



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org



16521-S

Distr. LIMITADA

ID/WG.470/3
17 julio 1987

Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial

ESPAÑOL
Original: INGLÉS

Primera Consulta sobre la Industria
de los Metales no Ferrosos

Budapest (Hungria)
30 de noviembre al 4 de diciembre de 1987

LA CONTAMINACION EN LA INDUSTRIA DE LOS METALES NO FERROSOS:

PROBLEMAS Y SOLUCIONES*

Preparado por
la Secretaría de la ONUDI

- 13

* El presente documento es traducción de un texto que no ha pasado por los servicios de edición de la Secretaría de la ONUDI.

	<u>Indice</u>	<u>Página</u>
1.	INTRODUCCION	1
2.	ALUMINIO	2
2.1	Tecnologías para el control de la contaminación en las plantas de producción de aluminio	2
2.1.1	El control de la contaminación durante la producción de alúmina	2
2.1.2	Control de la contaminación durante la producción de aluminio	2
2.2	Readaptación de las plantas existentes para reducir la contaminación	4
2.3	Costos del control de la contaminación	7
2.4	Normas de emisión	9
2.5	Protección de la salud de los trabajadores	10
3.	NIQUEL	13
3.1	Tecnologías de control de la contaminación en plantas elaboradoras de mineral sulfúrico	13
3.2	Readaptación de plantas existentes para reducir la contaminación	15
3.3	Costos del control de la contaminación	15
3.4	Normas de emisión	18
3.5	Protección de la salud de los trabajadores	18
4.	COBRE	22
4.1	Técnicas de control de la contaminación en plantas de producción de cobre	22
4.1.1	Control de la contaminación en la extracción	22
4.1.2	Control de la contaminación durante el tratamiento del mineral	22
4.1.3	Control de la contaminación durante el tostado del concentrado de mineral	22
4.1.4	Control de la contaminación durante la producción de mata	23

Indice (cont.)

	<u>Página</u>
4.1.5 Control de la contaminación durante la conversión de las matas	23
4.1.6 Control de la contaminación durante el afino al fuego	23
4.1.7 Control de la contaminación durante la electrorrefinación	24
4.1.8 Control de la contaminación en los procesos hidrometalúrgicos	24
4.1.9 Eliminación del dióxido de azufre de las corrientes gaseosas	24
4.2 Readaptación de plantas existentes para reducir la contaminación	26
4.3 Costos del control de la contaminación	27
4.4 Normas de emisión	30
4.5 Protección de la salud de los trabajadores	33
5. PLOMO	35
5.1 Tecnologías para el control de la contaminación en las plantas de producción de plomo	35
5.1.1 Control de la contaminación durante la extracción	35
5.1.2 Control de la contaminación durante el tratamiento del mineral	35
5.1.3 Control de la contaminación durante la fundición del concentrado	36
5.1.4 Control de la contaminación durante el refinado del galápagos de plomo	38
5.2 Readaptación de plantas existentes para reducir la contaminación	38
5.3 Los costes del control de la contaminación	39
5.4 Normas para emisiones	41
5.5 Protección de la salud de los trabajadores	44
6. ZINC	47
6.1 Tecnologías para el control de la contaminación en las plantas de producción de zinc	47
6.1.1 Control de la contaminación durante la extracción	47
6.1.2 Control de la contaminación durante el tratamiento del mineral	47

Indice (cont.)

	<u>Página</u>
6.1.3 Control de la contaminación durante la fusión	48
6.1.4 Control de la contaminación durante la refinación del zinc	49
6.1.5 Control de la contaminación durante el proceso hidrometalúrgico	49
6.2 Readaptación de plantas existentes para reducir la contaminación	50
6.3 Costes del control de la contaminación	50
6.4 Normas para emisiones	52
6.5 Protección de la salud de los trabajadores	53
7. ESTAÑO	55
7.1 Tecnologías para el control de la contaminación en las plantas de producción de estaño	55
7.1.1 Control de la contaminación en la extracción	55
7.1.2 Control de la contaminación durante el tratamiento del mineral	55
7.1.3 Control de la contaminación durante la fusión de concentrados de estaño de alta ley	56
7.1.4 Control de la contaminación durante la fusión de concentrados de estaño de baja ley	56
7.1.5 Control de la contaminación durante la refinación del estaño en bruto	57
7.2 Readaptación de plantas existentes para reducir la contaminación	57
7.3 Costes del control de la contaminación	58
7.4 Normas para emisiones	58
7.5 Protección de la salud de los trabajadores	58
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
<u>Cuadros</u>	
2.1 Polvo eliminado mediante ciclones separadores	3
2.2 Diferentes técnicas de recogida de humos	5

Indice (cont.)

	<u>Página</u>
2.3 Tecnologías de control de la contaminación para plantas de producción de aluminio de diferentes capacidades (cubas de precocido de funcionamiento central solamente; 97% de eficiencia de la recogida)	6
2.4 Costos de cinco tipos de equipo de control para fundiciones de aluminio primarias	8
2.5 Valores de concentración máxima para la protección de la salud de los trabajadores	12
3.1 Concentraciones de níquel en suspensión en el aire en algunas operaciones hidrometalúrgicas	13
3.2 Características de las corrientes de gases requeridas para el óptimo tratamiento en las plantas de recuperación de azufre	16
3.3 Costo de la fijación del azufre por libra de níquel producida	17
3.4 Valores máximos de exposición de los trabajadores al níquel en suspensión en el aire	19
3.5 Concentraciones de níquel en suspensión en el aire en la extracción y fundición de lateritas: Nueva Caledonia	20
4.1 Características de las corrientes gaseosas para el tratamiento óptimo en plantas de recuperación de azufre	25
4.2 Costo de la fijación del azufre por libra de cobre producida	28
4.3 Eficiencia y costo de equipo de control para 1.000.000 m ³ /h de gases polvorientos a 20°C	29
4.4 Directrices del Banco Mundial sobre los niveles de emisión de gases de escape	31
4.5 Normas para efluentes líquidos	32
4.6 Umbrales de exposición de los trabajadores a sustancias tóxicas en suspensión en el aire	33
5.1 Concentración de contaminantes en las aguas residuales de las plantas de fundición de plomo	37
5.2 Costes del control para algunas plantas tipo en la industria de fundición primaria de plomo de los Estados Unidos	40

Indice (cont.)

	<u>Página</u>
5.3 Costes del control para algunas plantas de segunda fusión de plomo	40
5.4 Efectos que se derivarían del cumplimiento de la norma de la EPA sobre concentración de plomo en el aire ambiente	41
5.5 Límites provisionales para fundiciones de plomo	42
5.6 Umbrales de contaminación del aire para fundiciones de plomo, Reino Unido	43
5.7 Directrices sobre contaminantes admisibles del agua de una fundición de plomo de primera fusión	43
5.8 Directrices sobre contaminantes admisibles en el agua de una fundición de plomo de segunda fusión	44
5.9 Umbrales de exposición profesional a sustancias tóxicas en suspensión en el aire	45
5.10 Concentración de plomo en el aire en tres hornos de fundición de plomo de primera fusión	46
6.1 Costes del control de la contaminación de instalaciones primarias de producción de zinc de los Estados Unidos	51
6.2 Costes del control de la contaminación en empresas de producción secundaria de zinc en los Estados Unidos	51
6.3 Directrices sobre contaminantes del agua admisibles originados por un horno de fundición de zinc de primera fusión (mg/l)	52
6.4 Directrices sobre contaminantes de agua admisibles originados por un horno de fundición de zinc de primera fusión (kg/ton de zinc)	53
6.5 Límites de exposición profesional para zinc en suspensión en el aire, mg/m ³	54
6.6 Límite de exposición profesional para cadmio en suspensión en el aire, mg/m ³	54
7.1 Análisis comparativo de los hornos de reducción de estaño	59
7.2 Directrices sobre niveles de emisión en gases fétidos de hornos de fusión de estaño	60

Glosario

- ACGIH American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales). Esta organización agrupa personal profesional de organismos e instituciones de enseñanza gubernamentales, y su objetivo consiste en estudiar los aspectos administrativos y técnicos de la protección de la salud de los trabajadores y promover normas y técnicas de higiene industrial. Su Committee on Threshold Limit Values (Comité de valores máximos de concentración) somete a revisión constante las concentraciones permisibles de unas 400 a 500 sustancias.
- CWPB Central-worked pre-bake (Precocido de funcionamiento central). Se trata de células electrolíticas para la producción de aluminio en las que los ánodos de grafito se fabrican (cuelcen) en un sector especial de la planta. Además, la alimentación en aluminio de la célula se lleva a cabo rompiendo la corteza de criolita sólida en un espacio "central" situado entre dos líneas de ánodos.
- KWhr DC 1 Kilovatio x 1 hora de corriente continua.
- Nm³ Normal cubic meter (metro cúbico normal). El contenido gaseoso de un metro cúbico medido a temperatura y presión normales, es decir 0°C y 1 atmósfera.
- SWPB Side-worked pre-bake (precocido de funcionamiento lateral). Se trata de células electrolíticas para la producción de aluminio. En principio, son similares al CWPB (véase supra), pero las células SWPB tienen un sistema de alimentación en alúmina que consiste en romper la corteza sólida de criolita a lo largo de toda la circunferencia del complejo del ánodo.
- TSS Total suspended solids (total de sólidos en suspensión).
- TWA Time-weighted average (promedio de ponderación en el tiempo). Se trata del promedio de la concentración de sustancias contaminantes en el aire para determinado período de tiempo.

1. INTRODUCCION

Las industrias de metales no ferrosos que se examinan en el presente estudio -aluminio, níquel, cobre, plomo, zinc y estaño- desempeñan un papel importante en la economía de varios países, tanto industrializados como en desarrollo. Lamentablemente, también figuran entre los sectores industriales cuya actividad entraña la emisión o descarga de enormes cantidades de contaminantes en el medio ambiente. Cada etapa de la producción de un metal se puede asociar, hasta cierto punto, con un efecto perjudicial para el medio ambiente. Ese efecto puede ser aun mayor por la magnitud misma de la industria y por el tipo de contaminantes que genere. Para dar un ejemplo concreto, las chimeneas de una sola planta productora de níquel/cobre emiten a la atmósfera unas 2.500 toneladas diarias de dióxido de azufre.

Como en el caso del níquel, el cobre, el plomo y el zinc, la fundición de minerales de azufre suele entrañar dos posibles problemas para el medio ambiente: las emisiones de polvo y humos, y las de dióxido de azufre. El primer problema se puede agravar si el polvo contiene cantidades apreciables de metales pesados nocivos tales como plomo, cadmio y mercurio, o elementos tales como arsénico, antimonio y bismuto. En cuanto al segundo de los peligros mencionados, se ha comprobado que el dióxido de azufre (SO_2) es directamente responsable de la formación de la lluvia ácida, fenómeno que ya ha provocado daños importante en el medio ambiente. A las fundiciones modernas se les puede dotar de dispositivos que recogen el polvo y los humos y que convierten el dióxido de azufre en productos químicos utilizables, reduciendo considerablemente sus efectos negativos sobre el medio ambiente. Además, ya existen, o están siendo sometidas a pruebas, nuevas tecnologías de fundición que reducen la cantidad de contaminantes o producen contaminantes fáciles de eliminar o de convertir en productos químicos inofensivos. Pero las fundiciones más antiguas siguen siendo una fuente de contaminación potencialmente importante, en particular porque resulta difícil dotarlas de medios para reducir de manera significativa la contaminación.

Como en el caso del aluminio, el níquel y el estaño, la fundición de minerales oxidados provoca emisiones de polvo u otros problemas para el medio ambiente (tales como la emisión de fluoruros).

Es pues necesario que las industrias de los metales no ferrosos continúen intensificando sus esfuerzos para reducir al mínimo el impacto de sus actividades sobre el medio ambiente. En los últimos decenios, las innovaciones tecnológicas junto con algunos cambios importantes en la estructura de esta rama del mercado, y la aplicación de normas ambientales nuevas y más rigurosas produjeron importantes cambios en las estrategias de esta industria que han repercutido positivamente en el medio ambiente. Cabe esperar que esta tendencia se mantenga en el futuro.

El presente documento fue preparado por la Dependencia de Estudios Sectoriales de la División de Estudios e Investigaciones, a pedido de la División del Sistema de Consultas.

2. ALUMINIO

2.1 Tecnologías para el control de la contaminación en las plantas de producción de aluminio

2.1.1 El control de la contaminación durante la producción de alúmina

Puesto que los barros rojos (residuos alcalinos de bauxita) constituyen la mayor cantidad de efluente de una planta de alúmina, los métodos que se utilizan para su evacuación, acumulación o almacenamiento revisten especial importancia.

Los métodos de eliminación bajo tierra pueden presentar las siguientes desventajas 1/:

- 1) Infiltración de licores alcalinos en el suelo. Se puede producir la contaminación de las aguas freáticas.
- 2) Vertidos provocados por tuberías rajadas o por rotura de los diques de contención.
- 3) Contaminación por polvo en las regiones áridas.
- 4) Reducción de la superficie de tierra utilizable.
- 5) Deterioro estético.

Por consiguiente, los métodos más eficaces para el control (o la contención) de la contaminación consisten en el emplazamiento adecuado de la planta y de la zona de evacuación de residuos, la construcción y vigilancia cuidadosas de esta zona, y la utilización de revestimientos adecuados para impedir las filtraciones. Los residuos líquidos que se descargan en el mar reaccionan rápidamente con el magnesio del agua. Esa reacción química produce un precipitado de partículas muy pequeñas que pueden ser nocivas para la flora y la fauna marinas. Por lo tanto, ese método de evacuación sólo se debe usar como último recurso. Se debe evitar sobre todo la evacuación en aguas poco profundas. Si la escasez de tierra obligase a evacuar los residuos en el mar, habría que llevar a cabo un cuidadoso estudio de las consecuencias para el medio ambiente, y luego mantener una vigilancia muy estricta de la situación. Ese método de evacuación es más caro que la eliminación en tierra.

2.1.2 Control de la contaminación durante la producción de aluminio

Durante el proceso Hall-Héroult, se producen corrientes de residuos gaseosos procedentes de las cámaras y conductos de las cubas electrolíticas, las plantas de cocido de ánodos y de electrodos "en verde", y las naves de colada. En muchas plantas existen dispositivos que recogen y eliminan eficazmente los diferentes contaminantes. Por consiguiente, es muy poco lo que se emite a la atmósfera. A continuación se examinan las diferentes fuentes de emisión.

1/ "Guidelines for the Environmental Management of Alumina Production", PNUMA, Industry and Environment Guidelines Series.

Control de la contaminación por humos producidos en las células electrolíticas

En primer lugar, debe existir un sistema eficaz de recogida de los humos producidos en las células. En las células de ánodo precocido, esto se realiza mediante campanas provistas de varias pantallas. Para reemplazar un ánodo sólo hay que retirar dos o tres de esas pantallas. Por consiguiente, durante la operación no se produce una merma significativa de la capacidad de recogida. Según las estimaciones sólo el 20% del total de fluoruro generado en las células no es recogido por las campanas durante el cambio de ánodo ^{2/}. Con respecto a las cubas Söderberg, se ha hecho la prueba de instalar paneles sobre el faldón para recoger los humos que pudieran desprenderse (pero no se han obtenido resultados totalmente satisfactorios) ^{3/}. En todo caso, una buena recogida de humos es fundamental para evitar que los trabajadores estén expuestos a contaminantes tóxicos. Después de la recogida, las partículas más densas del humo se eliminan mediante ciclones separadores. En el cuadro 2.1 figuran las tasas típicas de eliminación.

Cuadro 2.1

Polvo eliminado mediante ciclones separadores

Emplazamiento de la planta	Polvo recogido kg polvo/ton Al	Pérdida de presión (mm hidrómetro)	Contenido de polvo	
			Al ₂ O ₃ (%)	F (%)
EE.UU.	38,5	76	60	10
Rep. Fed. de Alemania	32,0	100	64-74	15-20
Nueva Zelanda	47,0	160	70	9,2
Francia	12,37	40	60-80	10-19

Fuente: "Environmental Aspects of Aluminium Smelting", PNUMA, Industry and Environment Technical Review Series, Vol. 3, 1981, pág. 51.

Los humos pasan luego por dispositivos de lavado en húmedo o en seco. Ambos métodos son muy eficaces para la eliminación del fluoruro. Algunas cajas de lavado en húmedo no son muy eficaces para eliminar las partículas submicrónicas. Los sistemas en húmedo consisten en hacer pasar los humos por dispositivos donde se lavan con sosa cáustica, cal o agua blanda. Con este proceso, los fluoruros se eliminan en forma de criolita o CaF₂. Además,

^{2/} "Environmental Aspects of Aluminium Smelting", PNUMA, Industry and Environment Technical Review Series, Vol. 3, 1981.

^{3/} Aluminium Pechiney, Ph. Le Cardinal, Hooding of Söderberg Pots in Saint-Jean-de-Maurienne Plant, AIMA, 1976.

también se elimina una parte del SO_2 , con el consiguiente descenso de la contaminación del aire. Por otra parte, hay que someter a tratamiento a la solución de lavado antes de su descarga en el medio ambiente. En el procedimiento en seco, el humo recogido de las cubas de precocido entra en contacto en un reactor a 100°C de temperatura con la alúmina que se va a verter en las cubas. El reactor es un lecho o conducto fluidificado donde la alúmina se inyecta junto con el gas. Pese a que el contacto apenas dura un segundo, se consigue eliminar el HF (en una concentración de 100 a 200 mg F/Nm^3), obteniéndose un 99% de eficacia de eliminación. Luego, las partículas de alúmina que arrastra el gas limpiado se eliminan mediante un filtro de tela. La alúmina recuperada vuelve a verterse en las cubas.

Control de la contaminación en las cubas de ánodo en "verde"

Se debe cerrar herméticamente todo el equipo (fundidor de brea, mezclador de pasta, molino, criba, máquina de conformación de ánodo) y el humo de alquitrán se debe tratar antes de salir a la atmósfera. Se pueden utilizar métodos en húmedo o en seco.

Control de la contaminación en el horno de cocido de ánodo

Los contaminantes generados son SO_2 , óxidos de nitrógeno (como productos de la combustión), humos de alquitrán, polvo de carbón y fluoruros (de los topes de ánodo). Las partículas sólidas se pueden recoger mediante un precipitador electrostático, mediante lavado en húmedo o mediante el contacto con la alúmina en seco. Los óxidos de nitrógeno y el resto del SO_2 se suelen escapar a la atmósfera.

