



Contaminación y contaminantes, aspectos científicos, teóricos y prácticos

Hugo Sandoval L

Hugo Sandoval L. es Químico y Licenciado en Química, Pontificia Universidad Católica de Chile. Actualmente se desempeña como Investigador, Departamento de Química, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

1. ANTECEDENTES GENERALES

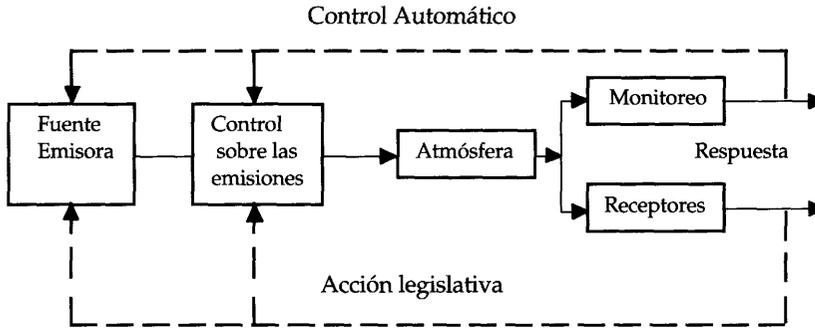
La contaminación atmosférica puede ser definida como la condición que presenta la atmósfera, de una zona dada, cuando la concentración de una o más sustancias supera fuertemente los niveles normales en ese ambiente, produciendo efectos medibles en seres humanos, animales, vegetales y materiales. Estas sustancias pueden encontrarse en estado gaseoso, sólido o líquido, y en el caso de las dos últimas se las denomina partículas o aerosoles.

Por otra parte, en la contaminación atmosférica actúan básicamente tres componentes, los que constituyen un sistema. Estos son: las fuentes emisoras, que pueden ser naturales o antrópicas y producen contaminantes; la atmósfera, que recibe estas sustancias y las transporta a diferentes lugares, bajo la acción, en algunos casos, de procesos de transformación, y, por último, están los receptores, seres vivos y materiales, que son los entes afectados por estas sustancias en el aire.

Durante mucho tiempo se pensó que la contaminación atmosférica era un problema local, asociado a los grandes centros urbanos o zonas altamente industrializadas. Sin embargo, en las últimas décadas han aparecido problemas globales como la lluvia ácida, el efecto invernadero y, en los últimos 8 años, el agujero del ozono en la zona antártica, que afecta durante unos 3 meses incluso a parte del territorio sur de Chile. Esto ha conducido a considerar la contaminación atmosférica como un problema generalizado, permitiendo desarrollar enfoques continentales, en algunos casos, como el del efecto invernadero.

Actualmente, se ha tomado la decisión de actuar sobre la contaminación atmosférica y para ello se la considera como un sistema, el que se presenta en el Gráfico 1.

GRÁFICO 1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA



En el gráfico anterior, cada bloque representa un proceso definido dentro del sistema contaminación atmosférica. En cambio, la línea punteada indica formas de actuar para lograr una mejor calidad del aire. Destacando, en primer lugar, las fuentes emisoras, las que incluyen el transporte público y privado, la generación de energía industrial-residencial y los procesos industriales. Como segundo punto está el control sobre las emisiones, que incluye una amplia gama de posibilidades técnicas y operacionales. A continuación está la atmósfera, que es el medio que transporta, diluye y transforma física y químicamente los contaminantes. Por último, están el monitoreo y los receptores, que son los causantes de aplicar drásticas medidas cuando la concentración de contaminantes es extremadamente alta, superando las normas de calidad de aire en un factor superior a dos o tres, según el contaminante problema.

2. CONTAMINANTES

Una forma de clasificar los contaminantes es a través de su estado físico o de agregación. Es así como se los divide en contaminantes gaseosos, dentro de los que destacan los compuestos de azufre como dióxido, trióxido, provenientes de procesos de combustión y de fundición de minerales sulfurados, sulfuro de hidrógeno y marcaptanos, producidos a partir de la degradación biológica de materia orgánica con azufre en su estructura molecular, con fórmulas SO_2 , SO_3 , H_2S y CH_3SH o $\text{C}_2\text{H}_5\text{-S-CH}_3$, respectivamente; monóxido de carbono (CO); compuestos

de nitrógeno como óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), sustancias generadas en los procesos de combustión, amoníaco (NH₃) que tiene su origen en excretas líquidas de animales domésticos y salvajes; hidrocarburos gaseosos (HC) o compuestos orgánicos volátiles (COV). Algunos de estos HC tienen origen natural como el CH₄ y los terpenos, producidos por los pentanos, en el caso del primero, y por abetos, eucalipto y pinos, entre otros, los segundos; una de las fuentes más importantes proviene de la combustión de petróleo y sus derivados, que incluyen a los hidrocarburos alifáticos y aromáticos, aldehídos (RCHO), cetonas (R-CO-R), compuestos aromáticos como benceno (C₆H₆); ozono (O₃), entre otros. Otro tipo de contaminantes corresponde a las partículas sólidas o líquidas, denominadas comúnmente aerosoles. Dentro de estas partículas se encuentran aquellas que tienen diámetro aerodinámico medio mayor que 50 micrones y corresponden a las partículas sedimentables, porque decantan por gravedad, y las con diámetro entre 10 y 50 micrones (1 micrón (μm) = 10⁻⁶m), que representan las partículas totales en suspensión (PTS) y, aquellas con diámetro menor que 10 μm que componen la fracción de partículas respirables. La respirabilidad de las partículas varía según el diámetro y se expresa en porcentajes que son de 100, 75, 50, 25 y 0 por ciento, según sea el valor del diámetro, de 2 - 2,5 - 3,5 - 5 y 10 μm, respectivamente.

El hecho de que las partículas sean contaminantes, y el grado de efecto agresivo que éstas tengan sobre la salud humana, está asociado, por una parte, al tamaño y, por otra, a su composición química. Esto conduce a que, en algunos casos, sea necesario disponer de las máximas concentraciones en partículas para sustancias como plomo, arsénico, cadmio, aerosoles, sulfatos y ácido sulfúrico, entre otras.

Adicionalmente, se agrupa a los contaminantes según su origen, el que puede ser natural (aerosoles marinos, sulfuros provenientes de emanaciones volcánicas, óxido nítrico de tempestades eléctricas) o antrópico (producidos por la acción del hombre, en diferentes procesos). Entre éstos se encuentran SO₂, CO y sales de plomo.

Por último, a los contaminantes se los clasifica en primarios, emitidos directamente al aire a través de diferentes procesos (CO, SO₂, partículas), y secundarios, que provienen de transformaciones homogéneas y heterogéneas que experimentan los contaminantes primarios, para generar sustancias como ozono, sulfatos, nitratos, aerosoles, ácido sulfúrico y sustancias orgánicas como aldehídos y nitratos de peroxiacilo (PANs), entre otros.

3. COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES

La emisión de sustancias a la atmósfera es un proceso constante, que debido a sus efectos nocivos sobre el medio ambiente eleva, en algunas ocasiones, el rango de concentraciones a niveles de preocupación. Sin embargo, este fenómeno no es acumulativo en el tiempo, sino que más bien es controlado por procesos que suceden en la atmósfera, dentro de los que destacan:

- Difusión de contaminantes en la atmósfera
- Deposición seca y húmeda
- Transformación de sustancias

A continuación se desarrolla una descripción de cada uno de estos procesos.

