

Distr.
RESTRINGIDA

LC/R.983 (Sem.61/5)
1° de abril de 1991

ORIGINAL: ESPAÑOL

C E P A L

Comisión Económica para América Latina y el Caribe

Seminario regional sobre "Políticas para la gestión de los residuos urbanos e industriales", organizado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en el marco del proyecto "Políticas para la gestión ambientalmente adecuada de residuos", que realiza con el apoyo de la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) de la República Federal de Alemania.

Santiago, Chile, 1 al 3 de julio de 1991

**PRINCIPALES EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS
Y ALGUNOS MEDIOS PARA SU CONTROL**

Elementos para la discusión

El caso de Chile

Este documento fue elaborado por la Unidad Conjunta CEPAL/PNUMA de Desarrollo y Medio Ambiente de la División de Medio Ambiente y Asentamientos Humanos. Contiene el trabajo del consultor señor Alejandro Steiner para el seminario-taller "Políticas para el control y fiscalización de la contaminación atmosférica de los sectores productivo y energético", realizado en Santiago, Chile, entre el 5 y el 7 de diciembre de 1990, y los comentarios y debates ahí presentados. Las opiniones expresadas en este trabajo, el cual no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad del autor y pueden no coincidir con las de la Organización.

91-4-464

INDICE

	<u>Página</u>
A. DIAGNOSTICO	1
1. Introducción	1
a) Consideraciones generales	1
b) Norma de calidad del aire	2
c) Alcances	3
d) Fuentes de información utilizadas	4
e) Consideraciones metodológicas	5
2. Matriz de emisiones	6
a) Región Metropolitana (RM)	6
b) Fundiciones y plantas de tostación y grandes consumidores de combustibles	12
c) Emisiones provenientes de plantas de celulosa	16
d) Emisiones provenientes de plantas de harina de pescado	20
3. Sistemas de reducción de emisiones	23
a) Emisión de partículas totales en suspensión	23
b) Emisión de SO ₂	35
c) Emisión industrial de olores	38
d) Emisiones de monóxido de carbono	39
e) Emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV)	40
f) Emisión de óxidos de nitrógeno	41
B. COMENTARIOS	43
C. DEBATE	47
Bibliografía	51
Anexo 1: BASES DE CALCULO DE LOS FACTORES DE EMISION	53

A. DIAGNOSTICO

1. Introducción

a) Consideraciones generales

La calidad del aire que respiramos y la de la atmósfera en la cual vivimos inmersos, constituyen un atributo fundamental de la calidad de vida que disfrutamos. No nos referimos a la salubridad del aire o a su carácter mefítico, sino a la apreciación **subjetiva** que tenemos de su bondad y, en consecuencia, a aquella calidad del aire que nos dejará satisfechos. Esta apreciación subjetiva no está asociada de manera inmediata con los efectos que sobre la salud tiene la contaminación atmosférica, de los que se ocupan los estudios epidemiológicos, sino con la forma en que **percibimos** y **apreciamos** la limpidez de la atmósfera que nos rodea. Esta percepción es un problema principalmente cultural, sobre el cual la sociedad ha generado una **sensibilidad** de cuya evolución en los últimos siglos se han ocupado los sociólogos. En efecto, el siglo XVIII inició el discurso higienista, que continúa hoy, antes y más allá de las necesidades determinadas objetivamente por la medicina. Según Corbin: 1/

"Cada animal está normalmente condicionado para el aire puro, natural y libre", leemos en el libro de Arbuthnot, traducido al francés desde el año 1742; los animales jóvenes ignoran la tolerancia, nacida del hábito, que permite al ciudadano soportar un aire artificial. Aun antes de que Priestley o Lavoisier se esforzaran por analizar "el aire común", emerge pues la reivindicación del derecho natural a respirar un aire no obstruido por una carga nociva; no fue sino más tarde que la noción de pureza se cargó de referencias a la alteración de su composición. Por el momento, lo que importa es el justo equilibrio entre "contaminación" y "purificación", tarea imposible que ordena una higiene privada que desconfía de las variaciones, de los deshielos súbitos, de los tiempos lluviosos, o de la irrupción de la lluvia después de una gran sequía. Discurso higienista que valoriza simbólicamente la blancura de la tez y la transparencia de la piel, señales manifiestas de la calidad de los intercambios en la variedad de aires de la que se nutre el ser viviente.

En función del pensamiento aerista se bosquejan las definiciones de lo sano y lo malsano, y se ordenan las normas de lo salubre y lo insalubre. Se formula ya la exigencia del movimiento y se presiente el himno de la tempestad.

Esta percepción, determinada cultural y biológicamente de lo sano y lo malsano se ha constituido hoy en el motor que ha impulsado las acciones que en todas partes del mundo buscan reducir la contaminación atmosférica. (En nuestro país, y en Santiago en particular, la sensibilización de la opinión pública a este problema no cesa de crecer, y constituye la causa inmediata de este Seminario.

En la consideración de la contaminación atmosférica, es necesario distinguir y referirse a tres aspectos del problema, a saber:

La **norma de calidad del aire**, que describe, para cada contaminante de importancia la concentración atmosférica máxima aceptable --según la autoridad sanitaria-- para no producir daños a la salud de las personas, a la vegetación, a la vida animal, a los bienes o a la calidad de vida de las personas.

Las **concentraciones ambientales**, o inmisiones, de los contaminantes limitados por la norma de calidad de aire.

Las **emisiones** de esos contaminantes.

En esta presentación nos referiremos a la norma de calidad de aire vigente, a las concentraciones ambientales disponibles de manera sistemática, que se limitan a las del centro de la Región Metropolitana, y a las emisiones principales en el país. A lo anterior, agregaremos los principales medios para controlar las emisiones.

b) Norma de calidad del aire

En el cuadro 1 se indican las concentraciones ambientales máximas permitidas en nuestro país:

Cuadro 1

NORMA CHILENA PRIMARIA DE CALIDAD DEL AIRE
(Resolución N°1 215 del Ministerio de Salud)

CONTAMINANTES	Concentraciones medias máximas en $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ durante el período			
	1 hora	8 horas	24 horas	1 año
Monóxido de carbono (CO)	40.000	10.000	-	-
Dióxido de azufre (SO ₂)	-	-	365	80
Ozono (O ₃)	160	-	-	-
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	-	-	-	100
Partículas totales en suspensión (PTS)	-	-	260	-
Fración Inhalable (PM10)	-	-	150	50a/

a/ Norma de la Environmental Protection Agency (EPA), de los Estados Unidos, no oficial en Chile.

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son de interés porque, si bien no están limitados por la norma, se combinan con los óxidos de nitrógeno (NOx) bajo la acción de la luz solar, en una reacción que permite la acumulación de ozono. En consecuencia, los NOx y los COV son los promotores del O₃.

c) **Alcances**

En general, los ámbitos donde las emisiones industriales gaseosas forman parte de un cuadro de contaminación ambiental como actores únicos o junto a otros factores, son:

- i) La Región Metropolitana (RM);
- ii) Las fundiciones de minerales y plantas de tostación y los grandes centros de consumo de combustible, tales como las plantas de cemento, las plantas productoras de azúcar, las centrales térmicas de generación de energía eléctrica, las siderurgias y derivados y las refinerías de petróleo;
- iii) Las plantas de celulosa que, además de partículas, producen olores molestos; y
- iv) Las plantas de harina de pescado, en las que el secado de la harina produce también emisiones odoríferas.

En nuestra opinión, (la situación de contaminación atmosférica obliga a distinguir entre la situación en el ámbito de la RM y la de los demás ámbitos. Esta distinción, que reconoce diferencias que procuraremos hacer explícitas más adelante, se traduce en la necesidad de formular sistemas de control específicos y distintos para cada caso. La diferencia estriba en que en la RM las emisiones de las fuentes fijas del sector productivo y energético provienen de numerosas fuentes, cuyo efecto combinado, de acuerdo con los conocimientos actuales, **hace difícil distinguir entre los efectos de las emanaciones de las diferentes fuentes.** A las emisiones de cada una de las fuentes fijas del sector productivo y energético, se suman las emisiones de numerosas fuentes de naturaleza diversa, de las cuales tampoco es posible distinguir las del sector productivo y energético. Todas ellas producen una situación de contaminación atmosférica, agravada por las condiciones climáticas de todos conocidas, que se caracterizan por un régimen invernal de bajos vientos, con la presencia de una capa de inversión térmica.

Para el establecimiento de una reglamentación de control, es necesario tener presente la dificultad de distinguir y separar el efecto de cada fuente, o categoría de fuentes, en el estado de contaminación de la atmósfera de la RM. En los demás ámbitos ya mencionados, por el contrario, las fuentes fijas del sector productivo y energético constituyen fuentes aisladas, y por ello el impacto ambiental de sus emisiones puede distinguirse y

cuantificarse respecto a una situación base de referencia (baseline), que se caracteriza a partir de la inexistencia de la fuente.

En el caso de la RM, la política de reducción de las emisiones de las fuentes fijas del sector productivo y energético (y la reglamentación asociada), **forma parte de una política general** de contención de la contaminación atmosférica. Para los demás ámbitos --las fundiciones y tostaciones de minerales y los grandes centros de consumo de energía, las fábricas de celulosa y las plantas de harina de pescado, la política debe ser específica, en el sentido de exigir que toda planta o grupo contiguo de plantas, en su punto de mayor impacto, no genere concentraciones que sobrepasen los máximos admitidos por la norma 1215 presentada en el cuadro 1.

En resumen, las emisiones de las fuentes fijas del sector productivo y energético de la RM estarán insertas en una política general de reducción de emisiones que pondrá el acento en una limitación de la emisión por unidad de tiempo, es decir, en toneladas por año (t/a) del contaminante de interés, en tanto que para los otros ámbitos proponemos que el sistema de control se base en una limitación en términos de concentraciones máximas aceptables en el punto de mayor impacto.

Aunque las razones para esta diferente proposición son evidentes, reiteramos que nos parece necesario exigir el establecimiento, sobre la base de mediciones, del impacto ambiental de las fuentes fijas del sector productivo y energético, así como obligar a la limitación del monto de las concentraciones máximas, tanto en chimenea como en el punto de mayor impacto, a valores indicados por las normas nacionales. Para la RM, donde no es posible establecer el impacto ambiental de cada fuente por separado, se requiere una política de reducción global de las emisiones, donde las emisiones de las fuentes fijas del sector productivo y energético son parte importante.

d) Fuentes de información utilizadas

Las fuentes de información utilizadas para la elaboración de la matriz de emisiones han sido:

i) Para la Región Metropolitana, los estudios realizados por la Intendencia de la Región Metropolitana (IRM) de caracterización y limitación de las emisiones, así como información propia generada por el consultor, a partir de encuestas y de su experiencia profesional;

ii) Para las fundiciones, plantas de tostación y grandes consumidores de combustibles, el Ministerio de Minería;

iii) Para las plantas de harina de pescado, las publicaciones de la Corporación de Fomento (CORFO) y del Instituto de Fomento Pesquero (IFP); y

iv) Para las plantas productoras de celulosa, la experiencia de la oficina de ingeniería de la que forma parte el consultor.

La información concerniente a los factores de emisión y los sistemas de control ha sido obtenida de la bibliografía especializada internacional, y en particular la de la EPA, de los Estados Unidos.

e) Consideraciones metodológicas

La información cuantitativa presentada en este trabajo es de origen diverso, por lo que tiene diversos grados de fiabilidad.

Los datos relativos a las emisiones en la Región Metropolitana corresponden a 1987, y son producto de un extenso trabajo de recolección y elaboración de información. La fiabilidad de esta información, alta cuando se originó, disminuye con el tiempo. Aunque, por cierto, la fiabilidad de los factores de emisión empleados en la elaboración de la estimación de las emisiones permanece inalterada, los niveles de actividad a los que se aplican los factores de emisión sufren un cambio.

Los costos de los equipos de control de emisiones de partículas constituyen una estimación por defecto, porque provienen de una encuesta a industrias que, en su mayor parte, han fabricado sus propios equipos de control. En la estimación de sus costos hay una tendencia a no considerar los costos fijos de producción, entre otros: costo de los equipos y mano de obra involucrados, servicios internos de la industria, tales como local, energía, etc.

La estimación de las emisiones de SO₂ provenientes de fundiciones, plantas de tostación y grandes consumidores de energía es fiable porque proviene de un balance de masa en el que se reducen las posibilidades de error. No es éste el caso de las estimaciones de emisión de partículas, que dependen del nivel de operación de los equipos, parámetro muy variable.

La información concerniente a las plantas de celulosa está muy actualizada, y por ello es fiable en relación con los niveles de actividad. Los factores de emisión, por el contrario, fueron deducidos, por una parte, de información de la EPA, y por otra, de información muy específica de proyectos en ejecución, lo que constituye una limitación.

La información relativa a las emisiones provenientes de la elaboración de harina de pescado es fiable en relación con los niveles de actividad, pero está limitada por la carencia de factores de emisión de procesos que, sin embargo, son importantes.

2. Matriz de emisiones

a) Región Metropolitana (RM)

i) Concentraciones ambientales en la RM. En el cuadro 1 hemos señalado los valores de concentración atmosférica que se encuentran regulados por la norma primaria de calidad del aire. A continuación, nos referiremos a las concentraciones ambientales alcanzadas por los contaminantes regulados por la norma, para referirnos luego a los emisores de estos contaminantes.

Limitaremos nuestra presentación de las concentraciones ambientales a la de las PTS, que constituyen el contaminante cuya norma se sobrepasa con mayor frecuencia en Santiago.

El gráfico 1 ilustra la frecuencia y el grado con que en Santiago se sobrepasa la norma de calidad del aire para partículas, con promedios de 24 horas. El valor 100 del índice de calidad del aire, corresponde al valor de la norma de 24 horas. Para un valor dado del índice, la ordenada representa el porcentaje de días del año cuyas concentraciones de partículas estuvieron por debajo de ese valor. Los valores corresponden a promedios hechos sobre los registros de las cuatro estaciones automáticas de la red MACAM de monitoreo de contaminantes atmosféricos que opera el Laboratorio de Contaminación Atmosférica del Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente.