Control de la contaminación en la nave de colada

Se suelen producir pequeñas cantidades de humos fundentes que contienen fluoruros y polvo. Esos humos pueden ser nocivos para los trabajadores y hay que procurar que su concentración en el aire sea siempre baja. Si se utiliza gas de cloro para desgasear el metal líquido, se debe lavar el humo con soluciones alcalinas.

Control de la contaminación de efluentes líquidos

El agua utilizada en el lavado en húmedo es la más contaminada. Contiene fluoruros, sulfatos y, en el caso de las cubas Söderberg, hidrocarburos. Es necesario tratarla. Los fluoruros se suelen recuperar en forma de criolita.

Control de la contaminación de los residuos sólidos

Se debe prever el almacenamiento y la evacuación de los topes de ánodo y de los revestimientos de célula gastados. Durante el almacenamiento al aire libre, el agua que cae puede arrastrar algo de fluoruros y cianuro y contaminar el suelo. Por tanto, antes de su evacuación definitiva, el material usado se debe transformar en residuos no peligrosos.

2.2 Readaptación de las plantas existentes para reducir la contaminación

Como consecuencia de los adelantos tecnológicos en la producción de aluminio y el control del medio ambiente, durante los últimos 30 años se han realizado progresos importantes en la reducción de la cantidad de fluoruros producidos por las fundiciones. Por ejemplo, en 1950 una fundición típica

emitía de 12 a 25 kg de fluoruros por tonelada de aluminio producida. En 1985 esa cantidad se había reducido, oscilando entre 0,5 y 1 kg. El primer paso para la readaptación consiste en colocar campanas en las cubas para recoger bien los humos. En el cuadro 2.2 se exponen los resultados obtenidos mediante la utilización de diversas técnicas de recogida ^{4/}.

Cuadro 2.2

Diferentes técnicas de recogida de humos

Cuba electrolítica	Amperage KA	Técnica de recogida	Tasas de caudal de evacuación		Eficiencia de recogida (%)
			Nm ³ /s/pot	Nm ³ /t Al 10 ⁵	
CWPB	150	Campana con pantallas múltiples	1,1	0,9	95-99
CWPB	180	Campana con pantallas múltiples	2,0	1,3	97-99
SWPB	130-140	Campana con paneles en los lados	0,9-1,2	0,8-1,0	80-90
SWPB	90	Campana local	0,1	0,13	65-75
TSS	100-200	Faldones con uno o dos quemadores	0,13	0,15	65-85

Fuente: "Environmental Aspects of Aluminium Smelting", PNUMA, Industry and Environment Technical Review Series, Vol. 3, 1981, pág. 25.

Luego habría que utilizar ciclones para eliminar el polvo grueso y reciclarlo hacia las cubas. También se podrían instalar cajas de lavado a continuación de los ciclones. Eso permitiría reducir el contenido de partículas de fluoruros y de HF en un 50% aproximadamente (el ciclón solamente) y en un 95% (el ciclón más caja de lavado) respectivamente. Las plantas nuevas, más grandes (con capacidad de producción de 200.000 toneladas de aluminio por año), deberían ir equipadas con un sistema de lavado en seco y chimenea. En el cuadro 2.3 se resumen los datos pertinentes. Cabe señalar que, por lo general, las empresas no consideran conveniente readaptar las

^{4/} "Environmental Aspects of Aluminium Smelting", PNUMA, Industry and Environment Technical Review Series, Vol. 3, 1981.

Cuadro 2.3

Tecnologías de control de la contaminación para plantas de producción de aluminio de diferentes capacidades (cubas de precocido de funcionamiento central solamente; 97% de eficiencia de la recogida)

Etapa No.	Capacidad anual	Evolución kg/t al					Técnica de limpieza	Emisión kg/t al					Emisión Ft por año
		Total Ft	Aire Vent. Ft	Humo recogido				Total Ft	Aire Vent. Ft	Humo de chimenea			
				Fg	Fp	Ft				Fg	Fp	Ft	
1	50 000	18	0,54	8,73	8,73	17,46	Ciclón + chimenea	14,51	0,54	8,73	5,24	13,97	725
2	50 000	18	0,54	8,73	8,73	17,46	Ciclón + procedimiento en húmedo Caja de lavado + chimenea	3,60	0,54	0,44	2,62	3,06	180
3	200 000	>20	0,6	10,67	8,73	>19,4	Procedimiento en seco + chimenea	0,95	0,6	-	-	0,35	190

Fuente: "Environmental Aspects of Aluminium Smelting", PNUMA, Industry and Environment Technical Review Series, Vol. 3, 1981, pág. 50.

viejas fundiciones instalando el equipo necesario para el control de la contaminación. Por consiguiente, algunas empresas y gobiernos han decidido poner en marcha un programa de modernización y sustitución de plantas 5/.

2.3 Costos del control de la contaminación

Según el trabajo mencionado en la referencia 50, el costo de construcción de una zona de acumulación de residuos oscila (en Hungría) entre 0,3 y 0,4 dólares de los EE.UU. por m³ de capacidad de almacenamiento, siempre y cuando para construir los diques se utilicen los sedimentos de ceniza volante. Si se construyen diques de tierra, el costo es más elevado: de 0,7 a 0,8 dólares por m³. Los gastos de explotación varían entre 0,1 y 0,15 dólares por tonelada de alúmina, según la distancia que exista entre la planta y la zona de acumulación de residuos 6/.

Según un informe preparado por el International Primary Aluminium Institute (IPAI) 7/ y otros estudios, los costos del control de la contaminación en las plantas nuevas son muy inferiores a los costos de readaptación de plantas existentes.

Los datos que figuran en el cuadro 2.4 presentan, desglosados, los costos de explotación, los costos de inversión y los montos recuperados (cuando corresponde) para diferentes tipos de sistemas de control de la contaminación 8/. Esos datos se han calculado sobre la base de una planta con una capacidad de producción de 50.000 toneladas de aluminio por año. Para dar una idea aproximada de los costos de readaptación, la instalación de una caja de lavado en húmedo secundaria en una planta existente costaría al menos el doble si previamente se hubiese instalado una caja de lavado primaria. La inversión media de capital para la instalación de un sistema de control de flúor supone un incremento del 7% en el costo de inversión inicial (sobre la base de un costo de 2.000 dólares de los EE.UU. por tonelada de capacidad de producción instalada). El incremento de los costos de explotación oscilaría entre 0,8 y 6,6%.

En 1977, la OCDE llevó a cabo otro estudio sobre costos del control de la contaminación en diversas plantas de producción de aluminio de los Estados Unidos, el Canadá, el Japón y Noruega 9/. En el informe se llega a la conclusión de que el costo de construcción de nuevas plantas era de 2.300 dólares de los EE.UU. mientras que los costos de explotación oscilaban entre 780 dólares y 1.040 dólares por tonelada de aluminio. A base de esas cifras, se infirió que el costo adicional máximo para el control de la contaminación ascendía al 6,3% del total de los costos de producción, mientras

5/ "The Aluminium Industry and the Environment", PNUMA, Industry and Development, julio, agosto y septiembre de 1979, Vol. 2, No. 3.

6/ Anon, "Information on the Environmental Aspects of Alumina Production in Hungary", Document ALU 80/495C, Budapest, 1980.

7/ Informe del International Primary Aluminum Institute.

8/ Atkins, M.H. y J.F. Lowe. The Economics of Pollution Control in the Non-Ferrous Metals Industry, Pergamon Press, 1979, pág. 36.

9/ "Pollution Control Costs in the Primary Aluminium Industry", OCDE, París, 1977, pág. 36.

que los costos de explotación correspondientes oscilaban entre el 2,2 y el 7,2% del costo de inversión inicial. En el caso de las plantas existentes, el informe estimaba que el control de la contaminación suponía un costo suplementario de 17,5 dólares por tonelada de capacidad de producción de aluminio instalada. Según las estimaciones, los costos de explotación correspondientes eran de 22,4 dólares por tonelada de aluminio, con una considerable desviación normal de 18,7 dólares.

Rush, Russell e Ireson ^{10/} han utilizado sistemas comparativamente nuevos, tales como el método en seco de inyección de alúmina, que permiten aumentar considerablemente la eficiencia de eliminación con costos relativamente bajos. Otros sistemas de control de la contaminación no sólo resultan menos eficaces, sino que también son más caros.

Cuadro 2.4

Costos de cinco tipos de equipo de control para fundiciones de aluminio primarias

Tipo de control	Costo de inversión*	Costo de inversión anual+	Costo de explotación+	Monto recuperado+	Costo Total anual+
Chimenea alta	50	8,85	3,04	1,72	10,17
Procedimiento en húmedo secundario solamente	110	19,40	7,97	-	27,37
Procedimiento en húmedo primario	108	19,20	14,30	8,50	25,00
Procedimiento en seco primario	75	13,30	11,20	10,50	14,00
Procedimiento en húmedo primario + secundario	174	30,80	17,20	11,80	36,20

* Dólares por tonelada métrica de capacidad de producción anual.

+ Dólares por tonelada métrica de aluminio producido.

Fuente: Informe del IPAI, op.cit.

^{10/} Rush, Russell y Ireson, "Air Pollution on Primary Aluminium Potlines: Effectiveness and Cost", Journal of the Air Pollution Control Association, febrero de 1973, Vol. 23, No. 2.

2.4 Normas de emisión

Los principales contaminantes de una planta de producción de aluminio son el flúor y el SO₂. En la mayoría de los países industrializados se han establecido normas de emisión para esas sustancias. En 1976, el Organismo de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos dio a conocer las normas de explotación para las nuevas plantas de electrólisis, que limitan la emisión de flúor a 0,95 kg por tonelada de aluminio producida. El límite establecido para los hornos de precocido es de 0,05 kg, con lo que el total asciende a 1 kg de F por tonelada de Al. En varios países se respetan esos umbrales.

Además, existen normas sobre concentraciones de emisión. Por ejemplo, el Estado de Washington (EE.UU.) ha establecido que las emisiones de F no deben superar los siguientes valores 11/:

3,68 microg/m³ en 12 horas

2,86 microg/m³ en 24 horas

1,54 microg/m³ en 1 semana

0,82 microg/m³ en 1 mes

0,50 microg/m³ entre el 1 de marzo y el 31 de octubre

También se aplican normas similares en la República Federal de Alemania y el Japón. Por lo general, las emisiones de flúor no producen daño alguno a la población: no se han observado casos de fluorosis (una enfermedad ósea causada por la ingestión de flúor) en las cercanías de las fábricas de aluminio modernas.

Con respecto al SO₂, las normas de los Estados Unidos establecen que una planta industrial no debe producir un incremento de la concentración en el aire en las cercanías de la fábrica superior a 40 microg/m³ (promedio anual) o los 182 microg/m³ (promedio de las 24 horas).

También se han establecido normas para los efluentes líquidos. En los Estados Unidos, los umbrales de descarga de las fundiciones de aluminio primarias son los siguientes 12/:

Fundiciones de aluminio primarias

	<u>Máximo en 24 horas</u>
Fluoruros (total)	0,05 kg/ton de aluminio
TSS	0,10 " "
pH	6 a 9 unidades "

11/ "Environmental Aspects of Aluminium Smelting", PNUMA, Industry and Environment Technical Review Series, Vol. 3, 1981.

12/ Environmental Guidelines, Oficina de Asuntos Ambientales, Banco Mundial, julio de 1984, pág. 239.

Fundiciones de aluminio secundarias

	<u>Máximo en 24 horas</u>
Fluoruros (total)	0,4 kg/ton de aluminio
TSS	1,5 " "
NH ₃ (en forma de N)	0,01 " "
Al	1,0 " "
Cu	0,003 " "
pH	6 a 9 unidades "

2.5 Protección de la salud de los trabajadores

La extracción de bauxita y, posteriormente, la producción de alúmina, pueden plantear problemas para el ambiente de trabajo como consecuencia de:

- La utilización de equipo y maquinaria pesados,
- La manipulación de sustancias químicas corrosivas tales como la sosa cáustica y el ácido cáustico, y
- La exposición al calor, el ruido, los humos, los polvos, los gases del soldeo y determinadas sustancias químicas tóxicas 13/.

Por consiguiente, se deben aplicar sistemas de protección y reglamentos de seguridad adecuados. La mayoría de estos posibles problemas, así como de los procedimientos correctivos que requieren, no son privativos de las plantas de producción de alúmina. En cuanto a las fundiciones de aluminio, la exposición de los trabajadores a contaminantes nocivos varía considerablemente según las distintas operaciones que el trabajador realiza durante su turno. En la mayoría de los países industrializados, las normas de protección de la salud establecen que durante un período laboral de ocho horas la concentración de sustancias contaminantes no debe sobrepasar determinados promedios. En el cuadro 2.5 figuran valores típicos para los contaminantes más corrientes en las fundiciones.

Sin embargo, el trabajador puede estar expuesto a concentraciones mayores de contaminantes durante ciertas operaciones que sólo duran unos pocos minutos: por ejemplo, al cambiar los ánclos en las cubas de precocido o al retirar las espigas de las cubas Söderberg. Las concentraciones más elevadas pueden alcanzar los siguientes valores 14/:

13/ "Guidelines for the Environmental Management of Alumina Production", PNUMA, Industry and Environment Guidelines Series.

14/ "Environmental Aspects of Aluminium Smelting", PNUMA, Industry and Environment Technical Review Series, Vol. 3, 1981, pág. 29.

HF	= 20 mg/me ³
Fluoruro (F)	= 25 mg/me ³
CO	= 200 mg/me ³
SO ₂	= 100 mg/me ³

Por consiguiente, la zona de trabajo siempre está ventilada, incluso en las plantas más antiguas. En las plantas nuevas existe, por lo general, un sistema de distribución de la ventilación desde abajo, de manera que el trabajador está situado en una corriente ascendente de aire limpio. Para limitar la concentración de sustancias contaminantes en las zonas de trabajo se pueden introducir las siguientes mejoras:

- a) Reducir el contenido de azufre del coque de ánodo, con la correspondiente reducción de la cantidad de SO₂ generada;
- b) Aumentar la eficiencia de recogida de las campanas;
- c) Reducir la eficiencia de adsorción de SO₂ del procedimiento de la alúmina en seco 15/. Esta es la medida más efectiva porque permite eliminar por la chimenea la mayor parte del SO₂;
- d) Recoger los humos de los faldones de las cubas Söderberg instalando paneles sobre éstas para formar una especie de campana 16/.

El ruido puede producir otros efectos nocivos. En una fundición hay muchos momentos en que se rebasa el límite de 90 decibelios establecido por la organización NIOSH (EE.UU.) (por ejemplo, la trituración del coque o de la brea, la formación de ánodos precocidos, la ruptura de la corteza, el traspaso del metal mediante sifón de vacío). Este factor perjudicial se puede reducir de diferentes maneras, por ejemplo, revistiendo el equipo con materiales porosos que amortigüen el ruido 17/ 18/.

15/ Alcan, W.D. Lamb, The Role and Fate of SO₂ in the Aluminium Reduction Cell Dry Scrubbing Systems, AIME 1979.

16/ PNUMA/ONU/IDI, "Record of the Workshop on the Environmental Aspects of Alumina Production", París, (UNEP/WS.A1.7 Final), 1981.

17/ Intalco Aluminium Corporation, K.G. Sandell, Noise Control in an Aluminum Reduction Plant, AIME 1974.

18/ Swiss Aluminium, W. Schmidt-Hatting, Investigations of Noise in Aluminium Electrolysis Cells, AIME 1975.

Cuadro 2.5

Valores de concentración máxima para la protección
de la salud de los trabajadores

A. Fluoruro (EE.UU., NIOSH)

HF en forma de F	2 mg/m ³
Fluoruros en partículas en forma de F	2,5 µg/m ³
HF total en forma de F y fluoruros en partículas en forma de F	2,5 mg/m ³
F ⁻ en orina*	4 mg/l antes del turno al cabo de 48 hs. de no exposición 7 mg/l después del turno a partir del cuarto día de la semana laborable

* Estos valores de concentración máxima no son oficiales pero se aplican en todas las fundiciones. Tanto los valores de 4 mg/l como de 7 mg/l son aplicables a los grupos de trabajo (por ejemplo en la operación de cambio de ánodos); el número representa la media geométrica para cada uno de los grupos de trabajo.

B. Otras sustancias contaminantes (EE.UU.)

SO ₂	5 mg/m ³
Total de partículas en suspensión	10 mg/m ³ (respirables 5 mg/m ³)

C. Sustancias volátiles de brea de alquitrán (EE.UU.)

Sustancias orgánicas solubles en benceno	0,2 mg/m ³
---	-----------------------

Este valor de concentración máxima aún se sigue aplicando pero la investigación ha mostrado que los hidrocarburos aromáticos en partículas, sustancias muy peligrosas, se encuentran en concentraciones variables. Se están realizando investigaciones para elaborar un método cromatográfico sencillo que permita medir las concentraciones de diversos tipos de hidrocarburos aromáticos en partículas.

Se tiende a reemplazar el benceno por el ciclohexano, que es un disolvente menos tóxico.

D. Hidrocarburos aromáticos policíclicos HAP (cromatografía en capa fina)

Noruega - Total de HAP	40 microg/m ³
Suecia - Benzo-3, 4-Pireno solamente	5 microg/m ³

Fuente: "Guidelines for Environmental Management of Aluminum Smelters", PNUMA, Industry and Environment Guidelines Series, 1986, pág. 37.

3. NIQUEL

3.1 Tecnologías de control de la contaminación en plantas elaboradoras de mineral sulfúrico

En las minas se utiliza agua para humedecer el mineral. Ese método, junto con la ventilación a presión, reduce aproximadamente a 1 mg/m^3 la concentración de polvo en suspensión en el aire. El agua residual se debe tratar en instalaciones centrales antes de ser descargada de las minas y de los depósitos de colas. Por lo general, la corriente se neutraliza en pH 9 para precipitar los metales pesados. Luego se somete a un proceso de floculación y clarificación que permite obtener agua de buena calidad, apta para la descarga.

