

**INTERNATIONAL CONFERENCES ON CLEAN TECHNOLOGIES
FOR THE MINING AND METALLURGICAL INDUSTRY
CONFERENCIAS INTERNACIONALES SOBRE TECNOLOGÍAS LIMPIAS
PARA LA INDUSTRIA MINERA Y METALÚRGICA**
Arequipa – Peru
September 24 to 26, 2007

Tecnologías Limpias para la Industria Minera

Mario Sánchez
Depto. Ingeniería Metalúrgica
Universidad de Concepción

CONTENIDO

- ANTECEDENTES**
- LA INDUSTRIA METALÚRGICA Y SUS IMPACTOS AMBIENTALES**
- PROCESOS DE EXTRACCIÓN METALÚRGICOS**
- DESAFÍOS AMBIENTALES**
- REGULACIONES AMBIENTALES**
- HACIA UNA PRODUCCIÓN LIMPIA**
- CONCLUSIONES**

ANTECEDENTES

La producción de materiales => cambios importantes en el medio ambiente:

- Energía para procesamiento
- Espacios para actividades
- Movimiento de tierras
- Lugares donde disponer desechos
- Evacuar gases y polvos
- Agua para funcionamiento.

Industrialización => minimizar **impactos**

GRANDES DESAFÍOS DEL SIGLO PASADO:

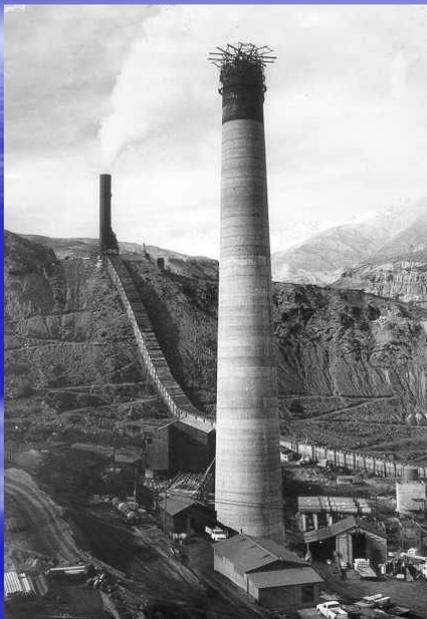
=> **ENERGÍA** (primera mitad siglo XX)

=> **MEDIO AMBIENTE** (segunda mitad siglo XX)

Movimiento de tierras y disposición de desechos



Evacuación de gases y polvos

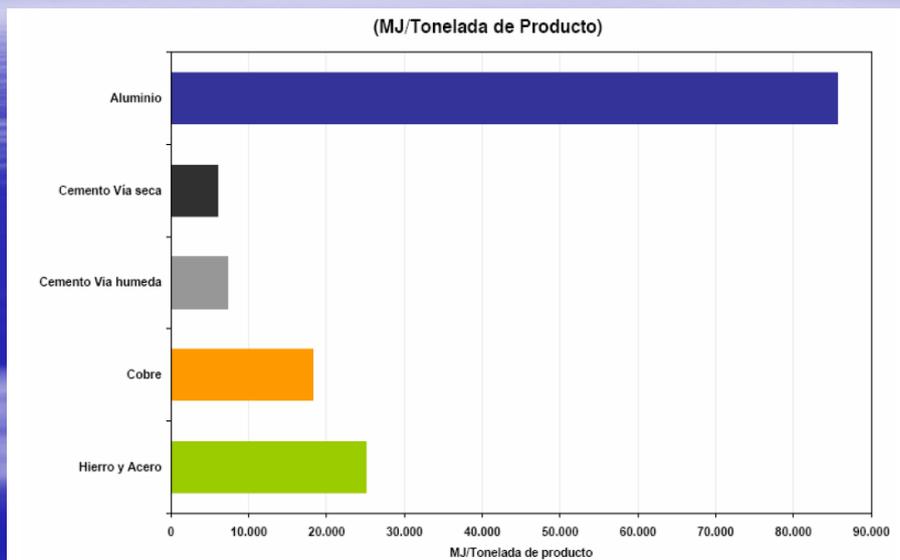




Necesidades de grandes cantidades de agua



Consumos Específicos de Energía para minerales seleccionados



WORLD WATER BALANCE (*)

Water Origin	Surface Area, 10 ⁶ km ²	Volume, 10 ⁶ km ³	Volume, %	Equivalent Depth, m	Approximate Residence Time
Ocean and Seas	361	1370	94	2500	4,000 years
Lakes and Reservoirs	1.55	0.13	< 0.01	0.25	10 years
Swamps	< 0.1	< 0.01	< 0.01	0.007	1 - 10 years
River Channels	< 0.1	< 0.01	< 0.01	0.003	2 weeks
Soil Moisture	130	0.07	< 0.01	0.13	2 weeks - 1 year
Groundwater	130	60	4	120	2 weeks -> 10,000 years
Icecaps and Glaciers	17.8	30	2	60	10 - 1,000 years
Atmospheric Water	504	0.01	< 0.01	0.025	10 days
Biospheric Water	< 0.1	< 0.01	< 0.01	0.001	1 week

(*) R.A. Freeze and J.A. Cherry (1979), Groundwater, Prentice Hall, USA, 604 pp.