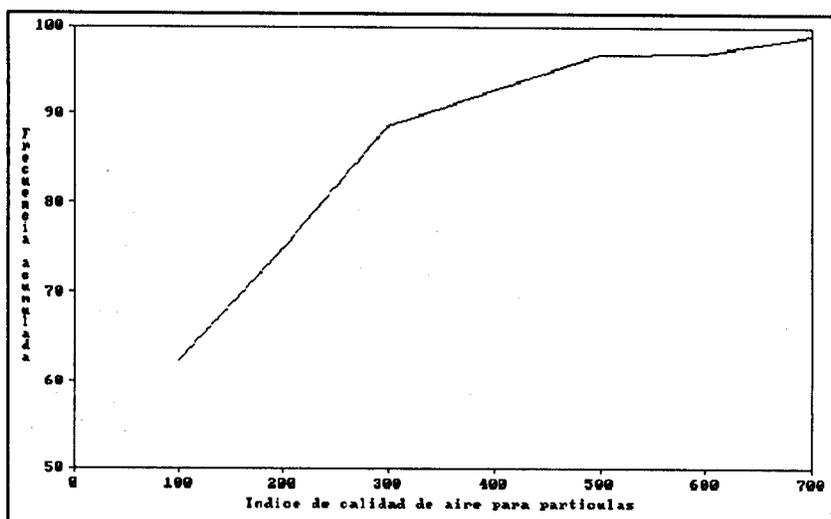


Figure 1 : Frecuencia acumulada de Índice de calidad de aire para partículas entre Abril y Septiembre de 1989

FUENTE: IRM/U.deCh-Intec

La primera conclusión es que en el período informado sólo 62% de los días tuvieron buena calidad de aire. La segunda tiene relación con las reducciones necesarias. Basados en la existencia de una relación proporcional entre la concentración ambiental (índice de calidad del aire) y las emisiones, la reducción del número de días malos debe lograrse reduciendo las emisiones. Si --obligados a transigir con las malas condiciones meteorológicas que se derivan

de la localización de Santiago-- aceptamos que se sobrepase la norma sólo en una fracción menor del tiempo, por ejemplo, en un 5% de los días, es necesario reducir las emisiones a un 23%, valor que se obtiene de la relación entre el índice 450, que corresponde en el gráfico 1 a la frecuencia 95% y el valor 100, que constituye la meta. Basada en series estadísticas extensas y en las recomendaciones del estudio de Derechos de Emisión 2/, la autoridad regional se prepara para reducir todas las emisiones a un 30% de su valor actual, y desplazar así hacia la izquierda la curva del gráfico 1. Este valor de reducción alcanzará, por supuesto, a las fuentes fijas industriales, de las que nos ocuparemos a continuación.

ii) Emisiones en la RM. La emisión de contaminantes atmosféricos en Santiago y sus consecuencias epidemiológicas ha sido descrita por estudios realizados por la Intendencia Regional Metropolitana (IRM) 3/, 4/ y 5/.

El detalle de estas emisiones, en términos de valores totales anuales, se entrega en el cuadro 2.

Cuadro 2

EMISIONES TOTALES, CONSUMO DE COMBUSTIBLES Y NUMERO DE FUENTES

CATEGORIA	CONSUMO (a)	PTS(b) (ton/año)	SOx (ton/año)	NOx (ton/año)	COV (ton/año)	CO (ton/año)	N° fuentes
CALDERAS Y HORNOS INDUST.							
Carbón	47,820.4	798.4	1,459.9	83.6	5.7	215.1	68
Coke	447.4	1.5	26.1	3.1	.0	.1	15
Leña de caldera	610,154.3	2,005.2	158.6	347.7	390.4	13,881.0	663
Gas licuado	18,140.3	.6	3.0	35.9	.6	9.3	737
Diesel	66,277.8	15.8	788.7	159.0	1.5	39.7	758
Petróleo 5	41,419.0	273.4	1,201.1	14.3	1.1	11.6	369
Petróleo 6	22,070.7	151.4	785.7	5.7	14.8	5.0	67
Gas de cañería	6,359,798.7	.0	.0	.3	.0	2.7	89
Leña de horno de panificación	103,128.0	196.9	16.5	89.7	57.3	5,486.4	431
SUB TOTAL		3,443.6	4,439.8	739.7	471.9	19,651.3	3,197
MOTORES INDUSTRIALES DE GENERACION ELECTRICA Y OTROS							
Diesel	253.8	1.0	.9	14.2	.9	3.0	6
Gasolina	449.1	.3	.2	5.4	7.9	212.4	6
SUB TOTAL		1.3	1.2	19.7	8.9	215.5	12
CALDERAS DE EDIFICIOS							
Carbón	4,977.8	130.7	151.9	8.7	.5	22.4	13
Leña de caldera	2,421.0	9.1	.6	1.3	1.5	55.0	20
Gas licuado	1,849.0	.0	.4	5.2	.1	1.3	37
Kerosene	579.0	.0	.6	.1	.0	1.0	11
Diesel	21,646.0	5.1	257.5	51.9	.5	12.9	514
Petróleo 5	6,464.0	43.8	187.4	2.2	.1	1.8	51

Petróleo 6	2,905.8	20.2	103.4	.7	1.9	.6	6
SUB TOTAL		209.3	702.2	70.4	4.9	95.3	652
COMBUSTION RESIDENCIAL							
Carbón vegetal	88,452.0	95.5	22.9	28.3	13.2	4,835.6	-
Gas licuado	218,945.0	.0	.0	.7	76.0	731.7	-
Kerosene	134,844.0	.0	120.5	30.5	.3	188.1	-
Diesel	15,821.0	3.7	187.5	37.8	.3	9.4	-
Gas de cañería	94,250,000.0	.0	.0	20.8	5.1	176.7	-
Leña residencial no confinada	119,137.0	524.2	30.9	61.9	269.2	10,815.2	-
Leña Residencial Confinada	65,410.0	1,037.4	17.0	56.9	54.2	3,356.8	-
SUB TOTAL		1,660.9	379.0	237.0	418.7	20,114.0	-
QUEMAS A CIELO ABIERTO							
Basura, Incend. Edif., Pastizales	-	438.2	26.0	161.4	846.8	2,376.7	-
SUB TOTAL		438.2	26.0	161.4	846.8	2,376.7	-
EVAPORACIONES DE COV NO INDUSTRIALES							
Lavasecos	-	.0	.0	.0	488.3	.0	151
Recubrimiento de superficies	-	.0	.0	.0	2,097.2	.0	-
Pintado de autos	-	.0	.0	.0	415.3	.0	-
Bencineras	-	.0	.0	.0	1,193.1	.0	261
Solventes de uso doméstico	-	.0	.0	.0	719.1	.0	-
Estanq.almacenamiento comb.	-	.0	.0	.0	424.4	.0	3
Aplicación de pesticidas	-	.0	.0	.0	9.9	.0	-
SUB TOTAL		.0	.0	.0	5,347.6	.0	415
PROCESOS INDUSTRIALES							
Industria química	-	173.8	74.0	.0	1,563.7	.0	314
Desengrase	-	.0	.0	.0	2,562.7	.0	161
Recubrimiento de superficies	-	.0	.0	.0	1,975.7	.0	406
Aplicación de adhesivo	-	.0	.0	.0	44.4	.0	2
Impresiones y estampados	-	.0	.0	.0	600.3	.0	104
Industria alimentaria	-	526.6	.0	.0	520.2	.0	52
Industria del petroleo y derivados	-	6.2	.0	.0	573.6	.0	45
Industria metalmeccánica y fundición	-	1,709.5	13,657.2	13.9	15.1	1,554.7	391
Ind. de productos de la madera	-	56.8	.0	.0	.0	.0	55
Industria del cuero y calzado	-	.0	.0	.0	.0	.0	19
Prod.piedra,arcilla,vidrio,concret	-	2,031.5	146.6	48.5	34.4	89.8	231
CATEGORIA	CONSUMO	PTS	SOx	NOx	COV	CO	N°
	(b)	(ton/año)	(ton/año)	(ton/año)	(ton/año)	(ton/año)	fuentes
SUB TOTAL		4,504.7	13,877.9	62.5	7,890.5	1,644.6	1,780
POLVOS FUGITIVOS (sin chim.)							
Polvo de calles s/pavimentar	-	21,747.8	.0	.0	.0	.0	-
Polvo de calles pavimentadas	-	10,951.6	.0	.0	.0	.0	-
Polvo de construcciones	-	389.2	.0	.0	.0	.0	-
Polvo de araduras	-	703.5	.0	.0	.0	.0	-
Alimentación de ganado	-	117.6	.0	.0	.0	.0	-
SUB TOTAL		33,909.9	.0	.0	.0	.0	-

COMBUSTION EN FUENTES MOVILES

Diesel	248,835.0	1,759.7	1,943.7	3,961.1	1,052.8	5,426.3	9,000
Gasolina de autos y taxis	386,236.8	901.8	1,064.7	7,569.7	12,958.1	177,630.8	325,000
SUB TOTAL		2,661.5	3,008.5	11,530.9	14,011.0	183,057.2	334,000
TOTAL		46,829.8	22,435.0	12,822.0	29,000.7	227,154.9	-

(a) Las unidades son ton/año para los combustibles sólidos; m³/año para los líquidos y gaseosos, excepto para el gas licuado, expresado en ton/año. Las cifras corresponden a 1987.

(b) PTS: partículas totales en suspensión; SOx: óxidos de azufre, incluyendo SO₂ y SO₃; NOx: óxidos de nitrógeno, incluyendo NO y NO₂; COV: compuestos orgánicos volátiles, excluyendo el metano; CO: monóxido de carbono.

(c) Igual a (b).

El contenido del cuadro 2 se encuentra representado en los gráficos 2 al 8. Al analizar tanto el cuadro 2 como los gráficos siguientes que lo ilustran, debe tomarse en cuenta que las emisiones corresponden a totales anuales sobre la región, cuya importancia relativa puede cambiar a lo largo del año. La relación entre las distintas emisiones puede ser diferente a la que guardan entre sí los totales anuales cuando la contaminación llega a ser más crítica, es decir, bajo condiciones de ausencia de vientos y durante la presencia de la capa de inversión térmica a baja altura. Asimismo, la importancia relativa varía de una zona a otra de la ciudad. Para un análisis más detallado de la variación geográfica y temporal de las emisiones, véase la nota 3/.

De acuerdo con las mediciones de la red MACAM, las PTS constituyen el contaminante cuya norma se sobrepasa con mayor frecuencia. Según se muestra en el gráfico 2, la causa principal de esta contaminación es el polvo fugitivo (no emitido por chimeneas), cuya emisión constituye el 72% del total. Dentro de esta categoría, la mayor contribución proviene del tránsito sobre calles pavimentadas y sin pavimentar. Las industrias constituyen la segunda fuente en importancia, con un 17%, que se forma por la adición de un 10% proveniente de procesos y un 7% proveniente de calderas.

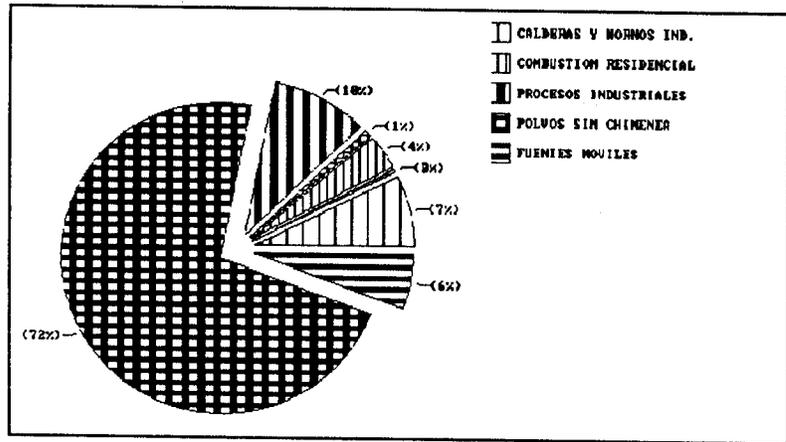


Figure 2: Emisiones de PTS sobre la Región Metropolitana

fuentes: IRM/Cade-Idepé

Si entre las PTS se distingue la fracción respirable (FR), definida como la formada por partículas de diámetro inferior a 2,5

micrones, las combustiones adquieren mayor importancia. Las emisiones de FR se muestran en el gráfico 3. El polvo de calles conserva el primer lugar, pero las partículas provenientes de motores Diesel del transporte colectivo toman el segundo lugar. La industria toma el tercer lugar, con un 20%, que agrupa un 9% proveniente de procesos y un 11% de combustiones.

En el centro de la ciudad, la fracción respirable proviene principalmente del transporte colectivo, tal como lo muestra el gráfico 4. El polvo de las calles es aquí solamente polvo proveniente de las calles pavimentadas, levantado por el tránsito vehicular. Si juntamos las emisiones de los escapes con

las que los vehículos levantan desde las calles, advertimos que el 82% de la fracción respirable proviene del transporte.