Cuadro 3.1

Concentraciones de níquel en suspensión en el aire en algunas operaciones hidrometalúrgicas

Operación	Número de muestras	Variación de las concentraciones (mg Ni/m ³)	Concentración media (mg Ni/m ³)
Lixiviación ácida de mata	-	0,005-1,630	0,099
Purificación del electrólito de níquel:			
Operador de filtro de tubería	12	0,013-0,316 0,011-0,316 <u>a/</u>	0,144 0,129
Operador de prensa de filtro	16	0,061-0,535 0,031-0,246 <u>a/</u>	0,209 0,152
Zona de prensado de filtro	11	0,064-0,508 0,052-0,466 <u>a/</u>	0,242 0,221
Purificación del electrólito de níquel (muestras por áreas)			
Cementación de cobre sobre níquel en tanques Pachuca	39	0,048-0,644 0,001-0,133 <u>a/</u>	0,168 0,038
Eliminación de lodos de hierro mediante filtro tubular	56	0,027-0,653 0,003-0,433 <u>a/</u>	0,200 0,085
Oxidación de cobalto con cloro	47	0,030-0,672 0,001-0,267 <u>a/</u>	0,183 0,066

a/ Níquel soluble

Fuente: Warner, J.S., "Occupational Exposure to Airborne Nickel in Producing and Using Nickel Products", en "Nickel in the Human Environment", Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer, Oxford University Press, 1984.

Además, el agua se recicla (hasta el 35% en algunas instalaciones). Se ha comprobado que si se mejoran los resultados durante la etapa de concentración del mineral se obtienen beneficios tanto para la industria del níquel como para el medio ambiente. Por ejemplo, en la planta Inco, en Sudbury, la corriente de concentrado solía contener 4% de níquel y 60% de pirrotina ferrosa de níquel. Eso significaba que, por cada tonelada de níquel producida, se procesaban 26 toneladas de concentrado, y se quemaban 17 toneladas de sulfuro de hierro produciendo 13 toneladas de SO₂ y 26 toneladas de escoria. En la actualidad, por cada tonelada de níquel producida las cifras correspondientes son 10, 6, 4,3 y 10 toneladas respectivamente.

El problema de la evacuación de las colas se ha resuelto en parte rellenando posteriormente las minas con los materiales más gruesos. En algunos sitios, alrededor del 20% de las colas se evacúan de esa manera. Pero subsiste el problema de las colas más finas, que tienden a convertirse en polvo. Un método que se ha utilizado para controlar la situación consiste en regar la zona de evacuación y volver a cubrirla de vegetación. En la planta de Sudbury se ha empleado ese método desde mediados del decenio de 1950 en los depósitos de colas 19/ 20/. En la zona explotada por INCO, en Copper Cliff, se han obtenido buenos resultados con varias especies de césped (p.ej., fleo de los prados), legumbres (alfalfa) y árboles (abedul, sauce) 21/. No es necesario destacar las ventajas que esto supone para el medio ambiente. Además, la vegetación puede reducir la infiltración del suelo por acción de las lluvias y reducir la humedad subterránea por ranspiración. Esto, por su parte, reduce las posibilidades de infiltración de las colas en el suelo.

La correcta acumulación, seguida de la oxidación en ácido sulfúrico por acción de las bacterias y la luz solar, han permitido obtener buenos resultados en la eliminación de otros contaminantes, tales como los tiosulfatos y politionatos que se forman en el agua utilizada para el tratamiento del mineral. El ácido se puede neutralizar luego con cal.

Los polvos finos se producen en muchas etapas de las operaciones pirometalúrgicas y de refinado (p.ej. en los tostadores, los hornos de reverbero, los hornos eléctricos, los convertidores). Esos polvos pueden contener entre 5 y 10% de níquel y 10 y 20% de sulfato. El problema se suele resolver aumentando la capacidad de recogida de las campanas y eliminando posteriormente el polvo mediante diversos dispositivos (tales como los precipitadores electrostáticos o los sistemas de lavado) que se describen en otras secciones del presente estudio.

El problema de la generación de SO₂ es, probablemente, el más grave. Hay dos enfoques posibles basados en la recogida del SO₂ de los gases de la

19/ Young, C.A. y T.H. Peters, The Use of Vegetation to Stabilize Mine Tailings at Copper Cliff, 68-77. Proceedings of the 15th Ontario Industrial Waste Conference, Junio 1968.

20/ Michelutti, R., "How to Establish Vegetation on High Iron-Sulphur Mine Tailings", Canadian Mining Journal, octubre de 1974, págs. 54 a 58.

21/ Peters, T.H., Inco Metals reclamation program, The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, diciembre de 1978.

combustión y su ulterior transformación en otras sustancias químicas. El primero consiste en transformar el SO_2 en productos químicos comercializables tales como azufre elemental, dióxido de azufre líquido, sulfato de amonio o ácido sulfúrico. Es un método que conviene utilizar siempre que sea económicamente viable. El otro consiste en transformar el SO_2 en productos químicos tales como yeso, para su ulterior evacuación. Ese yeso no es comercializable porque está contaminado con metales pesados. Actualmente no se utiliza ese método 22/ 23/.

3.2 Readaptación de plantas existentes para reducir la contaminación

La calidad de la emisión se puede mejorar modificando el proceso para reducir la producción primaria de contaminantes (como lo ha hecho la empresa INCO en sus plantas de Sudbury & Thompson) o bien limpiando los efluentes de la planta. Cuando se perfeccionan los sistemas de tratamiento al final del proceso, aumenta la eficiencia de eliminación del polvo que contienen los gases, así como el control de la emisión de SO_2 . Siempre que sea posible, convendrá utilizar sistemas en seco para la eliminación del polvo. Las cajas de lavado en húmedo pueden producir corrientes de aguas contaminadas. En las plantas antiguas se debe instalar, cuando no lo hubiere, un ciclón para depurar todas las corrientes cargadas de polvo. Los precipitadores electrostáticos tienen una eficiencia de eliminación elevada, sobre todo para las partículas más finas, pero son más caros.

Es posible eliminar el SO_2 de los gases de combustión mediante el proceso de contacto de producción de ácido sulfúrico, el proceso de absorción química o el proceso de producción de azufre elemental. En las grandes plantas de producción de níquel que existen en la actualidad no resulta fácil introducir procesos simples para eliminar el SO_2 , en particular si éste se emite en concentraciones bajas. En cambio, se han construido nuevas plantas dotadas de instalaciones que permiten recuperar hasta el 80% del SO_2 generado.

3.3 Costos del control de la contaminación

Las emisiones de SO_2 son las más difíciles de controlar y también las que entrañan un costo mayor. Existen varios sistemas de control, cada uno de ellos adaptado a un tipo distinto de emisión. En el cuadro 3.2 se presentan las características, de cada uno de los sistemas de eliminación más frecuentes, de las corrientes de gases susceptibles de ser tratados 24/. Actualmente no se dispone de ningún procedimiento barato para tratar los gases con bajo contenido de SO_2 , pero se están realizando estudios a ese respecto.

22/ "Background Information for New Source Performance Standards: Primary Copper, Zinc and Lead Smelters", EPA-450/2-74-002 a.

23/ Environment Canada, A Study of Sulphur Containment Technology in the Non-Ferrous Metallurgical Industry, Report EPS 3-AP-79-8, abril de 1980.

24/ Environment Canada, A Study of Sulphur Containment Technology in the Non-Ferrous Metallurgical Industry, Report EPS 3-AP-79-8, abril de 1980.

Cuadro 3.2

Características de las corrientes de gases requeridas para el óptimo tratamiento en las plantas de recuperación de azufre

		Porcentaje de SO ₂	Porcentaje O ₂	Caudal y Composición
Acido de contacto	-simple	5-8	8-12	Puede ser variable ¹
	-doble	5-8	8-12	Puede ser variable ¹
SO ₂ líquido	-físico	70-80	El más bajo posible	Constante
	-químico	10-11 ²	-	Constante
Azufre elemental		10	1-3	Constante

1. Más barato cuando es constante.
2. La planta requiere presión o absorción química y posterior tratamiento de la corriente concentrada.

Fuente: Lemmon, W.A., "Environmental Aspects of the Extraction and Production of Nickel", Seminario del PNUMA, Ginebra, 13 a 16 de abril de 1981.

Además del costo de la eliminación del SO₂ de los gases de escape, hay otros costos importantes relacionados con la fabricación de subproductos (tales como el ácido sulfúrico, el SO₂ líquido, el azufre elemental), la comercialización, el transporte, el almacenamiento o la evacuación definitiva de éstos. Por ejemplo, se considera que 300 km es la distancia máxima para los envíos de ácido sulfúrico en condiciones de rentabilidad 25/. Pero la mayoría de las plantas de producción de níquel están situadas a mucha distancia de los posibles mercados.

La proporción entre el azufre y el níquel en los concentrados suele oscilar entre 2,2 y 4,8%, y eso puede encarecer el control del SO₂. En el cuadro 3.3 26/ se presentan estos costos para diferentes sistemas de fijación, suponiendo que el producto final no tenga valor comercial.

25/ Anónimo, New Smelter, Acid Plant at Falconbridge to Improve Working Conditions, Efficiency, Canadian Mining Journal, 99, 5 de mayo de 1978.

26/ Environment Canada, A Study of Sulphur Containment Technology in the Non-Ferrous Metallurgical Industry, Report EPS 3-AP-79-8, April de 1980.

Cuadro 3.3

Costo de la fijación del azufre por libra de níquel producida*

	Planta de fabricación de ácido por catálisis simple						Catálisis doble	
	Gases continuos solamente		Gases variables solamente		Gases continuos y variables		Gases continuos y variables	
Fijación del azufre, porcentaje	50	45	95	97				
Costo de producción dólares EE.UU./ton S	59	92	54	58				
Costo de neutralización dólares EE.UU./ton S	92	92	86	86				
Proporción azufre/metal en concentrado	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta
Costos de fijación del azufre céntimos/lb Ni	2,95	6,43	4,14	9,02	5,12	11,18	5,64	12,31
Neutralización (costo total de fabricación del ácido y su neutralización) céntimos/lb Ni	7,57	16,51	8,29	18,09	13,25	28,91	13,94	30,42

* No se incluyen los gastos de lavado de los gases

Fuente: Lemmon, W.A., "Environmental Aspects of the Extraction and Production of Nickel", Seminario del PNUMA, Ginebra, 13 a 16 de abril de 1981.

3.4 Normas de emisión

Las normas de emisión para el SO₂, que es el contaminante principal, se consignan en otras secciones del presente estudio (aluminio, cobre). La emisión de partículas en el aire se debe mantener por debajo de los 240 microgramos/m³ para un valor máximo de emisión en 24 horas, y por debajo de los 75 microgramos/m³ como media geométrica anual 27/. El máximo de concentración de níquel en el aire debe ser inferior a 20 mg/m³. Las concentraciones de níquel superiores a 50 mg/kg pueden ser tóxicas para la vegetación. Por consiguiente, habría que limitar la cantidad de sales de níquel dispersas en la tierra que se utiliza con fines agrícolas, sobre todo si se trata de suelos ácidos. El Department of the Environment (Ministerio del medio ambiente) del Reino Unido recomienda que no se añada al suelo más que 7 g/m² (en forma de Ni) por un período de 30 años 28/. Con respecto a los efluentes líquidos de las fábricas de níquel, cuando no es posible embalsarlos, las autoridades del Canadá recomiendan los siguientes valores máximos:

Total de sólidos en suspensión	15 mg/l (promedio de 30 días)
Cu	0,2 "
Ni	0,5 "
Fe	0,5 "
pH	6 a 9 unidades

3.5 Protección de la salud de los trabajadores

En el cuadro 3.4 figuran los tiempos máximos de exposición de los trabajadores al níquel en suspensión en el aire en los ambientes de trabajo, según las normas vigentes en varios países.

27/ Environmental Guidelines, Oficina de Asuntos Ambientales, Banco Mundial, julio de 1984.

28/ "Environmental Aspects of Selected Non-Ferrous Metal Industries", PNUMA, Industry and Environment Overview Series, 1984.

Cuadro 3.4

Valores máximos de exposición de los trabajadores al níquel en suspensión en el aire

	Rep. Fed. de Alemania	Japón	Suecia	URSS	EE.UU.		
					Norma ocupacional	ACGIH Corto plazo	TWA
Níquel, mg/m ³		1	0,01	0,5	1		1
Carbonilo de níquel, mg/m ³	0,7	0,007	0,007	0,0005	0,007		0,35 0,35

Fuente: Occupational Exposure Limits for Airborne Toxic Substances, OIT, Serie Seguridad, higiene y medicina del trabajo, No. 37, Ginebra, 1977.

En el cuadro 3.5 29/, para ilustrar la exposición efectiva de los trabajadores, se presentan datos facilitados por la Société M tallurgique Le Nickel sobre su planta de Nueva Caledonia. Esos datos indican que las concentraciones de níquel en suspensión en el aire son bastante bajas aunque esto pueda deberse en gran parte al bajo contenido de níquel del mineral.

29/ Warner, J.S., "Occupational Exposure to Airborne Nickel in Producing and Using Nickel Products", en "Nickel in the Human Environment", Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer, Oxford University Press, 1984.

Cuadro 3.5

Concentraciones de níquel en suspensión en el aire en la extracción y fundición de lateritas: Nueva Caledonia

Concentración de níquel en suspensión en el aire (mg Ni/m ³)	Muestreo por áreas		Muestreo personal	
	Frecuencia de observación (%)	Concentración media <u>a/</u>	Frecuencia de observación (%)	Concentración media <u>a/</u>
0,05	67,1	0,0047	83,2	0,0022
0,05-0,10	8,3	0,076	1,4	0,081
0,10-1,00	24,6	0,029	15,5	0,274

a/ Muestreo para partículas con diámetro inferior a 30 micrones.

Fuente: Warner, J.S., "Occupational Exposure to Airborne Nickel in Producing and Using Nickel Products", en "Nickel in the Human Environment", Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer, Oxford University Press, 1984.

En general, el riesgo que corren los trabajadores depende fundamentalmente del tipo de compuesto de níquel. Mientras que el metal de níquel y la mayoría de sus sales inorgánicas son relativamente inocuas, el gas de carbonilo de níquel (presente en algunos procesos de refinación) es tóxico incluso en concentraciones bajas. Por consiguiente, los trabajadores deben ir debidamente protegidos. Se ha comprobado además experimentalmente que varios compuestos de níquel pueden producir tumores malignos en animales, por inhalación (subsulfato y carbonilo de níquel) o por inyección (subsulfuro, óxido, carbonato e hidróxido de níquel) 30/. De hecho, existen pruebas consistentes de que los trabajadores de las refinerías de níquel pueden contraer cáncer de nariz y pulmón. Los datos proceden de refinerías del Canadá, el Japón, Noruega, la República Democrática Alemana y la Unión Soviética. Aun cuando no se han encontrado pruebas conclusivas, el daño debería atribuirse a la inhalación de polvo de óxido de níquel y de vapores de

30/ Monographs on the evaluation of Carcinogenic Risk of Chemicals to Man, Vol. II., Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer, Lyon, 1976.

carbonilo de níquel 31/ 32/. El análisis de los datos también revela que el riesgo de cáncer para los trabajadores de las refinerías se ha reducido mucho desde hace tiempo, probablemente como consecuencia de la mejora de las condiciones de trabajo. Algunos cálculos de las concentraciones de níquel en suspensión en el aire en determinadas operaciones de refinación en las que en el pasado se registraba una incidencia progresiva de casos de cáncer duplicaban o triplicaban las cifras actuales de la industria del níquel.

31/ CIIC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans, Chemicals and Industrial Processes Associated with Cancer in Humans, CIIC Monographs Volumes 1-20, CIIC Monographs Supplement 1, Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer, Lyon, septiembre de 1979.

32/ Warner, J.S., "Occupational Exposure to Airborne Nickel in Producing and Using Nickel Products", en "Nickel in the Human Environment", Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer, Oxford University Press, 1984.

4. COBRE

4.1 Técnicas de control de la contaminación en plantas de producción de cobre

4.1.1 Control de la contaminación en la extracción

Durante esta etapa, el problema ambiental más importante es el polvo. El polvo generado por el camionaje se puede reducir empleando camiones de más capacidad y recubriendo las carreteras con una capa que retenga el polvo. Para ello se pueden utilizar emulsiones. Este método también tiene la ventaja de aumentar la velocidad de camionaje y extender la vida de los neumáticos entre un 10 y un 15% ^{33/}. Se puede reducir la cantidad de polvo producido por las voladuras rociando los barrenos con una solución de hidróxido de calcio o sulfato de sodio (10%). En las minas de explotación a cielo abierto se puede reducir la formación de polvo creando una llovizna ligera mediante chorros de aire y vapor. La reforestación es importante, tanto para rehabilitar las tierras como para crear zonas verdes de separación que impidan la difusión del polvo y de sustancias químicas nocivas. Una hectárea de bosque puede recoger hasta 18 toneladas de polvo. Sembrando cereales perennes se puede evitar la formación de polvo en los emplazamientos de las minas de explotación a cielo abierto ya agotadas.

4.1.2 Control de la contaminación durante el tratamiento del mineral

También en este caso el problema ambiental más importante es el polvo. El método más efectivo para evitar la formación de polvo durante la trituración y la molienda consiste en rociar o pulverizar agua. En los espacios cerrados, es necesario cerrar perfectamente el equipo generador de polvo, asegurar una buena ventilación y utilizar equipo de recogida del polvo. En esta etapa, la recogida del polvo puede llegar a tener una eficacia del 95%. Normalmente, estas operaciones se llevan a cabo por control remoto.

El principal problema ambiental que plantea la flotación del mineral es la contaminación del agua por determinados agentes de la flotación. En los últimos años ese problema se ha resuelto parcialmente reemplazando las sales de cianuro, muy tóxicas, por sulfuros, y los agentes espumantes fenólicos tóxicos, tales como el cresol, por agentes no fenólicos. Además, se ha difundido mucho la práctica de reciclar las aguas.

4.1.3 Control de la contaminación durante el tostado del concentrado de mineral

Es ésta una operación en la que se puede lograr la mayor eliminación posible del azufre en una sola etapa de todo el proceso de producción del cobre (50 a 70% de eliminación). La tostación en lecho fluidizado produce SO₂ en concentraciones suficientemente elevadas (hasta del 14%) para permitir altas tasas de recuperación (hasta el 99,5%). Con esto, la eficiencia de recuperación total del azufre se eleva hasta el 75 u 85%. Con los gases de escape del horno de tostación se pueden diluir otras corrientes de bajo contenido de SO₂ generadas por otras operaciones. La corriente resultante se puede volver a tratar (p.ej. en una planta de H₂SO₄) obteniéndose buenos resultados en la eliminación del SO₂. Sin embargo, en los hornos de tostación de varias soleras, el contenido de SO₂ en los gases de escape sólo

^{33/} "Environmental Aspects of Copper Production", Seminario del PNUMA, Ginebra, 13 a 16 de abril de 1981.

es del 7,5%. Eso permite obtener una correcta eliminación de SO_2 , pero los gases no se pueden diluir con otras corrientes de gases. Los gases de tostación también llevan polvo, que se suele eliminar mediante ciclones y precipitadores electrostáticos.

