removidos, fazendo o trato respiratório suscetível a infecções.

A poluição do ar tem sido associada a doenças respiratórias crônicas. Os poluentes do ar podem causar ataques de asma brônquica. Durante tais ataques, ocorrem o estreitamento temporário das vias aéreas menores (bronquíolos), produzido por um espasmo do músculo, o aumento das secreções de mucos, ou o encolhimento da membrana mucosa. Os poluentes do ar agravam tanto a bronquite crônica como o enfisema pulmonar. Na bronquite crônica, uma quantidade anormal de muco é produzida no brônquio, resultado de tosses contínuas. O enfisema pulmonar é caracterizado pela quebra das paredes do alvéolo. Durante essa doença, há um dano irreversível aos tecidos. O alvéolo aumenta, perde a sua resiliência e se desintegra. Respiração curta é o sintoma do enfisema. No câncer do pulmão, existe um crescimento anormal de cé-

lulas originando a membrana mucosa do brônquio. Embora seja improvável que o câncer do pulmão deva-se a uma só causa, os poluentes do ar podem paralisar a cília e permitir que substâncias carcinogênicas permaneçam em contato com as células do brônquio mais tempo que o normal. Alguns poluentes do ar têm sido identificados como substâncias capazes de causar câncer devido a certos hidrocarbonetos (benzeno, benzopireno).

Existe uma associação próxima entre o sistema respiratório e circulatório. Se o sistema respiratório é afetado por uma doença e não pode trocar os gases no sangue completamente, o coração precisa trabalhar mais intensamente para bombear sangue suficiente para repor as perdas de oxigênio. Como resultado, o coração e os vasos sanguíneos estarão sob *stress*, e poderão surgir algumas mudanças, por exemplo, o aumento do tamanho do coração. Como o monóxido de carbono reduz o conteúdo de oxigênio no sangue, este poluente pode exigir uma carga de trabalho do coração maior para pessoas com anemia ou doenças cardio-respiratórias.

Os poluentes do ar podem ter outros efeitos, que incluem ardor e lacrimejamento dos olhos, visão embaçada, tontura, dor de cabeça, irritação na garganta, espirros alérgicos, tosse e diminuição do desempenho corporal.

Os poluentes naturais que causam efeitos sobre a saúde humana são os aeroalérgicos. Os aeroalérgicos consistem principalmente de pólenes, mas também incluem bactérias, mofo, poros, poeira de casa, fibras vegetais, etc. Acima de 10% da população exposta é afetada por aeroalérgicos, cujos principais efeitos sobre a saúde são rinite alérgica e/ou asma brônquica com alteração do tecido reversível. Estes poluentes naturais, através de complicações infecciosas, podem agravar os efeitos sobre a saúde dos poluentes gerados pelo homem. Os pólenes das plantas, de algumas mais que de outras, produzem o mais importante dos alérgicos. Várias medições de pólenes são realizadas diariamente nos Estados Unidos, principalmente nas estações onde há maior ocorrência. Essas medições servem como um indicador das quantidades de alérgicos do ar. Os animais também são afetados pelos poluentes do ar. No passado, quando episódios agudos da poluição do ar produziam doenças nos homens, vários animais também ficavam seriamente doentes e alguns morriam. Entretanto, os efeitos parecem ocorrer de forma variada, de acordo com a espécie do animal.

A Tabela 2.1 a seguir mostra os efeitos dos poluentes atmosféricos sobre a saúde humana. A Tabela 2.2, os padrões de qualidade do ar adotados pela EPA (Environmental Protection Agency), nos Estados Unidos da América. Finalmente, a Figura 1 apresenta a pirâmide invertida de PTA (poluentes tóxicos do ar). Verifica-se que a atual tendência no mundo é de controlar a poluição através da qualidade do contaminante, ou seja, a sua toxicidade.

Tabela 2.1
Efeitos dos Poluentes Atmosféricos sobre a Saúde Humana

A – PARTÍCULAS NÃO TÓXICAS

CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS EM $\mu\text{g}/\text{m}^3$	EFEITOS
2000 g/m^3 com 0.4 ppm de SO_x (Média de 24 horas) vários dias de episódio	Aumento de mortes devidas a bronquite
1000 g/m^3 com 0.25 ppm de SO_x Durante Episódios	Aumento da mortalidade devida a doenças respiratórias e cardíacas
300 g/m^3 com 0.21 ppm SO_x (Média de 24 horas)	Aumento na frequência e gravidade das doenças do trato respiratório
130 g/m^3 com SO_x (Média anual)	Aumento de incidência de bronquites
100–200 g/m^3 com 0.05 a 0.08 ppm SO_x (Média dos níveis da estação)	Aumento de incidência de bronquites