From J. Menacho, Hydrocopper 2007

LA INDUSTRIA METALÚRGICA Y SUS IMPACTOS AMBIENTALES

Industrias Minera y Metalúrgica

1.- **Extracción y Procesamiento.**-
Desde **extracción minera** hasta **producción del metal**



2.- **Fabricación y Manufactura.**-
Etapas de **producción metal-mecánicas** para **obtener productos específicos**



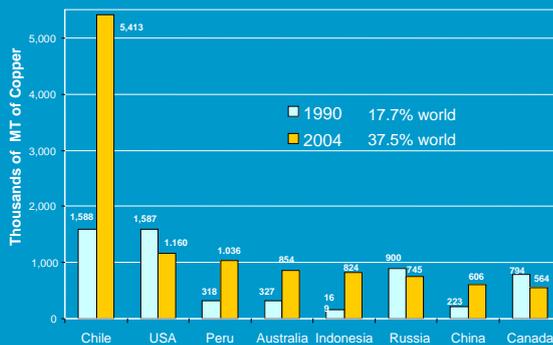
IMPACTOS AMBIENTALES DURANTE LAS ETAPAS DE EXTRACCIÓN Y PRODUCCIÓN DE METALES

ETAPA	TIERRA	AGUA	AIRE
<i>EXTRACCION</i>	<i>ALTO</i>	<i>ALTO</i>	<i>ALTO</i>
<i>PROCESAMIENTO</i>	<i>MEDIO-ALTO</i>	<i>MEDIO-ALTO</i>	<i>ALTO</i>
<i>FABRICACION</i>	<i>BAJO</i>	<i>BAJO</i>	<i>MEDIO-ALTO</i>
<i>MANUFACTURA</i>	<i>BAJO</i>	<i>BAJO</i>	<i>BAJO</i>

Las **alteraciones ambientales más importantes** ocurren en las etapas de **extracción y procesamiento** cuyo objetivo es obtener el **metal puro**.

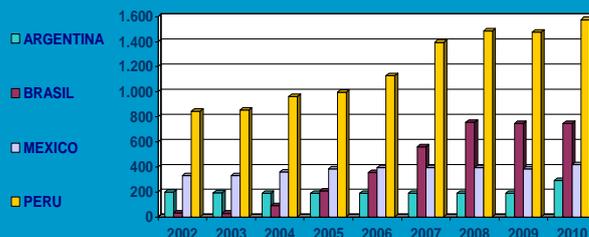
Baste señalar que, en el caso del **cobre**, los minerales tienen una ley aproximada de **1%**. Luego para producir cobre puro hay que **disponer el 99% del material**.

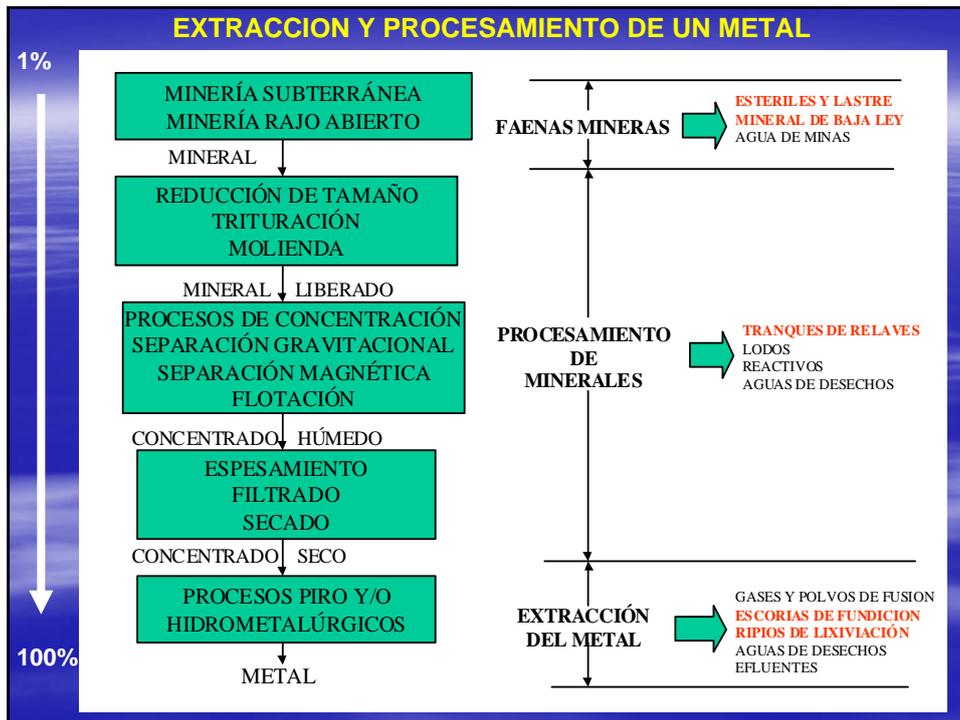
EVOLUCIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE COBRE DE MINA