3.1. Difusión de contaminantes

Una sustancia introducida a la atmósfera es sometida a un proceso de transporte y dilución en el aire, a causa del constante movimiento que experimentan las diferentes capas de aire que conforman la atmósfera. Este movimiento es controlado por distintas variables meteorológicas, entre las que destacan: dirección y velocidad del viento; presencia de inversiones de temperatura, que pueden ser de superficie o radiativas y de altura, ambas presentes en el valle central de Chile, en que está inserta la ciudad de Santiago; presión, temperatura, humedad y radiación solar. Algunas de estas variables, como la velocidad del viento de superficie y su dirección, el perfil de temperatura y la turbulencia atmosférica, permiten obtener diferentes clases de estabilidad atmosférica que facilitan o dificultan la capacidad de dispersión de los contaminantes en ella. Entre estas clases se encuentran las de condición de estabilidad extrema, moderada, suave y neutra. La de estabilidad suave y moderada predomina en Santiago en los meses de invierno y conduce a una baja capacidad de la atmósfera para dispersar contaminantes.¹

¹ Véase J. Escudero O., H. Sandoval L. y P. Ulriksen U. (1985) «Diagnóstico de la contaminación atmosférica de Santiago-Chile». Contaminación Ambiental, Medellín (Colombia), 7(14), p. 25.



3.1 Deposición seca y húmeda

Se designa por deposición seca a la transferencia de contaminantes gaseosos o particulados hacia la superficie de la Tierra, incluyendo suelo, agua y vegetación como medios de remoción. Este proceso se compone de tres etapas distintas. La primera considera el transporte del material a través de la capa superficial a la vecindad inmediata de la superficie. Esta etapa es controlada por difusión turbulenta en la capa superficial y a veces se denomina componente aerodinámico de transferencia. La segunda etapa, denominada componente superficial de transporte, involucra la difusión del material a través de la subcapa laminar próxima a la superficie del último sustrato adsorbente y absorbente. A pesar de que la subcapa laminar es típicamente sólo del orden de magnitud de 10^{-1} a 10^{-2} cm de espesor, la difusión a través de ella puede ser de importancia crítica en la velocidad total de deposición. La solubilidad o absorbilidad de especies en la subcapa determina cuántas de las especies que difunden a través de la subcapa laminar son realmente removidas, y este proceso final, denominado componente de transferencia, constituye la tercera etapa.

Los mecanismos de transporte que conducen a deposición seca son complejos y es por ello que en la descripción de la velocidad de remoción de una especie por deposición seca no se representa el proceso con un gran nivel de detalle.

El proceso de deposición seca se representa en función de una velocidad de deposición « V_d », que se determina experimentalmente. Este proceso puede ser observado en términos conceptuales como análogo al flujo eléctrico o calórico a través de una serie de resistencias. La transferencia de material desde la atmósfera a la superficie se desarrolla a través de tres resistencias, la aerodinámica, la de capa superficial y la resistencia de transferencia. A cada una de estas resistencias se las designa como r_a , r_s , r_t respectivamente, y tienen como unidades scm^{-1} . Es así como V_d se expresa como:

$$V_d = (r_a + r_s + r_t)^{-1}$$

Por lo general, esta velocidad varía de 0,8 a 2,0 y de 0,2 a 0,4 scm^{-1} para SO_2 y sulfates, respectivamente.

La deposición húmeda corresponde a la absorción de contaminantes en gotas, seguida de la remoción de estas gotas por precipita-

ción. Existe una amplia gama de términos que se emplean como sinónimos de deposición húmeda, como son eliminación por precipitación, *washout* y *rainout*. Estos términos corresponden a la remoción de contaminantes de la atmósfera por precipitación, lluvia y nieve. El término *washout* se aplica específicamente a la eliminación que sucede en las nubes; en cambio, el término *rainout* se refiere a la eliminación por debajo de las nubes por la caída de lluvia, nieve o granizo.

En la mayoría de los casos es posible presentar la velocidad local de remoción de un gas o partícula por deposición húmeda, como un proceso de primer orden del tipo $A(z,t)$ $C(x,y,z,t)$ y $A(D_p; z,t)n(D_p; x,y,z,t)$ en que

- C = Concentración del material contaminante gas o aerosol.
- D_p = Diámetro de la partícula
- z = Representa la altura sobre el suelo
- t = Tiempo
- x,y = Coordenadas
- n = Número de partículas

y $A(z, t)$ y $A(D, z, t)$ son los coeficientes de *washout* para gases y partículas, respectivamente, que por lo general dependen de la altura sobre la superficie y del tiempo. El proceso de primer orden se aplica cuando la eliminación es irreversible, tal como sucede con aerosoles y gases de alta solubilidad. En este caso la velocidad de remoción tiene una dependencia lineal con la concentración en el aire de este material y es independiente de la historia previa del sistema.

3.3. Transformación de sustancias. Smog fotoquímico

Corresponde a los procesos de transformación homogéneos y heterogéneos que experimentan las sustancias en la atmósfera bajo la acción de la radiación solar.

En el desarrollo y comprensión de este proceso, juega un rol fundamental la cinética química, disciplina dedicada al estudio de los cambios de concentración en el tiempo para una sustancia dada y de los mecanismos a través de los cuales suceden estas transformaciones o reacciones.



Una forma simple de representar la velocidad física de una reacción es mediante la ecuación (1)

$$(1) d[A]/dt = V = k[A]^n$$

en que:

- V = velocidad de reacción, y representa el cambio de la concentración de A en el tiempo
- [A] = Concentración de la sustancia A
- k = Constante de velocidad de una reacción dada. Para reacciones elementales, depende prácticamente sólo de la temperatura
- n = número entero o fraccionario que representa el orden de la reacción en estudio

La investigación en cinética está orientada a determinar, por una parte, el valor de «k» para las diferentes reacciones de transformación que experimentan los contaminantes en la atmósfera, así como el mecanismo por el cual suceden las reacciones, es decir, el camino que toma cada una de ellas, y, por otra, el valor de «n». Cuando «n» es entero, la reacción es elemental y sucede en una etapa; en cambio, cuando es fraccionario, quiere decir que se desarrolla en varias etapas, teniendo un mecanismo complejo.

A continuación se presentan procesos específicos que suceden en el smog fotoquímico.

3.3.1. Reacciones fotoquímicas de la atmósfera

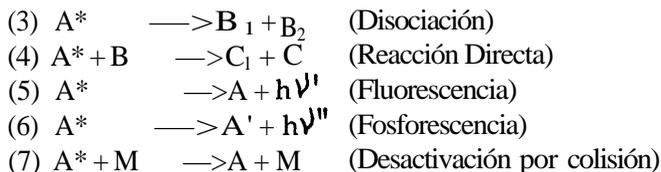
Son originadas por la absorción de un fotón ($h\nu$) de radiación ultravioleta de longitud de onda (λ) mayor que 3.000 Å, por una molécula y se esquematizan de la siguiente forma:

$$h\nu = \text{Constante de Planck} = 6,625 \times 10^{-7} \text{ erg x seg.}$$

$$\nu = \text{Frecuencia en ciclos (seg}^{-1}\text{)}$$

$$(2) A + h\nu \longrightarrow A^* (\text{Excitación})$$

La molécula excitada A^* puede participar en los siguientes procesos:



Las reacciones fotoquímicas desempeñan un rol importante en la contaminación del aire a causa de los productos que resultan de ellas, fundamentalmente radicales libres, átomos y otras sustancias, mediante un mecanismo muy complejo.² Luego, estos productos participan en reacciones responsables de la transformación de los contaminantes primarios más abundantes como NO, CO e hidrocarburos, y absorben radiación en las longitudes de onda existentes en la baja atmósfera. En cambio, el NO₂, como contaminante primario o secundario, absorbe la radiación ultravioleta que llega a la Tierra y que tiene longitud de onda (λ) mayor que 3.000 Å. El SO₂ presenta una absorción baja entre 3.000 y 4.000 Å y permite ser transformado con reducida eficiencia a SO₃.