A medida que se consideran partículas de diámetro cada vez más pequeño, bajo 10 micrones (PM10 o partículas inhalables del cuadro 1), la probabilidad de que alcancen el fondo de los alvéolos pulmonares es mayor, y para la fracción respirable (<2.5 micrones), esta probabilidad alcanza el 100%. Además de este carácter inhalable, debe tomarse en cuenta el carácter tóxico de los constituyentes de las partículas, que para las de origen

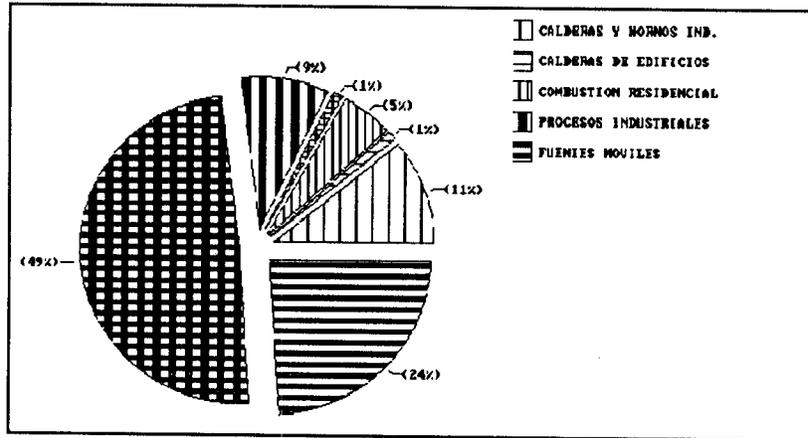


Figure 3: Fracción respirable en la Región Metropolitana

fuelle: IRM/Cade-Idepé

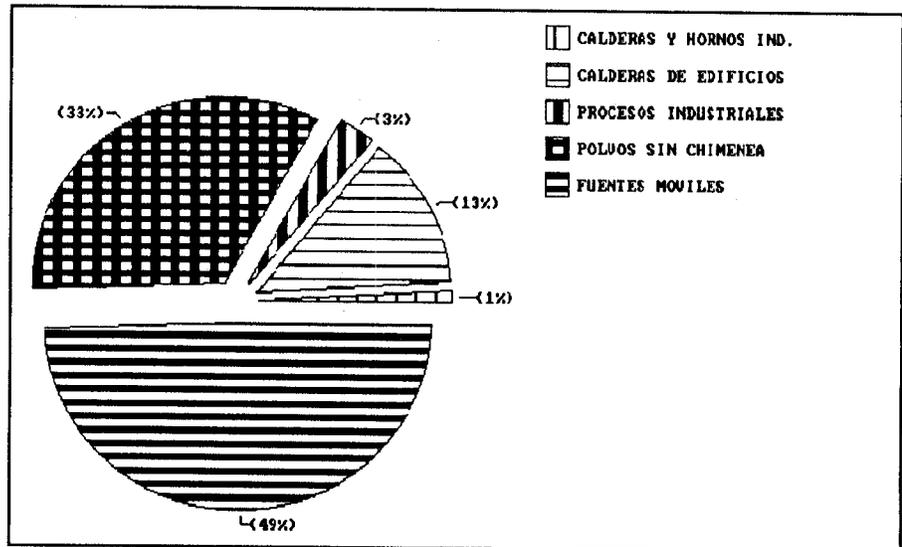


Figure 4: Fracción respirable en el centro de la ciudad

fuelle: IRM/Cade-Idepé

natural (como el polvo de calles sin pavimentar) es mucho menor que para el hollín, producto de combustiones incompletas. Las emisiones de SOx (tanto SO2 como SO3) provienen principalmente del sector industrial, y se concentran en el sur de la ciudad. La segunda fuente en importancia está constituida por el azufre de los combustibles, con un 28% proveniente de las fuentes fijas y un 13% de las fuentes móviles. Las emisiones de NOx (tanto de NO como NO2) son producidas principalmente por los escapes de los automóviles y su presencia en la atmósfera de Santiago comienzan a ser amenazadora, como lo señalan las mediciones de la red MACAM. Su distribución espacial sigue la de la densidad del tránsito vehicular.

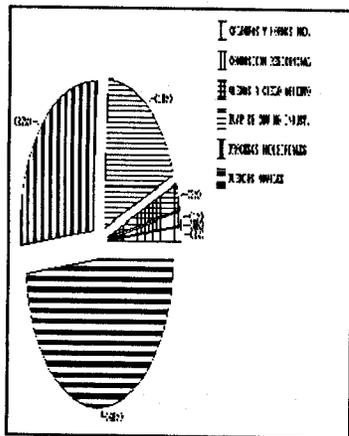


Figure 6: Emisiones de COV en la Región Metropolitana
fuente: IRM/Cade-idepé

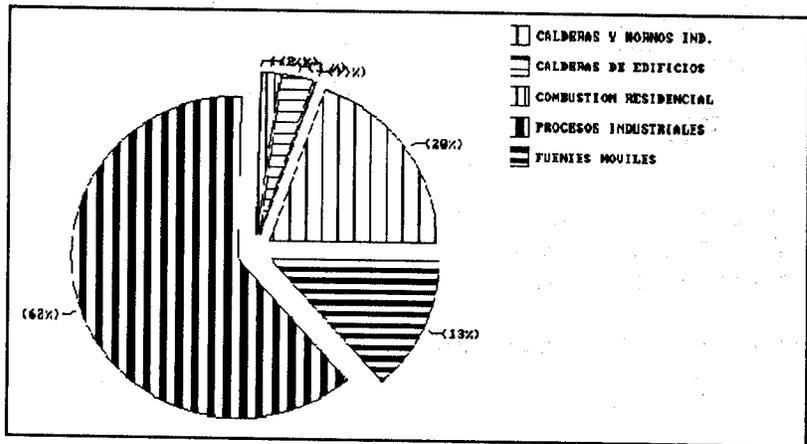


Figure 5: Emisiones de SOx sobre la región Metropolitana

fuentes: IRM/Cade-idepé

La emisión de COV proviene de una variedad de fuentes, entre las cuales sólo los vehículos forman el 49% de ellas. La evaporación de solventes industriales forma la segunda fuente en importancia y los solventes domésticos, la tercera. Como en todas partes del mundo, las emisiones de CO provienen principalmente de los motores de los automóviles y su distribución espacial sigue la de la densidad del tránsito vehicular.

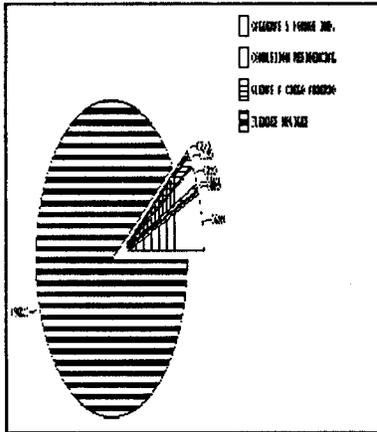


Figure 8: Emisiones de NOx en la Región Metropolitana

fuelle: IRM/Cade-Idepé

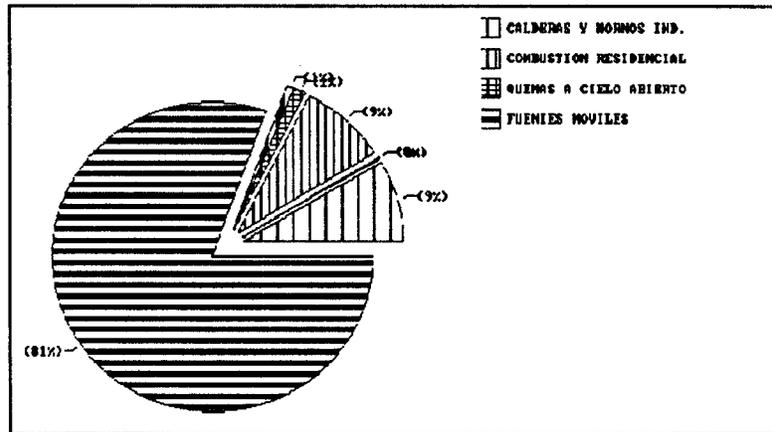


Figure 7: Emisiones de CO en la Región Metropolitana

fuelle: IRM/Cade-Idepé

b) Fundiciones y plantas de tostación y grandes consumidores de combustibles

De la observación del cuadro 3, se concluye que las emisiones de SO₂ de la RM, descritas en el cuadro 2 y estimadas en 22 435 toneladas por año son absolutamente insignificantes frente a los 2 056 416 ton/año emitidas por las fundiciones, plantas de tostación y grandes consumidores de combustibles señalados en el cuadro 3. En esta última cifra, las fundiciones constituyen el 92%, y si a ellas agregamos las plantas de tostación, totalizamos un 94%. Ello muestra la importancia de la metalurgia en la generación del SO₂ que en nuestro país se emite a la atmósfera.

i) Origen y consecuencias de la emisión de SO₂. El anhídrido sulfuroso llega a la atmósfera como resultado de la oxidación del azufre contenido en combustibles o en minerales sulfurados. La reacción de oxidación del azufre, fuertemente exotérmica, conduce a la formación de una mezcla de SO₂ y SO₃. A la temperatura de combustión, --unos 1 500°C--, el producto estable de la combustión es el SO₂, en tanto que a temperatura ordinaria lo es el SO₃. De lo anterior debería concluirse que el enfriamiento de la mezcla de SO₂ y SO₃ debería conducir a la transformación de SO₂ en SO₃. Si ello no sucede, salvo ante la presencia de catalizadores o bajo condiciones especiales de

enfriamiento, es a causa de la cinética y de la energía de activación de la reacción. Bajo condiciones ordinarias, sólo una fracción del SO_2 (del orden de $1/80$) forma SO_3 . De ambos óxidos, el SO_3 es el que, combinándose con el vapor de agua atmosférico, origina el corrosivo ácido sulfúrico, causa de SMOG y de la lluvia ácida. Siendo el SO_2 el óxido de equilibrio, existen numerosos catalizadores tales como óxidos metálicos o NO_2 , capaces de transformar el SO_2 en SO_3 en la atmósfera. Algunas de estas reacciones conducen a la formación, en la atmósfera, de sulfatos que, siendo sólidos a temperatura ambiente, forman partículas en el rango 0.01 a 1 micrones y contribuyen a la generación de la opacidad atmosférica.

ii) **Fundiciones de cobre.** Las fundiciones de cobre en Chile procesan mineral de tipo porfídico, donde la especie valiosa, formada por sulfuros de cobre y hierro, está dispersa en una ganga, o material estéril, formada por silicatos. Las concentraciones de cobre en el mineral, en las explotaciones de la gran minería, se encuentran en el rango de 0.8 a 2 % . Después de extraído de la mina, el mineral se muele finamente en suspensión acuosa y se separa parcialmente en un concentrador, hasta alcanzar concentraciones comprendidas entre 30 y 40%. El concentrado primero se seca, y luego se funde, para separar la ganga vítrea que flota sobre el baño de concentrado fundido, desde donde se extrae. Luego, se hace pasar aire a través del concentrado fundido, el que oxida primero el hierro, que flota así en la superficie, y de esa forma se extrae del baño fundido, y luego el azufre, que forma SO_2 y escapa en la corriente gaseosa hacia la chimenea. El cobre así producido, que tiene una pureza superior al 99% y recibe el nombre de Blister, requiere otros procesos de purificación para alcanzar la calidad comercial necesaria para la producción de conductores eléctricos. Estos procesos ulteriores son poco emisores de SO_2 .

La emisión de la gran cantidad de SO_2 producida por las fundiciones tiene lugar tanto durante la fusión como durante la oxidación del azufre. En las fundiciones de tecnología anterior a los años setenta, la fusión tiene lugar en un horno reverbero, calentado con combustible, en tanto que la oxidación del azufre ocurre en hornos convertidores Peirce-Smith. En ambos hornos, pero especialmente en el reverbero, la concentración de SO_2 en el efluyente raramente sobrepasa el 4%, lo que hace casi imposible operar una planta de ácido, que es el método privilegiado de control de las emisiones de SO_2 en una fundición.

El desarrollo tecnológico de los últimos 25 años ha procurado aprovechar el calor de combustión del azufre para la fusión del concentrado, juntando en un solo horno las operaciones que originalmente se realizaban separadamente en el reverbero y en el convertidor Peirce-Smith. Un subproducto inmediato de este logro ha sido la producción de gas con SO_2 menos diluido, lo que posibilita la operación de un planta de ácido.

Dos tipos de horno se han impuesto en el país: el convertidor modificado Teniente, desarrollado en Caletones y el horno flash (de fusión relámpago), de tecnología finlandesa Outokumpu.

En Chile hay seis fundiciones, a saber, Potrerillos, Chuquicamata, Caletones, Chagres, Ventanas y Paipote. De ellas, Chuquicamata tiene un horno flash, y estudia la instalación de otro, en tanto que Chagres se prepara para la instalación de uno. Chuquicamata, Potrerillos, Paipote, Ventanas y Caletones tienen convertidores modificados Teniente.

iii) Plantas de tostación. La tostación consiste en la oxidación de sulfuros minerales en presencia de oxígeno, por calentamiento suave con gases de combustión, para transformar el sulfuro en óxido metálico. En la misma operación, el azufre contenido se oxida a SO_2 , que escapa en el efluente gaseoso. La concentración que alcanza el SO_2 en la corriente efluente es alta, y permite la operación de una planta de ácido.

iv) Emisión de arsénico. Otro contaminante de importancia, si bien no incluido en la norma de calidad de aire 1215, es el arsénico. Los procesos pirometalúrgicos de la fundición oxidan el arsénico, tal como ocurre con el azufre, pero a diferencia del SO_2 , el As_2O_3 se condensa a temperatura ambiente, lo que hace que se lo encuentre como parte de las partículas emitidas.

