

correntes do uso de facão, bem como redução de acidentes com animais peçonhentos; diminuição significativa da quantidade de matéria estranha (folhas, pontas, ervas daninhas); aumento da densidade de transporte de matéria-prima; entre outros. Para reduzir os impactos ambientais relacionados à produção de etanol, ações de entidades ambientais deram origem à Lei da Queima da Cana (Lei n. 11.241/2002), que estabelece a queima controlada da palha da cana-de-açúcar, além da eliminação gradual dessa atividade até a total eliminação em 2021 em áreas mecanizadas e em 2031 nas não mecanizadas. No entanto, visando colaborar com as ações relacionadas a mudanças climáticas (discutidas mais adiante neste capítulo), foi estabelecido o Protocolo Agroambiental do setor Canavieiro Paulista. De acordo com o protocolo, após a adesão voluntária, os produtores de cana-de-açúcar se comprometem a antecipar a eliminação total da prática da queima de 2021 para 2014 e 2031 para 2017, em áreas mecanizadas e não mecanizadas, respectivamente.

2.3. Efeitos tóxicos causados pelos poluentes do ar

A qualidade do ar é um dos principais determinantes da saúde humana. Recentes estimativas indicam que anualmente dezenas de milhares de mortes prematuras podem estar relacionadas à exposição a poluentes atmosféricos. Por isso, a Organização Mundial da Saúde (OMS) considera o ar limpo um importante requisito para a manutenção da saúde humana. Concentrações elevadas de poluentes atmosféricos podem também causar degradação da flora e da fauna e deterioração de monumentos históricos e construções modernas.

Os efeitos nocivos para o homem causados pelos contaminantes do ar são difíceis de ser estabelecidos, pois as condições de exposição e as respostas individuais são muito variadas. Podem ocorrer episódios de intoxicação aguda em casos acidentais ou em situações desfavoráveis à dispersão dos poluentes, como a inversão térmica. Mas, geralmente, os efeitos observados são decorrentes da exposição por longos períodos.

Os principais tipos de efeitos tóxicos apresentados pela população exposta são:

- ▶ agudos: lacrimejamento, dificuldade de respiração e diminuição da capacidade física;
- ▶ crônicos: alteração da acuidade visual, alteração da ventilação pulmonar, asma, bronquite, doenças cardiovasculares, enfisema pulmonar e câncer pulmonar.

O grupo de maior risco, entre a população, é aquele mais suscetível a ação dos poluentes, como os idosos, as crianças, as gestantes e os portadores de deficiência respiratória ou cardíaca. Muitos estudos mostram uma associação positiva entre mortalidade e morbidade por problemas respiratórios em crianças. A poluição atmosférica tem sido associada a decréscimo na função pulmonar, faltas à escola, redução da capacidade respiratória em crianças normais e aumento no uso de medicamentos por crianças ou adultos com asma; além disso, já foram relatadas alterações no sistema imunológico em não fumantes, com redução do *clearance* mucociliar.

Em relação aos idosos, os maiores índices de doenças, relacionadas à poluição do ar, são cardiovasculares. No caso de gestantes, estudos epidemiológicos realizados em vários países relacionam elevados níveis de poluentes a efeitos sobre a gestação e sobre os neonatos, como nascimento prematuro, baixo peso ao nascer e retardo intrauterino.

2.4: Avaliação da poluição do ar

A qualidade do ar tem sido um tema extensivamente pesquisado nas últimas décadas e caracteriza-se como um fator de grande importância na busca da preservação do meio ambiente e na implementação de um modelo de desenvolvimento sustentável, pois seus efeitos afetam de diversas formas a saúde humana, os ecossistemas e os materiais. Os efeitos deletérios da poluição atmosférica para os organismos podem ser estudados por diversos métodos, incluindo os epidemiológicos, os de avaliação da exposição e os de avaliação de toxicidade, como os testes com animais e ensaios *in vitro*.

A poluição atmosférica constitui um problema de saúde que acompanha o homem desde a Antiguidade, quando a queima de madeira era utilizada como fonte de energia para várias atividades domésticas. A partir do século XVIII, as cidades iniciaram a utilização de grandes quantidades de carvão vegetal, o que lançava grande volume de fumaça na atmosfera. Nessa época, iniciou-se o desenvolvimento de legislações para redução da emissão de poluentes. Porém, a monitorização da qualidade ambiental é relativamente recente, iniciada na década de 1970, com a criação das agências de controle ambiental, como a Environmental Protection Agency (EPA), dos Estados Unidos, e a Cetesb.

A avaliação da qualidade do ar pode ser realizada em nível local, regional, nacional e internacional por meio de estimativas das emissões de poluentes, do uso de modelos matemáticos e de medidas das concentrações ambientais dos principais poluentes. A monitorização ambiental das concentrações de poluentes é um dos procedimentos utilizados para o controle da qualidade do ar. Ao se determinar a concentração de um poluente nesse compartimento, estima-se o grau de exposição de receptores, como o homem. Contudo, o resultado dessas medidas não permite conclusões imediatas sobre os impactos das concentrações atuais de poluentes em seres vivos. Na verdade, os possíveis efeitos dependem não somente da toxicidade, da concentração e da duração da exposição ao poluente, como também de outros fatores, como o clima, o estado nutricional, a predisposição de certos grupos, a idade e a exposição simultânea à mistura complexa de poluentes.

Normas nacionais e internacionais definem padrões de qualidade do ar e estabelecem valores-limite para concentrações de poluentes considerados prioritários, visando evitar ou minimizar os efeitos tóxicos e os prejuízos ambientais e econômicos desses agentes dispersos na atmosfera. No Brasil, em 1976, foram regulamentados alguns parâmetros de qualidade do ar por meio do Decreto Estadual n. 8.468, do Governo de São Paulo. Esses parâmetros foram ampliados em âmbito nacional e transformados na Resolução n. 003 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, Conama, em 28 de junho de 1990. Essa legislação estabelece os padrões primários e secundários para partículas totais em suspensão (PTS), fumaça, partículas inaláveis (MP₁₀), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃) e dióxido de nitrogênio (NO₂). Os padrões primários e secundários dos poluentes legislados no Brasil são apresentados na Tabela 2. Complementando a Legislação Federal, o Estado de São Paulo publicou recentemente o Decreto n. 59.113, de 23 de abril de 2013, no qual foram incluídos os padrões para o material particulado fino, com diâmetro aerodinâmico equivalente a 2,5 µm, e para o chumbo, que deverá ser aplicado apenas no monitoramento de áreas específicas, definidas a critério da Cetesb.