4.1.4 Control de la contaminación durante la producción de mata

Si la fundición se lleva a cabo en hornos de reverbero, los gases de escape llevan tan poco SO_2 que no se puede eliminar eficazmente. Hasta el momento no se ha ideado ningún método de control. Se lleva a cabo la termorrecuperación de los residuos y luego se elimina el polvo de los gases de escape mediante precipitadores electrostáticos (con una eficacia superior al 99%). Posteriormente, se recicla el polvo recogido.

Si la fundición se lleva a cabo en horno alto, la etapa de tostación se sustituye por una etapa de nodulización y sinterización que genera una corriente de gases cuyo contenido en SO_2 (alrededor del 7%) se puede convertir en ácido sulfúrico. Si se aplica luego el proceso pirítico modificado aún se puede extraer el SO_2 de la corriente de gases, aunque con menor eficacia. En cambio, con la fundición en horno alto por el procedimiento semipirítico no se puede eliminar el SO_2 , porque su contenido es demasiado bajo (inferior al 2%).

En la fundición eléctrica, la concentración de SO_2 en los gases de escape es muy elevada. No penetra aire en el horno (siempre que éste se encuentre en buen estado de estanqueidad, sobre todo en la zona de los electrodos), y el volumen de gas es reducido. Como el contenido de polvo también es reducido, se pueden usar pequeños precipitadores electrostáticos.

La fundición rápida también produce gases de escape con elevado contenido de SO_2 (hasta el 30%), y la concentración puede ser incluso superior si se utiliza oxígeno casi puro (85 a 95%). Esos gases se pueden diluir con otras corrientes procedentes de otras partes de la planta y permiten una eliminación muy eficaz del azufre.

4.1.5 Control de la contaminación durante la conversión de las matas

Junto con el SO_2 y el polvo, el escape de humos constituye el mayor problema para el medio ambiente, que se puede resolver eficazmente empleando campanas adecuadas y asegurando su utilización y mantenimiento correctos. La concentración media de SO_2 en los gases de escape oscila entre el 4 y el 4,8% y a veces alcanza valores superiores (siempre que se adopten determinadas medidas tales como cerrar adecuadamente las campanas y los conductos de gas, y refrigerar el agua y el vapor de las campanas). Esas concentraciones pequeñas reducen a un 50% la eficiencia de recuperación del SO_2 en una fábrica de ácido sulfúrico (aunque a veces puedan alcanzarse valores de hasta el 85%).

4.1.6 Control de la contaminación durante el afino al fuego

El horno produce gases de escape con un contenido de SO_2 inferior al 0,3%, proporción demasiado baja para su eliminación. Para recuperar el calor y captar el polvo, se pueden instalar calderines en el horno. Luego, el gas sale a la atmósfera sin otro tratamiento porque contiene pocos contaminantes. En algunos casos, conviene introducir otra etapa de eliminación de polvo.

4.1.7 Control de la contaminación durante la electrorrefinación

Normalmente, el aire de ventilación de los talleres se suelta sin tratamiento previo. En cuanto a las aguas residuales, su contenido de metales pesados se elimina mediante neutralización con cal, que precipita los metales en forma de sales. También se pueden emplear métodos más avanzados como el intercambio iónico o la floculación.

4.1.8 Control de la contaminación en los procesos hidrometalúrgicos

En la hidrometalurgia hay que prever la evacuación de líquidos y lodos. También existe la posibilidad de que se produzcan infiltraciones de ácido. A diferencia de las escorias pirometalúrgicas, que son sólidas e inertes, los lodos hidrometalúrgicos contienen metales no disueltos, ácidos y grandes cantidades de agua. Normalmente se recogen en balsas que deben estar impermeabilizadas.

4.1.9 Eliminación del dióxido de azufre de las corrientes gaseosas

Todas las corrientes gaseosas producidas por las fundiciones, contienen dióxido de azufre en concentraciones que varían entre 0,1 y 95%. En la actualidad existen tecnologías industriales que permiten eliminar el SO_2 en concentraciones superiores al 4%. La recuperación del SO_2 y su subsiguiente transformación en H_2SO_4 no sólo elimina los problemas de contaminación conexos, sino que también reduce los costos de fabricación del cobre. También existen tecnologías para corrientes con concentraciones más bajas de SO_2 , pero no se utilizan en la industria, debido a su elevado costo. El SO_2 se puede convertir en ácido sulfúrico, azufre elemental, dióxido de azufre líquido, sulfato de amonio o yeso. En el cuadro 4.1 se presentan los niveles de concentración necesarios para que se pueda purificar la corriente por esos métodos 34/.

34/ Lemmon, W.A., "Environmental Aspects of the Extraction and Production of Nickel", Seminario del PNUMA, Ginebra, 13 a 16 de abril de 1981.

Cuadro 4.1

Características de las corrientes gaseosas para el tratamiento
óptimo en plantas de recuperación de azufre

		Porcentaje de SO ₂	Porcentaje de O ₂	Caudal y composición
Acido de contacto	- simple	5-8	8-12	Puede ser variable <u>a/</u>
	- doble	5-8	8-12	Puede ser variable <u>a/</u>
SO ₂ líquido	- físico	70-80	Lo más bajo posible	Constante
	- químico	10-11 <u>b/</u>	0	Constante
Azufre elemental		10	1-3	Constante

a/ Más barato cuando es constante.

b/ La planta requiere presión o absorción química y, posteriormente, el tratamiento de la corriente concentrada.

Fuente: Lemmon, W.A., "Environmental Aspects of the Extraction and Production of Nickel", Seminario del PNUMA, Ginebra, 13 a 16 de abril de 1981.

Procedimiento del ácido sulfúrico de contacto

Este es el método más corriente que se utiliza para recuperar el SO₂. El procedimiento consiste en poner en contacto el SO₂ con el oxígeno en presencia de un catalizador (pentóxido de vanadio) para formar SO₃ que luego se convierte en H₂SO₄ añadiendo agua. La reacción es exotérmica y se puede recuperar el calor. Este procedimiento se aplica a concentraciones de SO₂ que oscilan entre el 5 y el 8%, y a concentraciones de oxígeno del 30 al 50% superiores a las del SO₂. El rendimiento de la conversión es del 97% y del 99,5% para plantas de contacto simples y dobles, respectivamente. Una desventaja económica importante consiste en que se ha de transportar el ácido a mercados que suelen estar muy lejos del lugar de producción.

Procedimiento del azufre elemental

Se han ideado varios procedimientos de este tipo (Outokumpu Allied Chemical, ASARCO, Texagulf). Todos ellos comportan dos etapas: reducción del SO₂ a H₂S y conversión catalítica del sulfuro de hidrógeno en azufre, reciclando el reactivo. Sólo se pueden tratar corrientes de SO₂ concentrado (10 a 15%). El contenido de oxígeno debe ser bastante bajo (inferior al 3%). El rendimiento de conversión es de del 90% aproximadamente. La principal ventaja de este procedimiento consiste en que el azufre es fácil de transportar y almacenar.

Proceso del dióxido de azufre líquido

Este procedimiento sólo se puede aplicar a concentraciones de SO₂ del 70 al 80%, que casi no contengan oxígeno. Los gases de escape deben estar limpios. Esos gases se comprimen y refrigeran hasta que se licúa el SO₂. Otro método consiste en eliminar el SO₂ de la corriente original de gases mediante absorción y posterior regeneración en forma concentrada, para luego licuarlos.

4.2 Readaptación de plantas existentes para reducir la contaminación

En los últimos años se ha hecho más hincapié en aumentar la eficiencia del tratamiento del mineral. Para reducir el consumo de energía se han readaptado algunas plantas instalando sistemas capaces de moler mucho más fino el mineral y aumentar la capacidad de recuperación. Se ha mejorado el control del proceso introduciendo métodos de análisis continuos y bucles de control automatizados.

Una tecnología que permitirá mejorar el rendimiento de la explotación es el procedimiento de la flotación inversa. Consiste en hacer flotar la ganga, en lugar del mineral rico en cobre. Ese sistema se ha utilizado ya en la mina Woodlawn, de la empresa CRA, en Australia 35/.

En cuanto a las operaciones de fundición, el problema ambiental más grave en las plantas antiguas es la emisión de SO₂. En la mayoría de los casos, el contenido de SO₂ en los gases de escape (sobre todo en los hornos de reverbero o los convertidores) es demasiado bajo para su eliminación. En principio, es técnicamente hacedero reducir mucho el nivel de esas emisiones. Por ejemplo, las bajas concentraciones de SO₂ en los gases de escape podrían absorberse y luego volver a emitirse para obtener una corriente más concentrada. Pero, en la práctica, esa tecnología todavía no es rentable. Por consiguiente, la mayoría de las fundiciones antiguas siguen emitiendo SO₂ no tratado. Para reducir al mínimo los efectos adversos sobre la vida y el medio ambiente en los alrededores de la planta, se podría instalar una chimenea alta que permitiese una dispersión adecuada en la atmósfera. Sin embargo, la difusión de SO₂ a larga distancia ya ha producido lluvias ácidas en el norte de Europa y América del Norte.

Un enfoque más satisfactorio consiste en readaptar los viejos convertidores mediante sistemas de inyección de aire oxigenado. Eso permite aumentar el rendimiento energético del proceso y reducir la cantidad de gases generados, obteniendo una mayor concentración de SO₂. Un ejemplo de ese sistema es el "convertidor modificado de El Teniente", diseñado por Codelco para la fundición de concentrado de mineral de El Teniente (Chile). La configuración básica de la fundición existente se modificó instalando sobre los convertidores quemadores de combustible oxigenado. Eso elevó la producción de cobre en 600 toneladas por día, mediante una operación única de fundición-conversión que no supuso ningún aumento del consumo de combustible. Se pueden obtener ventajas similares mediante convertidores con eliminadores laterales de gases. Esos sistemas permiten aumentar el nivel de recuperación de cobre y de SO₂ con costos de inversión relativamente pequeños.

35/ "Impact of New Technologies on the World Copper Market - A Study Prepared for UNCTAD", Commodities Research Unit Ltd. (Londres) y CRU Consultants Inc. (Nueva York), 1986.

En hidrometalurgia se puede llevar a cabo la readaptación recurriendo a nuevos disolventes. Después de la lixiviación del cobre del mineral con una solución de ácido sulfúrico, se pone en contacto esa corriente con una solución orgánica para recuperar el cobre. El reactivo más utilizado durante esta etapa de extracción con disolventes es el LIX 64 (Liquid Ion Exchange) [líquido para intercambio iónico] de la empresa General Mills. Ese disolvente (de composición patentada) reacciona selectivamente con el cobre. En fechas más recientes, reactivos de segunda generación tales como el LIX 860, han permitido reducir los costos de funcionamiento en las plantas existentes, y aumentar la eficiencia de recuperación. Los reactivos más nuevos no son muy sensibles a las variaciones del pH y, por tanto, permiten aumentar la capacidad de carga utilizando soluciones de cobre más ácidas.

4.3 Costos del control de la contaminación

Para un horno de reverbero nuevo (con una capacidad de 1.500 toneladas/día), el costo de fundición se puede estimar en 97,8 céntimos de dólar de los EE.UU. por kilogramo de cobre producido 36/. No se incluyen los costos de control de las emisiones de SO₂ o de la recuperación de materiales formados de partículas. Por otra parte, el costo de fundición de un horno de fundición rápida nuevo es sólo de 61 céntimos/kg 37/, incluido el costo de las operaciones necesarias para cumplir con las normas existentes sobre de emisiones a la atmósfera.

En el cuadro 4.2 38/ se presenta una estimación del costo de eliminación para los casos en que el SO₂ puede ser efectivamente eliminado de los gases de escape (es decir, cuando la concentración de SO₂ es suficientemente elevada), según los diferentes métodos. El cuadro presenta sólo el orden de magnitud de los costos y no incluye los sistemas de lavado de los gases calientes (en ese caso el costo aumentaría hasta un 30%). En los cálculos tampoco se tienen en cuenta las modificaciones o adaptaciones de las plantas existentes.

36/ "Compendium of Low-and Non-Waste Technology", Copper Production Using the Noranda Process, Naciones Unidas, Consejo Económico y Social, 1° de mayo de 1984.

37/ "Compendium on Low-and Non-Waste Technology", Primary Copper Production Using the Outokumpu Flash Furnace, Naciones Unidas, Consejo Económico y Social, 1° de mayo de 1984.

38/ "Background Information for New Source Performance Standards: Primary Copper, Zinc and Lead Smelters", EPA-450/2-74-002 a.

Cuadro 4.2

Costo de la fijación del azufre por libra de cobre producida*

	Fábrica de ácido de catálisis simple				Catálisis doble			
	Gases continuos solamente		Gases variables solamente		Gases continuos y variables		Gases continuos y variables	
Fijación de azufre, porcentaje	50	45	95	97				
Costo de producción dólares EE.UU/ton S	59	92	54	58				
Costo de neutralización dólares EE.UU/ton S	92	92	86	86				
Proporción azufre/ metal en concentrado	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
Costos de fijación del azufre céntimos/lb Cu	1,07	2,14	1,50	3,01	1,86	3,37	2,05	4,10
Neutralización (costo total de la fabricación de ácido y su neutralización) céntimos/lb Cu	2,75	5,50	3,02	6,03	4,67	9,64	5,07	10,14

(Canadá - 1979)

* No se incluyen los gastos de lavado de gases

Fuente: Lemmon, W.A., "Environmental Aspects of the Extraction and Production of Nickel", Seminario del PNUMA, Ginebra, 13 a 16 de abril de 1981.

Con respecto a la eliminación del polvo, el cuadro 4.5 permite obtener una idea aproximada de los costos relacionados con las distintas tecnologías, así como de las correspondientes eficacias de eliminación ^{39/}. Son costos de 1972.

^{39/} Stone, E.H.F., "Fume and Effluent Treatment Plant in the Non-Ferrous Metals Industry", Institute of Metals, Review 169, 1972.

Cuadro 4.3

Eficiencia y costo de equipo de control para 1.000.000 m³/h
de gases polvorientos a 20°C

Equipo	Eficiencia de eliminación, polvo normal (%)	Total de gastos corrientes (lb por año)	Total de costos incluidos gastos fijos (lb por año)
Colector de inercia	58,6	587	1 313
Ciclón de eficiencia media	65,3	1 233	1 693
Ciclón celular de baja resistencia	74,2	480	1 380
Ciclón de alta eficiencia	84,2	1 547	2 567
Ciclón tubular	93,8	1 360	2 467
Precipitador electrostático	99,0	933	5 867
Filtro de tela vibratorio	99,7	3 380	6 847
Filtro de tela de baja velocidad	99,8	3 127	6 327
Filtro de tela de chorro inverso	99,8	6 640	11 507
Lavador de choque de chorro	97,9	2 807	4 807
Ciclón irrigado	91,0	1 900	3 153
Desempolvador de atomización autoinducido	93,6	2 093	3 493
Torre rociadora	94,5	4 000	6 933
Lavador de lecho fluidizado	95,0	3 067	4 180
Lavador de objetivo irrigado	97,9	2 513	4 247
Desintegrador	98,5	15 840	18 707

Cuadro 4.3 (cont.)

Equipo	Eficiencia de eliminación, polvo normal (%)	Total de gastos corrientes (lb por año)	Total de costos incluidos gastos fijos (lb por año)
Precipitador electrostático irrigado	99,0	1 320	7 653
Lavador de cuello anular de baja potencia	99,5	4 933	7 067
Lavador Venturi de potencia media	99,7	7 293	9 560
Lavador de cuello anular de potencia media	99,8	7 466	9 733
Lavador Venturi de gran potencia	99,9	10 933	13 400

Fuente: E.H.F. Stone, op.cit.

4.4 Normas de emisión

Según el Banco Mundial, los niveles de emisión de gases de escape no deben sobrepasar los siguientes valores:

Cuadro 4.4

Directrices del Banco Mundial sobre los niveles
de emisión de gases de escape

Dióxido de azufre (SO₂)

Dentro del recinto de la planta	Media aritmética anual	100 g/m ³
	Máximo de punta en 24 horas	1 000 g/m ³
Fuera del recinto de la planta	Media aritmética anual	100 g/m ³
	Máximo de punta en 24 horas	500 g/m ³

Materiales en partículas

Media geométrica anual	75 g/m ³
Máximo de punta en 24 horas	260 g/m ³

Oxido de nitrógeno (en forma de NO₂)

Media aritmética anual	100 g/m ³
------------------------	----------------------

Monóxido de carbono (CO)

Promedio máximo 8 horas	10 g/m ³
Promedio máximo 1 hora	40 g/m ³

Fuente: Environmental Guidelines, Oficina de Asuntos Ambientales, Banco Mundial, julio de 1984.

Las normas de emisión establecidas en el Reino Unido para gases de escape en las plantas de producción de cobre son las siguientes: el total de materiales en partículas no debe exceder de los 0,46 g/m³ por emisión de hasta 700 m³/min, y debe reducirse a 0,23 g/m³ en el caso de emisiones de gran volumen. Las emisiones de cobre y de zinc no deben sobrepasar los 0,115 g/m³. Existen otras normas para el cadmio y el plomo, según las dimensiones de la planta. Con respecto a las emisiones de gran volumen, los umbrales son 0,012 g/m³ y 0,7 kg/hr para el cadmio, y 0,012 g/m³ y 5,4 kg/hr para el cobre. La altura mínima de la chimenea debe ser de 30 m 40/.

Para los efluentes líquidos, las normas varían según las diferentes plantas.

^{40/} Butler, D.H., "Cooper, Environmental Impact in Its Processing, Use and Disposal", PNUMA, Programa para la Industria y el Medio Ambiente, París, 1° de september de 1982.

Cuadro 4.5

Normas para efluentes líquidos

Para fundiciones de cobre primarias los umbrales son:
(mg/litro de efluente)

	<u>Máximo 24 horas</u>	<u>Promedio 30 días consecutivos</u>
TSS	50	25
As	20	10
Cu	0,5	0,25
Pb	1,0	0,5
Cd	1,0	0,5
Se	10	5
Zn	10	5
p ^H	6 a 9 unidades	6 a 9 unidades

Para las plantas de refino electrolítico de cobre los umbrales son:
(kg/tonelada métrica de producto)

	<u>Máximo 24 horas</u>	<u>Promedio 30 días consecutivos</u>
TSS	0,10	0,05
Cu	$1,7 \times 10^{-3}$	$0,8 \times 10^{-3}$
Cd	6×10^{-5}	3×10^{-5}
Pb	6×10^{-4}	$2,6 \times 10^{-4}$
Zn	$1,2 \times 10^{-3}$	$0,3 \times 10^{-3}$

Para las plantas de refino electrolítico de cobre los umbrales son:
(mg/litro de efluente)

	<u>Máximo 24 horas</u>	<u>Promedio 30 días consecutivos</u>
TSS	50	25
Cu	0,5	0,5
Zn	10	5
Aceite y grasa	20	10
p ^H	6 a 9 unidades	6 a 9 unidades

Fuente: Environmental Guidelines, Oficina de Asuntos Ambientales, Banco Mundial, julio de 1984.