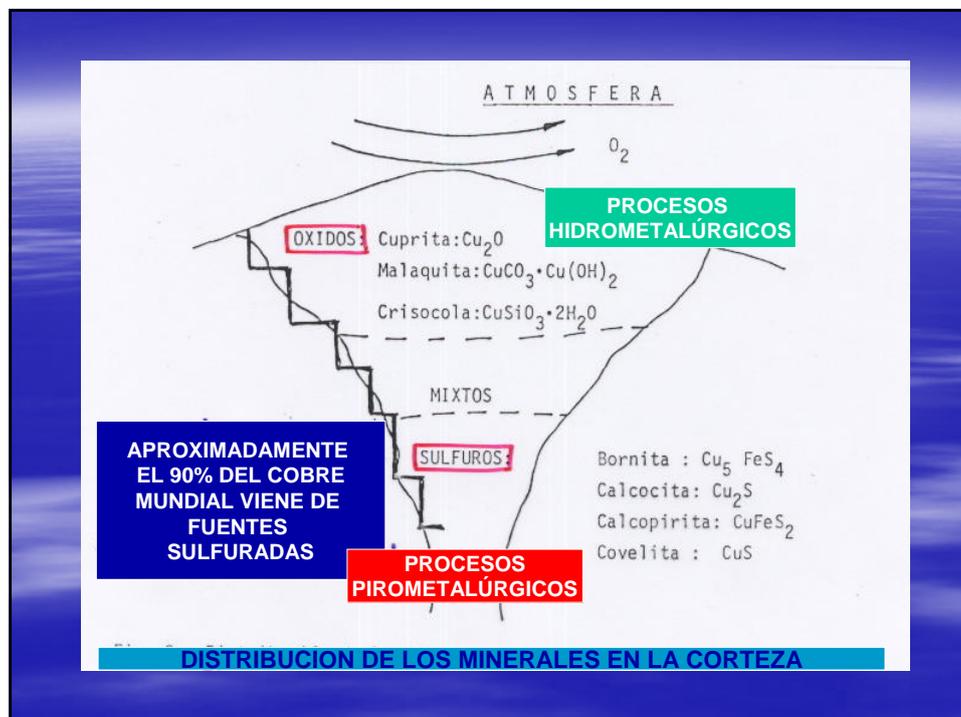
Source: Chilean Copper Commission

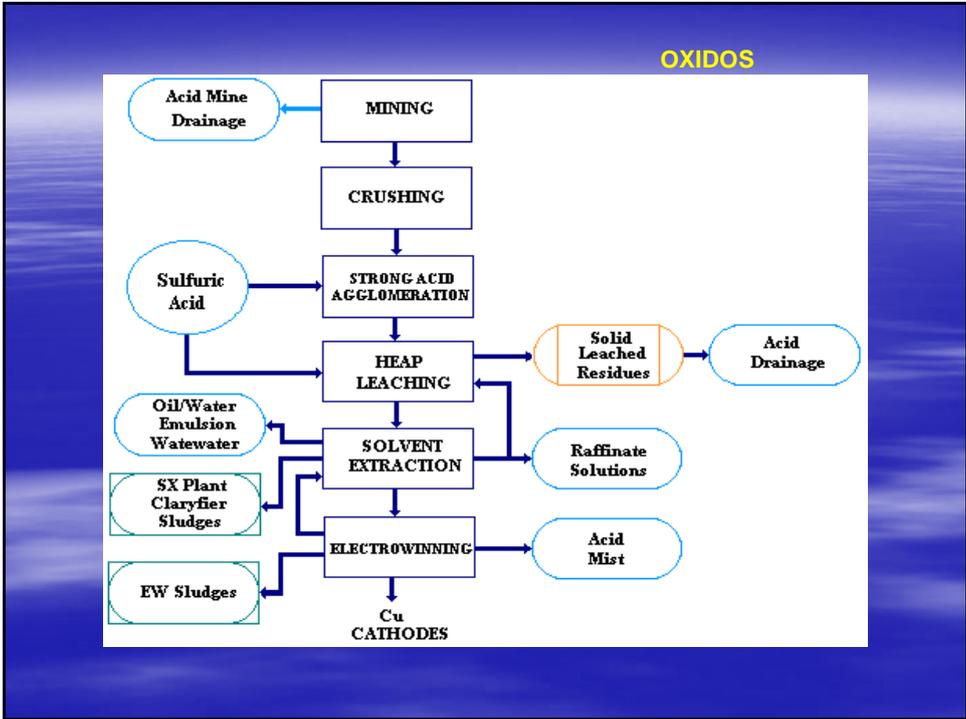