Segundo a Resolução Conama n. 003/90, são padrões primários de qualidade do ar as concentrações de poluentes que, se ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Esses padrões podem ser entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, constituindo-se em metas de curto e médio prazo. Padrões secundários são as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna e à flora, aos materiais e ao

meio ambiente em geral. Esses padrões podem ser entendidos como níveis desejados de concentrações de poluentes, constituindo-se em meta de longo prazo. O objetivo do estabelecimento dos padrões secundários é criar uma base para políticas de prevenção da degradação da qualidade do ar, devendo ser aplicados às áreas de preservação, como parques nacionais, e não, pelo menos a curto prazo, a áreas de desenvolvimento, onde devem ser aplicados os padrões primários.

Tabela 2. Padrões nacionais primários e secundários de qualidade do ar e métodos analíticos de medição estabelecidos pela Resolução Conama n. 003 de 28/06/1990.

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão primário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Padrão secundário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Métodos de análise
PTS	24 horas*	240	150	amostrador de grandes volumes ⁺
	MGA**	80	60	
MP ₁₀	24 horas*	150	150	separação inercial/filtração ⁺
	MAA***	50	50	
Fumaça	24 horas*	150	100	refletância ⁺
	MAA***	60	40	
SO ₂	24 horas*	365	100	pararosanilina ⁺
	MAA***	80	40	
NO ₂	1 hora*	320	190	quimiluminescência ⁺
	MAA***	100	100	
CO	1 hora*	40.000; 35 ppm	40.000; 35 ppm	infravermelho não dispersivo ⁺
	8 horas*	10.000; 9 ppm	10.000; 9 ppm	
O ₃	1 hora*	160	160	quimiluminescência ⁺

* Não deve ser excedida mais que uma vez ao ano. ** Média geométrica anual. *** Média aritmética anual. + Ou método equivalente.

A Resolução Conama n. 003/90 estabelece também critérios para episódios agudos de poluição do ar. Esses critérios são os níveis de atenção, alerta e emergência que devem ser observados para elaboração do Plano de Emergência para Episódios Críticos de Poluição do Ar (Tabela 3). Segundo a Conama n. 003, os níveis de atenção, alerta e emergência serão declarados quando, prevendo-se a manutenção das emissões e das condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos poluentes nas 24 horas subsequentes, um ou mais parâmetros descritos na Tabela 3 forem ultrapassados. Cabe aos Estados a competência para indicar as autoridades responsáveis pela declaração desses níveis e, durante a permanência dos níveis, as fontes poluidoras do ar ficarão sujeitas às restrições previamente estabelecidas pelo órgão ambiental.

Tabela 3. Critérios para episódios agudos de poluição do ar estabelecidos pela Resolução Conama n. 003 de 28/06/1990.

Parâmetro	Atenção	Alerta	Emergência
PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3 - 24 \text{ h}$)	375	625	875
MP ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3 - 24 \text{ h}$)	250	420	500
Fumaça ($\mu\text{g}/\text{m}^3 - 24 \text{ h}$)	250	420	500
SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3 - 24 \text{ h}$)	800	1.600	2.100
SO ₂ X PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3 - 24 \text{ h}$)	65.000	261.000	393.000
NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3 - 1 \text{ h}$)	1.130	2.260	3.000
CO (ppm - 8 h)	15	30	40
O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3 - 1 \text{ h}$)	400	800	1.000

Em 2005, a OMS publicou a atualização dos valores orientadores de qualidade do ar com o objetivo de reduzir os impactos causados pela poluição do ar sobre a saúde humana. Essa atualização foi motivada por evidências epidemiológicas que indicaram a possibilidade de efeitos adversos à saúde de poluentes (MP, O₃, NO₂ e SO₂) mesmo quando os valores orientadores não foram atingidos. A Tabela 4 apresenta os novos valores orientadores propostos pela OMS.

Tabela 4. Valores orientadores para MP, O₃, NO₂ e SO₂ propostos pela OMS em 2005 (WHO, 2005).

Poluente	Média por período	Valores orientadores de qualidade do ar
MP ₁₀	1 ano	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	24 horas	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
MP _{2,5}	1 ano	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	24 horas	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
O ₃	8 horas	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NO ₂	1 ano	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	1 hora	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
SO ₂	24 horas	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	10 minutos	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Há diversos fatores que dificultam o estabelecimento desses padrões de qualidade, sendo os principais: suscetibilidades individuais; heterogeneidade da população; dificuldade em reproduzir condições ambientais em experimentos laboratoriais

com animais; e avaliação da toxicidade após exposição a múltiplos agentes químicos. Em geral, cada país estabelece na legislação os padrões de qualidade do ar para os diferentes poluentes.

O monitoramento da qualidade do ar, segundo a Resolução Conama n. 003/90, é atribuição dos Estados e seus principais objetivos são: a) avaliar a qualidade do ar em relação aos limites legais, visando garantir a saúde e o bem-estar das populações; b) fornecer subsídios para ações de controle, durante períodos em que os níveis de poluentes na atmosfera possam representar riscos a saúde pública; c) fornecer informações que possam indicar impactos sobre a fauna, a flora e o meio ambiente; d) acompanhar as alterações e as tendências da qualidade do ar no decorrer do tempo; e) auxiliar no planejamento de ações de controle da poluição; e f) manter a população, os órgãos públicos e a sociedade informados sobre os níveis da contaminação do ar.

2.4.1. Padrões de qualidade do ar utilizados no Estado de São Paulo

A Cetesb é o órgão de controle ambiental do Estado de São Paulo, sendo o mais ativo no Brasil no que diz respeito ao controle da poluição. Por esse motivo, neste capítulo será dada maior ênfase aos padrões de qualidade adotados nesse Estado. Com base na atualização de 2005 dos valores-guia para poluentes atmosféricos da OMS, o Estado de São Paulo publicou em 2013 seus novos padrões de qualidade do ar (Tabela 5). O Decreto Estadual n. 59.113/2013 estabelece que a administração da qualidade do ar no território do Estado de São Paulo será efetuada observando os critérios a seguir.

Metas Intermediárias (MI) Estabelecidas como valores a serem cumpridos em etapas, visando a melhoria gradativa da qualidade do ar no Estado de São Paulo, com base na busca pela redução das emissões de fontes fixas e móveis, em linha com os princípios do desenvolvimento sustentável.