3.3.2. Reacciones de los óxidos de nitrógeno

La principal fuente de óxidos de nitrógeno es la combustión interna y externa y particularmente del NO. Sin embargo, cierta cantidad de NO₂ es producida a partir del NO proveniente de los gases de escape de los automóviles al reaccionar con el oxígeno del aire. Aproximadamente hay una transformación del orden del 5% a la salida del tubo de escape.³

Por lo tanto, en atmósferas contaminadas siempre habrá bajas concentraciones de NO₂ y altas concentraciones de NO. El NO₂ desempeña un importante papel en el smog fotoquímico y también en la oxidación de SO₂ a sulfates o ácido sulfúrico, cuando están presentes los HC en la atmósfera.

² Véase K. L. Demerjian, J. A. Kerr y J. G. Calvert (1974) «The Mechanism of Photochemical Smog Formation», *Advances in Environmental Sciences and Technology*, Vol. 4, p. 1.

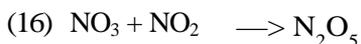
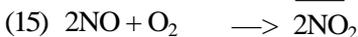
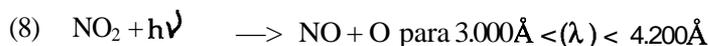
³ Véase E. A. Schuck y E. R. Stephens (1969) «Oxides of Nitrogen», *Advances in Environmental Sciences*, Vol. I, p. 73.



Concentraciones bajas de NO_2 en la atmósfera dan origen a una gran cantidad de reacciones que constituyen parte del smog fotoquímico y que se describen a continuación.

3.3.3. Ciclo fotoquímico del NO_2 , NO y O_3

Las reacciones más importantes entre el NO_2 , NO y el O_2 del aire en presencia de la luz solar son:



donde M es un tercer cuerpo, generalmente N_2 u O_2 , denominado termalizador por recibir energía de otras moléculas y no experimentar cambios. Las reacciones (8), (9) y (10) constituyen el ciclo fotoquímico del NO_2 .

Cabe señalar que el NO_2 es el principal absorbente de radiación ultravioleta entre los contaminantes, y las reacciones (8) y (10) son las más importantes.

Las sustancias subrayadas son contaminantes secundarios y éstas serían sus formas de producción en la atmósfera.

3.3.4. Reacciones adicionales en el sistema NO_x , H_2O , CO y Aire

Una vez analizadas las reacciones atmosféricas de los óxidos de nitrógeno, el paso siguiente es examinar el papel del vapor de agua y del monóxido de carbono, casi siempre presentes en atmósferas

urbanas. Estas reacciones adicionales pueden explicar la formación de grandes cantidades de ozono.

Al considerar la reacción:



en la cual se alcanza la concentración de equilibrio para el N_2O_5 , éste puede hidrolizarse en presencia de agua para formar ácido nítrico, el que da lugar a la lluvia ácida por NO_x .



el ácido nítrico puede oxidar al NO



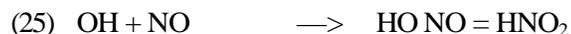
Además, se produce la formación de ácido nitroso de acuerdo a la siguiente reacción:



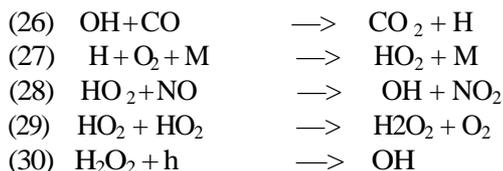
y posteriormente, la absorción de radiación ultravioleta produce la fotólisis del HNO_2 para dar:



El radical hidroxilo posee gran reactividad, especialmente con los hidrocarburos. Algunas de las reacciones de este radical son:



Por otra parte, cuando se agrega CO al aire irradiado que contiene trazas de óxidos de nitrógeno, se producen reacciones tales como las que se describen a continuación, en las que destacan las del radical hidroxilo con el CO (reacción muy importante y casi única en consumo de CO en atmósferas contaminadas),



Las reacciones anteriores proporcionan una explicación de la oxidación de NO en NO₂ en un sistema que incluye óxidos de nitrógeno, agua gaseosa, aire y monóxido de carbono, incluyendo la formación de O₃ mediante la fotólisis del NO₂ en el aire.⁴

Si bien el NO es oxidado a NO₂ por el ozono, son los HC los que favorecen más esta oxidación, principalmente a través de las reacciones en cadena de los radicales libres derivados de los hidrocarburos olefínicos al encontrarse en presencia de ozono en el conocido smog fotoquímico.

3.3.5. Reacciones de los hidrocarburos

El rol fundamental de los hidrocarburos (HC) como contaminantes atmosféricos radica en su participación en el smog fotoquímico. Para ello se requiere de la presencia de NO_x, HC y radiación solar. Si no estuvieran presentes los HC en la atmósfera no se observarían cambios en la concentración de NO en el tiempo, es decir, permanecería constante.

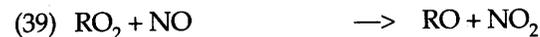
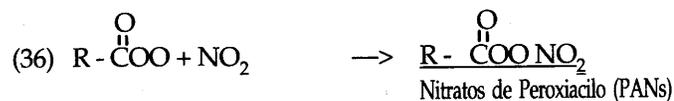
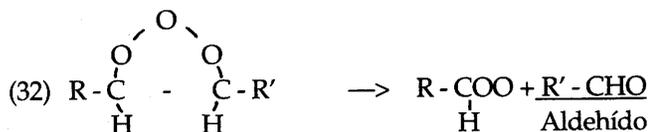
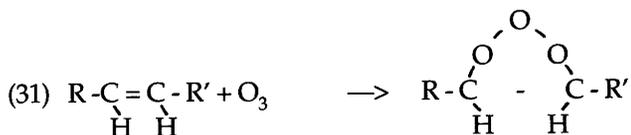
Tal como se ha planteado anteriormente, al analizar las emisiones de los motores de combustión interna, se observa claramente la importancia que tiene el transporte vehicular en la contaminación atmosférica y en especial en la producción de sustancias que dan origen a los contaminantes secundarios.

Dentro de los HC emitidos al aire por los procesos de combustión se encuentran los HC alifáticos o aquellos que sólo tienen enlaces simples y las olefinas o hidrocarburos con uno o más enlaces dobles, además de otras sustancias orgánicas como aldehídos, cetonas e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), por nombrar algunos.

Tanto las olefinas como los HC alifáticos o parafínicos son importantes en el smog fotoquímico y su participación se analiza a continuación en forma separada.