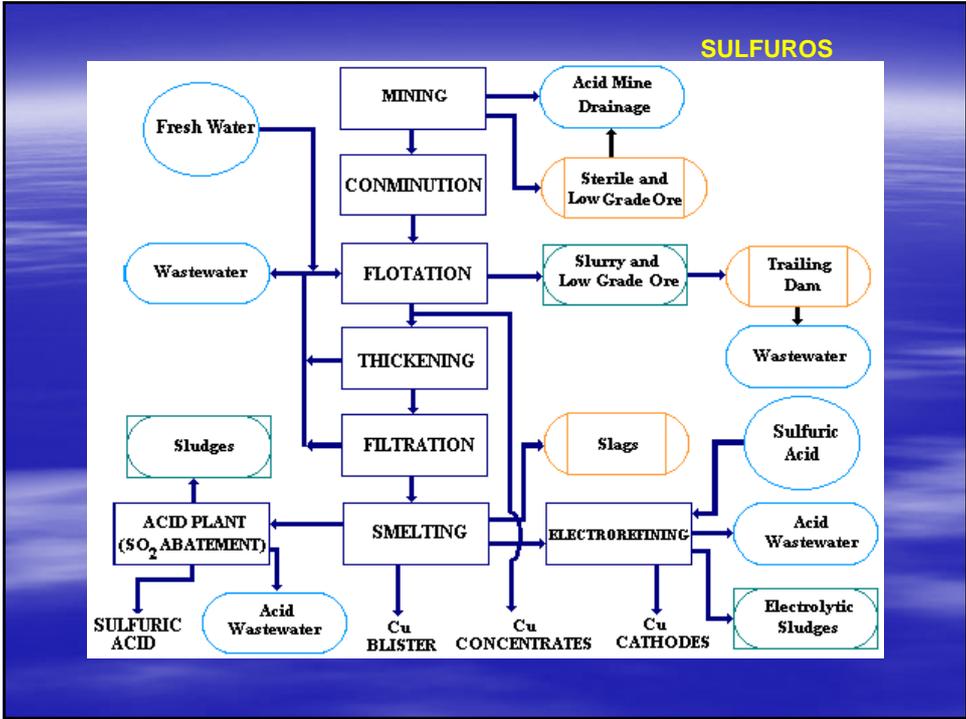
Hacia 2010,
Latinoamérica
participará con 57% de
la producción de cobre
del mundo, con 10,5
millones ton.