B – OZONA

CONCENTRAÇÃO DE OZONA EM ppm	EFEITOS
0.10 (1 hora)	Dificuldade de respirar
0.30 (8 horas)	Irritação no nariz, garganta e dores no peito
2.00 (2 horas)	Tosse muito forte

C – DIÓXIDO DE NITROGÊNIO

CONCENTRAÇÃO DO NO_x EM ppm	EFEITOS
150 ppm (5/8 minutos)	Potencialmente fatal
50 a 100 ppm (1 hora)	Pode causar broncopneumonia com provável recuperação
10 a 40 ppm (Exposição intermitente)	Pode causar fibrose crônica e enfisema pulmonar
0.05 a 0.10 ppm (Exposição crônica)	Evidências de aumento de bronquite crônica
0.05 ppm (Exposição longa)	Evidências de aumento de doenças do pulmão e coração em geral

D – DIÓXIDO DE ENXOFRE

CONCENTRAÇÃO DE SO _x EM ppm	EFEITOS
0.52 com particulados (Média de 24 horas)	Aumento da mortalidade
0.25 com fumaça (3 a 4 dias; média de 24 horas)	Aumento da mortalidade
0.25 com particulados (3 a 4 dias; média de 24 horas)	Aumento de doenças nos idosos
0.19 com baixa concentração de particulados	Aumento da mortalidade
0.11 a 0.19 com baixa concentração de particulados (Vários dias de episódio)	Aumento de internações
0.037 a 0.092 com fumaça (Exposição crônica)	Aumento de problemas respiratórios e doenças do pulmão

E – MONÓXIDO DE CARBONO

CONCENTRAÇÃO EM ppm	EFEITOS
0.10 (30 minutos)	Irritação nos olhos
0.13 (24 horas)	Agravamento das doenças respiratórias
0.03 a 0.30 (1 hora)	Diminuição de performance física
0.09 (1 hora)	Diminuição da capacidade respiratória

F – OXIDANTES FOTOQUÍMICOS

CONCENTRAÇÃO DO CO EM ppm	EFEITOS
Concentrações maiores que 100 ppm (10 minutos)	<i>Stress</i> fisiológico em pacientes com doenças do coração
100 ppm (Intermitente)	Diminuição de desempenho em teste psicomotor
50 ppm (para 90 minutos)	Diminuição no intervalo de tempo de discriminação para não fumantes
30 ppm (acima de 12 horas)	Carbono elevado nos níveis de hemoglobina com redução do transporte de oxigênio

Tabela 2.2

Padrões de Qualidade do Ar Adotados pela EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)

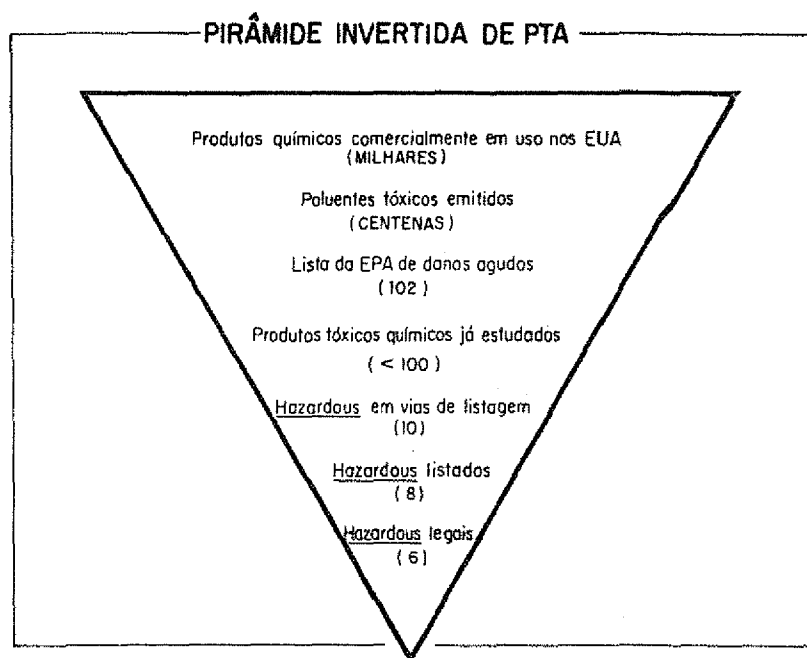
POLUENTE	TEMPO DE AMOSTRAGEM	PADRÃO PRIMÁRIO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MÉTODO DE MEDIÇÃO
Dióxido de enxofre	24 h Média Aritmética Anual	365 80	Pararosanilina
Partículas totais em suspensão	24h Média Geométrica Anual	260* 75	Amostrador de grandes volumes
Partículas respiráveis em suspensão	24h Média Geométrica Anual	150 50	Amostrador de grandes volumes (PM-10)
Monóxido de carbono	1 h 8 h	40.000 (35 ppm) 10.000 (9 ppm)	Infravermelho não-dispersivo
Ozona	1 h	235 (0,12 ppm)	Quimioluminescência
Hidrocarbonetos (menos metano)**	3 h (6h a 9h)	160 (0,24 ppmC)	Cromatografia gasosa/ionização de chama
Dióxido de nitrogênio	Média Aritmética Anual	100	Quimioluminescência
Chumbo**	90 dias	1,5	Absorção atômica