Cuadro 3

EMISIONES DE LAS FUNDICIONES Y PLANTAS DE TOSTACION
Y DE LOS GRANDES CONSUMIDORES DE COMBUSTIBLES
(1989) a/

EMPRESA	VOLUMEN DE GASES (Nm ³ /h)	EMISIÓN DE SO ₂ (ton/año)	EMISIÓN DE As ₂ O ₃ (ton/año)	EMISIÓN DE PARTIC. (ton/año)
FUNDICIONES				
Potrerosillos	740,000	291,761	695	13,560
Chuquicamata	1,150,000	715,102	8,916	
Caletones	686,347	665,602	5,076	5,406
Chagres		14,884		
Ventanas		132,764		
Paipote		66,480		
SUBTOTAL	2,576,344	1,886,593	14,687	18,966
PLANTAS DE TOSTACION				
Refimet (Stgo)		6,176		
Refimet (Antof)		7,608		
Molymet		5,300		
El Indio		18,947	5,610	
SUBTOTAL		38,031	5,610	
TERMoeLECTRICAS				
Ventanas		40,784		
Renca		16,074		
Lag. Verde		3,746		
Tocopilla		16,800		
Bocamina		18,802		
Huasco		3,156		
SUBTOTAL		99,362		
PLANTAS DE CEMENTO				
Polpaico		2,270		
Melón		3,164		
Inacesa		2,220		

Bio-Bio		1,754		
SUBTOTAL		9,408		
REFINERIAS DE PETROLEO				
Petrox		1,800		
RPC		1,800		
SUBTOTAL		3,600		
PLANTAS DE AZUCAR				
Curicó		2,160		
Linares		2,152		
Nuble		2,096		
Los Angeles		1,258		
Rapaco		670		
SUBTOTAL		8,336		
ACERIAS				
CAP		3,864		
CMP	1,006,000	7,222		13,420
SUBTOTAL	1,006,000	11,086		13,420
T O T A L	3,582,344	2,056,416	20,297	32,386

Fuente: Ministerio de Minería.

a/Los espacios en blanco indican ausencia de información no de emisión.

c) Emissiones provenientes de plantas de celulosa

La producción de celulosa se hace de dos maneras: con disolución química de la lignina, que constituye el agente ligante de la celulosa en la madera; con disgregación mecánica de las fibras de la madera, en las cuales la celulosa conserva la lignina. El producto de la disgregación mecánica es usualmente papel de diario de calidad corriente.

i) **Proceso principal: producción de pulpa química.** El proceso Kraft de producción de celulosa química, el más usado en el país, involucra la cocción en un digestor a presión de trozos de madera, en presencia de una solución acuosa de sulfuro de sodio e hidróxido de sodio, llamada licor blanco, que disuelve la lignina que liga las fibras de celulosa. Cuando se completa la cocción, el contenido del digestor se vacía en un estanque de

soplado, donde se separa la fibra digerida del licor que ahora contiene la lignina disuelta. Del estanque de soplado, la fibra pasa a un separador de nudos, y luego a las secciones de lavado, y en algunas plantas, a la de blanqueo, donde se decolora y disuelve la lignina sobrante.

Desde un punto de vista económico indispensable recuperar tanto el contenido calórico que la lignina disuelta imparte al licor gastado, o licor negro, como los compuestos químicos que contiene. Para ello se concentra el contenido del licor negro por evaporación, y luego se lo hace arder en una caldera, llamada de recuperación. En la caldera arde la lignina y otros compuestos orgánicos disueltos, en tanto que los compuestos inorgánicos caen al piso y se descargan al estanque de disolución de fundido, para formar una solución llamada licor verde. Este licor se mezcla con lechada de cal, que reconvierte el licor en licor blanco, y permite recomenzar el proceso.

El vapor necesario para calentamiento, para mover equipo, para generación eléctrica, etc., es mayor que el producido por la caldera de recuperación. Por ello, las plantas tienen una caldera suplementaria importante, que funciona con desechos de madera y corteza. Las emisiones de partículas importantes se originan en la caldera de recuperación, en el horno de calcinación de caliza, y en el estanque de disolución de fundido. El olor característico del proceso Kraft es sobre todo producto de la emisión de ácido sulfhídrico en los evaporadores de concentración de licor negro, del horno de calcinación que recibe caliza contaminada con sulfuro de sodio y de los incondensables del digestor. También se producen mercaptanos, gases particularmente malolientes, en el digestor y estanque de soplado y en el evaporador de contacto directo. En cuanto a las emisiones de plantas de celulosa, las bases de cálculo de los factores de emisión empleadas en la elaboración del cuadro 4, se encuentran en anexo.

Cuadro 4

VOLUMENES DE PRODUCCION DE PLANTAS DE CELULOSA

PLANTA	PRODUCCION (ton/día)	PROCESO	EQUIPO EMISOR	Factor de emisión en kg/ton						emisión en ton/año					
				PTS	SO2	CO	H2S	sul- fu- ra- dos-	PTS	SO2	CO	H2S	sul- fu- ra- dos-		
1) Puente Alto	500	celulosa comprada papel viejo reciclado. Pulpa Mecánica	-caldera a leña	0,78						140	0	0	0	0	
2) Licancel (a partir de 1992)	180	celulosa blanqueada	-horno de cal c/PES -caldera de potencia c/PES -caldera recuperadora c/PES	2,33	2,71	20	6,4	2,1		151	176	1.296	2	1363	
3) Constitución	850	celulosa blanqueada	- horno de cal c/PES - caldera de potencia c/PES - Caldera recuperadora c/PES	2,33	2,71	20	6,4	2,1		713	829	6.120	1.958	643	
4) Laja	1310	celulosa blanqueada	- horno de cal c/scrubber - caldera de potencia c/PES - Caldera recuperadora c/PES	2,33	2,71	20	6,4	2,1		1.099	1.278	9.432	3.018	990	
5) Bio-Bio	270	pulpa mecánica newsprint, CIMP for rejects	- caldera a leña s/PES	0,78						76	0	0	0	0	
6) Arauco I	560	celulosa blanqueada	- horno de cal c/scrubber - caldera de potencia c/PES - Caldera recuperadora c/PES	2,33	2,71	20	6,4	2,1		470	546	4.032	1.290	423	
7) Arauco II (a partir de 1991)	1111	celulosa blanqueada	-horno de cal c/scrubber - caldera de potencia c/PES - Caldera recuperadora c/PES	2,33	2,71	20	6,4	2,1		932	1.084	7.999	2.560	840	
8) Santa Fe	770			2,33	2,71	20	6,4	2,1		646	751	5.544	1.774	582	
9) Celpac (a partir de 1991)	960	celulosa blanqueada	- horno de cal c/scrubber - Caldera recuperadora c/PES	2,33	2,71	20	6,4	2,1		805	937	6.912	2.212	726	

(continúa)

(continuación)

PLANTA	PRODUCCION ton/día)	PROCESO	EQUIPO EMISOR	factor de emisión en kg/ton				emisión en ton/año					
				PTS	SO2	CO	H2S	sul- fu- ra- dos	PTS	SO2	CO	H2S sulf- furados	
10) Inforsa	320	pulpa al sulfito	-caldera de leña	0,78					90	0	0	0	0
	85	pulpa mecánica		3,00	40				92	1.224	0	0	0
11) Valdivia	100	pulpa mecánica celulosa comprada papeles estucados	-caldera de leña	0,78					28	0	0	0	0
T O T A L	7.016							5.242	6.827	41.33	12.812	4.340	

Fuente: elaboración propia a partir de información disponible en la consultora Cade-Idepé

d) Emisiones provenientes de plantas de harina de pescado

i) **Aspectos importantes del proceso.** El procesamiento incluye la producción de conservas en lata y la reducción, es decir, la fabricación de harina y aceite de pescado. La producción de harina y aceite pueden basarse en productos frescos de la pesca o en desechos de la producción de conservas. En ambos casos, el pescado se procesa en un cocedor con vapor vivo. Al salir del cocedor, el material se prensa para extraerle el agua y el aceite, y luego se deshace y seca en un secador rotativo. El secador está formado por un largo cilindro casi horizontal dotado de capachos interiores que, gracias a la rotación del horno, alzan el producto, y al invertirse el capacho en el lado descendente deja caer el producto, que cruza así la corriente gaseosa. Se usan dos tipos de secadores: de fuego directo y de camisa de vapor. En el primero, gas caliente proveniente de una cámara de combustión recorre el secador, aportando el calor y arrastrando el vapor proveniente de la harina húmeda. En el segundo, el vapor de una caldera se condensa en el exterior de las paredes del horno que contiene la harina, por lo que el calentamiento es indirecto y por ello más suave y controlado. En ambos casos, el gas que abandona el horno pasa por un ciclón para recuperar parte de la harina.

ii) **Emisiones y control.** Aunque tanto el humo como el polvo pueden constituirse en un problema, la emisión más objetable de las plantas de procesamiento de pescado es el olor, mucho más notorio en las plantas de harina que en las de conserva. Mientras más descompuesto esté el pescado antes de la cocción, mayor será la emisión de olor. La fuente principal en las plantas de harina es el horno de secado, y el olor es más pronunciado si el secador es a fuego directo. El olor se produce principalmente por la emisión de ácido sulfhídrico [H_2S] y de trimetilamina [$(CH_3)_3N$].

Los olores pueden controlarse con postquemadores, con lavadores de gases (scrubbers) con cloro y con condensadores. Los postquemadores son los más efectivos, en casi un 100%; sin embargo, por el combustible que emplean, son caros de operar. Las escobillas cloradoras son efectivas en un 95 a 99% en el control de olores de cocedores y secadores. Los condensadores son el dispositivo menos eficaz. Para el control de las emisiones de partículas, cuyo tamaño es más bien grande, los ciclones son satisfactorios.

Los factores de emisión presentados por el AP-42 se presentan en el cuadro 5:

Cuadro 5**FACTORES DE EMISION EN LA FABRICACION DE HARINA DE PESCADO**

FUENTE	PARTICULAS (kg/ton)	TRIMETILAMINA (kg/ton)	AC. SULFHIDRICO (kg/ton)
Cocedores (harina)			
pescado fresco		0,15	0,005
pescado descompues		1,75	0,100
sec.camisa de vap.	2,5		
sec. directos	4,0		

iii) Emisiones resultantes de la producción de harina de pescado. De acuerdo con CORFO/IFOP, "durante 1989 el sector pesquero nacional obtuvo las cifras más altas registradas en cuanto a captura, ubicándose como la tercera fuente de divisas a nivel nacional, y generando empleo para más de 107 000 personas. El sector mantuvo su posición entre las principales potencias pesqueras del mundo" 6/. Durante este período, el sector exportó productos por 934 millones de dólares.

Durante 1989, se desembarcaron 6 632 813 toneladas de productos marinos, que se convirtieron, ya elaboradas, en 1 794 440 toneladas de productos. De este monto, 76.9% tomó la forma de harina de pescado y 14.5% de aceite, también subproducto de la producción de harina. Entre ambos reúnen, entonces, 90.4% de los productos elaborados. El 93,8% de la harina se exporta.

La producción de harina y las emisiones consecuentes se muestran en cuadro 6:

Cuadro 6

PRODUCCION DE HARINA DE PESCADO Y SUS EMISIONES

PUERTO	HARINA (ton/año)	PARTICULAS (ton/año)	AC.SULFHDRIICO (ton/año)	TRIMETILAMINAS (ton/año)
Arica	203.809	129	3	56
Iquique	355.388	285	7	124
Tocopilla	94.683	0	0	0
Mejillones	102.005	0	0	0
Antofagasta		259	6	113
Caldera	46.170	94	2	41
Coquimbo	20.748	37	1	16
San Antonio	-	0	0	0
Tomé	822.803	12	0	5
Talcahuano	372.839	721	17	313
Coronel	132.527	257	6	112
T O T A L	1.334.614	1.794	42	780

Fuente: Elaboración propia sobre datos del boletín de estadísticas de CORFO/IFOP.

Los datos de producción de harina corresponden a los valores del año 1989. Las emisiones de partículas se han supuesto limitadas por ciclones de un 30% de eficiencia. Los factores de emisión de los de hornos se han tomado del valor medio entre los de secado directo e indirecto. El pescado se ha supuesto en un estado intermedio entre fresco y descompuesto.

3. Sistemas de reducción de emisiones

a) Emisión de partículas totales en suspensión

i) **Equipos de control de emisión industrial de material particulado.** El equipo específico que una planta industrial debe escoger para el control de la emisión de partículas depende de numerosas variables operacionales. Entre ellas se cuentan el volumen máximo que debe tratar, la eficiencia máxima que debe alcanzar, las características físicas y químicas de las partículas que debe tratar, el tamaño de las partículas y su concentración en el gas portador, la temperatura y la presencia de gases condensables.

En el cuadro 7 hemos incluido los equipos de control de emisiones de partículas de mayor utilización, y las situaciones en las cuales son más efectivos.

Cuadro 7

APLICACIONES TÍPICAS DE EQUIPOS DE CONTROL DE EMISIONES DE PTS

Ciclones	<ul style="list-style-type: none"> -el polvo es grueso -altas concentr. de polvo ($> 1 \text{ gr/ft}^3$) -se busca clasificar el material -no se requiere una eficiencia muy alta
Scrubbers húmedos	<ul style="list-style-type: none"> -se requiere alta eficiencia en la remoción de partículas pequeñas -se desea enfriar el gas y no hay objeciones contra la humedad -el gas es combustible -se desea limpiar el gas de partículas y de gases disueltos
Filtros de mangas	<ul style="list-style-type: none"> -se requiere una alta eficiencia -se requiere recuperar partículas valiosas secas -el gas está siempre sobre su punto de rocío -el caudal es relativamente bajo -la temperatura es moderada
Precipitadores electrostáticos	<ul style="list-style-type: none"> -se necesita remover polvo muy fino con alta eficiencia -se debe tratar un gran caudal de gas -se trata de recuperar material valioso

Fuente: Wark y Warner.

Cuando se han determinado los requerimientos operacionales y se conocen las capacidades básicas de los diferentes equipos de control, es posible realizar un análisis que conduce a un número reducido de opciones, en términos de la tecnología actual. Si bien una comparación detallada de los diferentes equipos de control es un ejercicio inútil porque las capacidades cambian con el desarrollo tecnológico, hay algunas características importantes que vale la pena comparar, las que se incluyen en el cuadro 8.