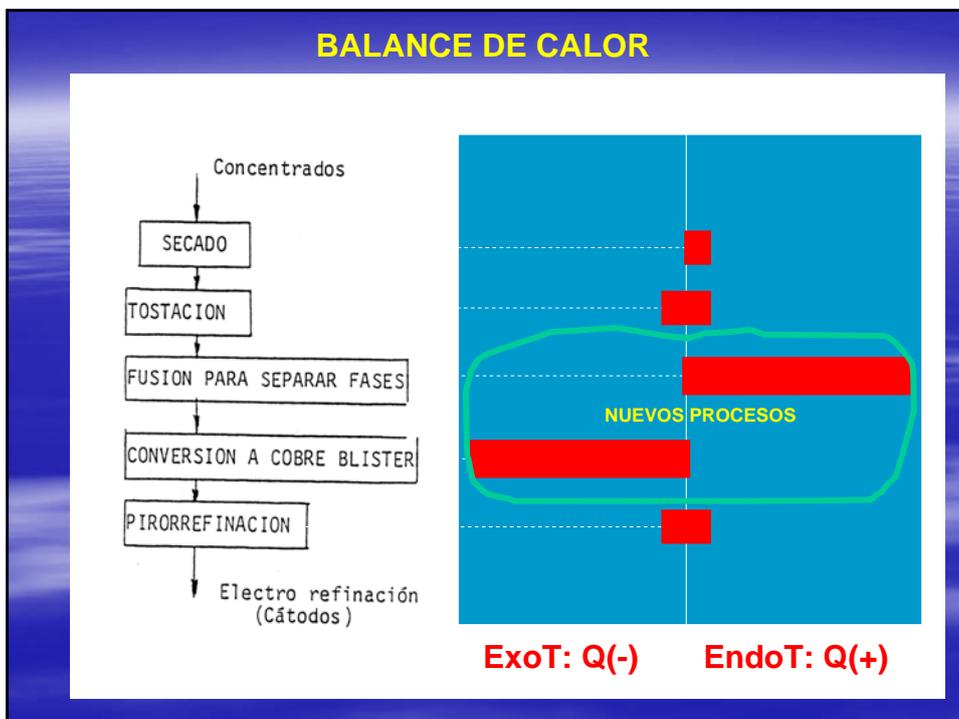
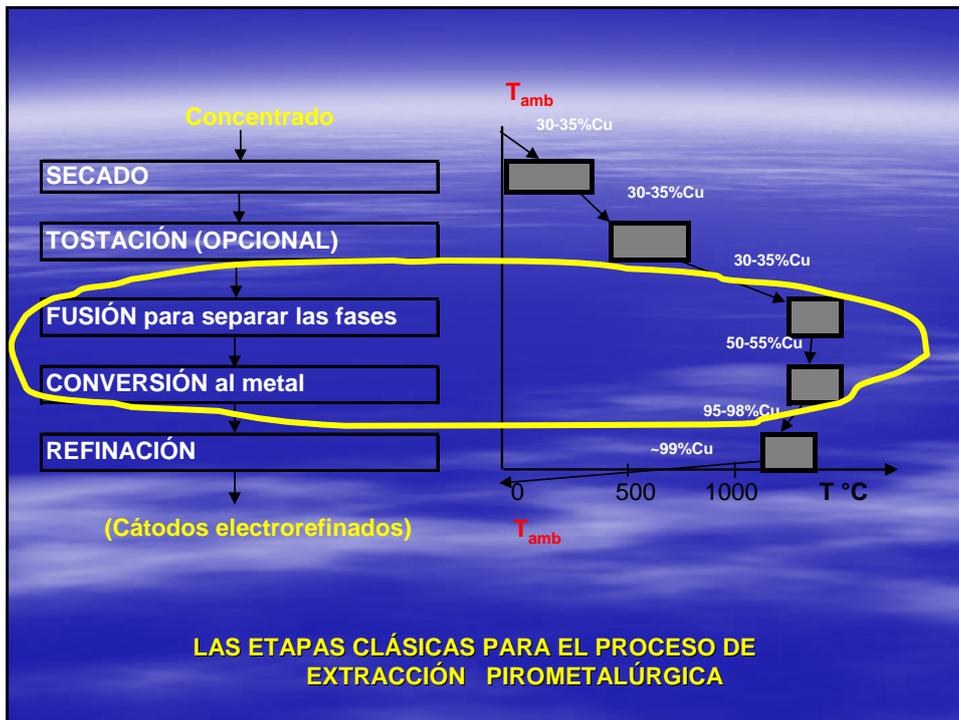