Padrões Finais (PF) Padrões determinados pelo melhor conhecimento científico para que a saúde da população seja preservada ao máximo em relação aos danos causados pela poluição atmosférica.

As metas intermediárias devem implementadas em três etapas:

Meta Intermediária 1 (MI1) Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados a partir de 24/04/2013.

Meta Intermediária 2 (MI2) Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados subsequentemente à MI1, que entrará em vigor após avaliações realizadas na Etapa 1, reveladas por estudos técnicos apresentados pelo órgão ambiental estadual, convalidados pelo Conselho Estadual do Meio Ambiente (Consema);

Meta Intermediária 3 (MI3) Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados nos anos subsequentes à MI2, sendo que o início de sua vigência e seu prazo de duração serão definidos pelo Consema, com base nas avaliações realizadas na Etapa 2.

Os padrões finais (PF) são aplicados sem etapas intermediárias quando não forem estabelecidas metas intermediárias, como no caso do monóxido de carbono, das partículas totais em suspensão e do chumbo. Para os demais poluentes, os pa-

drões finais passam a valer a partir do final do prazo de duração do MI3.

Tabela 5. Padrões de qualidade do ar válidos no território do Estado de São Paulo, estabelecidos no Decreto n. 59.113/2013 (adaptado de Cetesb, 2013).

Poluente	Tempo de amostragem	MI1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MI2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MI3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Partículas inaláveis (MP ₁₀)	24 horas	120	100	75	50
	MAA ¹	40	35	30	20
Partículas inaláveis finas (MP _{2,5})	24 horas	60	50	37	25
	MAA ¹	20	17	15	10
Dióxido de enxofre (SO ₂)	24 horas	60	40	30	20
	MAA ¹	40	30	20	-
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	1 hora	260	240	220	200
	MAA ¹	60	50	45	40
Ozônio (O ₃)	8 horas	140	130		100
Monóxido de carbono (CO)	8 horas	-	-	-	9 ppm
Fumaça* (FMC)	24 horas	120	100	75	50
	MAA ¹	40	35	30	20
Partículas totais em suspensão* (PTS)	24 horas	-	-	-	240
	MGA ²	-	-	-	80
Chumbo** (Pb)	MAA ¹	-	-	-	0,5

1 – Média aritmética anual.

2 – Média geométrica anual.

* Fumaça e Partículas Totais em Suspensão – parâmetros auxiliares a serem utilizados apenas em situações específicas, a critério da Cetesb.

** Chumbo – a ser monitorado apenas em áreas específicas, a critério da Cetesb.

- Padrão não estabelecido.

2.4.1.1. Índices de qualidade do ar utilizados no Estado de São Paulo

No Estado de São Paulo, a Cetesb utiliza os dados de qualidade do ar gerados pelo sistema de monitoramento ambiental e os dados meteorológicos para classificar a qualidade do ar e produzir o Boletim de Qualidade do ar com os índices das várias estações de monitoramento. A classificação é baseada nos cálculos de um índice de qualidade do ar, uma ferramenta matemática desenvolvida para simplificar o processo de divulgação das condições da atmosfera em relação aos poluentes ligados e associada aos efeitos sobre a saúde humana.

O índice é obtido por meio de uma função linear segmentada, em que os pontos de inflexão são os padrões de qualidade do ar. Dessa função, que relaciona a concentração do poluente com o valor índice, resulta um número adimensional referido a uma escala com base nos padrões de qualidade do ar. Para efeito de divulgação, é utilizado o índice mais elevado dos poluentes medidos em cada estação, portanto a qualidade do ar de cada estação é determinada pelo pior caso. Para facilitar a divulgação, foram introduzidas cores às classes. Após o cálculo do índice, o ar recebe uma qualificação de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6. Classificação e cor atribuída à qualidade do ar (para fins de divulgação), índices de qualidade do ar e seu significado para a saúde da população (adaptado de Cetesb, 2013).

Qualidade	Cor	Índice	Significado
N1 – Boa	Verde	0-40	Praticamente não há riscos à saúde.
N2 – Moderada	Amarelo	41-80	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada.
N3 – Ruim	Laranja	81-120	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
N4 – Muito ruim	Vermelho	120-200	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas, como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e, ainda, falta de ar e respiração ofegante. Há efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
N5 – Péssima	Violeta	> 200	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Há aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Além de realizar a monitorização ambiental e divulgar as condições de qualidade do ar, a Cetesb controla as fontes poluidoras, principalmente as estacionárias, exigindo a instalação de equipamentos antipoluição e outras medidas de redução das emissões.

2.4.2. Bioindicadores e biomonitoramento da qualidade do ar

A utilização de bioindicadores como método de detecção de mudanças no ambiente é uma ferramenta eficaz e relativamente rápida, pois apresenta menores custos e não requer instalações prévias, não usa energia elétrica e pode ser distribuída em diversos pontos em uma área de estudo. O uso de bioindicadores é uma metodologia adequada para a detecção de efeitos de poluentes atmosféricos sobre organismos (que podem ser utilizados como biomonitores) e, quando associado aos sistemas de monitoramento mecânicos, pode fornecer informações de grande valor.

Qualquer ser vivo pode ser utilizado como bioindicador, no entanto espécies menos sensíveis respondem mais lentamente e com menor eficácia em comparação às mais suscetíveis aos poluentes. Assim, o biomonitoramento pode ser definido, de maneira geral, como o uso de organismos ou materiais biológicos para obter informações qualitativas ou quantitativas sobre certas características da biosfera, como a presença de certos poluentes atmosféricos, ou ainda, como o uso sistemático das respostas de organismos vivos para avaliar mudanças ocorridas no ambiente.

As informações mais relevantes no biomonitoramento (utilizando, por exemplo, animais ou plantas) são obtidas pela mudança no comportamento do organismo usado como monitor (impactos sobre composição e/ou abundância da espécie, desempenho fisiológico e/ou ecológico ou na morfologia) ou pela determinação de substâncias específicas nos tecidos do organismo monitor. Para um indicador biológico ser considerado “ideal”, deve apresentar as seguintes características: ser taxonomicamente bem definido e facilmente reconhecível por não especialistas; apresentar distribuição geográfica ampla; ser

bem abundante ou de fácil coleta; ter baixa variabilidade genética e ecológica; e ser passível de uso em experimentos de laboratório. A seleção dos organismos para utilização em biomonitoramento está normalmente associada à ocorrência comum e permanente dos organismos na área de estudo e/ou em áreas remotas. Além da facilidade de medida, que permite a quantificação de múltiplos indivíduos, resposta-dose ou tempo-dependente (a fim de avaliar a magnitude da exposição ou efeitos), compreensão e especificação de limites de variabilidade como idade e sexo dos organismos e significância biológica.