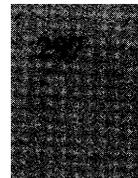
⁴ Véase J. Heicklen (1976) «Atmospheric Chemistry», Academic Press Inc.

Ciclo olefínico del smog fotoquímico:



Exceptuando $\text{R}-\underset{\text{H}}{\text{C}}=\underset{\text{H}}{\text{C}}-\text{R}'$ y O_3 que son reactantes y, por lo

tanto, sustancias estables, en la reacción se producen otras sustancias estables que están subrayadas con línea segmentada, entre los que destacan los productos de las reacciones (32), (35), (39) y (36) que forman aldehídos, dióxido de nitrógeno y nitratos de peroxiacilo (PANs), respectivamente.



El resto de los productos son radicales libres que participan activamente en otras reacciones que suceden en atmósferas contaminadas, como en el ciclo de las parafinas y en la oxidación del dióxido de azufre.

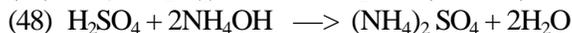
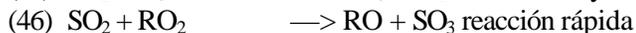
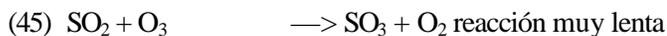
Ciclo parafínico del smog fotoquímico:



En este caso, el reactante R - CH₃ puede ser C₂H₆, C₃H₈ o C₄H₁₀, etano, propano y butano, respectivamente, o cualquier hidrocarburo ramificado o no, pero sin doble enlace.

Mediante las reacciones anteriores se obtienen productos estables que están subrayados con línea continua y que corresponden a agua, dióxido de nitrógeno y aldehídos, pertenecientes a las reacciones (40), (42), (44) y (43), respectivamente.

En el caso del dióxido de azufre, también se observa la participación de los HC a través de los radicales libres en la oxidación a trióxido de azufre y posteriormente a ácido sulfúrico o sulfates, mediante el mecanismo que se describe a continuación.



Exceptuando las reacciones (47) y (48) que son heterogéneas, las restantes son todas homogéneas y suceden mientras haya HC, NO_x y radiación solar.

De acuerdo a los resultados obtenidos de reacciones que suceden en la atmósfera, por medio del smog fotoquímico, se puede concluir que sus principales consecuencias están asociadas a la transformación de NO y SO₂ en NO₂ y SO₃, respectivamente, que darán origen a los correspondientes ácidos nítrico y sulfúrico; causantes fundamentales de la lluvia ácida, con un aporte del 60% para SO₂ y 40% para NO_x. Además, está la producción de aldehídos y cetonas, los que, por

una parte, son fotolizados en el aire, produciendo radicales libres y átomos, y, por otra, si no son fotolizados, son contaminantes tóxicos por sí mismos. En el caso de los aldehídos se presenta el efecto lacrimógeno, especialmente cuando son aromáticos como en el benzaldehído.

Finalmente, se ha podido observar que una forma importante de consumo de CO en la atmósfera es a través de su oxidación a CO₂ al reaccionar con el radical hidroxilo [reacción (26)], dándole al monóxido de carbono grandes características de estabilidad en la atmósfera, lo que permite que sea usado como trazador de movimiento de masas de aire contaminadas y sustancia indicadora de índices de contaminación.

4. TIEMPO DE RESIDENCIA

Este concepto representa el tiempo de permanencia de una sustancia en la atmósfera, es decir, el tiempo que transcurre para que desaparezca totalmente por reacción o consumo de otro tipo. Es inversamente proporcional a la reactividad de las sustancias y a los procesos que hacen disminuir su concentración en el tiempo. En general este proceso se puede representar mediante la ecuación (49).⁵

$$(49) \quad \frac{dM}{dt} = P + I - R - O$$

donde:

- M = cantidad total de una sustancia en un reservorio
- P = velocidad total de producción de la sustancia en estudio
- I = velocidad total de flujo másico de entrada
- R = velocidad total de remoción de una sustancia dada
- O = velocidad total de flujo másico de salida.

De acuerdo a lo anterior, se puede representar el tiempo de residencia « t_r » para las especies de un reservorio mediante ecuación (50):

$$(50) \quad \frac{1}{t_r} = \frac{1}{M} \times \frac{dM}{dt} = \frac{P+I}{M} - \frac{R+O}{M}$$

⁵ Véase W. G. N. Slim (1980) «Relationships between removal processes and residence times for atmospheric pollutants», *AICHE Symposium Series*, N° 196, Vol. 76, Air Pollution.

Adicionalmente, se pueden definir otros tiempos característicos mediante las ecuaciones (51), (52), (53) y (54), que representan:

$$(51) \quad t_p = \frac{M}{P} \quad \text{producción de una sustancia dada}$$

$$(52) \quad t_I = \frac{M}{I} \quad \text{flujo másico de entrada de la sustancia}$$

$$(53) \quad t_R = \frac{M}{R} \quad \text{remoción de la sustancia en estudio}$$

$$(54) \quad t_O = \frac{M}{O} \quad \text{flujo másico de salida de la sustancia}$$

Estas ecuaciones conducen a una velocidad total de incremento para la sustancia en estudio, definida por ecuación (55):

$$(55) \quad \frac{1}{t_S} = \frac{1}{t_P} + \frac{1}{t_I}$$

y, por otra parte, a una velocidad total de decaimiento igual a la representada por ecuación (56):

$$(56) \quad \frac{1}{t_L} = \frac{1}{t_R} + \frac{1}{t_O}$$

de esta forma, se obtiene el tiempo de residencia para una sustancia dada bajo condiciones de estado estacionario, que implica que

$$\frac{dM}{dt} = 0, \text{ y, por lo tanto, } P + I = R + O,$$

lo que conduce a que $t_g = t_L y t_R$ tiende a ser infinito.

El tiempo de residencia medio t_R , simplemente tiempo de residencia, en un reservorio para la especie en estudio está dado por la ecuación (57):

$$(57) \quad t_{r, \text{medio}} = \frac{M}{P+I} = \frac{M}{R+O}$$

En el Cuadro 1 se presentan los tiempos de residencia atmosféricos para sustancias de interés en contaminación atmosférica. En él se puede observar que existe una gran diferencia entre los tiempos de residencia de las sustancias de baja reactividad, como CO_2 y CH_4 , que son de 15 y 7 años, respectivamente, con los correspondientes a sustancias reactivas, como H_2S y HNO_3 con tiempos de 2 y 1 día, respectivamente. Cabe destacar que el sulfuro de hidrógeno es un contaminante gaseoso que emiten los automóviles con convertidor catalítico de uso en el país.

En atmósferas altamente contaminadas los tiempos de residencia se reducen a horas, dependiendo de las características de éstas. Es así, como en algunos casos, el SO_2 y NO_2 presentan estos valores en ciudades americanas y europeas.