Cuadro 8

CARACTERISTICAS DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE EMISIONES DE PTS

CLASE GENERAL	TIPO ESPECIFICO	CAPACIDAD TIPICA	PERDIDA DE CARGA (mmca)	POTENCIA NECESARIA (W/cfm)	EFICIENCIA	
					5µm	2µm 1µm
Colectores mecánicos	Cámara de sedimentación con baffles	12 a 15 cfm por ft ³ de cámara	5 a 12	0.03 a 0.10		
		100 a 3500 cfm por ft ² de área de entrada	13			
Filtros de mangas	Ciclones de alta eficiencia	2500 a 3500 cfm por ft ² de área de entrada	75 a 130	0.5 a 1.0	75	50 30
		1 a 6 cfm por ft ² de área de tela	100 a 150	1.0 a 1.3	99.8	99.5 99
Scrubbers húmedo	Con baffles de impacto	400 a 600 cfm por ft ² de área de baffle	50 a 125	0.2 a 1.0		
		500 a 700 cfm por ft ² de seccion transversal	150 a 200			
Torres con relleno	Venturi	6000 a 30000 cfm por ft ² de área de garganta	250 a 1270	4 a 12	99.7	99 97

(continúa)

(continuación)

Precipitador electros tático	Seco, con un solo campo	2 a 8 cfm por ft ² de área de electrodo	5 a 12	0.4 a 1.0	99	95	85
	Húmedo	5 a 15 cfm por ft ² de área de electrodo	12 a 18	0.3 1 0.5			

Fuente: Wark & Warner.

ii) Estimación de costo de control de emisiones industriales en la R.M. Aquí nos referiremos al control de las emisiones de PTS de las fuentes fijas industriales de la Región Metropolitana.

Como ya lo hemos señalado, la industria debe prepararse para una reducción del orden de 70% de sus emisiones de material particulado. Antes de hacer una estimación del costo que podría tener una reducción de emisiones, consideremos la variedad de equipos disponible para ello.

La estimación de costos que aquí se presenta está basada en una encuesta a 35 industrias de la RM realizada durante enero de 1990. La información recopilada no tiene precedentes recientes, y en consecuencia no puede analizarse desde un punto de vista crítico por comparación con otras fuentes. Sin embargo, junto con su originalidad, es prudente apreciar sus limitaciones, consistentes en que 20 de las industrias visitadas carecían de antecedentes relativos a los costos de adquisición e instalación, o bien desconocían el caudal de gases tratado por el sistema de captación; los antecedentes válidos se limitaron, entonces, a 15 sistemas de captación; las instalaciones a las que nos referimos corresponden total o parcialmente a construcciones mecánicas hechas por las propias industrias, lo que hace posible que una parte de los costos no haya sido informada. Estimar el costo de los equipos de control en términos genéricos es una tarea difícil, por su gran variabilidad. En efecto, si bien el costo de adquisición del equipo puede correlacionarse con el tipo de equipo y con el volumen de gas que éste deberá tratar (con una dispersión relativamente pequeña), no sucede lo mismo con los costos de instalación y de operación. El costo de instalación es tributario de la disponibilidad de espacio en las inmediaciones de la fuente de emisión, así como de la capacidad de la estructura existente para soportar el equipo suplementario que se instalará.

Ello, además de otros factores de incertidumbre que son habituales en cualquier expansión industrial, como la capacidad de los servicios existentes (potencia eléctrica, agua, etc.). El costo de operación anual, especialmente el de impulsión del gas, es también tributario de la geometría de la instalación, la que en general no se puede depurar para disminuir las pérdidas de carga como consecuencia del hecho de que se trata de un injerto en una instalación existente. La variabilidad de los costos puede apreciarse por el valor del coeficiente de correlación de las funciones de costo.

A partir de estas funciones, se ha hecho una estimación del costo de reducción de las emisiones de PTS de las fuentes fijas puntuales de Santiago. A pesar de que el laboratorio de contaminación atmosférica del Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente mantiene un listado actualizado de las emisiones de fuentes in-

dustriales, tanto de calderas como de procesos, esta información, a u n q u e actualizada es incompleta, por cuanto no indica la presencia de sistemas de control de emisiones. Por ello, nos hemos remitido al listado producido por la Intendencia de la RM.

Las funciones de costo de los gráficos 9, 10 y 11 incluyen tanto el costo de adquisición como el de instalación. En este último, no se ha considerado el costo de estructuras especiales necesarias para el montaje. Para la estimación del costo de la reducción de emisiones de fuentes industriales, considerado más abajo, se consideraron los promedios del cuadro 9.

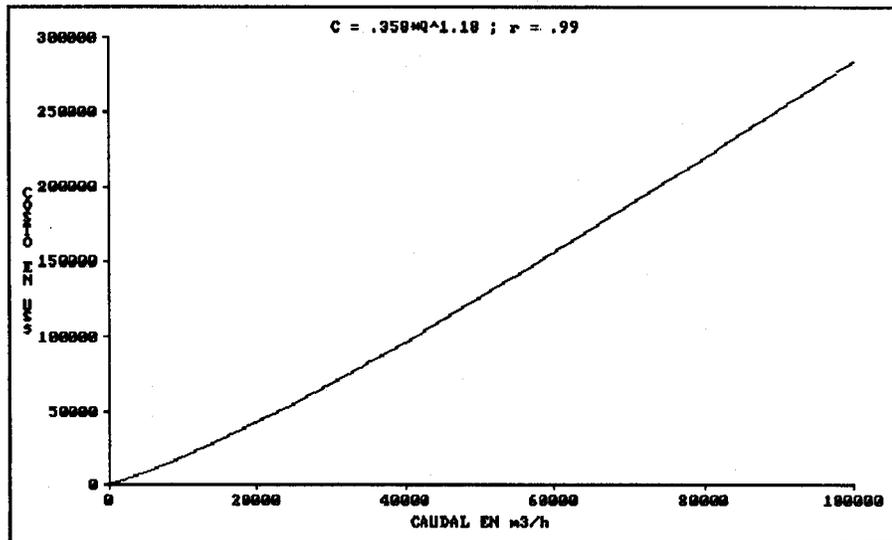


Figure 9: Función de costo de las mangas

fuentes: elaboración propia

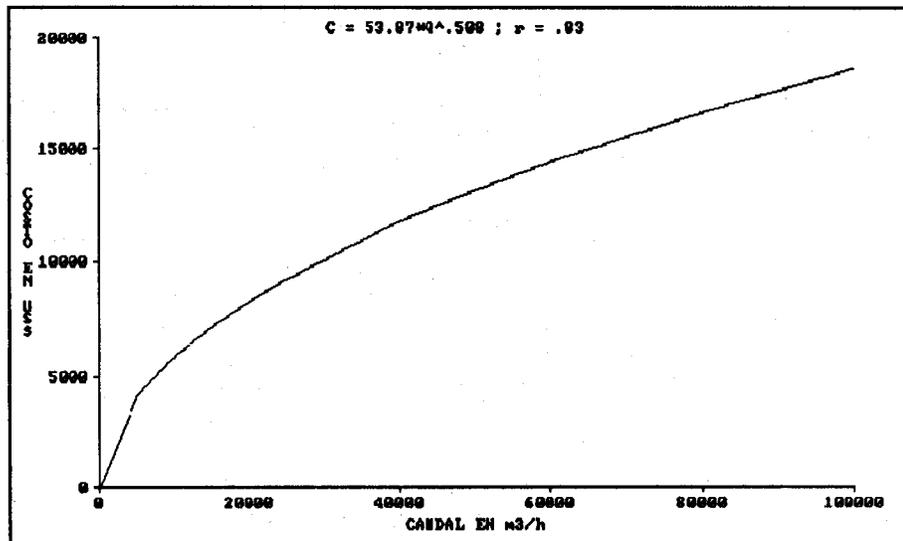


Figure 10: Función de costo de los ciclones

fuentes: elaboración propia

fuentes: elaboración propia

Cuadro 9**DIVISION DE COSTOS UTILIZADA**

	Adquisición %	Instalación %	Operación % anual
Scrubber	73	27	4
Mangas	85	15	17
Ciclones	88	12	51

a. Lavadores de gases (scrubbers)

Las variaciones de los costos de operación y mantenimiento, dependen fundamentalmente de la frecuencia del mantenimiento (limpieza y reparación por desgaste y corrosión), del consumo eléctrico y de los ventiladores y presión de descarga y caudal de agua o lechada de cal. Se obtienen mejores resultados con agua atomizada, lo que requiere bombas de mayor presión, y por ello, mayor consumo eléctrico. De allí que el costo de operación varíe entre un 1 y un 10% anual, con un promedio de 4% y una desviación estándar absoluta de 3%.

b. Mangas

Las variaciones en los costos de mantenimiento y operación dependen fundamentalmente del tipo de tela utilizado y del método de fabricación. Las mangas compradas a proveedores externos son caras; las fabricadas por la empresa (por costureras) permiten reducir los costos de fabricación, y por lo tanto de reposición. El costo de la energía eléctrica interviene en función de la pérdida de carga admitida en las mangas. A mayor pérdida de carga hay, en general, una menor superficie de tela, lo que reduce el costo inicial, pero aumenta el costo de la energía eléctrica de operación.

c. Ciclones

Las variaciones de los costos de operación y mantenimiento de los ciclones es muy grande. El costo se descompone de la siguiente manera:

- Reparación: El costo es relativamente pequeño, y depende en general de la velocidad de desgaste por erosión del metal.

- Limpieza: Incluye la mano de obra para limpieza y descarga del receptáculo de sólidos.

- Energía eléctrica de los ventiladores: Depende de la necesidad del tiraje forzado.

En general, cuando la instalación del sistema de control obliga a pasar de un sistema de tiraje natural a uno forzado, el costo del sistema aumenta de manera considerable, con un alto grado de variabilidad.

iii) Costo de creación de sistemas de control para fuentes puntuales

Las funciones de costo fueron aplicadas a las fuentes emisoras puntuales del Inventario de Emisiones para Santiago, elaborado por la Intendencia Regional. La aplicación se hizo bajo dos modalidades de sistemas de captación:

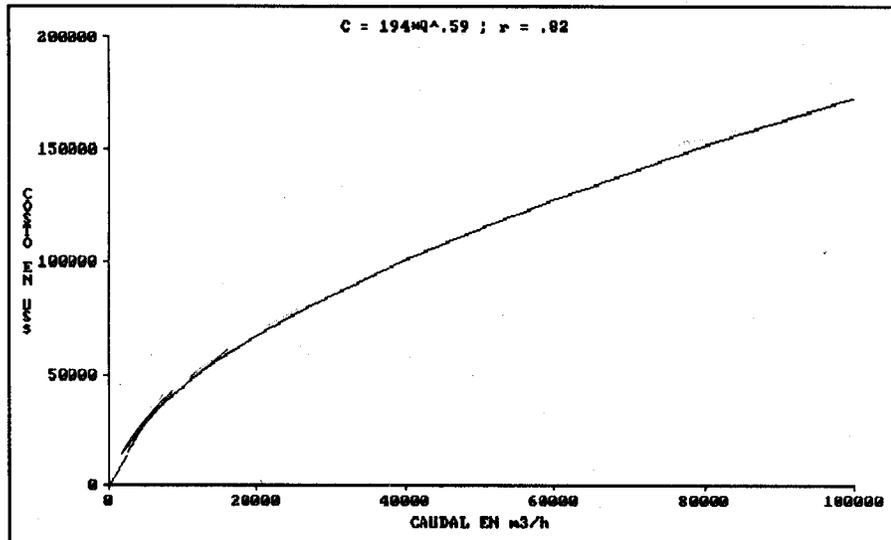


Figure 11: Función de costo de scrubbers

fuente: elaboración propia

Modalidad 1: Ciclones de alta eficiencia en las calderas y filtros de mangas en los procesos.

Modalidad 2: Limpiadores de gases o scrubbers húmedos para las calderas y filtros de mangas en los procesos.

En el cuadro 10 se indican las eficiencias que se han aceptado para estos equipos.

Cuadro 10**EFICIENCIAS ACEPTADAS PARA LOS EQUIPOS DE CONTROL**

EQUIPO	EFICIENCIA PARA LA FR
Ciclón alta eficiencia	50%
Scrubber húmedo	85%
Filtro de mangas	99%

En el cuadro 11 se registran los costos calculados con las funciones de costo señaladas.

Cuadro 11**COSTOS DE LA REDUCCION (EN DOLARES)**

CONCEPTO	MODALIDAD 1	MODALIDAD 2
Adquisición	921,698	4,353,632
Instalación	146,051	1,348,164
Costo total	1,067,750	5,701,798
Operación anual	447,622	493,567

La estimación de la captación y emisión resultante, así como la composición granulométrica, fueron determinadas para cada equipo, suponiendo un contenido medio de 28% de partículas de tamaño menor o igual a 2.5 micrones en las emisiones informadas por el Inventario. Este porcentaje corresponde al valor medio detectado por las mediciones efectuadas en chimeneas de calderas, hornos y procesos industriales durante el estudio de la IRM/CADE-IDEPE para fuentes emisoras.

La eficiencia global de estos equipos fue estimada como el cociente entre la captación total y la cantidad total de material tratado. Estos valores, así como la distribución de las partículas emitidas, fueron calculados de acuerdo con el procedimiento presentado en el cuadro 12.

Cuadro 12

EFICIENCIA TOTAL DE LOS EQUIPOS DE CAPTACION

SISTEMA	DIAMETRO DE PARTICULAS (µM)	CAPTACION (%)	TOTAL CAPTACION	TOTAL EMISION	DISTRIBUCION EMISIONES (%)	EFICIENCIA GLOBAL (%)
SCRUBBER	< 2.5	85.0	0.2380	0.0420	85.4	95.1
	> 2.5	99.0	0.7128	0.0072	14.6	
MANGAS	< 2.5	99.5	0.2786	0.0024	66.0	99.8
	> 2.5	99.9	0.7193	0.0007	34.0	
CICLON	< 2.5	50.0	0.1400	0.1400	95.1	85.3
	> 2.5	99.0	0.7128	0.0072	4.9	

El resultado de la aplicación de las eficiencias globales y distribución granulométrica de las emisiones, significa que en el caso de las modalidades 1 y 2 se obtienen de las fuentes puntuales los resultados que se presentan en los cuadros 13 y 14.