Líquens, musgos e folhas de vegetais superiores que respondem de forma precisa aos experimentos de detecção de poluentes são frequentemente empregados na avaliação de poluentes atmosféricos. No biomonitoramento, a coleta sistemática de dados relativos aos efeitos observados sobre os biomonitores permite a criação de um inventário de respostas à poluição, o que representa o terceiro sistema de informação no controle da qualidade do ar adicionalmente aos inventários de emissões e de concentrações ambientais de poluentes.

2.4.3. Biomonitoramento humano

A determinação de substâncias químicas em fluidos corporais humanos foi feita inicialmente em Toxicologia Ocupacional visando a proteção de trabalhadores expostos a toxicantes. A partir da década de 1960, surgiram novas técnicas analíticas capazes de determinar concentrações muito baixas de compostos químicos em matrizes biológicas, possibilitando a determinação de toxicantes em indivíduos expostos apenas a níveis ambientais de contaminação.

O biomonitoramento humano, um dos métodos utilizados, visa a proteção da saúde humana em caso de exposição às substâncias químicas e deve ser uma atividade sistemática, contínua ou repetitiva, de coleta de amostras biológicas para análises das concentrações dos poluentes, ou de seus produtos de biotransformação ou, ainda, a avaliação de seus efeitos específicos e não adversos. Esse monitoramento tem como objetivo analisar a exposição ou o risco à saúde de indivíduos expostos, comparando os dados obtidos com valores de referência e, se necessário, apli-

continuação

Observacionais/Associação entre variáveis		
Ecológicos	Correlação entre registros de determinada patologia com os registros dos níveis de exposição a um poluente por período de tempo.	Muito pouco factível pela ausência de registros.
Seccionais	Formar um grupo de pessoas expostas ao fator ambiental (Grupo Estudo) e outro de pessoas não expostas (Grupo Comparação). Comparar a prevalência dos efeitos entre os dois grupos.	Muito factível. Pode ser de curta duração e é indicado para efeitos crônicos.
Observacionais/Comparativos/Evidências de Casualidade		
Coorte	Inicialmente, formar dois grupos, Estudo e Comparação, e, depois, comparar a incidência/mortalidade dos efeitos entre ambos em determinado período.	Pouco factível. Longa duração e é indicado para efeitos agudos e populações estáveis.
Coorte Histórico	Por meio de dados de registros, os grupos Estudo e Comparação são formados em determinado momento do passado. Logo após, compara-se a incidência/mortalidade do efeito a ser estudado entre os dois grupos desde o passado até o momento atual.	Muito pouco factível pela ausência de registros.
Caso-controle	Forma-se um grupo de pessoas que apresenta o efeito que se quer estudar e outro grupo semelhante que não apresenta esse efeito. O segundo passo é comparar, em seguida, a proporção de pessoas expostas no passado entre os grupos.	Factível por ser de curta duração. Ideal para doenças de baixa prevalência. Necessita de registros confiáveis.
Intervencional		
Experimental	Selecionar grupo de pessoas que sofrerão determinada intervenção e um grupo semelhante sem a intervenção. Acompanhá-los por um período de tempo para comparar a incidência dos efeitos entre os dois grupos.	Pouco factível devido a questões éticas.

4. PRINCIPAIS POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Os poluentes do ar podem ser divididos em dois grupos. Os poluentes prioritários tradicionais, que compreendem SO_2 , NO_2 , CO, MP, chumbo (Pb) e o poluente secundário O_3 , legislados na maioria dos países, e os poluentes perigosos do ar, que abrangem compostos químicos e os agentes físicos e biológicos de diferentes tipos. Os poluentes perigosos geralmente estão presentes na atmosfera em concentrações muito menores do que os poluentes prioritários tradicionais e, normalmente, encontram-se localizados em determinadas áreas, porém esse grupo apresenta alta toxicidade.

4.1. Poluentes legislados pela Resolução Conama n. 003/90

4.1.1. Dióxido de enxofre (SO_2) e outros compostos de enxofre

O dióxido de enxofre (SO_2) é um gás incolor ou amarelo, com odor característico de enxofre, e muito irritante quando em contato com superfícies úmidas, pois se transforma em SO_3 e passa rapidamente a ácido sulfúrico (H_2SO_4). O SO_2 é um poluente primário clássico associado à presença de enxofre nos combustíveis fósseis, como carvão e petróleo. Suas principais fontes são automóveis, usinas termoelétricas, fundições, produção de ácido sulfúrico e de papel. As principais fontes naturais são as erupções vulcânicas e a oxidação de gases de enxofre produzidos principalmente pela decomposição de plantas. A emissão desse poluente pode ser reduzida com sucesso pela utilização de combustíveis com baixo conteúdo de enxofre, como o gás natural. Uma vez lançado na atmosfera, o SO_2 pode ser transportado para regiões distantes das fontes primárias de emissão, o que aumenta sua área de ação.

Uma vez inalado, o SO_2 dissolve-se na camada de muco que reveste o epitélio das vias aéreas e se transforma em ácido sul-

fúrico, sulfitos, bissulfitos e sulfatos. Dessa forma, a maior parte do dióxido de enxofre inalado por uma pessoa em repouso é retida nas vias aéreas superiores. A atividade física leva a um aumento da ventilação alveolar, com conseqüente aumento da sua penetração nas regiões mais distais do pulmão. Suas concentrações estão habitualmente relacionadas com as de material particulado e com maior mortalidade e morbidade por doenças respiratórias, particularmente a asma brônquica, a bronquite crônica e agravamento de doenças cardiovasculares. A exposição humana a altas concentrações pode acarretar irritação da mucosa respiratória, desde a nasofaringe e a orofaringe até os alvéolos, levando à inflamação, hemorragia e necrose. A liberação de mediadores da inflamação induz a hipersecreção de muco e estimulação das terminações nervosas. A resposta primária à inalação do SO_2 é uma broncoconstrição reflexa e reversível, levando ao aumento da resistência ao fluxo respiratório por causa do estreitamento das vias aéreas. Indivíduos com asma, doenças crônicas de coração e pulmão são mais sensíveis ao SO_2 .