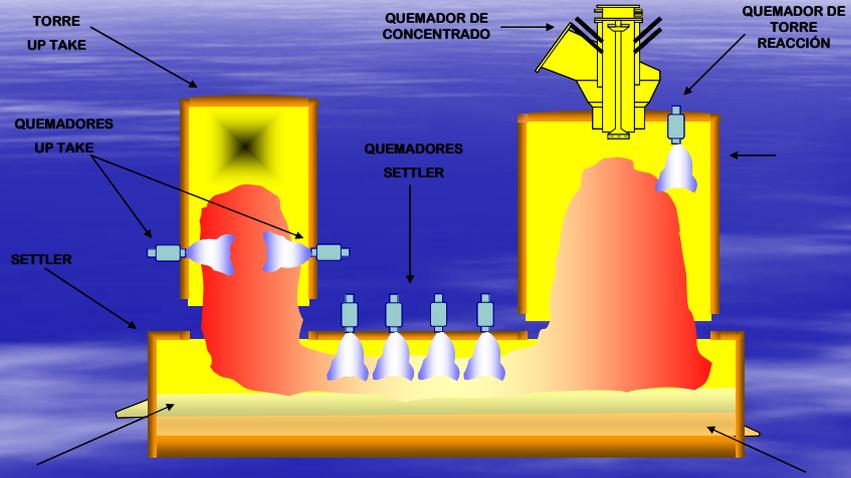
PROCESOS DE EXTRACCIÓN METALÚRGICOS





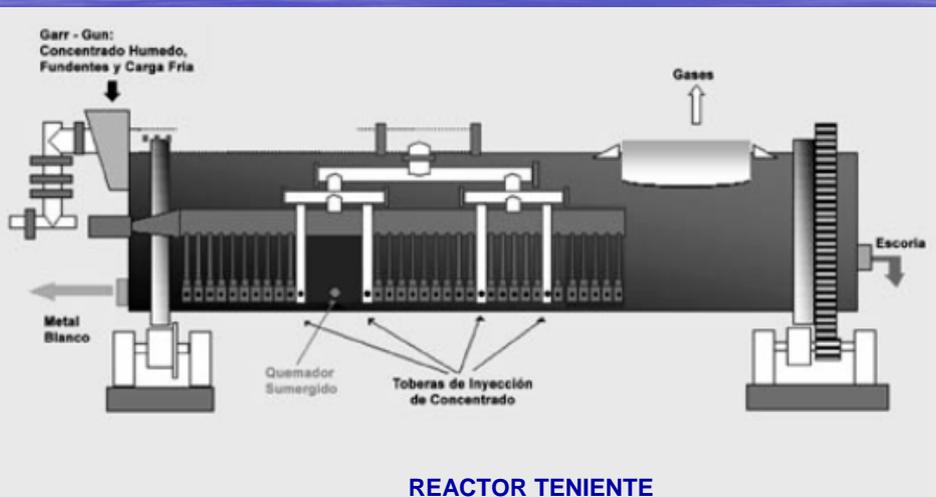


APORTE INTERNO: REACCIONES EXOTERMICAS DE OXIDACIÓN



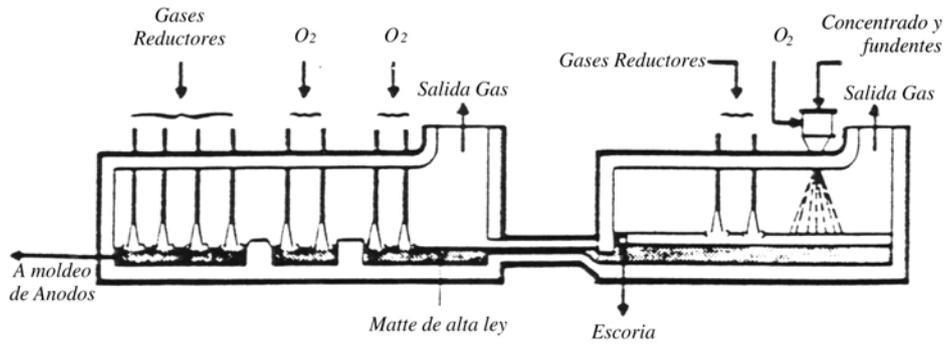
REACTOR FLASH OUTOKUMPU

APORTE INTERNO: REACCIONES EXOTERMICAS DE OXIDACIÓN



REACTOR TENIENTE

APORTE INTERNO: REACCIONES EXOTERMICAS DE OXIDACIÓN

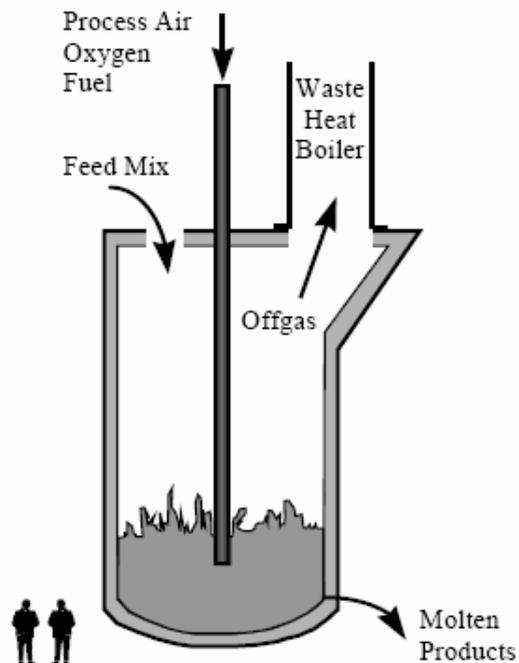


REACTOR CONTOP

**APORTE INTERNO:
REACCIONES EXOTERMICAS DE OXIDACIÓN**

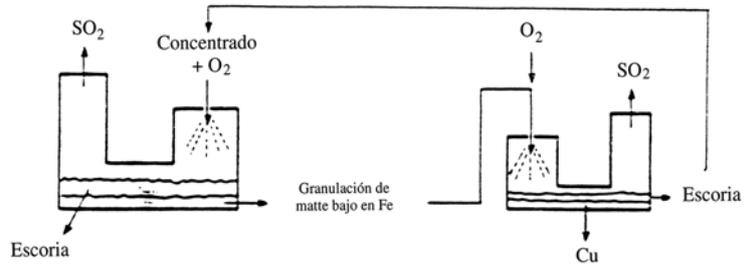
PROCESO ISASMELT

ISASMELT es un proceso comercial desarrollado por Mount Isa Mines (MIM), derivado del proceso SIROSMELT (tecnología de lanza sumergida).