* 240 no Brasil.

** Não existem padrões para poluentes no Brasil.

2.4.2 – Sobre a Vegetação

Várias plantas são sensíveis aos poluentes do ar. Algumas são usadas como indicadores de poluição do ar porque elas demonstram um tipo característico de dano para cada poluente específico. Os poluentes do ar entram nas folhas das plantas principalmente através dos seus poros ou estômatos. A extensão dos danos varia segundo vários fatores: as características dos poluentes (concentração, duração, propriedades físicas e químicas, etc.); condições climáticas (temperatura, intensidade de luz, precipitação, etc.); condições do solo (umidade, nutrientes, etc.); e fatores biológicos (estágio de desenvolvimento, composição genética, insetos, doenças, etc.). Os poluentes do ar atingem vários tipos de ve-



getação, inclusive as plantações. Também prejudicam a agricultura através da diminuição do valor do produto (a quantidade e a qualidade podem ser afetadas e a época de venda pode ser adiantada ou atrasada), ou aumento do custo de produção (necessidade de uso de fertilizantes, irrigação, etc.).

Várias espécies de vegetação e variedades dentro das espécies diferem na sua suscetibilidade a poluentes particulados. Os principais poluentes que causam danos às plantas e algumas das espécies que são afetadas estão listadas na Tabela 2.3.

2.4.3 – Sobre Certos Materiais

Os poluentes do ar podem corroer e escurecer metais, quebrar borracha, sujar roupas, móveis, prédios, etc. Podem ainda erodir construções, monumentos, etc., bem como descolorir vários tipos de materiais, enfraquecer o algodão, a lã, a fibra de seda e destruir o náilon.

Tabela 2.3
Efeitos da Poluição do Ar sobre a Vegetação

POLUENTES	SINTOMAS CARACTERÍSTICOS	MÍNIMA CONCENTRAÇÃO PARA DANO		
		ppm (vol)	g/m ³	TEMPO DE EXPOSIÇÃO
Dióxido de Enxofre	Manchas esbranquiçadas, áreas descoloridas entre veias, clorose (amarelamento)	0.3	785	8 horas
Ozona	Marcas esbranquiçadas, pigmentação. As pontas das coníferas tornam-se amarronzadas e necróticas	0.03	59	4 horas
Nitrato de Peroxiacetila	Espelhamento, prateamento ou bronzamento na parte inferior das folhas	0.01	56	6 horas
Dióxido de Nitrogênio	Lesões irregulares, brancas ou marrons, no tecido intercostal e próximas à margem das folhas	2.5	4.700	4 horas
Fluoreto de Hidrogênio	Queimaduras nas pontas e nas margens, diminuição do crescimento, abscesso na folha, faixa estreita vermelha amarronzada separa áreas necrozadas do tecido verde.	0.1ppb	0.08	5 semanas
Etileno	Necrose de parte do cálice em orquídeas, anormalidades nas folhas, queda de flores e falta de abertura das folhas: abscesso	0.05	58	6 horas
Cloro	Branqueamento entre veias das folhas, queimadura nas pontas e margens, abscesso nas folhas, danos similares ao da ozona	0,10	296	2 horas
Amônia	Aparência verde forte, tornando-se marron ou verde comum ao secar. Pode ocorrer escurecimento geral em algumas espécies	- 20	- 14000	4 horas
Ácido Clorídrico	Necrose tipo ácida, queimadura de pontas em algumas espécies, necrose da margem de folhas de plantas tipo folhas largas	-5 -10	-11200	2 horas
Gás Sulfídrico	Chamuscamento dorsal e marginal	20	28000	5 horas
Ácido Sulfúrico	Pontos necróticos na superfície superior da folha, similar a lesões de compostos ácidos ou básicos	-	-	-

Os gases reativos, tais como o ozônio e o dióxido de enxofre, assim como os ácidos, como o nítrico e o sulfúrico, são principalmente responsáveis por danificar tecidos, descolorir tingimentos, escurecer metais, enfraquecer a borracha e erodir pedrões.