Algumas plantas são muito sensíveis ao SO_2 , tendo suas folhas amareladas ou mesmo morrendo quando expostas a concentrações inferiores às que afetam a saúde humana. O SO_2 presente na atmosfera pode levar a formação de chuva ácida e é precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis (MP_{10}). Os sulfatos incorporados aos aerossóis são associados à acidificação de corpos d'água, redução da visibilidade, corrosão de edificações, monumentos, estruturas metálicas e condutores elétricos.

Os aerossóis ácidos mais comuns são o sulfato (SO_4^{2-}), o bisulfato (HSO_4^-) e o ácido sulfúrico (H_2SO_4), os quais podem causar inflamação do trato respiratório superior. O H_2SO_4 , contaminante secundário, além de irritar as vias aéreas superiores (nasofaringe), pode causar bronquite crônica. Por se tratarem de substâncias irritantes, não se têm indicadores biológicos de exposição utilizados na biomonitorização. Em indivíduos expostos, podem ser feitas provas de função respiratória.

4.1.2. Material particulado (MP), partículas inaláveis (MP₁₀) e partículas finas (MP_{2,5})

O material particulado é uma mistura variada de partículas sólidas e líquidas em suspensão no ar. Inicialmente, foi classificado como fuligem ou fumaça preta e, posteriormente, conceituado como "partículas totais em suspensão" (PTS). A partir de 1990, o tamanho das partículas foi fracionado, com especial atenção para o MP₁₀. Atualmente, o material particulado é classificado em MP₁₀ (partículas inaláveis com diâmetro aerodinâmico menor que 10 µm), MP_{2,5} (partículas finas com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm) e MP_{0,1} (partículas ultrafinas com diâmetro aerodinâmico menor do que 0,1 µm). Esses tamanhos de corte geralmente representam diferentes fontes e características, porém as propriedades físico-químicas responsáveis pela toxicidade não estão completamente elucidadas. Estudos mostram que a exposição a MP está relacionada à redução na expectativa de vida, estimando que, em todo o mundo, cerca de 3% dos óbitos por doenças cardiopulmonares, 5% dos cânceres de pulmão e 3% de óbitos em crianças até cinco anos de idade, totalizando aproximadamente 800 mil óbitos, estejam diretamente relacionados às concentrações atmosféricas de MP_{2,5}.

Os tipos de material particulado são poeiras, fumos, fumaças, névoas e neblinas e estão descritos abaixo.

Poeiras Dispersóides sólidos gerados por desagregação mecânica, ou seja, poeira tem a constituição química do material que lhe dá origem. O diâmetro é variável, desde 0,01 a 100 µm. Exemplos: talco, asbesto (amianto), óxido de ferro, algodão, linho, cânhamo etc.

Fumos Aerodispersóides sólidos gerados em processos de combustão, sublimação, fundição etc., ou seja, as partículas sólidas resultantes são diferentes do material que lhes dá origem. O diâmetro é muito pequeno, menor que 0,1 µm, como os fumos de metais. É interessante lembrar que a poeira impressiona e suja mais que o fumo, mas o risco de intoxicação por fumo é maior.

Fumaça Aerodispersóides formados pela combustão de matéria orgânica. O diâmetro é menor que 0,5 µm, podendo atingir alvéolos pulmonares.

Névoas Partículas líquidas, obtidas por processos mecânicos quaisquer. O diâmetro é muito variável, dependendo do sistema, por exemplo, *spray*.

Neblina Partículas líquidas obtidas por condensação de vapores. Tem-se como exemplo a neblina de ácido sulfúrico proveniente do aquecimento de cubas eletrolíticas contendo o ácido.

As fontes de material particulado são muitas e incluem aerossóis marinhos, poeira do solo, das ruas e rodovias, emissões veiculares (principalmente dos movidos a diesel), emissões de combustão e de processos industriais, construção e demolição, pulverização de praguicidas, bioaerossóis (como o pólen) e cinzas vulcânicas. Em muitos países localizados em regiões tropicais, a queima de biomassa, como a madeira, as folhas, os alimentos e as florestas, é a principal fonte de partículas atmosféricas.

A toxicidade das partículas depende do seu tamanho e da sua composição química. O MP₁₀ e o MP_{2,5} são considerados especialmente perigosos, pois atingem diferentes níveis do trato respiratório, além da variação em sua composição química. Partículas maiores do que 10 µm são efetivamente retidas pelo nariz e pela nasofaringe, sendo removidas com o muco, através de expectoração ou da saliva. Aquelas que possuem diâmetro aproximadamente de 2,5 µm podem ser depositadas na árvore traqueobrônquica. As partículas menores do que 1 µm se depositam na porção terminal dos brônquios e nos alvéolos, podendo ser absorvidas e atingir a circulação sistêmica. À medida que se depositam no trato respiratório, essas partículas passam a ser removidas pelos mecanismos de defesa, como o espirro desencadeado por grandes partículas que, devido ao seu tamanho, não conseguem ir além das narinas, nas quais se depositam. Outro mecanismo importante é o movimento ascendente realizado pelo aparelho mucociliar, localizado principalmente na traqueia e nos brônquios, que promove a eliminação eficaz de partículas, com auxílio do reflexo da tosse e do espirro, que aumentam muito a velocidade do movimento ciliar. As partículas que atingem porções mais distais das vias aéreas são fagocitadas pelos macrófagos alveolares, sendo, então, removidas. As partículas depositadas na árvore traqueobrônquica são eliminadas entre 1 e 20 dias após a exposição, ao passo que as depositadas nos bronquíolos não ciliados e alvéolos são eliminadas muito mais lentamente.

Com relação à composição química, as partículas contendo metais pesados (principalmente chumbo e mercúrio), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) e poluentes orgânicos persistentes (POP) como as dioxinas têm recebido maior atenção. Componentes inorgânicos das partículas como metais ou silicato podem ser citotóxicos para as células pulmonares e vários componentes orgânicos podem induzir toxicidade diretamente ou por meio de bioativação, gerando produtos genotóxicos.

Partículas menores causam maiores prejuízos à saúde e os efeitos à saúde estão relacionados à presença de metais, compostos orgânicos, acidez, atividade oxidativa ou redutiva e, ainda, aos potenciais tóxicos, alérgicos e biológicos dos seus componentes. De maneira geral, o MP contribui para o aumento da incidência de doenças respiratórias, como a bronquite e a asma, na população exposta. O principal risco associado à emissão de partículas é a capacidade de adsorção de gases tóxicos, como SO_x e NO_x, que podem ser carregados até os alvéolos e causar danos significativos. O SO₂ normalmente é retido e eliminado nas vias aéreas superiores, porém, quando é adsorvido em partículas muito pequenas, atinge áreas de maior suscetibilidade. As partículas inaláveis (MP₁₀) estão associadas ao aumento de atendimentos hospitalares e mortes prematuras. As maiores causam efeitos significativos em pessoas com doenças pulmonares, asma e bronquite.