Cuadro 13

VARIACION DE LAS EMISIONES DE ACUERDO CON LA MODALIDAD 1

	EMISION TOTAL PTS (ton/año)	FRACCION RESPIRABLE (ton/año)	FRACCION > 2.5 µm
ACTUAL	3,397	951	2,446
DISMINUCION	2,634	253	2,381
REMANENTE	763	698	65
VARIACION %	-77.5	-26.6	-97.3

Cuadro 14**VARIACION DE LAS EMISIONES DE ACUERDO CON LA MODALIDAD 2**

	EMISION TOTAL PTS (ton/año)	FRACCION RESPIRABLE (ton/año)	FRACCION > 2.5 μ m
ACTUAL	3,397	951	2,446
DISMINUCION	3,008	617	2,391
REMANENTE	389	334	55
VARIACION %	-88.5	-64.9	-97.8

El resultado de esta disminución sobre el total de las emisiones de PTS sobre la ciudad, se detalla en el cuadro 15.

Cuadro 15

DISMINUCION ESPERADA

FUENTES EMISORAS	PTS (t/a) $\phi < 100\mu\text{m}$	F. respirable		Efecto Medidas		Variación	
		%	TOTAL	PTS	F.R.	PTS	F.R.
COMB. INDUSTRIALES							
Fuentes puntuales	1,480	28.0	415	332	110	77.6	73.4
Fuentes grupales	1,963	28.0	550	1,963	550	0.0	0.0
PROCESOS. INDUSTRIAL.							
Fuentes puntuales	1,795	28.0	503	403	134	77.5	73.4
Fuentes grupales	2,710	28.0	759	2,709	759	0.0	0.0
HOSP. PUNT. Y OTROS	122	28.0	34	28	9	77.0	73.3
POLVOS FUGITIVOS	33,910	13.8	4,675	33,910	4,675	0.0	0.0
RESIDENCIAS	1,661	28.0	465	1,661	465	0.0	0.0
FUENTES MOVILES							
Diesel	1,760	92.4	1,626	1,760	1,626	0.0	0.0
Gasolina	902	73.6	664	902	664	0.0	0.0
OTRAS FUENTES	528	20.0	106	528	106	0.0	0.0
TOTAL	46,931		9,797	44,196	9,098	5.6	7.1

b) Emisión de SO₂

i) Cambio a combustibles con bajo contenido de azufre. Esta es una posibilidad cuya realidad se acrecienta con las perspectivas de la disponibilidad, entre Concepción y Santiago, de gas natural procedente de Argentina.

ii) Desulfurización de carbón y combustibles líquidos. El azufre forma parte del carbón bajo dos formas: orgánica e inorgánica. La forma inorgánica es pirita de hierro (FeS₂), presente como partículas discretas, por lo que pueden ser retiradas parcialmente del carbón mediante un lavado con agua. La extracción del azufre orgánico es un proceso costoso y complicado, que envuelve la transformación del carbón en combustible gaseoso o líquido. La desulfuración de derivados del petróleo debe hacerse en refinería.

iii) Dispersión por chimeneas altas. Este método consiste en descargar el gas a través de una chimenea alta, de modo que la dispersión del SO₂ haga que el penacho, al tocar tierra, tenga una concentración menor a la indicada por la norma de calidad del aire.

iv) Desulfuración de gas de chimeneas industriales o de termoeléctricas. En los últimos años se ha presenciado el desarrollo de numerosos métodos para la desulfuración de gases de chimeneas, particularmente desde que la legislación en los Estados Unidos limitó la emisión admisible de las centrales termoeléctricas a 1,2 lb de SO₂ por millón de BTU quemados.

Entre los métodos desarrollados. podemos mencionar:

a. Combustión en lecho fluidizado y limpieza con caliza. El método se aplica a calderas que queman carbón, y consiste en la combustión en lecho fluidizado, al que se agrega caliza para absorber el SO₂ generado por la combustión. Desgraciadamente, aun con los procesos que aumentan la eficiencia de absorción, la del SO₂ en la caliza es baja, lo que genera una cantidad importante de subproducto seco que contiene el SO₂ retenido, el que debe depositarse como desecho.

b. Lavado con cal y caliza. El gas se lava con una suspensión de 5 a 15% de sulfito y sulfato de calcio, que contiene además cal y caliza. Como producto, se obtiene sulfato de calcio (yeso), además de cenizas, que se envían a una piscina de sedimentación. El líquido de la piscina se recarga con cal y caliza, y vuelve a la torre de lavado. El procedimiento enfría el gas, que es necesario calentar para darle el empuje que le permita ascender cuando sale de la chimenea. Por la naturaleza de los solutos, hay un permanente peligro de incrustación en todo el circuito de líquido.

c. Lavado con caliza modificado con sulfato de magnesio. Un método para superar las dificultades derivadas de la incrustación y la baja eficiencia de absorción de SO_2 consiste en absorberlo como sulfato soluble en un licor de lavado, y precipitarlo en un estanque exterior a la torre de absorción. Se usa sulfato de magnesio para aumentar en más de 90% la solubilidad del SO_2 y eliminar casi completamente la incrustación. Otra ventaja importante del proceso es que opera con el rango completo de caudal de gas, desde el valor de diseño hasta cero. Por adición de caliza, el SO_2 se recupera en el estanque exterior como sulfito o sulfato de calcio.

d. Lavado con óxido de magnesio. Opera de manera similar al proceso que utiliza caliza y cal, con la importante deferencia de que la absorción del SO_2 produce sulfato o sulfito de magnesio, sólido sedimentable que, a diferencia del sulfato de calcio, puede calcinarse en un horno, produciendo un efluente gaseoso con una concentración de 10 a 15% de SO_2 , permitiendo operar una planta de ácido sulfúrico.

e. Lavado con álcali. El lavado con álcali utiliza sulfito de sodio, que retiene el SO_2 formando sulfito ácido. El sulfito se regenera por evaporación y cristalización, seguido de un calentamiento que descompone la sal, produciendo un efluente gaseoso con alta concentración de SO_2 .

f. Lavado con ácido cítrico. La ventaja de este lavado está en que permite una remoción del SO_2 de las corrientes que lo contienen en un amplio rango de concentraciones que va desde 0,05 a 5%, con una eficiencia de 80 a 90%. La absorción del SO_2 está controlada por una reacción que forma sulfito ácido. La adición de ácido sulfhídrico a la solución forma azufre elemental, sólido, que se concentra y separa de la solución por flotación con aire. El azufre elemental, combinado con un agente reductor como metano, monóxido de carbono, hidrógeno u otro, se emplea para la preparación del ácido sulfhídrico. El azufre elemental remanente tiene aplicaciones comerciales y, además, almacenamiento es relativamente fácil.

g. Desulfuración en chimeneas de fundición de cobre. Los métodos anteriores, practicables en chimeneas que conducen gases de combustión con contenidos de SO_2 del orden de 0,5%, no se utilizan en las chimeneas de fundiciones de cobre por el gran volumen de gas que involucran y por la gran cantidad de SO_2 que contienen. En las fundiciones, la tendencia mundial ha consistido en la operación de una planta de producción de ácido sulfúrico con los gases de chimenea. La limitación para la aplicación de este método es que, si bien la concentración es de una magnitud superior a la de los efluentes de combustión, la baja concentración de SO_2 contenido en el gas no hace viable la operación de la planta de ácido. La necesidad de operar una planta de ácido, que requiere una concentración de SO_2 del orden de 8-10% en el gas de

alimentación, ha impulsado importantes cambios en la tecnología de la pirometalurgia del cobre, limitando la dilución del SO_2 en el gas efluente.

h. Plantas de ácido sulfúrico. Una planta de ácido sulfúrico requiere, como materia prima, una corriente gaseosa seca y limpia de 8-10% de SO_2 en aire. En la planta de ácido, la corriente gaseosa entra en contacto con pentóxido de vanadio, óxido metálico que cataliza la combustión de SO_2 a SO_3 . Este impulso exotérmico proporciona la energía de activación necesaria para mantener la reacción. Si la concentración de SO_2 en el gas que ingresa a la planta es demasiado baja, la reacción no se produce por falta de calor suficiente para activarla. Cuando ésta tiene lugar, el calor generado se usa parcialmente para calentar el gas antes de entrar a la torre de contacto con el catalizador, en tanto que el calor sobrante se descarta hacia una corriente de agua de enfriamiento.

i. Fundiciones de cobre. Tal como se señaló, la emisión de gran cantidad de SO_2 producida por las fundiciones tiene lugar tanto durante la fusión como durante la oxidación del azufre. En las fundiciones de tecnología anterior a los años setenta, la fusión tiene lugar en un horno reverbero calentado con combustible, y la oxidación del azufre, en hornos convertidores Pierce-Smith. En ambos tipos de horno, pero especialmente en el reverbero, la concentración del SO_2 en el efluente rara vez sobrepasa el 4%, lo que hace casi imposible operar una planta de ácido.

El desarrollo tecnológico de los últimos 25 años ha procurado aprovechar el calor de combustión del azufre para la fusión del concentrado, juntando en un solo horno las operaciones que originalmente se realizaban separadamente en el reverbero y en el convertidor Peirce-Smith. Un subproducto inmediato de este logro ha sido la producción de gas con SO_2 menos diluido, lo que posibilita la operación de una planta de ácido. En el país se han impuesto dos tipos de horno: el convertidor modificado Teniente, desarrollado en Caletones, y el horno Flash (de fusión relámpago), de tecnología finlandesa Outokumpu.

Desmintiendo las predicciones que pronosticaban un mar de ácido que nos ahogaría, la propagación de esta nueva tecnología en las seis fundiciones de cobre del país (Chuquicamata, Potrerillos, Paipote, Chagres, Ventanas y Caletones), asociada a plantas de ácido para controlar la emisión de SO_2 , ha producido una corriente de ácido barato que ha comenzado a generar una industria que lo aprovecha, especialmente en el sector minero, pudiendo lixiviar (disolver) minerales cuya explotación antes no era rentable. Además, hay buenas perspectivas para la producción de SO_2 en concentraciones suficientemente altas como para permitir, no la fabricación de ácido, sino la licuación del SO_2 para su aplicación en las plantas de celulosa.

v) **Desulfuración en chimeneas de plantas de tostación.** La tostación consiste en la oxidación de sulfuros minerales en presencia de oxígeno, por calentamiento suave con gases de combustión para transformar el sulfuro en óxido metálico. En la misma operación, el azufre contenido se oxida a SO₂, que escapa en el efluente gaseoso, alcanzando una alta concentración en la corriente efluente, permitiendo la operación de una planta de ácido.

c) **Emisión industrial de olores**

El control de los olores emanados de operaciones industriales es una tarea difícil, en particular como consecuencia de que muchos de los olores desagradables emitidos por la industria son percibidos aun en bajísimas concentraciones.

Cuadro 16

CONCENTRACION UMBRAL DE ALGUNOS COMPUESTOS

COMPUESTO	CONCENTRACION UMBRAL (ppb)	DESCRIPCION
Trimetilmamina	2,1	color acre a pesc.
Acido sulfhídr.	0,47	la huevos podridos

Fuente: Leonardos, Kendall y Bernard.

Desafortunadamente, los métodos para el control de olores son relativamente poco eficaces y de un costo de operación importante. En términos generales, consisten en: reducir la concentración, de modo que el olor sea menos objetable, y ocultar el olor para hacerlo menos molesto.

i) **Ventilación.** El método más simple y más utilizado consiste en confinar el olor en un ambiente cerrado, extraerlo por medio de campanas y ductos, y expulsarlo a través de una chimenea alta que disperse el compuesto oloroso, de modo que cuando el penacho de la chimenea toque tierra en lugar poblado, la concentración esté por debajo del umbral de percepción.

ii) **Adsorción.** Se utiliza carbón activado para adsorber compuestos odoríferos en corrientes que se descargan a la atmósfera, las que ingresan a un recinto cerrado o se recirculan dentro de un recinto.

iii) **Absorción**. Se emplean limpiadores de gases o scrubbers, es decir, lavadores húmedos, cuando el compuesto odorífero es soluble o condensable en el líquido de lavado, o puede ligarse con partículas en el líquido.

iv) **Oxidación con llama**. Es probablemente el método más eficaz, aunque también el más costoso. Consiste en hacer pasar la corriente de gas a través de una cámara de combustión donde los compuestos odoríferos arden, es decir, se oxidan. La cámara debe alcanzar una temperatura de entre 600 y 820°C. El tamaño requerido de la cámara de combustión y el combustible necesario constituyen las mayores objeciones a este método.

v) **Oxidación catalítica**. La incineración catalítica puede hacer disminuir entre 280 y 450°C la temperatura necesaria, y en consecuencia el tamaño de la cámara y la cantidad de combustible.

vi) **Oxidación química**. Se logra con el uso de oxidantes fuertes como ozono, permanganatos, hipocloritos, cloro, y dióxido de cloro. El agente oxidante es específico para cada compuesto odorífero.

d) **Emissiones de monóxido de carbono**

El monóxido se forma como producto intermedio durante la combustión de productos carbonáceos. Cuando hay poco oxígeno, es decir, con mezclas ricas en combustible y aire, el monóxido aparece como producto final de la reacción de combustión. En las mezclas pobres, el monóxido es consecuencia de la existencia de zonas ricas en combustible, a causa de una mezcla deficiente entre combustible y aire, que aun en una mezcla promedio rica produce zonas pobres. También se origina en combustiones de alta temperatura --sobre 1 630°C--, donde la constante de equilibrio indica disociación del CO₂ cuando tras la zona de alta temperatura hay un enfriamiento rápido del gas que impide que la reacción proceda hacia la composición de equilibrio.

El control de la emisión de CO no se presta, como en el caso de otros contaminantes, a la eliminación en la corriente efluente. Es más práctico evitar su formación, lo cual no se logra de manera simple, porque, al hacerlo, por lo general aumenta la producción de óxidos de nitrógeno. La manera práctica de reducir la emisión de CO es utilizando quemadores eficientes y dándoles un mantenimiento adecuado.