2.4.4 – Sobre o Tempo

A poluição do ar pode reduzir a visibilidade e criar danos para o transporte. A diminuição da visibilidade é facilmente observada e é especialmente danosa em locais com paisagens turísticas. A diminuição da visibilidade também reduz o alcance visual dos objetos do nosso meio. Se os poluentes e outras partículas “naturalmente” encontradas na atmosfera não estivessem aí presentes, o alcance visual ao nível do mar seria limitado somente pela topografia, pela dispersão da luz, ou pelos gases e a neblina que ocorrem naturalmente.

A poluição do ar pode também causar a descoloração da atmosfera. Isto pode ser observado em várias cidades do Brasil, principalmente na cidade de São Paulo com a sua nuvem marrom escurecida. Esta nuvem é particularmente observável porque impede a vista de toda cidade a uma distância de mais de 15 quilômetros. A diminuição da visibilidade e a cor amarronzada em São Paulo e em algumas cidades do Brasil são causadas pela dispersão da luz por particulados bastante pequenos para serem vistos sem o auxílio de um microscópio. Estes particulados têm diâmetro entre 0,3 μ (1/3 mil do milímetro) até 1,0 μ (1/1.000 do milímetro). Em alguns lugares, a descoloração amarronzada é aumentada pelo dióxido de nitrogênio, que é um gás amarronzado.

As fontes móveis estacionárias emitem material particulado, em geral muito pequeno, que permite dispersão da luz. Também, sob certas condições, o dióxido de enxofre, os hidrocarbonetos e o óxido de nitrogênio emitidos destas fontes podem promover reações químicas na presença da luz, produzindo muito mais particulados. Isto leva à formação de grandes áreas, com centenas de quilômetros, totalmente encobertas por uma névoa. Para complicar o cenário, o processo de remoção destes particulados da atmosfera é extremamente lento na ausência de chuva. Assim, eles podem viajar centenas de quilômetros das suas fontes e afetar outras áreas, incluindo áreas rurais com poucas fontes de poluentes produzidos pelo homem. A redução da visibilidade por poluentes é certamente o maior efeito visível na nossa atmosfera. Existem, entretanto, vários outros efeitos conhecidos, ou postos de lado, alguns dos quais podem ser potencialmente mais sérios. São eles: o aumento da formação de neblina, o aumento da precipitação, a alteração da temperatura global da Terra e o esgotamento do ozônio na atmosfera.

Normalmente, a neblina ocorre quando a umidade relativa alcança 100%. Entretanto, certos particulados, como os sulfatos e os nitratos,

atraem água e podem formar neblina com umidade relativa levemente abaixo de 100%.

A maioria dos particulados de pequeno tamanho serve como um excelente núcleo na formação de nuvens de gotas. Conseqüentemente, isto pode causar o aumento da precipitação a jusante de grandes fontes de material particulado.

Existem dois fatores opostos para serem considerados no que diz respeito à alteração da temperatura global da Terra. Primeiro, as concentrações de dióxido de carbono (CO_2) vêm aumentando constantemente nas últimas décadas. O dióxido de carbono é emitido por todos os processos de combustão; entretanto, não é considerado um poluente do ar. Uma vez que o CO_2 dificulta a passagem do aquecimento solar na baixa atmosfera, seu aumento pode induzir à elevação da temperatura global da Terra. Alguns cientistas acham que isto poderia levar a um derretimento parcial da calota polar, o que causaria um aumento no nível dos oceanos com ocorrência de enchentes em certas cidades costeiras. O segundo fator a ser considerado é o efeito dos particulados de pequeno tamanho, que interceptam parte da energia do Sol impedindo-a de alcançar a superfície da Terra, o que poderia promover uma diminuição da temperatura da superfície terrestre. Essas teses ainda não foram confirmadas. Mas, como as emissões aumentam, existe uma grande probabilidade de que alguns destes efeitos se confirmem rapidamente.