As partículas podem viajar por milhares de quilômetros na atmosfera, atravessar oceanos e se depositar em outros países, conseguindo causar danos à vegetação, diminuição da visibilidade e contaminação do solo. São removidas da atmosfera por sedimentação (deposição seca) ou arrastadas pela chuva na forma de deposição úmida.

A redução da emissão de MP de origem antropogênica pode se dar por meio do uso de combustíveis mais limpos (p.

ex., álcool), de melhores técnicas de combustão ou, ainda, do uso de separadores mecânicos, por gravidade ou centrifugação (p. ex., câmaras de poeira), precipitadores eletrostáticos, lavadores na saída das chaminés e filtros de tela ou carvão ativado.

4.1.3. Monóxido de carbono (CO)

O monóxido de carbono (CO) é um gás inodoro e incolor, classificado toxicologicamente como asfixiante químico por agir na formação de carboxiemoglobina (COHb). Produto da combustão incompleta, suas principais fontes são os veículos automotores, sistemas de aquecimento, usinas termoeletricas a carvão, queima de biomassa, queima de tabaco e churrasqueiras. É produzido em grandes quantidades durante a combustão com baixa eficiência, em baixas temperaturas ou em regiões altas. Há, também, as fontes naturais, como atividade vulcânica, descargas elétricas durante tempestades e emissão de gás natural, que levam a uma concentração média mundial de 0,09 ppm.

O CO apresenta meia-vida na atmosfera de 1 a 2 meses e pode ser transportado por milhares de quilômetros. Suas emissões podem ser reduzidas pelo aumento da relação ar/combustível durante a combustão, porém com o risco de aumento da formação de óxidos de nitrogênio (NO_x). A forma mais efetiva de redução das emissões é o uso de catalisadores nos automóveis.

A concentração normal de COHb no sangue de indivíduos não fumantes é aproximadamente 0,5% (valor de referência para população não fumante), devido a produção endógena de CO durante o catabolismo do heme. A avaliação percentual de COHb no sangue da população é utilizada como indicador biológico de exposição ao CO na monitorização biológica. O limite biológico de exposição (LBE) proposto pela EPA é de 2% de COHb; a OMS recomenda o limite de 2,5 a 3% de COHb para a população exposta não fumante.

Intoxicações agudas podem ser fatais. Em grande parte, a toxicidade do CO se deve a sua elevada afinidade (entre 240 e 300 vezes maior que a do oxigênio) pela hemoglobina e mioglobina com formação de COHb que não transporta o O₂ para as células, causando anóxia tecidual. Por isso, a exposição ao CO está também associada a prejuízos na acuidade visual, no aprendizado, na capacidade de trabalho e no aumento na mortalidade por infarto cardíaco agudo entre idosos. As Tabelas 8 e 9 apresentam a relação entre a porcentagem de COHb e os efeitos nocivos para o homem e entre as concentrações de CO no ambiente, concentrações de COHb e sinais e sintomas da intoxicação.

Tabela 8. Relação entre a porcentagem de carboxiemoglobina (COHb) no sangue e efeitos nocivos (Passarelli, 2003).

[COHb]	Efeitos nocivos ao homem
< 1%	Nada observável.
1-2%	Leve alteração no comportamento.
2-5%	Efeitos sobre o sistema nervoso central (SNC): ► diminuição da capacidade de distinguir espaço/tempo; ► falhas na acuidade visual; ► alterações nas funções motoras.
> 5%	Alterações cardiovasculares.

Tabela 9. Relação entre teor de CO no ar, de COHb no sangue e sinais e sintomas de intoxicação (Passarelli, 2003).

[] de CO (ppm)	% de COHb	Sinais e sintomas
60	10%	Dificuldade visual, cefaleia.
130	20%	Dores abdominais, cefaleia, desmaios.
200	30%	Desmaios, paralisia, distúrbios respiratórios, colapso circulatório.
600	50%	Bloqueio das funções respiratórias, paralisia, coma, morte.

4.1.4. Dióxido de nitrogênio (NO₂) e outros compostos de nitrogênio (NO_x)

O dióxido de nitrogênio (NO₂) é um gás marrom-avermelhado, com forte odor e muito irritante. Os óxidos de nitrogênio (NO_x) são formados por reações de oxidação atmosféricas do nitrogênio durante a combustão. Suas principais fontes estão relacionadas a processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas a base de óleo ou gás, incineração e também pela oxidação de fertilizantes a base de nitrogênio. Como fontes naturais, merecem destaque certas bactérias que emitem grande quantidade de óxido nítrico na atmosfera. A maior parte dos compostos de nitrogênio é emitida na forma não tóxica de óxido nítrico (NO) que, na sequência, sofre oxidação na atmosfera, formando o real poluente NO₂.

A presença do NO₂ na atmosfera pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos (os quais contribuem para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera), ozônio (O₃) e outros compostos orgânicos tóxicos e genotóxicos (p. ex., 3-nitrobenzantrona). Suas emissões podem ser reduzidas por meio da otimização dos processos de combustão ou pelo uso de conversores catalíticos de emissões.

O NO₂, quando inalado, atinge porções periféricas dos pulmões devido ao seu caráter lipofílico, e seus efeitos tóxicos estão relacionados ao seu poder oxidante. Os principais efeitos tóxicos do NO₂ são irritação das vias aéreas, enfisema pulmonar a longo prazo e, em intoxicações agudas, edema pulmonar. Está relacionado às infecções respiratórias (principalmente causadas por vírus), ao aumento da sensibilidade à asma e à bronquite, e à formação de nitrosaminas carcinogênicas nos pulmões. É capaz de oxidar componentes teciduais (p. ex., proteínas, lipídios) e de suprimir sistemas antioxidantes, protetores dos organismos.

Os efeitos tóxicos são mais acentuados em crianças, nas quais o NO₂ prolonga as queixas respiratórias e prejudica a função pulmonar. A exposição materna durante a gravidez pode aumentar o risco de complicações gestacionais por danos celulares causados por peroxidação lipídica ou por diminuição materna das reservas de antioxidantes. Asmáticos têm resposta aumentada à histamina, à metilcolina e aos alérgenos após a inalação de NO₂.