CUADRO 1 TIEMPOS DE RESIDENCIA ATMOSFÉRICO PARA SUSTANCIAS DE INTERÉS EN CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y FUENTES DE ORIGEN

Contaminante	Fuente Emisora Antropogénica	Tiempo de residencia	
		Natural	
SO_2	Combustión de carbón y petróleo	Volcanes	4 días
H_2S	Procesos químicos	Descomposición de materia orgánica	2 días
CO	Combustión externa e interna	Incendio de bosques	65 días
$\text{NO} + \text{NO}_2$	Combustión	Sección bacteriana en el suelo	5 días
NH_3	Tratamiento de desechos	Decaimiento biológico	20 días
CH_4	Tratamiento de desechos	Acción bacteriana	7 años
CO_2	Combustión	Decaimiento biológico	15 años
HNO_3	Procesos químicos smog fotoquímico	—	1 día

5. EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Dentro de las variables por evaluar cuando se analiza la contaminación atmosférica están, aunque no es el caso en Chile, los efectos de los contaminantes sobre el medio ambiente, que incluye seres vivos, materiales y alteración del comportamiento de propiedades de la atmósfera, como, por ejemplo, pH del agua de lluvia y conductividad.

A continuación se entrega un análisis resumido de los efectos que presentan los contaminantes. Para ello se consideran en forma separada partículas y gases.

5.1. Efectos de las partículas en suspensión

Se analiza el efecto del material particulado, sobre el medio ambiente, considerando el impacto sobre la salud humana y animal. Cuando es inhalado el material particulado, sus efectos están asociados, por una parte, al lugar en que son depositadas las partículas en el aparato respiratorio, que depende del tamaño y forma de ellas —a menor tamaño mayor respirabilidad— y, por otra, a la composición química de ellas.

La deposición de partículas en el sistema respiratorio depende de tres fuerzas físicas:

- i) Fuerzas inerciales son las causantes de deposición en la nasofaringe. La inercia es muy importante en los grandes conductos del sistema respiratorio, especialmente cuando se requiere respiración rápida forzada. Su importancia decrece mientras más adentro del sistema respiratorio se encuentren las partículas.
- ii) La sedimentación gravitacional es proporcional a la velocidad de deposición de la partícula y al tiempo disponible para sedimentar. Como la velocidad decrece en los conductos estrechos del sistema, el efecto gravitacional se ve aumentado.
- iii) En el caso de partículas finas, la fuerza más importante es la de difusión y conduce a una sedimentación o depósito en

las paredes de los ductos finos del sistema, como es el espacio alveolar. Esta fuerza es una magnitud significativa para partículas de diámetro sobre 0,5 micrón.

Una vez depositadas las partículas, su importancia está asociada a su acción irritante, la que no es función sólo de la naturaleza de ellas, sino, también, de la facilidad de absorber o adsorber otras sustancias en la superficie de ellas, que en ciertas ocasiones da lugar al sinergismo.

Efecto sinérgico es el fenómeno que presentan algunas sustancias que al encontrarse en presencia de otras incrementan su agresividad frente al medio que las rodea. Un típico ejemplo de sinergismo se observa cuando las partículas se encuentran en presencia de SO₂ en el aire, tanto es así que cuando la concentración, en microgramos por metro cúbico, de partículas multiplicada por la de dióxido de azufre es de 490.000, se está frente a una grave amenaza sobre la salud humana. Este número fue superado en los episodios de contaminación en Londres en la década de los cincuenta. Otro ejemplo de este tipo lo presentan los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) que en algunos casos no son agentes mutagénicos, pero se comportan como tales cuando están en presencia de otros HAP.

Los HAP están presentes en el humo de cigarrillos, en el hollín emitido por el escape de los vehículos diesel (humo negro) y de los gasolineras (humo azul) y, fundamentalmente, en orden decreciente, en emisiones provenientes de la combustión externa de leña, petróleos pesados (5 y 6), carbón y otros combustibles derivados del petróleo pero de menor densidad. Esta es la razón por la que, en Santiago en los últimos años, se han tomado acciones que parecieran drásticas, sobre las emisiones de vehículos diesel, así como sobre la utilización de leña en artefactos de uso residencial.⁶ Las concentraciones de estas sustancias medidas en el aire indican que Santiago es una de las ciudades con altas tasas de emisión.⁷

⁶ Véase Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana (CEDRM) 1990. «Programa de Descontaminación para la Región Metropolitana».

⁷ Véase H. Sandoval L. y P. Toro E. (1990) «Distribución espacial de hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire de Santiago de Chile». XIX Congreso Latinoamericano de Química. Buenos Aires, Argentina, p. 1.222.

Por otra parte, los HAP tienen transformaciones en la atmósfera que conducen a producir nitroderivados y otras sustancias de mayor agresividad para la salud humana.

Otras sustancias que están presentes en las partículas son el plomo, arsénico, cadmio, mercurio, ácido sulfúrico y sulfates, por nombrar algunos. Dentro de éstas, los efectos que produce el plomo se resumen en una acumulación en los huesos y tejidos, produciendo alteraciones nerviosas y reducción de la función renal.

Hay dos formas cómo el plomo ingresa al organismo: la primera, y más importante, corresponde a la ingesta por los alimentos que alcanza a alrededor del 80%; en cambio, el 20% restante corresponde a la segunda, que está asociada al ingreso por las vías respiratorias.

Por último, es destacable el hecho de que haya partículas que el organismo tarda varios años en eliminar, como son las del humo de cigarrillos que están en el rango de 100% de respirabilidad. Pero, también, hay otras que son eliminadas en días y horas, como es el caso de las interceptadas en la faringe, sin considerar su desaparición por solubilización o reacción.

5.2. Efectos de los contaminantes gaseosos

En este caso, se hace una presentación considerando el efecto sobre la salud humana y en forma separada sobre los vegetales.

Efectos sobre la salud humana:

- i) *Monóxido de carbono*: actúa por asociación con la hemoglobina de la sangre, formando carboxihemoglobina, reduciendo ostensiblemente la oxigenación debido a que el CO es 210 veces más reactivo que el oxígeno con la hemoglobina. Por lo tanto, se observa una disminución en el transporte de oxígeno por la sangre hacia las células del cuerpo humano. Esto produce pérdidas de reflejos, dolores de cabeza, náuseas e incluso vómitos, cuando la concentración de CO supera las 120 partes por millón (ppm) por una hora. Sin embargo, este problema no es de gravedad, ya que es reversible y en unas cuantas horas el organismo puede regenerar la hemoglobina a partir de carboxihemoglobina, y

quedar en condiciones de poder asociarse con oxígeno la primera de ellas, para cumplir la función de oxigenación.

- ii) *Dióxido de azufre:* Esta sustancia de carácter ácido tiene efectos irritantes sobre las vías respiratorias, creando problemas de bronquitis obstructiva. Al encontrarse en presencia de partículas en suspensión, la sinergia producida por ambas sustancias aumenta su agresividad. Por otra parte, el carácter ácido y la solubilidad de esta sustancia en agua (las vías respiratorias están húmedas constantemente) permiten que origine problemas puntuales en regiones de alta sensibilidad del sistema respiratorio, especialmente cuando existe la posibilidad de transformar el SO_2 en ácido sulfúrico. En resumen, el efecto más importante de esta sustancia está asociado a un aumento de las enfermedades respiratorias.