En algunas industrias de proceso donde se genera CO, como en la producción de acero o en refinerías de petróleo, el monóxido se utiliza como combustible suplementario para la operación de hornos, o en calderas recuperadoras, para la generación de vapor.

e) Emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV)

La emisión de COV en procesos industriales está comúnmente asociada con el empleo de solventes, en especial en las operaciones de desengrasado, en la aplicación de pinturas y barnices y en la polimerización de plásticos por evaporación de solventes. En todos o algunos de estos casos es posible la condensación y recuperación del solvente en una torre de lavado o en un condensador por contacto. Sin embargo, estas situaciones son la excepción a la regla general, donde el control de la emisión se hace por incineración de los hidrocarburos.

Una dificultad suplementaria consiste en que la emisión de COV tiene lugar de manera fugitiva, es decir, no ocurre a través de chimeneas; por el contrario, salvo que el solvente tenga un carácter tóxico, la evaporación se produce en locales que se intenta mantener lo mejor ventilados posible, favoreciendo la rápida dispersión del solvente.

El control de la emisión exige que la evaporación del solvente tenga lugar en un ambiente estanco, y que los vapores sean captados por una campana. Si no son condensados y recuperados, los vapores deben ser quemados, es decir, oxidados a vapor de agua y CO₂.

La combustión, dependiendo de la concentración de los COV en la corriente efluente de la campana de captación, puede tener lugar en alguno de los dispositivos que se explican a continuación. En cualquiera de ellos, la economía de la operación se ve favorecida con la recuperación del calor de la corriente de gas efluente.

i) **Incineración con llama directa.** La incineración con llama directa sólo es posible cuando la concentración de COV es suficientemente alta como para que el poder calorífico de la mezcla sea capaz de mantener la combustión. Sin embargo, esta situación es peligrosa porque puede conducir a la inflamación de la mezcla en los ductos que lo conducen a la cámara de combustión. Se suele diluir la mezcla por debajo del límite de inflamación, agregándose combustible en la cámara de combustión. Alternativamente, se conduce la mezcla a una concentración por debajo de la inflamación, y luego se precalienta, lo que usualmente disminuye el límite de inflamabilidad y permite encenderla.

ii) **Incineración térmica.** Cuando el poder calorífico está entre 40 y 750 kJ/m³, la mezcla no permite sostener la combustión. En estos casos, ésta se precalienta y conduce a una cámara de combustión donde arde con combustible suplementario. La cámara de combustión debe tener un tamaño apropiado, es decir, permitir un tiempo de residencia de al menos 0,5 segundos, producir una

turbulencia suficiente para mezclar el oxígeno con el combustible, y alcanzar una temperatura de entre 500 y 750°C.

iii) Incineración catalítica. La incineración catalítica permite reducir el tiempo de residencia del gas, haciendo que la cámara de combustión sea una 40 veces más pequeña, reduciendo a la vez hasta en 280°C la temperatura de ignición.

La mayor parte de los gases efluentes que contienen COV están a temperatura ambiente. Por ello, se precalienta el gas hasta la temperatura en que puede actuar el catalizador --usualmente entre 220 y 540°C--, lo que no le permite arder. La combustión tiene lugar sobre el catalizador, sin llama visible, como en una estufa catalítica a gas. La incineración catalítica se usa especialmente para controlar la emisión de solventes en cámaras de pintura y barnizado. Una de las limitaciones de su uso es la vida útil del catalizador, que puede reducirse fuertemente por envenenamiento con algunos metales.

f) Emisión de óxidos de nitrógeno

La presencia de los siguientes factores incrementa la formación de los óxidos de nitrógeno NO y NO₂ durante la combustión:

- La temperatura máxima alcanzada por la llama, que determina tanto la constante de equilibrio como la cinética de la reacción del nitrógeno con el oxígeno.
- El tiempo durante el cual el gas permanece a la temperatura máxima, permitiendo que prosiga la reacción.
- El exceso de aire, que proporciona el oxígeno necesario para la reacción.

Aunque el aumento del exceso de aire disminuye la temperatura máxima de la combustión, la mayor disponibilidad de oxígeno para la oxidación del nitrógeno sobrepasa el efecto de la menor temperatura, y la formación de NO_x aumenta.

El control de la emisión de NO_x a través de la acción sobre el efluente gaseoso es particularmente difícil. Por ello, el control de la emisión no tiene lugar a través del uso de dispositivos especiales sino a través de un diseño de los dispositivos de combustión que limiten la formación de los NO_x.

Algunos de los criterios de diseño que han tenido mayor éxito son los siguientes:

i) Evitar el precalentamiento del aire de combustión. A pesar de que la práctica del precalentamiento del aire de combustión con el calor de las corrientes de descarte conduce a importantes ahorros de energía, la mayor temperatura de llama que produce tiene un efecto pernicioso sobre la generación de NOx.

ii) Efecto de la configuración de los quemadores. Deben evitarse los diseños de quemadores que producen una emisión de calor intensa y localizada. La existencia de superficies frías en la proximidad de los quemadores capaces de absorber en un corto espacio la energía emitida por los gases radiantes contribuye a disminuir la emisión de los NOx.

iii) Recirculación de los gases de combustión. La recirculación de gases de combustión enfriados es uno de los métodos que han mostrado mayor eficacia en la reducción de la emisión de NOx. No sólo reduce la temperatura de combustión por la adición de un gas frío, sino que limita la cantidad de oxígeno disponible. En calefactores domésticos, la recirculación de un 50% de los gases conduce a una reducción de casi un 60% de los NOx.

iv) Combustión en dos etapas. Consiste en la desagregación de la combustión en dos etapas. En la primera la cantidad de aire introducida corresponde a entre 85 y 95% de la estequiométrica, en lugar del 110 a 130% habitual. La consecuencia es una llama de menor temperatura, con combustión incompleta del carbono, pero con poco oxígeno para la formación de óxidos de nitrógeno. La adición aguas abajo de un suplemento de aire, permite completar la combustión del monóxido y de los hidrocarburos no quemados.

En resumen, las técnicas de modificación de combustión se reducen a dos principios:

- Limitar al máximo el tiempo de residencia del gas de combustión a la máxima temperatura: disminuyendo directamente la temperatura máxima; aumentando la velocidad de extracción de calor, y evitando las grandes velocidades de emisión de calor.
- Limitar la presencia de reactantes a través del uso no excesivo de aire.

B. COMENTARIOS
Juan Escudero (CEDRM)

Considero que el documento presentado por Alejandro Steiner contiene gran cantidad de información, constituyendo un interesante tratado sobre el tema, que prestará utilidad durante mucho tiempo.

Deseo hacer algunos comentarios acerca de ciertos puntos muy interesantes para el proceso de elaboración de políticas, junto con sacar algunas conclusiones evaluativas.

a) Al comienzo del documento hay un interesante comentario acerca de la calidad del aire, distinguiendo entre calidad objetiva y calidad subjetiva. La primera dice relación con la comparación entre la calidad física y química de la atmósfera y la norma de calidad del aire. En esa comparación, no cabe duda que nuestra atmósfera tiene una mala calidad por existir una serie de sustancias presentes en proporciones excesivas respecto a las normas. La calidad subjetiva se refiere a cómo la percibe la población, y en ese marco, nuestra calidad de aire es aún peor. La población, y en especial la de Santiago, tiene una imagen de calidad de aire mucho peor de lo que en realidad es, y ello se debe a la influencia de la contaminación visible. Todos los estudios de percepción, a pesar de ser limitados, son significativos por demostrar que la contaminación visible es la que causa una mayor sensación de contaminación entre la población, siendo al mismo tiempo la que ha galvanizado la opinión pública en cuanto a la necesidad urgente de resolver el problema. La contaminación visible no tiene una proporción directa con la objetiva o invisible, ya que en lo fundamental se compone de material particulado fino, y en forma secundaria de oxidantes fotoquímicos y de una pequeña cantidad de azufre, en circunstancias de que estos dos últimos componentes se encuentran en gran proporción en la contaminación invisible.

Esta situación me ha hecho recordar la discusión que se produjo alrededor de 1980-1981, a raíz de la cual el gobierno de entonces contrató un estudio con la Universidad de Chile sobre la posibilidad de realizar un esquema de impuestos a la emisión para el control de la contaminación atmosférica de Santiago. Eso estuvo muy cerca de hacerse realidad, aunque en definitiva los argumentos que condujeron a no adoptar el esquema propuesto se refirieron a que los impuestos serían capaces de solventar un control de casi todos los contaminantes, excepto el material particulado fino proveniente de calles y caminos de tierra. Por lo tanto, a pesar de que el problema objetivo fue solucionado en los aspectos básicos, no ocurrió lo mismo con el problema subjetivo, pronosticándose entonces que la medida sería inefectiva desde el punto de vista de los dividendos políticos. Esto constituye una lección que conviene no olvidar.

b) En relación con los comentarios referentes a las diferencias entre la Región Metropolitana y el resto del país, también hay en el documento de Alejandro Steiner una información valiosa de recuperar. Los casos de la Región Metropolitana y de otros pocos lugares del país, donde hay cierta cantidad de distintas fuentes de emisión que participan en conjunto en la generación de un problema grave, desde el punto de vista de las políticas es totalmente diferente al caso de fuentes aisladas que causan problemas en su área de influencia, por más serios que éstos puedan ser.

El caso de Chuquicamata no debería ser tratado de la misma manera que el de Santiago. Cuando hay cierta cantidad de fuentes interactuando, existe la posibilidad de elegir cuáles de ellas deberán reducir sus emisiones y cuáles podrían no reducirlas. En el caso de una sola fuente, lo único posible de hacer es reducir esas emisiones concretas, e incluso se puede determinar desde un punto de vista puramente técnico, objetivo, en cuánto es preciso reducir esas emisiones. En esta situación, las medidas son directas y no necesitan pasar por mecanismos de mercado.

c) Respecto a las fuentes predominantes en el caso de Santiago, creo que valdría la pena hacer algunos llamados de atención.

En relación con el material particulado, la importancia de calles y caminos con y sin pavimento. De acuerdo con las cifras entregadas en los cuadros del documento, la parte mayoritaria de material particulado que es remitido a la atmósfera en la Región Metropolitana proviene de lo que se ha llamado en términos genéricos «calles y caminos sin pavimentar», pero en verdad incluye cierta cantidad de otros tipos de fuentes, por lo general de propiedad pública, donde la actividad humana contribuye a la dispersión de polvo en la atmósfera. Entre ellas están las áreas verdes no sembradas; las zonas aledañas a los caminos, que por lo general contienen mucha tierra suelta; el barro arrastrado por las lluvias desde las montañas a las zonas urbanas durante el invierno, lo que por una parte se debe a la erosión provocada por las precipitaciones y por otra a una carencia de infraestructura. En este sentido, se hará necesaria una fuerte intervención del Estado, con inversiones directas, ya sea pavimentación, lavado de calles, construcción de ductos para desagüe, etc.

d) Frente a la diferencia que existe entre la composición de las emisiones y la composición de las concentraciones de contaminantes, de acuerdo con lo planteado por Alejandro Steiner, esto tiene que ver con la necesidad de establecer un inventario de emisiones, donde se analice cuántas fuentes hay, cuánto produce cada una, cuánto emite cada una, tras lo cual, se suman.

Ha habido una cierta cantidad de trabajo en el análisis de la concentración en el polvo recogido de la atmósfera a través de un análisis físico y químico de los filtros de las estaciones de

monitoreo. La composición que se encuentra tras esta actividad, muestra una concentración mucho mayor de material particulado proveniente de combustión, y principalmente de combustión de Diesel, que es básicamente carbono. Al respecto, deberemos ser capaces de transmitir estos resultados a la población, ya que ese material particulado es de menor tamaño y densidad, por lo que su tiempo de residencia en la atmósfera es mucho mayor, pudiendo permanecer en suspensión durante semanas, mientras que las partículas compuestas de arenillas son más pesadas y caen más rápidamente. Esa es la razón por la que en invierno, producto de las inversiones térmicas, este material puede permanecer en suspensión casi por tiempo indefinido.

e) Quisiera referirme también a la importancia de la leña. En los cuadros incluidos en el trabajo se observa que, dentro de la combustión, la leña contribuye con una proporción muy elevada. Si a esto se añade que en el próximo decenio la disponibilidad de madera en Chile más que se duplicará debido a la maduración de los bosques plantados en los decenios de 1960 y 1970, se espera que su consumo siga aumentando. Por lo tanto, el control de la combustión de leña constituye una de las tareas más importantes y efectivas para lograr que esas emisiones por lo menos no aumenten. Existen posibilidades reales para lograrlo gracias a las tecnologías modernas para quemar leña con emisiones muy bajas y rendimientos mucho más altos que los actuales.

f) En relación con la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV), ello tiene que ver con tecnologías desarrolladas; tal es el caso de los lavasecos, con maquinaria muy desarrollada. Aquí, el principal problema son los oxidantes fotoquímicos, y es más posible actuar sobre la emisión de otros organismos volátiles que sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno. En los países desarrollados se está trabajando activamente por el desarrollo de maquinaria que emita menos o por un cambio de los solventes por productos que no emitan o sean de recuperación más fácil. De este modo y sin proponérselo, la próxima maquinaria que importemos tendrá emisiones más bajas.

En este tipo de emisiones, la función del Estado en la búsqueda de soluciones va más bien por la vía de mantenerse actualizado e impulsar la rápida incorporación de ese cambio tecnológico. Considero que este tipo de problema pertenece a aquellos que se resuelven solos.

g) El problema realmente grave está relacionado con las emisiones propias del país, que no se repiten en los países desarrollados y por lo tanto no tienen referentes. Por ende, si no encontramos una solución a ellos nadie lo hará. Entre otros está la combustión de leña, el desastre existente con nuestra maquinaria Diesel, probablemente los problemas de arsénico de las refineries de cobre.