4.5 Protección de la salud de los trabajadores

El cobre es un metal muy poco tóxico. La escasez de publicaciones sobre los efectos nocivos de la exposición a ese metal parece confirmar ese hecho 41/ 42/. En el cuadro 4.6 figuran algunos umbrales de exposición de los trabajadores al cobre en suspensión en el aire, según las normas recomendadas en países seleccionados 43/.

Cuadro 4.6

Umbrales de exposición de los trabajadores a sustancias tóxicas en suspensión en el aire

	Rep. Fed. Alemania	Japón	Suecia	URSS	EE.UU.	
					Norma ocupacional	ACGIH Corto plazo
Polvo de cobre mg/m ³	1		1	1	1	2
Humos de cobre mg/m ³	0,1				0,1	0,2 0,2

Fuente: OIT, Serie Seguridad, higiene y medicina del trabajo, No. 37, Ginebra, 1977.

El cobre funde y hierve a temperaturas relativamente altas. Por consiguiente, no despidе humos metálicos con tanta facilidad como otros metales como el plomo, el cadmio o el zinc. Además, el polvo y los humos de cobre tienen un olor característico que alerta a los trabajadores y interrumpe la exposición antes de que la ingestión tóxica pueda producirse. Sin embargo, la salud de los trabajadores se puede ver afectada si se sobrepasan determinadas concentraciones. En casos extremos, se puede contraer la fiebre del cobre, enfermedad que dura de 24 a 48 horas. También se han mencionado casos de dermatitis por contacto 44/, pero más de 25 años de observaciones de los trabajadores de las fundiciones y refinерías de cobre no han mostrado una incidencia significativa de la dermatitis. En las operaciones de fundición de cobre es probable que se produzcan humos metálicos más nocivos procedentes del plomo, el cadmio, el antimonio, el selenio, el berilio, y en especial el

41/ "Cooper, Medical and Biological Effects of Environmental Pollutants", The National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1977.

42/ Demayo, A., M.C. Taylor, y K.W. Taylor, "Effects of Copper on Humans, Laboratory and Farm Animals, Terrestrial Plants, and Aquatic Life", agosto de 1982.

43/ Nordman, H., Seminario del PNUMA sobre Environmental Aspects of Non-Ferrous Metals Industries, OMS/Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

44/ Saltzer, E.I. y J.W. Wilson, "Allergic Contact Dermatitis Due to Copper", Arch. Derm. 98:375-376, 1968.

arsénico. Todos los autores que han informado sobre el aumento de la incidencia del cáncer de pulmón entre los trabajadores de las fundiciones de cobre han sugerido que la enfermedad debía atribuirse al trióxido de arsénico contenido en el polvo y los humos 45/ 46/ 47/ 48/.

Puede considerarse que el SO₂ también es una sustancia química sumamente nociva en el ambiente de trabajo. Resulta perjudicial para la salud humana en concentraciones tan bajas como 0,5 mg/m³, aunque solo puede ser detectado en concentraciones de 2,6 a 3 mg/m³. En concentraciones de 20 mg/m³ provoca efectos irritantes de cierta importancia. Al parecer, otros factores, químicos y de otra índole (tales como la humedad y el polvo) tienen efectos sinérgicos cuando se combinan con el SO₂.

45/ Kuratsune, M., S. Tokudome, T. Shirakusa, M. Yoshida, Y. Tokumitsu, T. Hayano y M. Seita, "Occupational Lung Cancer among Copper Smelters", Int. J. Cancer 13:552-558, 1974.

46/ Lee, A.M. y J.F. Fraumeni, Jr., "Arsenic and Respiratory Cancer in Man: An Occupational Study", J. Nat. Cancer Inst. 42:1045-1052, 1969.

47/ Milham, S., Jr. y T. Strong, "Human Arsenic Exposure in Relation to a Copper Smelter", Environm. Res. 7:176-182, 1974.

48/ Tokudome, S. y M. Kuratsune, "Cohort Study on Mortality from Cancer and Other Causes among Workers at a Metal Refinery", Int. J. Cancer 17:310-317, 1976.

5. PLOMO

5.1 Tecnologías para el control de la contaminación en las plantas de producción de plomo

5.1.1 Control de la contaminación durante la extracción

Las minas subterráneas están siempre dotadas de un sistema de ventilación que debe ser capaz de introducir aire fresco del exterior y diluir a la vez suficientemente el aire viciado que contiene polvo y humos de las operaciones de extracción. La formación de polvo se puede aminorar rociando las rocas o el mineral con agua antes de cada operación. Las aguas residuales de la extracción se pueden regenerar en una planta de tratamiento para eliminar al menos los sólidos en suspensión y reciclarlas parcialmente. En las regiones áridas, la escasez de agua puede agravar el problema, y es indispensable un plan adecuado de aprovechamiento del agua. La Mount Isa Mines Ltd., en Australia constituye un interesante ejemplo al respecto. Existe en ella un complejo sistema de captación, bombeo y distribución, que permite suministrar agua a todos los puntos en que se necesita 49/. El problema contrario se plantea en aquellas minas en las que hay que extraer el agua presente en las rocas. Es probable que el agua sea ácida y esté contaminada por sales metálicas disueltas, por lo que es necesario tratarla. Ese tratamiento consiste en un ajuste del pH con cal, que sedimenta los metales pesados. Añadiendo coagulantes se forma un fango que se recoge después en tanques de sedimentación. Posteriormente ese fango espeso se extrae y se vierte a lagunas 50/.

5.1.2 Control de la contaminación durante el tratamiento del mineral

Durante las operaciones de espumación la contaminación del aire suele ser insignificante. El polvo puede representar un problema en todas las demás operaciones que entrañan la manipulación de materiales sólidos en seco. Los materiales sólidos pulvígenos se pueden almacenar en estructuras cerradas o protegidas para evitar que se vuelen. Durante su transporte en camiones o barcasas debería cubrirse el concentrado de mineral con objeto de obviar ese problema. En zonas de tráfico denso de camiones cargados se han medido elevadas concentraciones de polvo de mineral en el aire (hasta los 100 metros de altura) 51/. Con objeto de mitigar el problema el mineral podría enviarse a la planta de fundición con un grado de humedad del 10 al 12% 52/.

49/ "Operations at Mount Isa", Mount Isa Mines Limited Australia, 1977.

50/ "Processes, Procedures, y Methods to Control Pollution from Mining Activities, Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Medio Ambiente, EPA 430/9-73-011, Washington, D.C., octubre de 1973.

51/ Hemphill, D.D., "Lead Contamination Along Roadways", in Lead in the Environment, Boggess, W.R. and Wixon, B.G. (ed.), Natl. Sci. Foundation, NSF/RA-770214, Washington, D.C., 150, 1977.

52/ "Environmental Impacts and controls in the Extraction and Production of Lead, Zinc and Cadmium", Seminario del PNUMA, sobre los aspectos ambientales de la industria de los metales no ferrosos, Ginebra, 13 a 16 de abril de 1981.

La contaminación del agua puede constituir un problema grave, debido a la presencia de contaminantes y colas en flotación. Siempre que fuese posible se debería proceder al tratamiento del agua para su reutilización. En muchas minas, el agua de la mina se utiliza en otras operaciones posteriores, como la molturación y la flotación. Hay tres formas posibles de eliminar los fangos de aguas residuales que llevan colas: enterrarlos, depositarlos en embalses de colas y verterlos al mar. Muchas empresas han adoptado el procedimiento de evacuación subterránea, que consiste en bombear el fango a los espacios que han quedado vacíos después de la extracción, añadiendo a veces cemento. Ese procedimiento es el que menos afecta al medio ambiente.

El depósito de los desechos en embalses de colas puede afectar al medio ambiente, debido a los posibles escapes de agua contaminada a las tierras. De hecho, debido al problema potencial de los escapes de agua ácida, la industria de plomo/zinc ocupa en los Estados Unidos el segundo lugar (después de la del uranio) en la clasificación en función de los riesgos tóxicos de la evacuación terrestre de desechos 53/ 54/. Una vez que el agua se ha evaporado, el viento puede levantar polvo de las colas. En consecuencia se debería estabilizar la zona con algún tipo de vegetación. En algunos casos, no resulta posible hacerlo, como pasa en las regiones áridas, y se ha resuelto el problema cubriendo de piedras las colas secas. Ese procedimiento se ha utilizado con éxito en Australia.

Rara vez se utiliza la evacuación de las colas mediante vertidos en el mar. Pero se utiliza ese procedimiento en la mina de Greenex Black Angel, en Groenlandia, en la que las colas se estabilizan con cal y se vierten luego a un fiordo cercano 55/.

5.1.3 Control de la contaminación durante la fundición del concentrado

Control de la contaminación durante la preparación de las cargas

Los desprendimientos ocasionales de polvo pueden constituir un grave problema debido a su elevado contenido de plomo. Se pueden evitar humedeciendo el material, o utilizando dispositivos eficaces de captación de polvo. La humedad de la carga no debería nunca ser inferior al 8%. Se pueden tratar las sustancias desprendidas que se hayan captado en un depurador por vía húmeda para recuperar el polvo, que luego se puede reutilizar.

53/ "The Health and Environmental Impacts of Lead on an Assessment of a Need for Limitations", Oficina de Sustancias Tóxicas, Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Medio Ambiente, EPA-560/2-79-001, Washington, D.C., abril de 1979.

54/ "Environmental Impacts and Controls in the Extraction and Production of Lead, Zinc and Cadmium", Seminario del PNUMA sobre los aspectos ambientales de la industria de los metales no ferrosos, Ginebra, 13 a 16 de abril de 1981.

55/ Greenland Fisheries Investigations, Recipient andersogeke ued Marmorilik, 1980, 1979, 198, 1977, 1976, Ostervaldgade 10, 1350 Copenhagen, K. Dinamarca (en danés, con resúmenes en inglés y groenlandés).

Control de la contaminación durante la sinterización por tostado

En esta fase el problema principal es el de las emisiones de SO₂ y de polvo. La mayoría de los aparatos de sinterización de aspiración ascendente pueden producir gases de escape con una concentración de SO₂ del 4% como mínimo, susceptibles de transformación en H₂SO₄ en una planta para ácidos (para más detalles, véase el capítulo sobre el cobre). Esa concentración se logra tratando los gases en los que el sol está más diluido en el aparato hasta generar una corriente de gas con la concentración suficiente.

La excesiva dilución de los gases de escape de los aparatos de aspiración descendente impide eliminar eficazmente el SO₂. En consecuencia, se procede a disipar esos gases. Los gases de escape se enfrían y se tratan utilizando filtros de bolsa, cubas electrostáticas de precipitación, o depuradores por vía húmeda, para captar las emisiones de polvo. El enfriamiento provoca la condensación de los metales pesados, que de lo contrario puede tener lugar dentro de la chimenea o en su penacho, con la lluvia de partículas y la contaminación ambiental consiguientes. Si se utilizaran depuradores por vía húmeda, el agua quedaría también contaminada por metales pesados, y habría que tratarla antes de la descarga (por ejemplo añadiendo cal para precipitar los metales pesados). En el cuadro 5.1 56/ se indican las concentraciones de los principales contaminantes en la corriente de aguas residuales generadas por una planta de fundición.

Cuadro 5.1

Concentración de contaminantes en las aguas residuales de las plantas de fundición de plomo

Contaminantes	Número de		Concentración, mg/L		
	Análisis	Veces que se detectaron	Escala	Mediana	Promedio
COD	3	2	ND* - 170	3,7	58
TOC	1	1		3,3	3,3
TSS	1	1		26	26
Total fenol	2	2	0,012 - 0,050		0,031
Amoniaco	2	2	0,43 - 3,8		2,1

*ND = No apreciable.

Fuente: EPA Treatability Manual, Vol. II, Industrial Descriptions, Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Medio Ambiente, julio de 1980.

56/ EPA Treatability Manual, Vol. II, Industrial Descriptions, Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Medio Ambiente, julio de 1980.

Control de la contaminación durante la reducción en el alto horno

Normalmente se hace pasar a los gases del horno por una caldera con el fin de recuperar el calor residual. En esa fase, algunos metales se pueden condensar y recuperar. A continuación es posible depurar de polvo los gases haciéndolos pasar a través de filtros de bolsa. El polvo captado puede tratarse para ser reutilizado. El azufre contenido en el material sinterizado con que se alimentó el alto horno afluye también a la corriente de gas en forma de SO_2 , pero la concentración de SO_2 es demasiado baja para poder eliminarlo. En consecuencia, se diluyen los gases con aire fresco (utilizado también para el sistema de ventilación) antes de eliminar el polvo y hacerlos pasar a la chimenea. Durante esa operación se producen, aproximadamente, el 10% de las posibles emisiones de SO_2 .

Las escorias residuales generadas en el curso de esa operación y del proceso de sinterización se suelen eliminar en tierra, en un lugar adecuado.

5.1.4 Control de la contaminación durante el refinado del galápago de plomo

Las operaciones de refinado se suelen realizar a temperaturas relativamente bajas. El único riesgo ambiental se deriva de los humos que pueden generar y que contienen plomo y, en algunos casos, metales tales como bismuto, cadmio, hallio y arsénico, entre los principales contaminantes. Para disiparlos, se suelen utilizar grandes cantidades de aire de ventilación, que se hace pasar previamente por filtros de bolsa.

En el refinado electrolítico del plomo, el principal riesgo está constituido por el trióxido de arsénico que se forma a partir del baño en los gases de escape. Por consiguiente, se debe proceder al enfriamiento con el objeto de que el trióxido de arsénico se condense antes de hacer pasar los gases a los filtros de bolsa.

5.2 Readaptación de plantas existentes para reducir la contaminación

Los principales riesgos ambientales de las instalaciones de producción de plomo se deben a las emisiones de SO_2 y de polvo. Es posible y se ha conseguido ya reducir esas emisiones en plantas existentes. La primera medida para eliminar el SO_2 de los gases de escape consiste en sustituir la tecnología de tostación del concentrado de mineral utilizando aparatos de sinterización de aspiración ascendente en vez de sinterizadores de aspiración descendente, con lo que pueden obtenerse gases de escape de los que es posible eliminar el SO_2 . En las plantas emplazadas en zonas remotas (el transporte del ácido sulfúrico resultaría demasiado costoso), pueden producirse deliberadamente corrientes de gas con SO_2 muy diluido, que se pueden dispersar a continuación por una chimenea alta. Sin embargo, es un hecho perfectamente conocido que esos hornos de fusión de plomo provocan problemas de contaminación en las zonas cercanas. Por ejemplo, se ha comprobado que en un caso la contaminación atmosférica llegó aproximadamente a 5 kilómetros del emplazamiento de la fundición, detectándose además contaminación del suelo en un radio de más de 10 kilómetros 57/ 58/. De forma análoga, la contaminación

57/ "Lead", Environmental Health Criteria 3, OMS, Ginebra, 1977.

58/ Landrigan, P.J., S.H. Gelbach, B.F. Rosenblum, J.M. Shoults, R.M. Candelaria, W.F. Barthel, J.A. Liddle, A.L. Smrek, N.W. Staehling, and J.F. Sanders, (1975b) "Epidemic Lead Adsorption Near an Ore Smelter; The Role of Particulate Lead", New Engl. J. Med., 292:123-129.

en torno a la mina y al horno de fusión de Mezica (Yugoslavia) alcanzó en la atmósfera y en el suelo distancias de 10 y 7 kilómetros respectivamente 59/ 60/.

En 1974, la Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Medio Ambiente llevó a cabo un estudio de las seis plantas más importantes de producción de plomo del país. Según sus cálculos, los efectos económicos de su adaptación a las normas federales de control podrían ascender a 51 millones de dólares (a pesar de que tres de las plantas contaban ya con instalaciones para ácidos) 61/, lo que pone de manifiesto que, aun en ese caso, el control de la contaminación es posible si se destinan recursos suficientes para ello.

Por lo que respecta a las emisiones de partículas, es relativamente fácil dotar a las plantas existentes de filtros de bolsa y de otros dispositivos de captación de polvo capaces de eliminar casi el 100% del polvo y los humos de los gases de escape.

5.3 Los costes del control de la contaminación

La Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Medio Ambiente efectuó en 1974 una estimación de las repercusiones económicas del cumplimiento de las rigurosas normas de protección del medio ambiente en el caso de los hornos primarios de fundición de plomo 62/. Se tuvieron en cuenta las emisiones de polvo y de SO_2 y se incluyeron en los cálculos los costes de la planta para ácidos. En el cuadro 5.1 se reflejan los resultados en relación con plantas de tamaño tipo 63/.

59/ Djuric, D., Z. Kerin, L. Graovac-Leposavic, L. Novak, and M. Kop, Environmental Contamination by Lead from a Mine and Smelter; A Preliminary Report, Arch. Environ. Health, 23:275-279, 1971.

60/ Kerin, Z., Lead in New-Fallen Snow Near a Lead Smelter, Arch. Environ. Health, 26:256-260, 1973.

61/ The Cost of Clean Air, Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Medio Ambiente, 1974.

62/ The Cost of Clean Air, Agencia para la Protección del Medio Ambiente, 1974.

63/ Atkins, M.H. y J.F. Lowe, The Economics of Pollution Control in the Non-Ferrous Metals Industry, Pergamon Press, 1979.

Cuadro 5.2

Costes del control para algunas plantas tipo en la industria de fundición primaria de plomo de los Estados Unidos

Tamaño tipo (toneladas)	Inversión prevista (m. de \$EE.UU.)	Inversión		Coste anual previsto (m. de \$EE.UU.)			Coste previsto por tonelada de capacidad actual		
		mín.	máx.	mín.	máx.		mín.	máx.	
107,000	8,9	4,3	12,5	2,1	1,0	3,0	17,8	8,8	26,3
131,000	9,9	5,1	13,8	2,5	1,2	3,4	17,4	8,3	23,6

Fuente: Atkins, M.H. y J.F. Lowe, The Economics of Pollution Control in the Non-Ferrous Metals Industry, Pergamon Press, 1979.