FUTUROS PROCESOS DE FUSIÓN Y CONVERSION

Kennecott Minerals Company y Outokumpu Oy

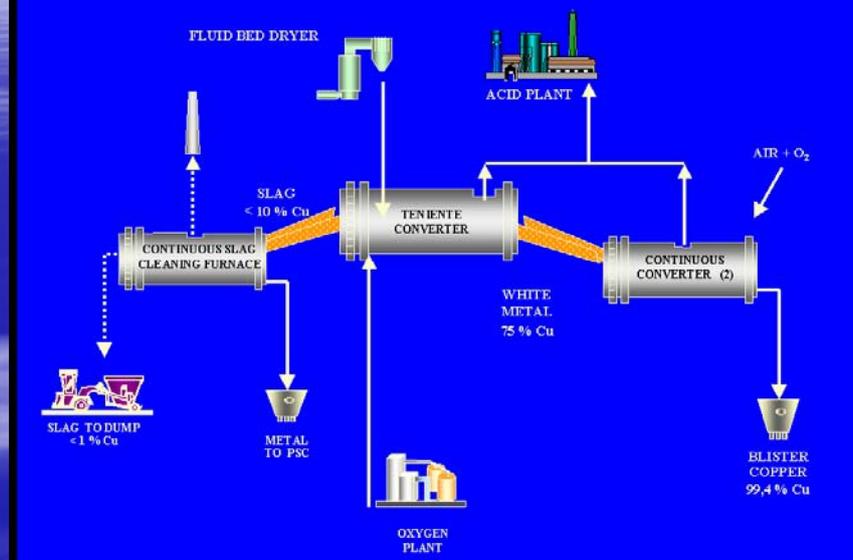


La escoria generada en la conversión es recirculada a la fusión /

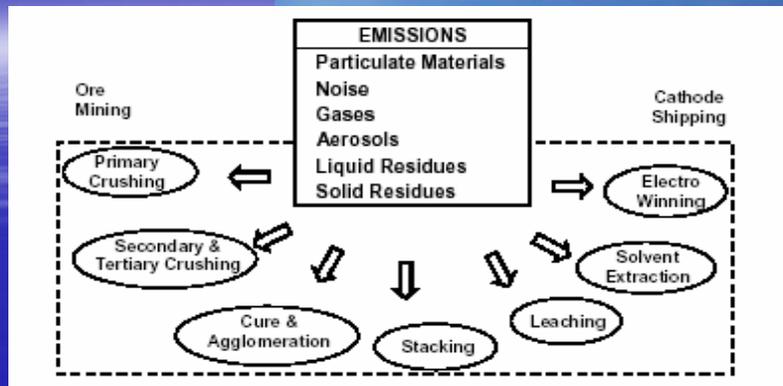
Buen control de emisiones con captación del 99% del azufre como SO₂ y transformado en ácido sulfúrico /

FUTUROS PROCESOS DE FUSIÓN Y CONVERSION

CONVERSION CONTINUA TENIENTE



PROCESOS DE EXTRACCIÓN HIDROMETALURGICA

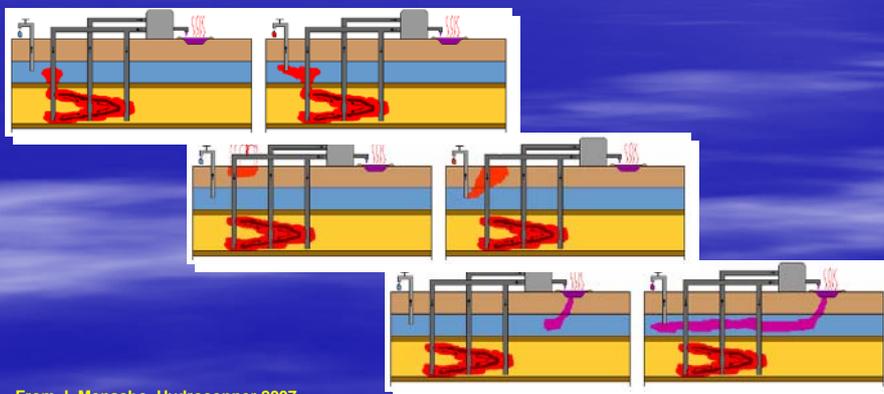


La hidrometalurgia no es hoy menos contaminante que la pirometalurgia. Era así antes de los 90 cuando la hidrometalurgia era más marginal como negocio minero. Hoy la situación debe revisarse ya que las operaciones a gran escala tienen grandes riesgos y peligros ambientales. Una planta moderna de SX-EW involucra emisiones de polvos, ruidos, gases, aerosoles, y grandes cantidades de residuos sólidos y líquidos.

J. Menacho, VII ctwmi, Concepción, Chile, 2004

LIXIVIACIÓN IN SITU

- Aún siendo muy atractiva desde el punto de vista económico, no es actualmente recomendable ya que requiere de un riguroso control, no es exactamente segura y en general no se le considera una técnica minera benigna.



From J. Menacho, Hydrocopper 2007

THE ENVIRONMENTAL COST OF COPPER

Item	kg per kg of Copper	
	Mineral Processing	Hydrometallurgy
Mine waste	300	300
Mill tailing or Ripio	113	119
Tailing/Ripio solution	28	12
Slags	2.0	0
Sulphur bearing co-product	2.9	0
Sulphate	0	3.4
SO ₂ to air	0.08	0
CO ₂ to air	1.9	1.5
Underground infiltration	Alkaline (?)	Acid (?)