Por todo ello, debería haber un esfuerzo de investigación y desarrollo en el campo de la descontaminación hacia la solución de ese tipo concreto de problemas.

h) Otro de los aspectos es el referente a la contaminación por olores. La mayor protesta de la población por este tipo de contaminación se produjo en los grandes puertos pesqueros del norte hace ya unos ocho años. En virtud de ello, las empresas pesqueras debieron enfrentar el problema pues corrían el riesgo de ser expulsadas de la ciudad. De allí surgió el esfuerzo por desarrollar empresas pesqueras inodoras, demostrándose que esta industria era capaz de importar tecnología desarrollada y llegar a producir plantas completas hechas en Chile, que no sólo son inodoras sino también experimentan tales incrementos en sus rendimientos que serán capaces de pagarse solas.

i) Por último, desearía insistir sobre los equipos de control, que pueden ser un elemento positivo o negativo. Si bien resolverán problemas de descontaminación atmosférica --y la experiencia mundial en su uso es concluyente--, siempre producen residuos. En algunos casos, esos residuos son comercializables, y el ejemplo más cercano es el de MOLIMET, que se ha convertido en el primer productor mundial de renio gracias a la reducción de sus emisiones. Hay otros casos donde las sustancias recuperadas serán extremadamente peligrosas; esto sucederá sin duda en el caso del cobre, donde una parte importante de la recuperación será arsénico. Estos aspectos no se pueden obviar en los programas de descontaminación atmosférica.

C. DEBATE

JORGE MORAGA (SAG). Respecto al último punto tratado en el comentario por Juan Escudero, se refiere a una recomendación hecha por un profesor de la Universidad Santa María en relación con el tratamiento de los concentrados de minerales sulfurados antes de producir el proceso, consistente en sacar la concentración de azufre para evitar esas emisiones.

Sugiere que lo mismo se podría hacer en el caso del arsénico; esto es, realizar un pretratamiento del concentrado antes de iniciar el proceso, ya sea de concentración o de fusión. Considera que se trata de un sistema que en el futuro se utilizará, reconociendo no saber hasta qué punto en Chile podría ser factible en lo económico.

ALEJANDRO STEINER (CONSULTOR DE CEPAL). A propósito de ello, informa que existen otros procesos que permiten tratar minerales sulfurados sin pasar por la fundición. El problema consiste en que cuando el mineral pasa por la fundición y se oxida --a menos que el circuito funcione casi como circuito cerrado, que es lo que ocurre en el proceso de fundición relámpago (fundición flash)--, hay emisiones de SO_2 . Una de las formas de evitarlo, es la lixiviación bacteriana, donde se puede digerir el material sulfurado por intermedio de bacterias cuyo metabolismo vive de la transformación de la valencia del azufre, y cuyo resultado produce óxido de cobre, que por ser soluble puede tratarse con los métodos clásicos para cobre soluble.

Informa que estos métodos fueron muy promisorios hace 20 años, y continúan aplicándose a minerales marginales o a desechos que no se pueden explotar, pero hasta ahora nadie los ha utilizado de manera intensiva.

JAIME SOLARI (MINISTERIO DE MINERIA). Informa que se está contemplando la aplicación del estudio del profesor David Uhler de la Universidad Santa María, pero agrega que ello se haría sólo en pequeña escala pues Chuquibambilla no es una industria que permita experimentos en gran escala. Respecto al arsénico, dice que en Chuquibambilla se está estudiando la posibilidad de limitar su entrada a la fundición.

XIMENA MONTENEGRO (MIDEPLAN). Señala que el uso de oxígeno en los reverberos es una alternativa para enriquecer la combustión.

ALEJANDRO STEINER. A propósito de esa observación, comenta que ya hay por lo menos tres iniciativas para enriquecer la combustión en reverberos agregando oxígeno.

XIMENA MONTENEGRO. Pregunta a Steiner cómo aprecia él el mercado del ácido para su posible producción en el futuro, y cuáles son los efectos contaminantes de las plantas de ácidos.

ALEJANDRO STEINER. En cuanto al mercado, de acuerdo con el encargado de la Comisión de Acido Sulfúrico del Instituto de Ingenieros, la producción de ácido sulfúrico barato ha ido generando un mercado en plena expansión, aunque con un precio bajo del producto. En el futuro, este ácido tendrá seguramente otros usos, por lo que no habría que preocuparse por una posible sobreproducción.

JUAN ESCUDERO (CEDRM). Retomando el tema de la coyuntura internacional, sostiene que en la evaluación de los proyectos de ácidos, de arsénico, de tratamiento de aguas servidas, la coyuntura internacional no se puede obviar. En ese aspecto, señala que estamos abriendo caminos nuevos. Las exportaciones chilenas son vulnerables al parecer de los compradores, y es muy claro que nuestras exportaciones de cobre está compitiendo con la propia producción de los países importadores. Por ello, aparte de la eliminación de la contaminación, de los beneficios de salud, de los beneficios que pueda producir el mismo ácido, hay un seguro de vida en la industria del cobre.

HERNAN DURAN (CEPAL). En relación con lo anterior, da a conocer una experiencia a raíz de una consultoría con el Banco Mundial (BM), donde se hizo una primera evaluación de la cantidad de azufre que emiten las distintas fundiciones. En las conversaciones sostenidas con los representantes del BM, al preguntar la razón por la cual tenían tanto interés en el tema del control de la contaminación, le respondieron que la explicación de esta preocupación y de la exigencia para que la industria del cobre en Chile, como todas las demás industrias de América Latina, se someta a estas restricciones se debe a que existe una presión por parte de los productores de cobre de los Estados Unidos, quienes reclaman por el hecho de no estar igualadas las condiciones de mercado para todos los productores. Esta exigencia será cada vez mayor, por lo que deberá tomarse muy en serio esta situación, abordándola y solucionándola de la manera más clara posible.

JUAN ESCUDERO (CEDRM). Señala su interés por el tema de cómo considerar estos factores en la evaluación de proyectos, aunque se trata de un tema extraordinariamente difícil, sobre todo por las deficiencias en la teoría existente al respecto, por el hecho de ser general.

EDUARDO KLEIN (CONSULTOR GTZ). Manifiesta advertir una contradicción en la lógica de la política medioambiental relacionada con el problema del ácido sulfúrico. Se ha dicho que hay varias plantas en proceso de construcción, transformándose una sustancia que contamina el aire, advirtiéndose satisfacción por el hecho de que el producto se use en el mercado. Agrega que

le surge al respecto una interrogante: ¿Qué ocurre con el ácido sulfúrico que se utiliza en muchos otros procesos, acaso no contamina? Reconociendo que tal vez esta apreciación se deba a su ignorancia en la materia, se pregunta qué ocurrirá si Chile se convierte en gran productor y usuario de ácido sulfúrico con fines antes no pensados, agregando que tal vez no se ha pensado en el hecho de que se trata de un veneno.

ALEJANDRO STEINER (CONSULTOR CEPAL). Informa que no todos los estados finales de ese ácido son nocivos. La mayor parte de los sulfatos es estable y se pueden utilizar como relleno, como tiza, etc. El que se usa para lixiviar cobre termina en las corrientes de agua que desaguan las minas, porque sirven para reponer el ácido que se va consumiendo en la solución.

FERNANDO MENENDEZ (MEXICO). Desea rescatar algunos comentarios de lo discutido en relación con la experiencia mexicana. En primer lugar, se manifiesta de acuerdo con lo señalado por Juan Escudero relativo a la contaminación visible y su impacto en la población, que se convierte en un problema de tipo político.

En el caso de otros elementos, como el de los óxidos de nitrógeno, hasta el momento no ha sido resuelto el problema en ningún país; de hecho, en 65 localidades de los Estados Unidos se viola la norma del ozono. Señala que se ha logrado ciertas soluciones a través de la instalación de convertidores en los vehículos, los que separan el oxígeno y el nitrógeno, y también se han tomado medidas específicas en algunas industrias.

Respecto a lo mencionado por Escudero en cuanto a partículas, observa que en Chile hay una gran preocupación por el problema, tal como se puede observar en el documento sobre la descontaminación de Santiago en relación con las partículas de polvo; sin embargo, observa que por lo general éstas superan los 10 micrones, en circunstancias de que lo más importante para la población, lo más impactante, son las partículas de Diesel en forma de carbón activado y con dióxido de azufre, elemento altamente cancerígeno. El otro aspecto que considera preocupante es el caso de partículas con metales pesados, por lo que valdría la pena hacer un análisis de los filtros para determinar la cantidad de metales pesados contenidos en las partículas, pues son aun más dañinas que las de Diesel.

Sugiere que se fije una norma de emisiones para los motores Diesel, porque en el caso de los autobuses, si no se impone una norma estricta y no se exige el uso de motores de bajísima emisión, el problema no se resuelve; además, dado el desgaste que sufren estos motores, se debería exigir su reposición cada cuatro o cinco años.

En relación con los solventes, otro tipo de sustancias muy nocivas, señala que existe una sustitución de ellos por sustancias menos volátiles y reactivas.

Se manifiesta no estar muy de acuerdo en el sentido de que el cambio tecnológico por sí mismo resolverá el problema, porque existen diversas tecnologías en los distintos países. En este sentido, aconseja tomar los ejemplos más significativos de cada país en relación con los distintos contaminantes, entregando a continuación los siguientes. El Japón es el país más avanzado en la regulación del dióxido de azufre, y ello se advierte en que la norma de este elemento es un tercio inferior a la del los Estados Unidos, lo cual ha sido posible gracias a una tecnología muy desarrollada que les ha permitido alcanzar estos niveles mínimos. En cuanto a residuos tóxicos, informa que los alemanes y los suecos han avanzado mucho más en el sistema de incineración y disposición final de estos residuos.

Respecto a vehículos, recuerda que el área de California posee las normas más estrictas del mundo, por lo que sería conveniente estudiarlas.

Frente al problema del azufre, informa que en Nacozari, México, hay una fundición de cobre que durante muchos años constituyó un problema político con los Estados Unidos; en este momento, el azufre se está reciclando como ácido sulfúrico y convirtiendo en fertilizante. La planta costó, en 1975, 60 millones de dólares, por lo cual deduce que la planta fundidora chilena debe ser mucho más grande. En ello, la ventaja consiste en que se trata de una inversión y no de un gasto, gracias a su rápida recuperación.

Recuerda que existe una acelerada tendencia hacia la homogeneización de las reglas ambientales, tal como se produjo en salud hace 10 ó 15 años y en la actualidad se observa en el comercio. Advierte que si esta situación no se toma en cuenta desde ahora, las inversiones que se realicen tendrán serios problemas en un futuro muy cercano.

Bibliografía

1/ Corbin, Alain, El perfume o el miasma. El olfato y lo imaginario social. Siglos XVIII y XIX, Fondo de cultura económica, México, 1987.

2/ Intendencia Regional Metropolitana/Universidad de Chile/Intec, "Sistema de Derechos de Emisión", (Informe final provisorio), Santiago, 1990.

3/ Intendencia Regional Metropolitana/ CADE-IDEPE, "Fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos e inventario real de contaminantes para Santiago", Santiago, 1989.

4/ Intendencia Regional Metropolitana/ARA/SEBLA/CONSECOL, "Análisis epidemiológico de la contaminación atmosférica de Santiago", Santiago, 1989.

5/ Ministerio de Minería, informaciones recogidas personalmente por el autor.

6/ CORFO/IFOP, El sector pesquero chileno, Santiago, 1989.

7/ United States Environmental Protection Agency (EPA), Compilation of Air Pollutant emission Factor, AP-42, Estados Unidos, septiembre de 1985.

Anexo 1

BASES DE CALCULO DE LOS FACTORES DE EMISION

Los caudales y otras características del Proyecto Arauco II se han tomado como referencia para el cálculo de **factores de emisión** que conduzcan a una estimación de los efluentes gaseosos de todas las plantas.

i) Caldera de potencia:

Caudal = 166 Am³/s @ 200°C = 95,8 Nm³/s
 Humedad = 24% en volumen
 Eficiencia = 93.25% con un mínimo en la descarga no inferior a 270 mgr/Nm³

La especificación de la caldera del Proyecto Arauco indica una carga máxima del gas de escape de 3.9 gr/Nm³ de gas seco. Razonaremos utilizando una carga de 3 gr/Nm³.

$$FE = (0.003 * 95.8 * [1 - 0.24] * 3600 * 24 * [1 - 0.9325]) / 1111 = 1,5 \text{ kg/ton}$$

ii) Caldera de recuperación:

Caudal = 225,9 Am³/s @ 210°C = 127,7 Nm³/s
 Humedad relativa = 14,8%
 Eficiencia = 99.51% con un mínimo en la descarga no inferior a 100 mgr/Nm³

A partir del cuadro 10.1.2-1. del manual AP-42 de la EPA, 7/ el factor de emisión FE es:

$$FE = 75 + 25 = 98.5 \text{ kg/ton}$$

La eficiencia asignada por el AP-42 al precipitador electrostático (PES) es muy baja. En sustitución de ese valor, hemos empleado la eficiencia indicada por el fabricante del precipitador del Proyecto Arauco, que alcanza a 99.5%.

$$FE = 98.5 * (1 - 0.995) = 0.48 \text{ kg/ton}$$

iii) Horno de cal:

Caudal = 20,2 Am³/s @ 180°C = 12,2 Nm³/s
 Humedad relativa = 25%
 Eficiencia = 99,7% con un mínimo en la descarga de 0,2 g/DSm³

De acuerdo con las especificaciones del Proyecto Arauco, la carga al PES es de 92.8 kg/min. De los datos anteriores deducimos:

$$FE = (92,8*60*24*91-0,997)/1111 = 0,36 \text{ kg/ton}$$

Los factores de emisión anteriores fueron aplicados a todas las plantas con procesos Kraft con blanqueo químico. Para las otras plantas, se procedió como sigue:

- **Laja:**

Para la eficiencia del scrubber o limpiador de gases de Laja, se adoptó el mismo valor que el PES del Proyecto Arauco II.

- **Puente Alto:**

Se adoptó un factor de emisión que arrojará una emisión igual a la del Inventario de Emisiones de Santiago (IES), de 138 ton/año.