Se estima que los costes serían mucho más reducidos en el caso de los hornos de segunda fusión, por cuanto esas instalaciones reúnen condiciones mucho más favorables desde el punto de vista ambiental. Las cifras correspondientes se facilitan en el cuadro 5.3.

Cuadro 5.3

Costes del control para algunas plantas de segunda fusión de plomo

Toneladas/día tipo	Inversión prevista (miles de \$EE.UU.)	Inversión		Coste anual previsto (miles de \$EE.UU.)			Coste unitario previsto por tonelada/día de capacidad		
		mín.	máx.	mín.	máx.		mín.	máx.	
109	305	171	434	68,9	26,3	108,1	0,63	0,24	0,99
54	148	79	218	34,3	11,3	54,4	0,64	0,21	0,99
15,8	59	37	82	15,3	9,3	21,7	0,97	0,59	1,31

Fuente: Atkins, M.H. y J.F. Lowe, The Economics of Pollution Control in the Non-Ferrous Metals Industry, Pergamon Press, 1979.

En un estudio llevado a cabo por Charles River Associates y la Research Corporation of New England para la Asociación de Empresas de Producción de Plomo se calculaban los efectos de las nuevas normas sobre calidad del aire promulgadas por la EPA en 1978 para la industria del plomo 64/. Se estimaba que el intento de ajustarse a la norma de la EPA de 1,5 microg/m³ (90 días de promedio) para la concentración de plomo en el aire sería ruinoso desde el punto de vista económico.

Cuadro 5.4

Efectos que se derivarían del cumplimiento de la norma de la EPA sobre concentración de plomo en el aire ambiente

Sector de la industria	Costes (\$ EE.UU.)		Cierres de plantas
	Capital	Anual	
Fundición de primera fusión	190 millones	35 millones	Las siete
Fundición de segunda fusión	285 millones	60 millones	40 de 50 (pérdida de capacidad del 90%)

Fuente: "Lead-Zinc-Tin '80", Simposio mundial sobre metalurgia y control del medio ambiente de TMS-AIME, J. Cole: United States Environmental Laws and Regulations as Applied to the Lead and Zinc Industries, AIME, New York, 1979.

5.4 Normas para emisiones

Las directrices del Banco Mundial sobre concentraciones de contaminantes en los efluentes gaseosos producidos por hornos de fusión de plomo son las siguientes 65/:

64/ "Lead-Zinc-Tin '80", Simposio mundial sobre metalurgia y control del medio ambiente de TMS-AIME, J. Cole: United States Environmental Laws and Regulations as Applied to the Lead and Zinc Industries, AIME, Nueva York, 1979.

65/ Environmental Guidelines, Oficina de Asuntos Ambientales, Banco Mundial, julio de 1984.

Cuadro 5.5

Límites provisionales para fundiciones de plomo

Dióxido de azufre

Dentro del recinto de la planta	Media aritmética anual	100 micro/m ³
	Punta máxima por 24 horas	1,000 micro/m ³
Fuera del recinto de la planta	Media aritmética anual	100 micro/m ³
	Punta máxima por 24 horas	500 micro/m ³

Partículas

Media geométrica anual	75 micro/m ³
Punta máxima por 24 horas	260 micro/m ³

Arsénico (en forma de As)

Dentro del recinto de la planta	Media por 24 horas	0,006 mg/m ³
Fuera del recinto de la planta	Media por 24 horas	0,003 mg/m ³

Cadmio (en forma de Cd)

Dentro del recinto de la planta	Media por 24 horas	0,006 mg/m ³
Fuera del recinto de la planta	Media por 24 horas	0,003 mg/m ³

Plomo (en forma de Pb)

Dentro del recinto de la planta	Media por 24 horas	0,008 mg/m ³
Fuera del recinto de la planta	Media por 24 horas	0,004 mg/m ³

Fuente: Environmental Guidelines, Oficina de Asuntos Ambientales, Banco Mundial, julio 1984.

Los límites establecidos en el Reino Unido dependen del tamaño de la planta, y por consiguiente de la cantidad de gases emitida. Se establecen tres categorías: los límites correspondientes se facilitan en el cuadro 5.6 66/.

66/ "Lead-Zinc-Tin '80", Simposio mundial sobre metalurgia y control del medio ambiente de TMS-AIME, A. Barbour: European Economic Community Laws and Regulations as Applied to the Lead and Zinc Industries, AIME, Nueva York, 1979.

Cuadro 5.6

Umbral de contaminación del aire para fundiciones de plomo, Reino Unido

Categoría de la fundición	Volumen de gas		Concentración en cada chimenea*		Volumen total de emisión*	
	pc/min.	m ³ /min.	granos/pc	g/m ³	lbs/hora	kg/hora
Categoría I	>7.000	200	0,05	0,115	0,6	0,27
Categoría II	7.000-140.000	200-4.000	0,01	0,023	6,0	2,7
Categoría III	>140.000	>4.000	0,005	0,0115	12,0	5,4

* De plomo elemental

Fuente: "Lead-Zinc-Tin '80", Simposio mundial sobre metalurgia y control del medio ambiente de TMS-AIME, A. Barbour: European Economic Community Laws and Regulations as Applied to the Lead and Zinc Industries, AIME, Nueva York, 1979.

Las directrices del Banco Mundial sobre concentraciones de contaminantes en efluentes líquidos para hornos de primera fusión de plomo son las siguientes 67/:

Cuadro 5.7

Directrices sobre contaminantes admisibles del agua de una fundición de plomo de primera fusión (kg/ton de producto)

	Punta máxima por 24 horas	Promedio de 30 días consecutivos
TSS	4,2 x 10 ⁻²	2,1 x 10 ⁻²
Cd	8,0 x 10 ⁻⁴	4,0 x 10 ⁻⁴
Pb	8,0 x 10 ⁻⁴	4,0 x 10 ⁻⁴
Zn	8,0 x 10 ⁻³	4,0 x 10 ⁻³
pH	6-9 unidades	6-9 unidades

Fuente: Environmental Guidelines, Oficina de Asuntos Ambientales, Banco Mundial, julio de 1984.

67/ Environmental Guidelines, Oficina de Asuntos Ambientales, Banco Mundial, julio de 1984.

Respecto de las fundiciones de plomo de segunda fusión, las cifras correspondientes son las siguientes:

Cuadro 5.8

Directrices sobre contaminantes admisibles en el agua de una fundición de plomo de segunda fusión (kg/ton de producto)

	Punta máxima por 24 horas	Media de 30 días consecutivos
TSS	5×10^{-2}	$2,5 \times 10^{-2}$
Cd	4×10^{-5}	$2,0 \times 10^{-5}$
Pb	1×10^{-3}	$0,5 \times 10^{-3}$
As	1×10^{-4}	$0,5 \times 10^{-4}$
pH	6-9 unidades	6-9 unidades

Fuente: Environmental Guidelines, Oficina de Asuntos Ambientales, Banco Mundial, julio de 1984.

5.5 Protección de la salud de los trabajadores

Se sabe que el plomo produce intoxicaciones agudas y a largo plazo, sobre todo en los trabajadores de esa industria. Las mayores posibilidades de exposición peligrosa corresponden a las operaciones de fundición y refinado. En los últimos años ha disminuido sensiblemente la intoxicación por plomo entre los trabajadores de esas instalaciones debido a la aplicación de procedimientos más seguros de manipulación, a una mayor protección de los trabajadores en el lugar de trabajo, y a la automatización, que ha reducido la necesidad de la presencia de los trabajadores en algunas fases de la producción.

La intoxicación por plomo se produce mediante inhalación, ingestión o absorción cutánea. Por término medio, el 30 + 10% del plomo inhalado es absorbido por el organismo. Se absorbe también entre el 5 y el 10% del plomo ingerido 68/. El plomo metabolizado puede provocar efectos a largo plazo, ya que, según se admite generalmente, su período de semidesintegración biológica dura más de 10 años 69/. El plomo afecta especialmente al sistema nervioso.

68/ "Environmental Health Aspects of Non-Ferrous Metals: Cadmium, Copper, Lead, Nickel and Zinc", Seminario del PNUMA sobre los aspectos ambientales de la industria de los metales no ferrosos, OMS, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

69/ "Lead", Environmental Health Criteria 3, OMS, Ginebra, 1977.

Puede establecerse una relación entre la concentración de plomo en la sangre y diversos efectos para la salud. El nivel en el que no se detectan efectos se sitúa actualmente para la neuropatía subclínica entre los 40 y 50 microg/100 ml. Con una concentración de 60-70 microg/100 ml comienzan a registrarse disfunciones cerebrales apreciables. Para evaluar los efectos sobre la salud puede ser útil el siguiente criterio de orientación: tomando como medida de absorción del plomo la cantidad de plomo en sangre, la exposición continua a 1 microg/m³ de plomo en el aire significaría entre 1 y 2 microg/100 ml de plomo en sangre 70/. De ahí que el límite de exposición profesional al plomo en suspensión en el aire sea bastante bajo en la mayor parte de los países. En el cuadro 5.8 se recogen algunos de esos valores 71/.

Cuadro 5.9

Umbrales de exposición profesional a sustancias tóxicas en suspensión en el aire

					EE.UU.		ACGIH Corto plazo
	Rep. Fed. de Alemania	Japón	Suecia	URSS	Norma pro- fesional	TWA	
Plomo y compuestos inorgánicos, mg/m ³	0,2	0,15	0,1	0,01	0,2	0,15	0,45

Fuente: OIT, Serie de Seguridad, Higiene y Medicina del Trabajo, Núm. 37, Ginebra, 1977.

Sin embargo, los riesgos para los trabajadores pueden ser graves. Por ejemplo, se midió la concentración de plomo en el aire en el curso de diversas operaciones en un horno normal de fundición de mineral de plomo en Salt Lake City, Utah, (Estados Unidos). Los datos de esa medición se recogen en el cuadro 5.10 72/. Dichos datos indican claramente que las concentraciones de plomo eran enormemente altas, con riesgo potencial para la salud de los trabajadores, quienes, de hecho, tenían que usar mascarillas de respiración.

70/ "Lead, Executive Summary", Environmental Health Criteria 3, OMS, Ginebra, 1983.

71/ "Environmental Health Aspects of Non-Ferrous Metals: Cadmium, Copper, Lead, Nickel and Zinc", Seminario del PNUMA sobre los aspectos ambientales de la industria de los metales no ferrosos, OMS, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

72/ "Lead", Environmental Health Criteria 3, OMS, Ginebra, 1977.

Cuadro 5.10

Concentración de plomo en el aire en tres hornos
de fundición de plomo de primera fusión
(micro/m³) a/

Horno de fusión	Año	Identificación <u>b/</u>	Media <u>c/</u>	Promedio de las medias	Escala (todos los valores)
A	1972-75	(1)	610, 1930, 2860	1800	250-3670
		(2)	970, 470, 450	630	250-1380
		(3)	860, 950, 320	710	200-1700
		(4)	1220, 350, 950	840	260-1640
B	1973-74	(1)	1310, 2330, 4720	2790	370-5160
		(2)	2740, 3460, 770	2320	310-7570
		(3)	860, 140, 530	510	120-1560
		(4)	1270, 540, 5730, 4050	2900	60-7220
C	1973-74	(1)	--	--	--
		(2)	3850, 8740, 830	4470	10-31 200
		(3)	1320, 230	780	90-1340
		(4)	80	80	

a/ Datos facilitados por M. Varner, American Smelting and Refining Co., Salt Lake City, Utah, Estados Unidos.

b/ Identificación: 1) dosificación del mineral; 2) nodulización y sinterización; 3) alto horno; 4) espumado y reverberación.

c/ Determinadas utilizando detectores personales en diversas ocasiones. La duración de cada período de toma de muestras osciló entre 5 y 7 horas.

Fuente: "Lead", Environmental Health Criteria 3, OMS, Ginebra, 1977.

No se dispone de datos análogos respecto de hornos de segunda fusión, pero de algunos estudios se desprende que los trabajadores están efectivamente expuestos a elevadas concentraciones de plomo en el aire, que dan lugar a cantidades cada vez mayores de plomo en sangre.

6. ZINC

6.1 Tecnologías para el control de la contaminación en las plantas de producción de zinc

6.1.1 Control de la contaminación durante la extracción

En esa fase, el principal problema consiste en el tratamiento y la evacuación del agua de la mina, lodosa y contaminada por partículas cuya densidad y grado pueden variar en gran medida. Habida cuenta de que ese agua suele ser ácida, es posible aumentar su pH añadiéndole piedra caliza, lo que resulta especialmente útil si se pretende reutilizar el agua en la planta de tratamiento del mineral, ya que la operación de flotación de minerales de zinc y de plomo y zinc se suele efectuar con índices de acidez elevados (entre 8,5 y 11). Sin embargo, en ese caso hay que eliminar antes las materias sólidas en suspensión. El agua que no se pueda regenerar se puede eliminar después de tratada.

La mina de Tochibora constituye un interesante ejemplo de esa tecnología. Como la roca de la que se obtiene inicialmente el plomo/zinc tiene gran contenido de caliza, el índice de acidez del agua freática se sitúa ya de por sí en la escala alcalina (7-8). Además, esa agua contiene pocos iones disueltos. Tras eliminar las materias sólidas en suspensión se pueden utilizar las aguas residuales de la mina como agua para la industria en la cercana planta de producción de plomo y zinc de Shikama. La mina de Tochibora abastece en un 60% aproximadamente a la planta de Shikama 73/.

6.1.2 Control de la contaminación durante el tratamiento del mineral

El desprendimiento de polvo durante las operaciones de trituración se puede reducir humedeciendo el mineral y cubriendo el equipo de trituración. Un problema mucho más grave que se plantea en las operaciones de tratamiento del mineral es el de la evacuación de las colas y del agua de las operaciones de flotación. Se hace pasar primero el fango de lavado a los tanques de sedimentación, en los que se sedimentan los materiales sólidos, que a continuación se vierten en forma de fango denso a lagunas o zonas de embalsamiento. El líquido sobrante del tanque de sedimentación se puede reutilizar en operaciones de flotación simultánea, y también se pueden aprovechar los sobrantes de otras operaciones de flotación/sedimentación. Pero hay que eliminar cierta cantidad de impurezas nocivas, principalmente agentes de flotación, que contienen esos líquidos. Existen procedimientos para eliminar esos contaminantes. Por ejemplo, en el procedimiento de flotación mediante ionización, precipitación y partículas ultrafinas (IPU) se añade ácido sulfúrico, sulfuro sódico, acofloc (un producto floculante) e isobutilmetilcetona para sedimentar las impurezas, que se separan a continuación mediante filtración. El agua se puede regenerar. Ese procedimiento se ha utilizado en la planta de Shikama, dando lugar a una mejora sensible de la calidad de los efluentes, a economías sustanciales en

^{73/} Matsui, N., "Pollution Preventive Measures in a Lead-Zinc Mine in Japan", PNUMA, Industry and Environment, Vol. 8, No. 1, enero, febrero, marzo de 1985.

reactivos de flotación, y a una recuperación complementaria de zinc e incluso de cobre (como subproducto) contenido en las aguas residuales 74/.

6.1.3 Control de la contaminación durante la fusión

Control de la contaminación durante el proceso electrolítico de tostación

Durante la fase de tostación el principal riesgo para el medio ambiente procede de los gases de escape del horno de tostación, que contienen SO₂, polvo y humos, así como vapores de metales pesados como mercurio, cadmio y arsénico (presentes inicialmente en el concentrado). En plantas relativamente modernas se utiliza una caldera de recuperación térmica para recuperar energía y enfriar los gases de escape del horno de tostación. Seguidamente se eliminan el polvo y los humos haciendo pasar los gases por extractores de polvo y a continuación, para su eliminación de forma más completa, por un precipitador electrostático. En las plantas más antiguas, que utilizan hornos de tostación de escasa eficacia (como los hornos de tostación de varias soleras), la concentración de SO₂ en los gases es demasiado débil para que éstos puedan ser eliminados, y se hacen pasar directamente a una chimenea. En las plantas modernas, en las que se utilizan tostadores de lecho fluidizado, el contenido de SO₂ puede llegar a ser del 9,5%, como en la nueva (1979) planta de Jersey Miniere Zinc Company en Clarksville, Tennessee (Estados Unidos) 75/, lo que hace posible su transformación rentable en ácido sulfúrico.

Antes de proceder a la eliminación del SO₂, es necesario depurar los gases de escape del precipitador electrostático de los metales pesados contenidos en ellos. Se lavan primero los gases en lavadores Venturi y se les hace pasar a continuación a una torre de eliminación de mercurio de Boliden-Norzink, en la que fluye, en sentido inverso a la corriente, una solución de cloruro de mercurio. El mercurio presente en el gas reacciona con la solución formando cloruro de mercurio, que se precipita y se elimina posteriormente mediante flotación. La corriente de gas depurada de metales pesados puede regenerarse en una planta para ácido sulfúrico, en la que se transforma en H₂SO₄. Los gases lavados se disipan por lo general a través de una chimenea.

En la segunda parte del proceso, los posibles riesgos para el medio ambiente provienen principalmente de la lixiviación del zinc. El residuo de lixiviación que se produce en el curso de esa operación contiene todos los materiales sólidos insolubles presentes en el calcinado y cierta cantidad de electrolito en disolución. El residuo se recoge en el fondo de los tanques de sedimentación en forma de fango, después de la floculación. Se trata con cal para eliminar el exceso de acidez, se lava y se filtra. La masa del residuo de lixiviación ácido lavado se vierte a una laguna o zona de embalsamiento. La presencia de residuos de metales pesados agrava los problemas ambientales.

74/ Ibid.

75/ "Lead-Zinc-Tin 80", Simposio mundial sobre metalurgia y control del medio ambiente TMS-AIME, L. Painter: The Electrolytic Zinc Plant of Jersey Miniere Zinc Company at Clarksville, Tennessee, AIME, Nueva York, 1979.

Control de la contaminación durante el proceso pirometalúrgico

En principio, la operación de tostación es análoga a la que se lleva a cabo en el proceso electrolítico, y en consecuencia, plantea el mismo tipo de problemas ambientales. Sin embargo, en el proceso pirometalúrgico, la fase de tostación es también una fase de sinterización, lo que significa que el producto final no sólo debe estar plenamente calcinado, sino tener también un tamaño mínimo de grano para cumplir las condiciones necesarias para la siguiente fase de reducción, lo que implica la necesidad de reutilizar en forma de polvo el 80% aproximadamente del producto del aparato de sinterización 76/. En consecuencia, además de utilizar el procedimiento habitual de depuración del gas de escape, es necesario extraer y depurar de polvo una gran cantidad de aire de ventilación. A tal fin se pueden emplear filtros de bolsa, ciclones o lavadores Venturi 77/. A continuación deberían tratarse los gases de escape para eliminar de ellos los metales pesados antes de enviarlos a la planta de ácido sulfúrico con objeto de eliminar el SO₂.