- iii) *Dióxido de nitrógeno:* Este es otro de los contaminantes gaseosos presentes en la atmósfera que poseen carácter ácido. Su acción se manifiesta mediante la descomposición del NO_2 con la humedad, que frecuentemente presenta el sistema respiratorio, transformándolo en ácido nítrico. Durante los últimos años, la literatura internacional muestra una gran cantidad de estudios que han estado orientados a dimensionar los efectos del NO_2 sobre la salud humana, situación que con anterioridad no había sido estudiada.⁸

- iv) *Ozono:* Contaminante gaseoso secundario, producido por el smog fotoquímico, que afecta la salud humana a través de la alta reactividad que muestra esta sustancia en presencia de compuestos orgánicos con doble enlace. Una de las acciones más relevantes está asociada a la acción directa que presenta este contaminante frente a proteínas y elementos constitutivos de las células que poseen enlace doble. Esta situación conduce a transformaciones químicas que pueden dar lugar incluso a mutaciones a nivel celular, cuando esta

⁸ Véase V. Hasselblad, D. M. Edd y D. J. Kotchmar (1992). «Synthesis of Environmental Evidence: Nitrogen Dioxide Epidemiology Studies». J. Air Waste Manage. Assoc. Vol. 42, N° 5, p. 662.

sustancia penetra al organismo a través de las vías respiratorias. Es uno de los contaminantes de mayor estudio en el campo epidemiológico por sus efectos nocivos a la salud humana.

- v) *Hidrocarburos*: Estas sustancias gaseosas, compuestas mayoritariamente de carbono e hidrógeno, no presentan efectos nocivos sobre la salud al nivel de concentraciones en que están presentes en el aire. Sin embargo, los hidrocarburos que tienen oxígeno incorporado a su estructura molecular, como es el caso de aldehídos, cetonas y algunos ácidos orgánicos sustituidos, por lo general son perjudiciales al hombre, especialmente cuando presentan dobles enlaces, como es el caso de la acroleína. Por otra parte, también son importantes las sustancias aromáticas como el benceno, debido a su alto poder cancerígeno, así como otras sustancias cíclicas con anillos bencénicos presentes en atmósferas contaminadas.

Efectos de los contaminantes atmosféricos sobre los vegetales:

Los efectos de la Contaminación Atmosférica sobre las plantas se manifiestan por alteraciones bioquímicas, respuestas fisiológicas y síntomas visibles. Destacan para el primero la reducción del nivel de enzimas, en el segundo las alteraciones al proceso de fotosíntesis y supresión de la transpiración, y para el tercero la clorosis (reducción de los cloroplastos), manchas en la superficie de las hojas (bronceado o plateado por daño en la capa epidérmica), reducción en el desarrollo de la planta y disminución de la cosecha, para terminar, en casos extremos, con la muerte de la planta.

Estudios de laboratorio han demostrado la fitotoxicidad de los contaminantes sobre las plantas, dentro de los que destacan ozono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, fluoruros (HF, F) y nitratos de peroxiacilo (PANs).

En algunos casos, los contaminantes producen marcas visibles en las plantas o frutos de éstas, destacando como ejemplos las plantas de lechugas, tomates, tabaco, avena; orquídeas, rosas, gladiolos y otras flores; frutales como parras, cítricos, duraznos, damascos entre otras, que se traducen en pérdidas económicas directas. En este caso,

cabe destacar que es altamente recomendable considerar las características del medio ambiente, antes de tomar decisiones relativas a la plantación de frutales o de otros productos agrícolas, con el fin de no lamentar pérdidas económicas causadas por los contaminantes.

A continuación se presenta en el Cuadro 2 los daños que producen algunos contaminantes, su concentración umbral de inicio del daño y por último el período de exposición.

CUADRO 2 EJEMPLOS DE DAÑOS PRODUCIDOS POR CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Contaminantes	Síntomas	Concentración de inicio del daño M-g/m ³	Tiempo de Exposición
SO ₂	Manchas en las hojas, clorosis	785	8Hrs.
O ₃	Manchas y oscurecimiento de hojas	59	4Hrs.
PANs	Plateado y bronceado de hojas	50	6Hrs.
NO ₂	Daños irregulares por manchas blancas o cafés	4.700	4Hrs.
HF	Quema de puntas y bordes de las hojas, separación al interior de ellas	0,08	5 semanas

De la tabla anterior se infiere que la contaminación atmosférica afecta negativamente a la producción agrícola, en especial en plantas de tomates, árboles frutales, pinos y siembras agrícolas. Los costos producidos por la contaminación atmosférica son difíciles de estimar. Sin embargo, estimaciones realizadas para el año 1981 en EE.UU. indican que las pérdidas en las cosechas son del orden de 1 a 2 billones de dólares, equivalentes a un 2 a 4% de la producción total.

6. MONITOREO DE CONTAMINANTES

Se entiende por monitoreo de contaminantes atmosféricos la acción de medir cuantitativamente la concentración de estas sustancias por unidad de volumen.

Para expresar las concentraciones se emplean unidades de microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) o partes por millón en volumen (ppm), dependiendo del tipo de sustancia a medir. A veces se usan las partes por cien millones (pphm) o partes por billón o trillón (ppb o ppt), respectivamente, y también los nanogramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), según el nivel de concentraciones presentes en el aire.

Hay dos formas de medir contaminantes. La primera opera a través de métodos integrados, que proporcionan la concentración media para un muestreo en un tiempo definido, y la segunda permite obtener valores instantáneos por unidad de tiempo y se los denomina discontinuos y continuos, respectivamente.

La determinación de concentraciones de contaminantes está influida por una serie de parámetros, dentro de los cuales destacan la concentración, que en algunos casos es extremadamente baja; las posibles interferencias de otras sustancias con la de interés por evaluar, y, por último, el principio de operación del equipo de monitoreo.

Por otra parte, se aplican diferentes criterios para estimar la aptitud y utilidad de una técnica de análisis específica, dentro de los cuales están:

- Exactitud
- Especificidad
- Precisión o reproducibilidad de las medidas
- Tiempo de respuesta del instrumento
- Facilidad de calibración del instrumento
- Volumen de gas necesario para la determinación

A continuación se presenta una descripción breve de cada uno de estos términos.

- Se entiende por exactitud el grado de semejanza entre el valor medido u observado y el valor verdadero, y depende tanto de la especificidad del método como de la exactitud de la calibración. En el caso de los métodos húmedos, la

falta de especificidad y la interferencia por otras especies es tino de los problemas más generalizados.

La exactitud de los métodos de calibración depende de la disponibilidad de estándares primarios y de la forma como es calibrado el equipo. En este caso, se debe considerar el rango de variación de la concentración de la sustancia a medir, realizando una calibración multipunto y definiendo la frecuencia de la calibración.

- La especificidad indica la carencia de interferencias en la determinación. Mientras más alta es, menor serán las interferencias y viceversa.
- Precisión: se define como el grado de semejanza entre una serie de medidas y el valor medio de las observaciones.
- Tiempo de respuesta: corresponde al tiempo necesario para que el monitor responda a una señal dada. Por ejemplo, segundos que tarda en responder cuando se introduce un gas de calibración o una señal externa.
- Facilidad de calibración del instrumento: está asociada a la disponibilidad de gases de calibración en el mercado (estándares primarios) y a su aplicación en el sistema de muestreo, así como a la frecuencia de empleo.
- Volumen de gas necesario. Aplicable a los métodos húmedos, pero también a los otros, dependiendo del comportamiento de las concentraciones de sustancias a medir.

Otro factor de interés en el monitoreo de contaminantes está asociado a la instalación de los equipos y en forma muy especial a la toma de muestra. Sobre este tema destaca la influencia del material a través del cual es conducido el aire a muestrear, que debe ser lo más inerte posible para evitar pérdidas por reacciones o absorción y adsorción de la sustancia en estudio.