Cerca de 25 quilômetros acima da superfície da Terra na estratosfera, existe uma camada natural de ozônio. Esta camada de ozônio é extremamente importante para a vida, porque ela absorve uma parcela significativa da radiação ultravioleta do Sol. A maior parte da vida na Terra pereceria se esta camada fosse eliminada. Os gases de exaustão das aeronaves que voam na estratosfera, os aviões supersônicos e os fluorcarbonos são os principais responsáveis pela diminuição do ozônio. Os fluorcarbonos têm vários usos. Os mais comuns são os sistemas de ar condicionado e de refrigeração, usos industriais e latas de aerossóis. Estes produtos químicos são extremamente inertes e não são destruídos facilmente pelos processos naturais, exceto pela radiação ultravioleta. Como os fluorcarbonos são liberados na atmosfera, eles se acumulam e eventualmente migram para a camada de ozônio. Não se conhece quanto de ozônio será destruído por este processo, mas alguns cientistas pensam que isso resultará em um aumento do câncer de pele. Assim, muitos dos usos dos fluorcarbonos estão sendo proibidos.

2.5 – Métodos de Controle da Poluição do Ar

Estamos expostos à atmosfera todo dia. Uma vez que contribuimos para a poluição do ar e por ela somos atingidos, temos a responsabilidade de conservar o nosso ar o mais limpo possível. O controle da po-

lução do ar é necessário para prevenir a ocorrência de danos à saúde. Com o aumento do desenvolvimento industrial, da urbanização, do uso de veículos automotores, etc., foram adotadas legislações e regulamentos locais, estaduais e federais para limitar a quantidade de poluentes no ar. Como resultado, tem-se recorrido a medidas de controle para manter as emissões de poluentes dentro destes limites. O monitoramento da poluição do ar é feito por agências de controle da poluição e por firmas privadas.

A poluição do ar pode ser controlada de várias formas. A primeira delas é prevenir a formação de poluentes do ar. Para tanto, há vários procedimentos:

1. Alteração ou substituição de combustível ou da matéria-prima empregada. Exemplos: troca de combustível de alto conteúdo de enxofre por outro com baixo conteúdo de enxofre; uso de gás natural ou combustível dessulfurizado ao invés de carvão ou combustível com alto conteúdo de enxofre; alteração na forma de um produto de maneira que sua produção cause menor poluição.

2. Mudança no processo de fabricação. Exemplo: redução do excesso de ar na queima de combustíveis fósseis com o intuito de reduzir a formação e a emissão de óxido de nitrogênio.

3. Mudança do equipamento. Exemplo: troca de um forno velho por um outro projetado para uma combustão mais completa.

4. Melhoria nos procedimentos de operação e manutenção. Exemplo: manter os veículos automotores adequadamente regulados e os fornos e incineradores adequadamente ajustados; operar a caldeira de acordo com as especificações do seu fabricante.

5. Enclausuramento de uma operação. Exemplo: uso de tetos flutuantes ao invés de tetos fixos em tanques de armazenamento de óleos combustíveis e outras substâncias voláteis em refinarias.

Outra modalidade de controle é a diminuição da concentração dos poluentes do ar pelo aumento da sua dispersão. Para esse efeito contribuem providências como:

1. Selecionar o lugar que tenha boa ventilação. Exemplo: as condições do tempo, tais como velocidade do vento e altura da camada de inversão, variam consideravelmente de lugar para lugar. Assim, antes de uma indústria ser construída, a sua localização deve ser escolhida de modo a se obter uma boa ventilação, ventos fortes e uma pequena ocorrência de inversões térmicas: nos vales, haverá a grande possibilidade de uma baixa ventilação devida a inversões de baixo nível, e ventos calmos são comuns na chegada da noite e nas manhãs. Tais condições produziram o tamponamento dos poluentes próximos à superfície da terra. Uma colina bem ventilada será o local melhor escolhido.

2. Construir chaminés mais altas, que diluiriam os poluentes do ar pela dispersão sobre uma área maior, embora a quantidade total de po-

luentes do ar a ser emitida continue a mesma. Deve ser mencionado que este método era muito empregado no passado; recentemente, entretanto, descobriu-se que, em muitos casos, essa prática aumentou as concentrações de poluentes muitos quilômetros a jusante da fonte.

Controlar os poluentes do ar antes de eles atingirem a atmosfera é um outro recurso. Vários equipamentos de controle podem ser instalados para eliminar, coletar ou alterar os poluentes do ar. Os particulados maiores podem ser removidos em câmaras de sedimentação. Esses particulados suspensos passarão rapidamente através de um duto estreito e entrarão em uma câmara de sedimentação maior, onde a gravidade promoverá a sua queda ao fundo do equipamento.