Los problemas ambientales vinculados a la siguiente fase, la de la reducción por sinterizado, dependen en gran medida del tipo de equipo que se utilice. El proceso de fusión "Imperial" es mucho más inocuo desde el punto de vista ambiental que las retortas horizontales. Los gases con zinc producidos durante la fase de reducción se recuperan casi completamente por el rotor de salpicaduras de plomo. Los vapores de zinc desprendidos se condensan haciendo pasar los gases a través de lavadores de gases por vía húmeda. En el curso de esa operación se eliminan también los demás metales pesados, con lo que se pueden ya disipar los gases.

El licor obtenido del lavador de gases contiene los metales pesados de aquéllos. Añadiendo cal al licor, esos metales se precipitan, se sedimentan en tanques de sedimentación, se desecan y se recuperan. El licor se reutiliza en su mayor parte en el lavador de gases. Solamente parte de él se elimina después del tratamiento. La escoria generada al emplear ese procedimiento, una vez granulada, se vierte en depósitos o utiliza como material inerte para hormigón.

6.1.4 Control de la contaminación durante la refinación del zinc

En esa fase, el principal riesgo para el medio ambiente consiste en las posibles emisiones de humo con metales pesados, especialmente cadmio. Siempre que exista un sistema adecuado de captación de humos, se eliminan los metales pesados empleando lavadores de gases, de la forma descrita en el apartado anterior.

6.1.5 Control de la contaminación durante el proceso hidrometalúrgico

Lo mismo que en el caso del proceso electrolítico, la eliminación del fango después de la lixiviación constituye un posible problema para el medio ambiente. La regeneración reduce al mínimo la producción de efluentes. Los

76/ Atkins, M.H. and J.F. Lowe, "The Economics of Pollution Control in the Non-Ferrous Metals Industry", Pergamon Press, 1979.

77/ "Processes, Procedures, and Methods to Control Pollution from Mining Activities", Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Medio Ambiente, EPA-430/9-73-011, Washington, D.C., octubre de 1973.

efluentes se tratan para eliminar los metales pesados antes de la descarga. El fango se puede embalsar en zonas destinadas al efecto, en las que no se puedan producir escapes.

6.2 Readaptación de plantas existentes para reducir la contaminación

Resulta difícil aplicar medidas correctivas en las plantas que utilizan tecnologías de producción desfasadas o más antiguas. Esas plantas, que pueden adolecer también de una débil rentabilidad y elevado coste de producción están condenadas a desaparecer gradualmente en el curso del tiempo. Así por ejemplo, en los Estados Unidos, entre 1969 y 1978 dejaron de funcionar seis de los ocho hornos de fundición, de zinc de primera fusión en los que se empleaban procedimientos de fusión en retortas horizontales o verticales. De las dos restantes, una incorporó el tratamiento electrolítico y la otra seguía aún funcionando en 1979.

La innovación tecnológica, al menos en algunos sectores de la planta, puede resultar beneficiosa tanto desde el punto de vista económico como del ambiental. Por ejemplo, los modernos hornos de tostación no sólo no necesitan para funcionar combustible suplementario, sino que generan también corrientes con abundante contenido de SO₂ susceptibles de una transformación mucho más rentable en ácido sulfúrico. Actualmente existen tecnologías que permiten controlar las emisiones de metales pesados, especialmente las de mercurio. Se ha comprobado que el funcionamiento de las columnas de Boliden-Norzink es muy satisfactorio. En la fusión pirometalúrgica, el proceso es ya ambientalmente inocuo siempre que se utilicen dispositivos de control de la contaminación para regular las emisiones finales de gases. Pueden también adaptarse a plantas existentes otros dispositivos de control de la contaminación independientes del horno.

6.3 Costes del control de la contaminación

Una publicación de la Agencia de los Estados Unidos para la protección del medio ambiente (EPA) sobre la situación en ese país constituye una importante fuente de información acerca de los costes del control de la contaminación en la industria del zinc 78/. La EPA calculó que en 1971 el conjunto de los hornos de fundición de zinc de primera fusión de los Estados Unidos (que producían más de un millón de toneladas al año) emitían 263.000 toneladas de SO₂ y 18.600 toneladas de partículas. En esa fecha no existía ningún control de la emisión de SO₂, y solamente se recogían el 90% de las partículas producidas en la operación de fusión antes de la descarga del gas de escape en la atmósfera. La EPA preveía que en 1979 las cifras correspondientes ascenderían respectivamente a 1.900 toneladas de SO₂ y 31.000 toneladas de partículas, gracias a la adopción de las tecnologías de control. Se calculaba que las inversiones correspondientes alcanzaban un coste de 32,4 millones de dólares EE.UU., con costes operativos anuales por un valor total de 8,15 millones de dólares EE.UU. (a precios de 1974). En el cuadro 6.1 se reproducen datos más detallados respecto de plantas de diferente tamaño 79/.

78/ Atkins, M.H. y J.F. Lowe, "The Economics of Pollution Control in the Non-Ferrous Metals Industry", Pergamon Press, 1979.

79/ Ibid.

Cuadro 6.1

Costes del control de la contaminación de instalaciones primarias de producción de zinc de los Estados Unidos

Tamaño tipo (tonelada)	Inversión (millones de dólares EE.UU.) prevista			Coste operativo anual (millones de dólares EE.UU.) previsto			Dólares EE.UU./ ton/año previstos	Coste unitario	
	min	max		min	max			min	max
91.000	8,67	6,66	11,1	2,17	1,65	2,77	23,8	18,1	30,4
139.000	11,6	8,82	15,0	2,91	2,23	3,76	20,9	16,0	27,1
149.000	12,2	9,42	15,6	3,09	2,37	3,97	22,2	17,1	28,6

Fuente: The Cost of Clean Air, Agencia para la Protección del Medio Ambiente, Documento del Senado No. 93-122, 1974.

En el cuadro 6.2 se facilitan los costes estimados de inversión en plantas de diverso tamaño de la industria secundaria de producción de zinc.

Cuadro 6.2

Costes del control de la contaminación en empresas de producción secundaria de zinc en los Estados Unidos

Tamaño tipo capacidad (toneladas)	Inversión (miles de dólares EE.UU.) prevista			Coste anual (miles de dólares EE.UU.) previsto			Coste unitario (dólares EE.UU./ ton/año)		
	min	max		min	max		min	max	
4.990	138	80,4	195	43,2	22,5	64,4	7,85	4,09	11,7
10.990	225	131	345	12,3	386	113	6,03	3,22	9,42

Fuente: The Cost of Clean Air, Agencia para la Protección del Medio Ambiente, Documento del Senado No. 93-122, 1974.

6.4 Normas para emisiones

Conforme a lo indicado 80/, los límites máximos admisibles para las emisiones en la atmósfera procedentes de plantas de zinc son las mismas que para las procedentes de plantas de plomo. Esas normas se han facilitado ya en el apartado 5.10 del capítulo relativo al plomo. En el cuadro 6.3 81/ se indican los límites fijados por la Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Medio Ambiente en relación con las normas para efluentes líquidos. En el cuadro 6.4 se reflejan las normas para plantas de producción primaria de zinc en kilogramos de contaminante por tonelada de metal producido.

Cuadro 6.3

Directrices sobre contaminantes del agua admisibles
originados por un horno de fundición de zinc
de primera fusión (mg/l)

	<u>Concentración (mg/l) en el efluente</u>	
	<u>promedio de 30 días</u>	<u>máximo en 24 horas</u>
pH	6-9 unidades	6-9 unidades
TSS	20	30
Cianuro	0,01	0,02
Cd	0,05	0,1
Cu	0,05	0,1
Hg	0,001	0,002
Pb	0,2	0,4
Zn	0,2	0,4

Fuente: "Development Document for Interim Final and Proposed Effluent Limitations Guidelines and New Source Performance Standards for the Ore Mining and Dressing Industry", Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Medio Ambiente, EPA-440/1-75/061, Vol. I y II, Washington, D.C., octubre de 1975.

80/ "Development Document for Interim, Final and Proposed Effluent Limitations Guidelines and New Source Performance Standards for the Ore Mining and Dressing Industry", Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Medio Ambiente, EPA-440/1-75/061, Vol. I y II, Washington, D.C., octubre de 1975.

81/ "Processes, Procedures, and Methods to Control Pollution from Mining Activities", Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Medio Ambiente, EPA-430/9-73-011, Washington, D.C., octubre de 1973.

Cuadro 6.4

Directrices sobre contaminantes de agua admisibles
originados por un horno de fundición de zinc
de primera fusión (kg/ton de zinc)

	Máximo en 24 horas	Promedio de 30 días consecutivos
TSS	0,42	0,21
As	$1,6 \times 10^{-3}$	8×10^{-4}
Cd	$8,0 \times 10^{-3}$	4×10^{-4}
Se	0,08	0,04
Zn	0,08	0,04
pH	6-9 unidades	6-9 unidades

Fuente: "Environmental Guidelines", Oficina de Asuntos Ambientales, Banco Mundial, julio de 1984.

6.5 Protección de la salud de los trabajadores

El zinc se puede considerar relativamente no tóxico. La intoxicación más corriente de los trabajadores por zinc se produce por inhalación de humos durante operaciones como la fundición, la galvanización u otras en las que el zinc se calienta a elevada temperatura. La intoxicación provoca trastornos que se conocen con el nombre de fiebre del humo de los metales, y de los que el trabajador se recupera por regla general en un lapso de 24 a 36 horas. Se ha comprobado que la exposición profesional entre 2 y 35 años a humos de óxido de zinc dentro de la escala de 3 a 15 mg/m³ no produce efectos perjudiciales 82/. En algunos lugares de trabajo se han registrado concentraciones de hasta 100 mg/m³ y mayores 83/. Deberían ventilarse suficientemente para reducir la exposición a valores inferiores al límite de exposición profesional adoptado en cada país. En el cuadro 6.5 se recogen algunos valores.

82/ Límites de exposición profesional a sustancias tóxicas en suspensión en el aire, OIT, Serie de Higiene, Seguridad y Medicina en el Trabajo, No. 37, Ginebra, 1977.

83/ Ibid.

Cuadro 6.5

Límites de exposición profesional para zinc en suspensión en el aire, mg/m³

	República Federal de Alemania	Japón	Suecia	URSS	USA		ACGIH corto plazo
					Norma profesional	TWA	
Cloruro de zinc (humos)			1		1	1	2
Oxido de zinc (humos)	5	5	1	6	5	5	10

Fuente: Occupational Exposure Limits for Airborne Toxic Substances, OIT, Serie de Higiene, Seguridad y Medicina en el Trabajo, No. 37, Ginebra, 1977.

La exposición al cadmio, un subproducto de la fabricación de zinc, puede producir efectos tóxicos más graves en los trabajadores. El cadmio puede provocar efectos a corto y largo plazo, sobre todo en pulmones y riñones. La exposición durante ocho horas a un aire con 5 mg/m³ puede tener efectos letales ^{84/}. La exposición a un contenido de 1 mg/m³ de cadmio en el aire puede tener efectos tóxicos. Por esa razón, los umbrales de exposición profesional adoptados en muchos países son bastante bajos. Esos umbrales se reflejan en el cuadro 6.6.

Cuadro 6.6

Límite de exposición profesional para cadmio en suspensión en el aire, mg/m³

	República Federal de Alemania	Japón	Suecia	URSS	EE.UU.		ACGIH corto plazo
					Norma profesional	TWA	
Polvo y sales solubles de cadmio (cadmio)			0,5			0,5	0,15
Oxido de cadmio (humos de cadmio)	0,1	0,1	0,02	0,1	TWA/M ^a / 0,1/3	M ^a / 0,05	0,05

a/ M = valor máximo.

Fuente: Occupational Exposure Limits for Airborne Toxic Substances, OIT, Serie de Higiene, Seguridad y Medicina en el Trabajo, No. 37, Ginebra, 1977.

84/ Ibid.

7. ESTAÑO

7.1 Tecnologías para el control de la contaminación en las plantas de producción de estaño

7.1.1 Control de la contaminación en la extracción

Debido a la diversidad de tipos y emplazamientos de las minas de estaño, las consecuencias de las operaciones de extracción para el medio ambiente pueden ser de muy diversa índole. La explotación de minas subterráneas de roca dura tiene efectos reducidos en comparación con la explotación de minas a cielo abierto. Los problemas que plantean estas últimas son, sobre todo, la generación de polvo en las operaciones de voladura y movimiento de tierras y la deforestación. Se pueden eludir en parte esos problemas rociando con agua las zonas donde se levanta polvo, y aplicando un programa adecuado para bonificar las tierras y volverlas a cubrir de vegetación.

La extracción de estaño en terrenos de aluvión plantea problemas más graves, sobre todo en Asia sudoriental, región en la que el uso de la tierra se divide entre la explotación minera y otras actividades como la agricultura, la silvicultura y la ganadería. Hasta ahora no se ha procedido a una explotación agrícola en gran escala de las zonas mineras. En principio, se pueden volver a meter las colas en las minas y comenzar inmediatamente a fertilizar la tierra y cubrirla de nuevo de vegetación (a este efecto, las leguminosas brindan excelentes posibilidades) con la consiguiente bonificación plena de las zonas mineras. Un obstáculo importante para ese objetivo estriba en el hecho de que los terrenos de aluvión nunca están completamente explotados, y se pueden volver a explotar en diversos períodos, en función de las fluctuaciones del precio del estaño y de la oferta mundial de ese mineral 85/.

7.1.2 Control de la contaminación durante el tratamiento del mineral

En el caso de los depósitos aluviales de estaño, la separación del mineral de casiterita de la ganga es una operación meramente física que no plantea grandes problemas de contaminación química. Pero hay que eliminar una gran cantidad de colas, lo que produce un cuadro horrososo de montones de desechos, zonas de colas y ríos fangosos. Aunque no es posible resolver plenamente el problema, éste se puede mitigar con un plan adecuado de utilización y ordenación de las tierras, unido a programas de explotación agrícola.

La evacuación de las colas es también el principal problema que se plantea durante el tratamiento del mineral de roca dura. Además de recurrir a la separación por gravedad, se puede a veces tratar el mineral por flotación de la ganga. En tal caso, las aguas residuales no sólo contienen gran cantidad de materiales sólidos en suspensión, sino que a veces pueden estar contaminadas por agentes químicos. Por consiguiente se debería regenerar el agua, añadiendo además cal al excedente para neutralizar las sustancias químicas disueltas, potencialmente peligrosas, antes de descargarla en el medio ambiente.

85/ "Lead-Zinc-Tin '80", Simposio mundial sobre metalurgia y control del medio ambiente, TMS-AIME, J. Harris: The Problems of Tin, AIME, Nueva York, 1979.

7.1.3 Control de la contaminación durante la fusión de concentrados de estaño de alta ley

Los gases que se producen en el horno de fusión del concentrado y en el horno de fusión de la escoria contienen grandes cantidades de polvo (entre 50 y 150 g/Nm³ de gas en la fusión eléctrica) ^{86/}. La refrigeración de esos gases se realiza con agua fría, o bien haciéndolos pasar a través de calderas de recuperación. A continuación se hacen pasar a dispositivos de captación de polvo, por lo general lavadores de polvo por vía húmeda de Venturi o cámaras de filtros de bolsas pluricompartimentadas, en donde se elimina la mayor parte del polvo. La eliminación de los últimos restos de polvo se puede efectuar mediante precipitadores electrostáticos. Se ha comprobado que, tradicionalmente, en los hornos de fusión de estaño la emisión de partículas en el gas de escape es muy pequeña. De hecho, el polvo contiene una gran parte de todo el estaño tratado (que asciende hasta el 10% de la carga de ambos hornos) que puede ser adecuadamente recuperada y regenerada.

Los gases de escape del horno de fusión son también ricos en CO y H₂, debido a la necesidad de mantener en todo momento una atmósfera reductora en el horno. En consecuencia, se encienden los gases en vez de limitarse a expulsarlos a través de una chimenea. En función de la composición de la carga, los gases pueden contener también diversas cantidades de SO₂. En la mayoría de los casos, su concentración es demasiado débil para su conversión en ácido sulfúrico, y el SO₂ se expulsa al ambiente.

7.1.4 Control de la contaminación durante la fusión de concentrados de estaño de baja ley

El tratamiento de mineral de baja ley significa a menudo el tratamiento de mineral de roca dura con gran cantidad de piritas. En consecuencia, la mayor parte del azufre que contienen éstas se libera durante la operación previa de tostación. Cuando se utilizan hornos de tostación de varias soleras, el SO₂ generado no es susceptible de transformación en ácido sulfúrico, lo que puede provocar los problemas ambientales vinculados habitualmente a las emisiones de SO₂. Solamente utilizando un horno de tostación de diseño moderno o mediante el ahumado del mineral se pueden obtener concentraciones más elevadas de SO₂, en cuyo caso es posible utilizar eficazmente las plantas para conversión en H₂SO₄.

La operación de lixiviación, unida frecuentemente a la tostación, puede dar lugar a la contaminación del licor de lixiviación por elementos tales como arsénico, plomo y bismuto. Esos elementos se recuperan del licor mediante su precipitación con cal y se regeneran a continuación. Los problemas ambientales y las tecnologías de control en la operación de fusión son análogos a los expuestos en el apartado anterior. La operación de ahumado de la escoria es también una fuente potencial de emisiones. Los humos y polvos generados tienen un elevado valor económico, debido al metal que contienen (aproximadamente un 50% de estaño). El gas de escape puede contener también

^{86/} "Lead-Zinc-Tin '80", Simposio mundial sobre metalurgia y control del medio ambiente, TMS-AIME, F. Oberbeckmann y M. Porten: Tin Smelting at Berzelius, Duisburg, AIME, Nueva York, 1979.

cantidades recuperables de SO₂ (p. ej. un 8% en el moderno tipo SIROSMELT de honors) 87/ que se pueden regenerar en plantas para la conversión en ácido sulfúrico.