Por otra parte, está la ubicación de la estación de muestreo o del equipo en cuestión, que tiene una fuerte influencia en los resultados, a causa de la falta de representatividad de ellos cuando existen proble-



mas de interferencia física al flujo de aire contaminado en las proximidades del lugar, o de influencia directa de fuentes emisoras sobre la toma de muestra, por impacto del penacho.

A continuación se presentan las características más relevantes de los sistemas de monitoreo de contaminantes atmosféricos.

6.1. Monitoreo de partículas

Una forma de clasificación gruesa del material particulado en la atmósfera lo divide en partículas sedimentables y totales en suspensión, por lo que debe hacerse un análisis de cada caso en forma separada.

6.1.1. Partículas sedimentables

Son muestreadas por medio de un dispositivo denominado jarro colector, que tiene un alto y un diámetro definidos, con un volumen aproximado de 2 litros, al que se le agrega agua destilada con algunas sustancias que evitan la producción de hongos y microorganismos. Sobre este líquido sedimentan las partículas y una vez al mes es sometido a análisis gravimétrico, previa evaporación del agua. La concentración de estas partículas se expresa en $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$.

6.1.2. Partículas totales en suspensión

En este caso, se emplea el muestreador de alto volumen (high volume sampler o hi-vol) como método de medición y que es clasificado como método de referencia por la USEPA (lo que quiere decir que es el método recomendado por este organismo para medir las partículas y considerar su valor en relación a la norma de calidad de aire).

Básicamente, el equipo opera filtrando, en 24 horas, alrededor de 2.000 m^3 de aire en un filtro de fibra de vidrio de 8×10 pulgadas. Este sustrato es acondicionado previa y posteriormente al muestreo en el aire, de tal manera que es posible determinar el peso neto de las partículas, eliminando el exceso de humedad en el proceso de acondicionamiento. La concentración de partículas se obtiene dividiendo la masa neta de partículas por el volumen muestreado.

6.1.3. Partículas respirables

Para muestrear este tipo de partículas se emplea, como método de referencia, el muestreador de alto volumen con cabezal PM-10 (de ahí viene el nombre abreviado de este método), que opera mediante el uso de filtros de fibra de vidrio de 8 por 10 pulgadas por el que pasa un flujo constante de $68 \text{ m}^3/\text{h}$ o $1.630 \text{ m}^3/24 \text{ hrs}$. Este equipo discrimina a la entrada del cabezal PM-10 a las partículas con diámetro inferior a 10 mm. El método es gravimétrico y se aplican las mismas operaciones que en el caso de las PTS en cuanto a acondicionamiento y pesaje del filtro.

En la actualidad hay otros métodos que están en la categoría de los de referencia o equivalentes, según recomendaciones de la USEPA, como son el método TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) y los equipos de atenuación β . Todos ellos emplean un cabezal especial que corta en 10 mm el muestreo de partículas. Estos equipos operan con un flujo constante de un metro cúbico por hora, cayendo en la categoría de muestreadores de bajo volumen. En la literatura internacional ha habido una discusión muy profunda sobre las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.⁹

6.1.4. Distribución de tamaño de partículas respirables

Tal como fue planteado en el punto 5 del presente trabajo, la importancia de las partículas radica en la respirabilidad de ellas. Sólo así es posible considerar sus efectos en salud humana. En la determinación de distribución de tamaño se emplean básicamente dos métodos, que incluyen a los impactadores inerciales y a los de cascada, sobre los cuales se hace un análisis a continuación:

- Impactadores inerciales: operan con bajo volumen y se les denomina, comercialmente, muestreadores dicotómicos. El principio de operación se basa en producir una estrangula-

⁹ Véase J. B. Wedding (1991) «Facts, Fallacies and Popular Myths». J. Air Waste Manage. Assoc. Vol. 41, N° 11; H. Patashnick y E. G. Rupprecht (1991) «Continuous PM-10 measurements using Tapered Element Oscillating Microbalance», J. Air Waste Manage. Assoc. Vol. 41, N° 8, p. 1.079.

ción en el ducto que conduce el aire contaminado y una bifurcación del caudal en la relación 9:1, siendo el caudal que contiene a las partículas bajo 2,5 μm (fracción fina) el superior. En cambio, el de aquellas con diámetro entre 2,5 y 10 μm (fracción gruesa) es el más bajo.

El método opera por gravimetría, lo que implica acondicionar los filtros (membranas de politetraflúor etileno) para evitar la influencia de la humedad y, además, disponer de una balanza adecuada a la masa que se pesará, puesto que de lo contrario los resultados serán de baja confiabilidad y no representativos de la realidad.

- Impactadores de cascada: funcionan mediante jets de impactación que tienen diámetro decreciente para cada una de las etapas del equipo. Como el caudal es el mismo al reducirse el diámetro por el que pasa, se produce un incremento en la velocidad de los gases y las partículas quedan atrapadas sobre una superficie no rebotante, por impactación sobre ella.

Según el número de etapas del equipo serán los cortes de muestras que entregará el monitor. Hay algunos que proporcionan 5 o hasta 10 cortes, según las características de diseño del fabricante. Este método también usa balanzas para determinar la masa, por lo que será necesario aplicar los mismos criterios que en los impactadores virtuales o dicotómicos.

A todas las muestras de partículas colectadas por diferentes metodologías se las puede someter a análisis químico cuantitativo, para determinar la concentración de sustancias y elementos de interés en estudios epidemiológicos de los efectos de la contaminación sobre la salud humana.

6.2. Monitoreo de gases

En la determinación de gases se aplican diferentes metodologías de análisis que forman parte de los métodos discontinuos y continuos. Algunos de ellos captan la muestra en soluciones específi-

cas para cada sustancia y operan a través de absorción del contaminante sobre la solución; en cambio, hay otros que analizan directamente la muestra desde la corriente de aire gaseosa, libre de partículas. Dentro de los métodos discontinuos o integrados están los de absorción en fase acuosa, y en los instantáneos se encuentran los de monitoreo continuo con respuesta instantánea, la que es almacenada en un registrador o en archivo magnético; también en estos últimos están los tubos de absorción que son específicos para cada sustancia.

A continuación se presenta una descripción de los diferentes métodos, en general, y de los utilizados en la determinación de sustancias gaseosas, denominados métodos de referencia.

6.2.1. Tubos colorimétricos

Son dispositivos que funcionan mediante reacción química específica para cada sustancia gaseosa a determinar, produciendo una mancha coloreada en un soporte blanco o incoloro que contiene al reactivo específico para el análisis. La concentración es directamente proporcional al largo de la mancha, la que, dependiendo de la sustancia a medir, podrá ser negra, como es el caso del CO o amarilla rojiza para el NO₂.

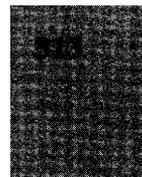
La precisión del método no es muy alta, pero son recomendados para hacer diagnósticos gruesos.

Cada tubo es usado una sola vez, después de haber pasado un volumen de aire de alrededor de cien centímetros cúbicos, entregando la concentración al instante.

6.2.2. Métodos de absorción

Se aplican en la determinación de diferentes sustancias gaseosas. El sistema opera haciendo burbujear sobre un reactivo específico la muestra de aire, que es variable en caudal para cada solución absorbente y contaminante a medir.