O NO₂ pode ser transformado em ácido nítrico (HNO₃), que também é irritante e um dos componentes da chuva ácida responsável por danos à vegetação e às colheitas.

4.1.5. Ozônio (O₃)

A molécula de ozônio (O₃) contém três átomos de oxigênio, diferentemente das moléculas usuais de oxigênio (O₂). É um gás

incolor e inodoro nas concentrações identificadas ambientalmente e se encontra em duas camadas distintas da atmosfera: na estratosfera, naturalmente presente devido à fotólise do O_2 , onde protege os organismos vivos por meio da absorção da radiação ultravioleta emitida pelo sol; e na troposfera, presente devido às atividades humanas principalmente em áreas urbanas, onde possui potencial tóxico reconhecido.

O O_3 presente na troposfera é um poluente secundário formado por uma série de reações catalisadas pela radiação ultravioleta, envolvendo principalmente os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os compostos orgânicos voláteis (COV). Outras fontes de emissão de O_3 são os purificadores de ar e fotocopiadoras. Como o MP, o O_3 pode viajar por milhares de quilômetros. Os seus níveis são maiores no verão, elevam-se no período da manhã, têm o seu pico durante a tarde e decaem durante o início da noite, devido às variações da intensidade da luz UV. Seu tempo de meia-vida atmosférica é de 1 a 2 semanas durante o verão e 1 a 2 meses no inverno.

É um potente agente oxidante e citotóxico, que pode afetar a saúde da população, irritando os olhos e o sistema respiratório, levando à perda da função pulmonar. Torna as pessoas mais suscetíveis a infecções respiratórias e agrava doenças preexistentes como a asma. Devido a sua baixa solubilidade em água, o O_3 costuma atingir facilmente os alvéolos, produzindo seus efeitos tóxicos nessa região com mudanças irreversíveis na estrutura dos pulmões e levando a doenças crônicas como enfisema e bronquite. A reação inflamatória provocada pelo O_3 em idosos e em outros grupos sensíveis torna-os mais suscetíveis aos efeitos adversos de outros poluentes como o MP. Os picos nas concentrações de O_3 estão relacionados ao aumento no número de mortes em várias cidades.

Com relação aos impactos ambientais, o O_3 causa danos à vegetação natural e à agricultura, pois age como inibidor da fotossíntese, produzindo também lesões nas folhas das plantas. Contribui para o aquecimento global e, devido ao seu poder oxidante, é capaz de danificar materiais como borracha e couro.

4.2. Poluentes não legislados pela Resolução Conama n. 003/90

4.2.1. Chumbo (Pb)

Embora o chumbo (Pb) não esteja presente na Resolução Conama n. 003, em 2013 o Estado de São Paulo incluiu esse poluente no Decreto n. 59.113, conforme o qual o chumbo no material particulado deverá ser monitorado apenas em áreas específicas determinadas pela Cetesb, sendo estabelecido como padrão final, para concentrações médias aritméticas anuais, de $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

O Pb é lançado na atmosfera principalmente na forma de MP por inúmeras fontes industriais, como siderurgias, incineradores (p. ex., queima de lixo doméstico), produção de energia (p. ex., usinas termoeletricas a carvão) e operações de fabricação e reciclagem de materiais metálicos, e naturais, destacando-se as erupções vulcânicas. A exemplo do Brasil, nos países que diminuíram ou eliminaram o chumbo tetraetila, usado como aditivo antidetonante na gasolina, seus níveis atmosféricos diminuíram significativamente.

Como consequência direta da retirada do Pb da gasolina, observou-se a diminuição dos níveis sanguíneos desse metal na população em geral, contudo níveis sanguíneos de Pb relati-

vamente elevados ainda são observados em populações que residem nas proximidades de incineradores e áreas industrializadas quando comparados àquelas de áreas isoladas, refletindo o impacto da poluição ambiental desse metal. Recentes estudos em diversos países têm associado a exposição ambiental ao Pb a efeitos adversos em diferentes sistemas do organismo, incluindo alterações nos sistemas neurológico, hematológico, metabólico, reprodutivo e cardiovascular. Esses estudos demonstram que os efeitos adversos ocorrem em níveis de exposição antes considerados seguros.

Depois de absorvido pelo organismo, o Pb tende a ser transportado por diversas vias, dependendo da fonte e da extensão da exposição, e da sua biodisponibilidade. A fração do Pb absorvida depende principalmente das propriedades físico-químicas, como a solubilidade da forma a qual os organismos estão em contato, a exposição atmosférica e o tamanho das partículas contendo esse metal. Crianças e gestantes são particularmente vulneráveis ao Pb porque o sistema nervoso em desenvolvimento é um dos principais alvos da toxicidade desse metal.

Entre os efeitos tóxicos do Pb, estão as alterações hematológicas (decréscimo na síntese do *heme* e aumento na destruição dos eritrócitos); endócrinas (alterações na tireoide e na produção do hormônio do crescimento); neurológicas (encefalopatia, déficit de inteligência e distúrbios no aprendizado); reprodutivas (infertilidade masculina e maior probabilidade de abortos e natimortos); e imunológicas. Nas intoxicações, são observados efeitos cardiovasculares, renais e gastrintestinais. O Pb inorgânico é classificado como provável carcinógeno para humanos (grupo 2B) pela International Agency for Research on Cancer (IARC).

4.2.2. Compostos orgânicos voláteis (COV)

Os compostos orgânicos voláteis (COV) constituem uma classe de contaminantes com características diferenciadas dos demais poluentes atmosféricos e incluem uma longa lista de compostos químicos de uso industrial, bem como aqueles emitidos por veículos motorizados. Entre as classes que compõem os COV, estão os hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, hidrocarbonetos halogenados, alguns álcoois, ésteres e aldeídos.

Esses compostos estão presentes na atmosfera devido a sua volatilização ou a seu processo de combustão incompleta. Suas principais fontes são as refinarias de petróleo, indústrias petroquímicas, exaustões veiculares, produção e distribuição de gás natural, praguicidas, processos de combustão e emissões florestais.

Por definição, COV são substâncias com pressão de vapor a 20°C inferior à pressão atmosférica normal ($1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$) e maior que 130 Pa . O número de espécies orgânicas na atmosfera é muito elevado e as pressões de vapor de muitas delas fazem com que a transição entre as fases gasosa e particulada seja frequente. Assim, muitos desses COV estão presentes na atmosfera simultaneamente como vapores e MP. Frequentemente, o termo COV é aplicado aos poluentes semivoláteis e engloba não apenas os hidrocarbonetos, como também moléculas que contêm átomos de oxigênio, enxofre, cloro, entre outros. Em geral, essa classe de poluentes é estudada separadamente do metano.