Os particulados menores devem ser removidos por equipamentos de controle da poluição do ar mais efetivos, tais como coletores inerciais. Os coletores ciclônicos são um tipo de coletor inercial no qual o fluxo de poluentes suspensos no ar é introduzido em uma câmara cilíndrica girando a alta velocidade, o que forçará muitos desses particulados contra a parede da câmara cilíndrica, fazendo-os cair para serem coletados.

Os filtros de manga também removem os particulados; eles são basicamente grandes aspiradores de pó. Os poluentes suspensos no ar passam através do filtro de tecido, que segura o particulado na sua fibra.

O mais efetivo e também mais caro método para o controle dos particulados é o precipitador eletrostático, o qual, em certas situações, pode remover 99,9% de todos os particulados que entram em contato com ele. Como os poluentes do ar suspensos passam através do precipitador eletrostático, os particulados recebem uma carga elétrica. Assim, serão atraídos através de tubos ou placas coletoras, onde são neutralizados e depositados em um coletor de particulados.

Os lavadores são também conhecidos como coletores de particulados de pequeno tamanho. Entretanto, podem criar problemas de poluição nas águas quando o líquido residual contaminado tiver sido disposto. Existem vários tipos de lavadores, com várias técnicas que usam o líquido para lavar ou dissolver os poluentes.

Os poluentes gasosos são removidos por absorção, incineração ou oxidação e condensação. Na absorção, os poluentes gasosos são removidos através da passagem por um líquido. O gás se dissolve num líquido ou reage com ele quimicamente. A absorção remove certos poluentes gasosos no ponto da sua passagem através de um sólido poroso, tal como o carvão ativado. O gás é atraído e acaba aderindo a esse sólido.

Na incineração ou oxidação, os hidrocarbonetos não queimados são convertidos para dióxido de carbono e água. O processo de incineração produz combustão completa pelo uso de equipamentos chamados pós-queimadores, que destroem hidrocarbonetos a altas temperaturas com o adequado tempo de retenção e de mistura. Outros equipamentos

de oxidação são chamados conversores catalíticos, onde os hidrocarbonetos e o monóxido de carbono passam sobre um material catalítico sólido que causará sua reação com o oxigênio para formar dióxido de carbono e água. A partir de 1992 e até 1997, os veículos movidos a gasolina e álcool no Brasil deverão incorporar este equipamento para reduzir suas emissões de hidrocarbonetos e de monóxido de carbono.

No processo de condensação, os poluentes gasosos são resfriados até atingirem a forma líquida, quando então são removidos.

No caso do dióxido de enxofre (SO_2), o seu controle tem sido efetuado no Brasil principalmente através de lavadores com soda cáustica, tendo-se evitado a instalação de dessulfurizadores por seu custo inicial elevado e pelos problemas de operação e manutenção. Uma das estratégias usadas na Grande São Paulo foi a utilização das caldeiras elétricas como forma alternativa de geração de vapor para uso industrial e/ou utilização de combustível de baixo teor de enxofre para regiões saturadas. Já os óxidos de nitrogênio (NO_x) têm sido controlados somente em situações específicas, tais como em unidades de fabricação de ácido nítrico, não havendo ainda tecnologias para o seu controle nos processos de combustão que envolvam abaixamento de temperatura e formato das câmaras de combustão, por exemplo.

Bibliografia

- FAITH, W., ATKISSON JR, A. A. Meteorology. *In: Air pollution*. Nova York, Wiley Interscience, 1972.
- LEDBETTER, J. O. *Air pollution*. Nova York, Marcel Dekker, Inc., 1972.
- LEWIS, A. Pollution disasters. *In: Clean the air*. McGraw Hill, pp. 35-38, 1965.
- STERN, A. C. *Air pollution*, 2 ed., Nova York, Academic Press, 1968.
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Air quality criteria for ozone and other photochemical oxidants*. EPA - 600/8-78-004, Washington DC, Office of Research and Development, 1978.
- . *Acid rain*. EPA-600/8-79-028. Washington DC, Office of Research and Development, 1979
- . *Air quality criteria for particulate matter and sulfur oxides*. Washington, D. C., Office of Research and Development, Research Triangle Park, 1980.
- WILLIAMSON, S. J. *Fundamentals of air pollution*. Reading, MA, Addison-Wesley Publ. Co., 1973.