La concentración de cada sustancia es determinada por colorimetría, a través de un tratamiento químico, para posteriormente medir cuantitativamente el contaminante en estudio, por medio de absorción de luz en un espectrofotómetro ultravioleta-visible.



Para que la determinación sea confiable deben tomarse las precauciones que se detallan a continuación:

- Curva de calibración adecuada al rango de concentraciones a medir, hecha en lo posible durante el desarrollo del análisis, calibrando el equipo con la mayor frecuencia posible.
- Toma de muestra: debe hacerse bajo estricto cumplimiento de exigencias del equipo, entre los que destacan flujo por unidad de tiempo, volumen de aire a muestrear y cantidad de solución absorbente requerida.
- Características del material y del burbujeador usado en la experiencia (ejemplo, si debe ser ámbar para evitar la influencia de la luz y diámetro de la burbuja), así como diámetro del dispositivo que contiene la solución absorbente.
- Manipuleo de la muestra, que considera temperatura mientras es tomada la muestra y tiempo de almacenamiento.
- Características de los reactivos y soluciones a usar. Estas deben ser de alta pureza, preparadas y almacenadas conforme a recomendaciones del método.

Cumpliendo con estas exigencias, el método tiene gran precisión e incluso puede ser de referencia, como es el de la pararosanilina para medir dióxido de azufre.

6.2.3. Métodos continuos

En esta categoría se encuentra la mayoría de los métodos de referencia para monitorear gases, recomendados por la USEPA, y de amplio uso a nivel mundial y local.

Cada equipo monitor opera mediante un método físico de detección, que es específico para cada sustancia.

Se presenta, a continuación, una breve descripción de los principios y monitores más usados en el muestreo de gases contaminantes con norma de calidad de aire:

- *Monóxido de carbono*: en su determinación se emplea el método infrarrojo no dispersivo o el método de filtro de correlación gaseoso. Ambos métodos operan mediante

espectroscopia infrarroja, pero el último es de la década de los 80, mientras el otro es de los 70.

- *Hidrocarburos gaseosos*: son determinados mediante el detector de ionización de llama, que es bastante complejo de operar y tiene complicaciones, ya que requiere de gases ultrapuros como ser hidrógeno y aire cero (aire compuesto sólo de nitrógeno y oxígeno), gases de alto costo y escasa disponibilidad en países del tercer mundo. Mediante este equipo se determinan hidrocarburos gaseosos totales, incluyendo metano, o hidrocarburos gaseosos no metánicos, mediante uso de columna que adsorbe metano. Y, por lo tanto, cuando se desea determinar a este último se procede a desorberlo de la columna.
- *Dióxido de azufre*: este contaminante puede ser determinado por fluorescencia de pulso o mediante detector fotométría) de llama. Ambos equipos son muy confiables y considerados métodos de referencia. El de fluorescencia de pulso opera en forma estática, pues requiere de línea de 220 Volt; en cambio, el fotométrico es diseñado para operar en forma estática o portátil, situación que le da mayor versatilidad. Adicionalmente, el detector fotométrico de llama permite determinar SO₂ y sulfures gaseosos orgánicos e inorgánicos.
- *Óxidos de nitrógeno, óxido nítrico y dióxido de nitrógeno (NC_x)*. En su determinación se emplea la luminiscencia química como método de referencia. Es muy preciso, pues mide tanto NO como NO₂ en forma independiente, mediante la determinación de NO directamente y de NO₂ por transformación de éste en NO.
- *Ozono*: es medido mediante espectroscopia ultravioleta, empleando la longitud de onda de 2.537 Å. El principio de detección es altamente confiable, pero el gran problema asociado a su uso tiene relación con la calibración, que es dudosa en cuanto a su credibilidad.



Todos estos monitores de gases entregan resultados precisos en la medida en que son usados en ambientes normales y no corrosivos o sometidos a grandes cambios de temperatura, siendo necesario disponer de gases de calibración que permiten hacer calibraciones multipunto y chequeo diario de respuesta del equipo.

7. COSTOS ASOCIADOS

7.1. Costos de monitores

En el Cuadro 3 se presenta el precio estimativo de los monitores de gases y partículas de uso más difundido en la actualidad. Esta tabla no incluye otros costos asociados al uso e instalación de estos monitores, y los valores son CIF-Valparaíso.

CUADRO 3 PRECIOS ESTIMATIVOS DE MONITORES A OCTUBRE DE 1992

Dispositivo	Principio de Medición	Sensibilidad	Precio US\$CIF
Monitor CO	Filtro de correlación gaseoso	0,1 ppm	13.200
Monitor de NO _x	Luminiscencia química	0,5 ppb	13.100
Monitor de SO ₂	Fluorescencia de pulso	0,5 ppb	13.600
Monitor de HCT gaseosos	Detector de ionización de llama	0,1 ppm	13.200
Monitor de ozono	Ultravioleta	1ppb	12.800
Monitor de PM10	Gravimétrico	Definido según filtro	5.700

Los precios señalados en el cuadro no incluyen gases de calibración, el sistema de manejo de estos gases y los filtros para el muestreador de partículas, que son variables según el sistema utilizado y el tipo de filtro a emplear para el monitoreo de partículas.

Finalmente, los tubos colorimétricos tienen un valor del orden de 15 dólares la caja de 10 unidades y la bomba para operarlos cuesta alrededor de 120 dólares en el mercado nacional.

72. Otros costos

En este punto serán analizados y entregados en forma referencial otros costos que tiene la contaminación atmosférica y que regularmente no son considerados, entre los que destacan los efectos sobre la agricultura, sobre las propiedades y, finalmente, sobre la familia (National Air Pollution Control Administration de EE.UU., 1960).

En la agricultura las pérdidas ascienden a 500 millones de dólares que se descomponen en 325 millones en cosechas y 175 millones en ganado. En las propiedades, los costos ascienden a 200 millones de dólares y, finalmente, los costos para una familia se descomponen en mantención de la casa, 17 dólares; mantención interior, 32 dólares; lavandería y lavado en seco, 25 dólares; cuidados del cabello y faciales, 10 dólares, lo que da un valor referencial de 84 dólares por familia para el año 1960.

73. Costos en Santiago

La situación de contaminación de Santiago prevé en la actualidad la incorporación de convertidores catalíticos en los automóviles nuevos. Considerando que en nuestra capital hay alrededor de 450 mil y aceptando un precio del orden de 700 dólares por convertidor, esto nos daría un costo asociado al uso de esta tecnología del orden de 310 millones de dólares. Por otra parte, en el caso de las fuentes fijas, estimaciones muy preliminares indican que la inversión para aminorar las emisiones a un rango razonable son del orden de los 50 millones de dólares.

Otros costos, que por lo general no son considerados ni en la literatura ni en Santiago, están referidos a los efectos sobre la salud humana y los montos asociados a tal situación, que como es sabido deben ser bastante considerables, debido a ausencias laborales, gastos en consultas médicas y medicamentos, disminución de la capacidad de trabajo y depresiones.

Por último, en Chile no hay estudios que muestren los costos que la contaminación atmosférica tiene sobre la agricultura, mantención de fachada e interior de viviendas, efectos sobre la agricultura, que con seguridad en algunas zonas deben ser de consideración.