Os COV desempenham um papel relevante na química atmosférica por atuarem como percussores do *smog* fotoquímico

por meio da formação de radicais orgânicos que levam à produção de O_3 e à modificação da capacidade oxidante da própria atmosfera, onde podem ser transportados por distâncias relativamente grandes. Muitos compostos dessa classe de poluentes são tóxicos para humanos, contribuem para o aquecimento global, e os clorofluorcarbonos (CFC) destroem a camada de ozônio. A presença de compostos mutagênicos e carcinogênicos entre os COV tem despertado grande interesse sobre esses poluentes. COV comuns produzidos por motores a diesel incluem benzeno, tolueno, formaldeído e 1,3-butadieno, sendo o benzeno e o butadieno carcinógenos humanos bem conhecidos. O formaldeído é um potente irritante das vias aéreas e é um provável carcinógeno. Outros COV estão associados a problemas reprodutivos, asma e problemas neurológicos.

4.2.3. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA)

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) formam uma classe de poluentes ubiqüitários caracterizados por possuírem dois ou mais anéis aromáticos condensados em suas moléculas. Essas substâncias, bem como seus derivados nitrados e oxigenados, formadas na atmosfera têm ampla distribuição e são encontradas como constituintes de misturas complexas em todos os compartimentos ambientais. De maneira geral, tanto os HPA quanto seus derivados estão associados ao aumento da incidência de diversos tipos de câncer no homem.

Esses compostos são gerados tanto por fontes naturais como antrópicas, sendo as atividades antrópicas as principais responsáveis pela presença dos HPA nos compartimentos ambientais. Os HPA são gerados por meio de síntese por bactérias, plantas e fungos ou durante a queima incompleta de matéria orgânica, naturalmente presente no meio ambiente (p. ex., incêndios florestais naturais) ou relacionados a uma série de atividades humanas, destacando-se a produção de carvão coque e gás, indústrias petroquímicas, produção e derramamentos de óleos combustíveis e emissões veiculares. Embora os HPA sejam emitidos na atmosfera principalmente na forma gasosa, uma porção significativa, principalmente os HPA mais pesados e mais mutagênicos, está associada principalmente às partículas finas.

Com relação à toxicidade, aqueles de menor massa molecular apresentam maior toxicidade aguda, ao passo que os com maior massa são mais genotóxicos, tanto para o homem como para outros organismos. Esses compostos somente se tornam genotóxicos após sua biotransformação, quando são produzidos intermediários reativos que se ligam covalentemente ao DNA. Os mecanismos das ações tóxicas não carcinogênicas desses compostos têm sido menos estudados, porém há trabalhos que demonstram a capacidade em causar estresse oxidativo, efeitos sobre o sistema imunológico, alterações na regulação endócrina e alterações no desenvolvimento de espécies aquáticas. Outro mecanismo de toxicidade dos HPA e dos compostos heterocíclicos é a fototoxicidade. Estudos com organismos aquáticos indicam que a exposição à radiação ultravioleta (UV) ou aos raios solares pode aumentar drasticamente a toxicidade dos HPA.

O primeiro indício de carcinogenicidade química de produtos de combustão orgânica foi publicado em 1775, quando se

observou maior incidência de câncer em limpadores de chaminés. Muitos anos depois, essa atividade carcinogênica foi atribuída à presença de benzo[a]pireno (BaP) nas amostras. Posteriormente, foi comprovado experimentalmente que a presença do BaP, por si só, não justificava toda a atividade carcinogênica observada nessas amostras, sendo esse "excesso de carcinogenicidade" atribuído à presença conjunta de outros membros da família dos HPA e de alguns de seus derivados, principalmente nitroderivados. Porém, muitos trabalhos reconhecem que, apesar da presença de HPA carcinogênicos no ar, esses compostos podem não ser os maiores responsáveis pela atividade mutagênica detectada. Já foram identificados mais de 500 compostos mutagênicos de diversas classes químicas em extratos orgânicos obtidos de material particulado do ar.

5. FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS E A POLUIÇÃO DO AR

Além de os problemas decorrentes da poluição terem uma importância localizada, principalmente em centros urbanos industrializados, a poluição assume um significado global quando se observam efeitos como: destruição da camada de ozônio; deposição ácida; efeito estufa; além do próprio transporte dos poluentes por grandes distâncias.

5.1. Chuva ácida

O termo chuva ácida foi empregado pela primeira vez por Robert Angus Smith, químico e climatologista inglês, que usou a expressão para descrever a precipitação ácida que ocorreu sobre a cidade de Manchester no início da Revolução Industrial. Atividades como a queima de carvão e de combustíveis fósseis, além de outras atividades industriais, lançam dióxido de enxofre e de nitrogênio na atmosfera. Como citado neste capítulo, ao se combinarem com moléculas de água presentes na atmosfera sob a forma de vapor, esses gases formam ácido sulfúrico ou ácido nítrico, tendo como resultado as chuvas ácidas. As águas da chuva, assim como a geada, neve e neblina carregadas de ácidos, ao caírem na superfície, alteram a composição química do solo e das águas, atingem as cadeias alimentares, destroem florestas e lavouras, atacam estruturas metálicas, monumentos e edificações. Essas precipitações ácidas apresentam valores de pH entre 4 e 5, mas podem atingir valores menores, em alguns casos até pH ao redor de 2.

É importante salientar que as precipitações ácidas podem ser carregadas pelo vento e se precipitarem em locais bem distantes do ponto de emissão dos gases. Por exemplo, emissões na cidade de Londres podem acabar se precipitando nas florestas da Escandinávia, resultando em problemas internacionais. Essa deposição ácida diminui o pH de lagos, de rios e do solo e tem um efeito acentuado em animais e plantas. Em pH 5,9, a população de animais aquáticos decresce e alguns deles desaparecem. Em pH 5,4, os peixes não se reproduzem.

Segundo o Fundo Mundial para a Natureza (WWF, do inglês World Wide Fund for Nature), cerca de 35% dos ecossistemas europeus já estão seriamente alterados e cerca de 50% das florestas da Alemanha e da Holanda estão destruídas pela acidez da chuva. Na costa do Atlântico Norte, a água do mar está entre 10 e 30% mais ácida do que nos últimos vinte anos. Nos Estados Unidos, onde as usinas termoeletricas são responsáveis