7.1.5 Control de la contaminación durante la refinación del estaño en bruto

En la mayoría de las operaciones de refinación de estaño, los riesgos ambientales son mínimos. Una excepción significativa es la eliminación del arsénico mediante aluminio. Aunque para que se forme arsina es necesario que el AlAs generado entre en contacto con el agua, muchos hornos de fusión utilizan preferentemente en la actualidad sodio en vez de aluminio en esa operación, lo que permite excluir cualquier posibilidad de accidente. En la electrólisis ácida, el baño electrolítico contiene fenol o ácidos sulfúrico-cresólicos que pueden dar lugar, en principio, a emisiones y humos peligrosos. El empleo de bajas temperaturas y una adecuada ventilación reducen el problema a sus mínimas dimensiones. Si se usan baños alcalinos, el proceso resulta más eficiente, puesto que es admisible un mayor grado de impureza del estaño en bruto. En cambio, la electrólisis se debe realizar a una temperatura de 80°C y las emisiones pueden plantear problemas más graves. En ese caso se precisa una ventilación adecuada y el empleo de sombreretes en las chimeneas.

7.2 Readaptación de plantas existentes para reducir la contaminación

Las plantas de tratamiento de concentrados de alta ley presentan pocos problemas de emisión, puesto que casi el 100% del polvo y de los humos se recupera ya para reutilizar el estaño que contienen. Además, las emisiones de SO₂ suelen ser muy bajas. Las plantas de tratamientos de concentrados de estaño de baja ley (en las que el metal se obtiene del tratamiento del mineral) se han enfrentado con la necesidad de incrementar su productividad y reducir la cantidad de material residual desechado. Debido a la escasa rentabilidad del tratamiento del concentrado de mineral de casiterita por los métodos tradicionales, se ha tendido a readaptar las plantas existentes dotándolas de hornos de ahumado de concentrado de estaño que pueden producir un concentrado de calidad media (del 40 al 50% de estaño) con un elevado índice de recuperación (superior al 90%). En cambio, mediante el tratamiento del mineral pueden obtenerse concentrados de calidad algo mayor (aproximadamente el 60% de estaño), pero con índices de recuperación mucho menores (aproximadamente el 50%) 88/, lo que no sólo entraña repercusiones económica sino que afecta también al medio ambiente, por cuanto la cantidad de colas que hay que eliminar es mucho menor. En algunos casos, el ahumado

87/ "Lead-Zinc-Tin '80", Simposio mundial sobre metalurgia y control del medio ambiente, TMS-AIME, K. Foo y J. Floyd: Development of the Matte Fuming Process for Tin Recovery from Sulphide Materials, AIME, Nueva York, 1979.

88/ "Lead-Zinc-Tin '80", Simposio mundial sobre metalurgia y control del medio ambiente, TMS-AIME, T.R.A. Davey: Advances in Lead, Zinc and Tin Technology-Projections for the 1980's, AIME, Nueva York, 1979.

puede llegar a sustituir totalmente al tratamiento del mineral 89/. Una desventaja de ese proceso consiste en la generación de SO₂. Por otra parte, si se utilizan tecnologías adecuadas, la concentración de SO₂ en los gases de salida será lo suficientemente elevada para que resulte posible su conversión en ácido sulfúrico.

7.3 Costes del control de la contaminación

En el caso de los hornos de fusión de estaño, el equipo utilizado para limpiar de polvo los gases de escape se puede considerar indistintamente como maquinaria destinada al control de la contaminación y como equipo de explotación, a causa del valor del estaño contenido en el polvo. En el capítulo relativo al cobre se han facilitado ya datos acerca del coste de los dispositivos de captación de polvo. En el presente capítulo se facilitan también datos sobre el coste de la eliminación del SO₂.

En el cuadro 7.1 se establece una comparación entre las principales características de los diferentes hornos de fusión de estaño. Los datos que figuran en ese cuadro pueden servir para evaluar el rendimiento de cada uno de los tipos de horno, y, en consecuencia, los costes ambientales conexos (sobre la base de una estimación provisional de la importancia de los dispositivos depuradores de los gases y de sus costes de funcionamiento).

7.4 Normas para emisiones

Los tipos de contaminantes liberados por los hornos de fusión de estaño varían según la tecnología utilizada y la concentración de contaminantes en el concentrado de estaño tratado. En el cuadro 7.2 se facilitan los límites para emisiones de gases respecto de algunos de los contaminantes que pueden tener importancia en el caso del estaño (como SO₂, CO, As, Pb y partículas) 90/.

7.5 Protección de la salud de los trabajadores

La inhalación del estaño elemental no produce efectos en el hombre 91/. La exposición prolongada a los polvos y humos de óxidos de estaño puede producir estañosis, una neumoconiosis benigna caracterizada por la presencia de pequeñas sombras en la radiografías de pulmón. Ese trastorno se puede presentar después de una exposición prolongada (durante un período de 3 a 5 años como mínimo), pero no provoca un deterioro de la función pulmonar, siempre que el polvo inhalado no contenga otros agentes, como sílice. En las obras que tratan de esta materia se han descrito más de 200 casos de

89/ "Lead-Zinc-Tin '80", Simposio mundial sobre metalurgia y control del medio ambiente, S. Pearce: Development in the Smelting and Refining of Tin, AIME, Nueva York, 1979.

90/ Environmental Guidelines, Oficina de Asuntos Ambientales, Banco Mundial, julio de 1984.

91/ "Tin and Organotin Compounds", Environmental Health Criteria 15, OMS, Ginebra, 1980.

estañosis 92/, 93/, 94/. La exposición de los trabajadores a los humos de estaño o de óxido de estaño está relacionada fundamentalmente con operaciones como el ensacado del concentrado, la mezcla de los componentes de la carga del horno, la colada del horno, y la limpieza periódica de los filtros de bolsa. Algunas operaciones de refinación pueden dar también lugar a la exposición a los humos de estaño. Se informa que no se han observado casos de estañosis en trabajadores expuestos a concentraciones de polvo de óxido de estaño de 10 mg/m^3 durante 10 años. Sin embargo, se considera que el umbral generalmente admitido de SnO_2 en el medio de trabajo es de 2 mg/m^3 de aire 95/.

Cuadro 7.1

Análisis comparativo de los hornos de reducción de estaño

	Horno rotativo	Horno de reverbero	Horno eléctrico
Tiempo de fusión (h/t de carga)	0,7	0,48	0,48
Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)	1100	1350	1580
Capacidad de producción ($\text{t/m}^2\text{d}$)	1,36	1,0	6,6
Funcionamiento del horno (días/año)	300	300	330
Período refractario (meses)	8	8	36
		2 años, paredes y bóveda	
Combustible (l/h)	200	200	---
Agentes reductores (kg/t metal)	330	370	220
Consumo de energía (kWh/t metal)	208	126,9	1580
Agua de refrigeración (m^3/t metal)	5,88	0,2	18
Recuperación de estaño (porcentaje)	98,5-99,0	99,0	99,5
Gas residual (m^3/t carga)	6500	16.000	250
Polvo, máx. (porcentaje)	10	10	5

Fuente: "Lead-Zinc-Tin '80", Simposio mundial sobre metalurgia y control del medio ambiente, TMS-AIME, F. Oberbeckmann y M. Porten: Tin Smelting at Berzelius, Duisburg, AIME, Nueva York, 1979

92/ Schuler, P., E. Cruz, C. Guijon, V. Maturana, y A. Valenzuela, Stannosis, Benign Pneumoconiosis Owing to Inhalation of Tin Dust and Fume, II, Clinical Study, Ind. Med. Surg., 27:432-435, 1958.

93/ Robertson, A.J. y P.H. Whitaker, Radiological Changes in Pneumoconiosis due to Tin Oxide, J. Fac. Radiol., 6:224-233, 1957.

94/ Pendergrass, E.P. y A.W. Pryde, Benign Pneumoconiosis due to Tin Oxide, J. Ind. Hyg., 30:119-123.

95/ "Tin and Organotin Compounds", Environmental Health Criteria 15, OMS, Ginebra, 1980.

Cuadro 7.2

Directrices sobre niveles de emisión en gases fétidos
de hornos de fusión de estaño

Dióxido de azufre (SO₂)

En el recinto de las instalaciones	Media aritmética anual	100 microg/m ³
	Punta máxima por 24 horas	1000 microg/m ³

Fuera del recinto de las instalaciones	Media aritmética anual	100 microg/m ³
	Punta máxima por 24 horas	500 microg/m ³

Partículas	Media geométrica anual	75 microg/m ³
	Punta máxima por 24 horas	260 microg/m ³

Monóxido de carbono (CO)	Media máxima por 8 horas	10 microg/m ³
	Media máxima por 1 hora	40 microg/m ³

Plomo (en forma de Pb)

En el recinto de las instalaciones	Media por 24 horas	0,008 mg/m ³
------------------------------------	--------------------	-------------------------

Fuera del recinto de las instalaciones	Media por 24 horas	0,004 mg/m ³
--	--------------------	-------------------------

Arsénico (en forma de As)

En el recinto de las instalaciones	Media por 24 horas	0,006 mg/m ³
------------------------------------	--------------------	-------------------------

Fuera del recinto de las instalaciones	Media por 24 horas	0,003 mg/m ³
--	--------------------	-------------------------

Fuente: Environmental Guidelines, Oficina de Asuntos Ambientales, Banco Mundial, julio de 1984.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

a) Las industrias de metales no ferrosos estudiadas en la presente obra constituyen una importante fuente de contaminación ambiental. El alcance de los efectos que producen en el medio ambiente depende en gran medida del tipo de metal tratado, el emplazamiento de la planta y/o de la mina, la tecnología de tratamiento adoptada, y el sistema empleado para controlar la contaminación.

b) Es probable que las actividades de extracción tengan efectos perjudiciales sobre el medio ambiente, sobre todo cuando se desarrollan cerca de zonas pobladas. En el curso del laboreo de minas a cielo abierto el material de montera suele acumularse en vertederos en las proximidades de la mina. En la medida de lo posible ese material se debería reutilizar como relleno o acumular en montones para facilitar la recuperación posterior de la zona de minas y su subsiguiente repoblación forestal.

c) A la explotación de minas a cielo abierto por excavadoras y de terrenos aluviales con estafío, especialmente en Asia sudoriental, deberían seguir inmediatamente operaciones de relleno tendentes a recuperar las zonas mineras a medida que van avanzando las actividades de extracción. Posteriormente, al cabo de algunos años podrían comenzar a cubrirse de nuevo de vegetación las tierras, e iniciarse, en su caso, actividades agrícolas o ganaderas.

d) Probablemente los efectos ambientales del laboreo de minas bajo tierra son más limitados que los de las operaciones de extracción de otro tipo. Subsiste el problema de la eliminación de la ganga, pero a veces se puede solucionar mediante operaciones de relleno.

e) Es probable también que las actividades de extracción produzcan polvo, ruido y emisiones nocivas de humos residuales de voladuras. Debería reducirse el desprendimiento de polvo rociando de agua las zonas pulvígenas (como las masas de mineral quebrantado en los tajos de arranque, o las perforaciones producidas por las voladuras), construyendo vías de arrastre pavimentadas y utilizando métodos apropiados para reducir el polvo producido por las voladuras (como las nebulizaciones de aire para producir vapor). Se puede reducir eficazmente el nivel de ruido y la cantidad de polvo en las proximidades de la mina mediante hileras de puntales o barreras artificiales construidas con rocas y material de desecho. Siempre que fuese posible convendría organizar sistemas de ventilación, o tener en cuenta los vientos dominantes al elegir los puntos de voladura, con el fin de favorecer la dispersión de los humos nocivos generados por esas operaciones.

f) En las regiones que no son áridas, la contaminación del agua de la mina puede provocar un grave problema ambiental. El agua utilizada durante las operaciones de extracción (como la utilizada en la perforación de galerías en las minas bajo tierra) o las aguas que escurren de la mina (sobre todo en las minas a cielo abierto) se puede contaminar por agentes químicos presentes inicialmente en el suelo, lo que puede dar lugar a un elevado grado de acidez del agua en las minas a cielo abierto o de alcalinidad en las minas subterráneas. Puede haber también metales disueltos. Se deberían tomar medidas para a) calcular de antemano el tipo y la cantidad de agentes contaminantes presentes en el agua de la mina, b) calcular el caudal de agua generado, c) recoger el agua antes de que fluya al medio ambiente, y d) construir plantas de tratamiento del agua que permitan eliminar los materiales sólidos en suspensión, neutralizar la acidez o alcalinidad excesivas, y precipitar los metales disueltos antes de que el agua pase al medio circundante.

g) También se produce polvo en el curso de algunas operaciones de tratamiento del mineral, como las de carga, descarga, transporte y trituración. Se deberían tomar medidas para reducir la cantidad de polvo generado, mediante rociados de agua. Durante el transporte se debería mantener el grado de humedad del mineral a un nivel que impida la formación de polvo. Para aminorar la concentración de polvo en las zonas de manipulación se debería determinar qué operaciones generan polvo y realizar éstas exclusivamente en recinto o espacios adecuados, aislar bien el equipo, e instalar sistemas de ventilación local. Habría que seguir esas recomendaciones de forma aún más estricta cuando el mineral contenga metales pesados, como plomo o cadmio y antimonio, que constituyen en sí mismos un riesgo para la salud.

h) La concentración de los metales en los minerales sulfurosos (níquel, cobre, plomo, zinc y estaño) requiere operaciones de flotación. Hacen falta cantidades muy grandes de agua, que se contamina por una cantidad variable de agentes de flotación, los cuales suelen ser muy tóxicos y contener cianuros. En consecuencia, se debería hacer el máximo esfuerzo para regenerar la mayor cantidad posible de agua de flotación (después de separar las colas). Siempre que fuese posible se debería utilizar agentes de flotación menos tóxicos; y sería necesario emprender investigaciones orientadas al descubrimiento e implantación de ese tipo de agentes.

i) La evacuación de las colas después de la concentración del mineral puede provocar efectos muy perjudiciales para el medio ambiente, debido al gran volumen de colas producidas por la industria y a los contaminantes que contienen, generados en anteriores operaciones (como la flotación). El método más inocuo de evacuación de esas colas consiste en su embalsamiento en zonas cuidadosamente elegidas, que posteriormente vuelven a cubrirse de vegetación. Esas zonas deberían estar situadas lejos de las fuentes de agua, y ser impermeables a las filtraciones (el suelo del depósito debería ser de arcilla natural o tener impermeabilizadores artificiales).

j) La concentración de la mayoría de los minerales óxidos y especialmente de la bauxita para la producción de alúmina requiere una operación de lixiviación. Se utilizan en ella tanto álcalis (como en el tratamiento del mineral de bauxita y de algunos tipos de níquel) como ácidos (como en los minerales de cobre, zinc y otros tipos de níquel). La ganga no solubilizada durante el tratamiento se elimina y es necesario proceder a su evacuación, lo que a menudo afecta al medio ambiente, debido al contenido residual de álcalis o ácidos de las colas. En ese caso el embalsamiento en depósitos impermeabilizados es también el mejor procedimiento de evacuación, acompañado o no de la neutralización con cal, si se trata de colas ácidas. Muchas plantas de producción de alúmina utilizan ya el método de embalsamiento total de las colas, en el que los lagos de residuos de las operaciones de elaboración y de la bauxita (fango rojo) son parte integrante del proceso. Siempre que fuese posible se debería adoptar esa tecnología. Se ha comprobado que la práctica de eliminar el fango rojo en el mar es muy perjudicial para la vida acuática, y se debería sustituir en el plazo más breve posible por métodos de evacuación más racionales desde el punto de vista ambiental.

k) El proceso de fusión pirometalúrgica utilizado para producir el metal en bruto (níquel, cobre, plomo y zinc) a partir del concentrado de mineral sulfuroso requiere eliminar el azufre, inicialmente presente en el concentrado, en forma de dióxido de zufre gaseoso (SO_2). Al liberarse en la atmósfera, el SO_2 puede convertirse en ácido sulfúrico, con las bien

conocidas consecuencias ambientales sobre la salud humana, la vegetación y los edificios que produce el fenómeno de la lluvia ácida. La concentración de dióxido de azufre en la corriente de gas de escape del horno de fusión del mineral, y la cantidad de gases de escape producidos dependen en gran medida de la tecnología utilizada. Las plantas más antiguas producen por lo general mayores emisiones de gases, con una débil concentración de SO_2 . La eliminación del dióxido de azufre de esas emisiones no resulta económicamente viable. Otras plantas más modernas producen gases de escape con abundante contenido de SO_2 , lo que permite eliminarlo de los gases y transformarlo en ácido sulfúrico que se comercializa posteriormente. Por consiguiente, es recomendable readaptar los hornos de fusión que producen corrientes de gas de escape con una concentración suficientemente alta de SO_2 dotándolos (si no cuentan ya con ello) de una planta para la conversión del SO_2 en ácido sulfúrico. A largo plazo se deberían eliminar gradualmente las plantas más antiguas, o modernizarlas con equipos que puedan producir corrientes de gas susceptibles de transformación en ácido sulfúrico.

l) Los hornos de fusión producen también grandes cantidades de polvo y humo que se pueden liberar con los gases de escape. Se recomienda dotar a las nuevas plantas de dispositivos de captación de polvo muy eficaces y readaptar las plantas más antiguas dotándolas de un equipo análogo. Esa medida puede resultar beneficiosa también desde un punto de vista económico, puesto que el polvo captado suele contener óxidos de metales que pueden reutilizarse en el horno de fusión.

m) Las emisiones de los hornos de fusión electrolítica de aluminio contienen fluoruros contaminantes. De forma análoga, las plantas de producción por electrólisis de otros metales (como estaño o cobre) pueden emitir también vapores que contienen contaminantes. Se recomienda dotar a esas plantas de sistemas adecuados de ventilación, provistos de diapositivas de captación de partículas.

n) En los últimos años se han aplicado nuevos procedimientos de fusión pirometalúrgica de níquel, cobre, plomo, zinc y estaño. Esos procedimientos ofrecen varias ventajas, como un índice elevado de recuperación de metal, una mayor concentración de dióxido de azufre en los gases de escape (que por consiguiente son susceptibles de conversión en ácido sulfúrico), la producción de una menor cantidad de polvos y humos, un mayor ahorro de energía, y mayor capacidad para fundir minerales complejos. Los aspectos ambientales deberían desempeñar un papel decisivo al elegir el procedimiento de fusión de las nuevas plantas. Se recomienda a los países mayor rigor en la elaboración y aplicación de normas ambientales.

o) La regeneración y nueva fusión de diversos restos de metal se lleva a cabo ya en gran escala en el caso del plomo, el aluminio, el cobre y en menor grado del estaño, el zinc y el níquel. Se prevé que en un futuro próximo aumentará sensiblemente el porcentaje de metales producidos mediante la regeneración de chatarra, a consecuencia del aumento de los costes de la producción primaria de metal y del menor consumo de energía que entraña la producción secundaria.