Total Kg Residues / Kg of Copper 447.88 435.90

From J. Menacho, Hydrocopper 2007

DESAFÍOS AMBIENTALES

LOS PROBLEMAS AMBIENTALES MAS IMPORTANTES ASOCIADOS A LAS FUNDICIONES DE CONCENTRADOS

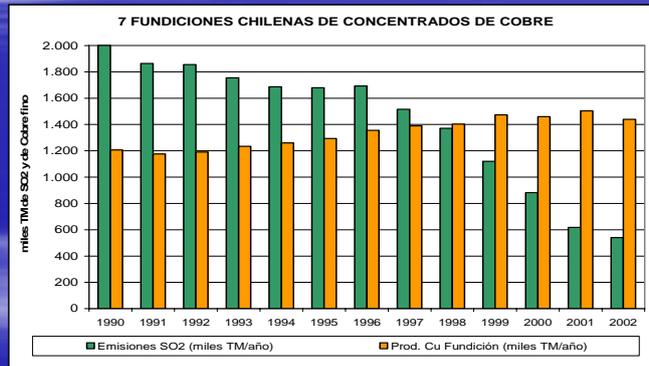
- GENERACION DE ANHIDRIDO SULFUROSO (SO_2)
 - Alrededor del 90 % de los minerales son sulfurados.
 - Los sulfuros no son solubles en medio ácido (en general)
 - Entonces siguen un tratamiento pirometalúrgico (fundiciones)
 - El anhídrido sulfuroso es convertido en ácido sulfúrico
- PRESENCIA DE COMPUESTOS VOLATILES, PARTICULARMENTE DE ARSENICO
- MATERIAL PARTICULADO SUSPENDIDO

Recuperación de SO_2

- Fabricación del ácido sulfúrico (H_2SO_4)
 - Necesidad de $[\text{SO}_2] > 4\%$ (excepción $\approx 2-3\%$), 4 Etapas
- 1. Purificación del gas
 - Eliminación del polvo por precipitación electrostática
 - Eliminación de la humedad por lavado con H_2SO_4 diluido (150°C)
- 2. Conversión
 - Oxidación del SO_2 a SO_3 por contacto con un catalizador (V_2O_5)
 - Conversión del 97% a 450°C
- 3. Absorción
 - SO_3 es absorbido en H_2SO_4 (99%) para producir H_2SO_4 (99,6%)
- 4. Dilución
 - H_2SO_4 (99,6%) diluido en agua para obtener H_2SO_4 (93%) → mercado

Plan de descontaminación para anhídrido sulfuroso (SO₂)

- En Chile, los planes de descontaminación en las fundiciones estatales se han ido implementando y cumpliendo, lo que ha demandado una inversión a diciembre del año 2002 de US\$ 1.500 millones.



- Incremento de los niveles de captación de SO₂ desde 19% a valores superiores al 80%

Fuente: Comisión Chilena del Cobre

DISPOSICIÓN DE ARSÉNICO

SOLUBILIDAD Y ESTABILIDAD DE LOS COMPUESTOS DE ARSÉNICO

- La disposición del arsénico se ha realizado en la práctica mediante la formación de arsenatos y arsenitos metálicos, p.e. Ca²⁺, Cu²⁺ y Fe²⁺ dada su baja solubilidad.
- El arsénico se ha precipitado mediante la adición de cal a la solución, obteniéndose un arsenato de calcio:
$$3\text{CaO} + 6\text{H}^+ + 2\text{AsO}_4^{3-} \rightarrow \text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2 + 3\text{H}_2\text{O}$$
- La estabilidad de este compuesto ha sido cuestionada ya que bajo la influencia del CO₂ del aire, el arsenato de calcio se descompone y libera óxidos de arsénico en la solución.
- Para asegurar la estabilidad a largo plazo se ha estudiado la formación de compuestos más estables (p.e. con Cu, Zn, Co, Ba, Hg, etc.).
- Actualmente la industria ha adoptado como compuesto más estable el arsenato férrico a la forma de escorodita (FeAsO₄·2H₂O).

Reduccion de las emisiones de Arsénico (Chile)

Location province, region ^a	Smelter	Copper concentrate smelting, t/y	Year		
			2000	2001 ^d	2003
El Loa, II	Chuquibambilla	≥ 1,400,000	1,100	800	400 ^e
Antofagasta, II	Altonorte	≥ 350,000	126	126	126
Copiapó, III	Paipote	≥ 200,000	42	42	34
Chañaral, III	Potrerrillos	≥ 500,000	1,450	800	150 ^f
Elqui, IV	El Indio ^g	≥ 80,000 ^h	200	200	200
San Felipe de Aconcagua, V	Chagres	≥ 350,000	95	95	95
Valparaíso, V	Ventanas	≥ 400,000	120	120	120
Cachapoal, VI	Caletones	≥ 1,100,000	1,880	375	375
Total emissions			5,013	2,558	1,500

^a In this norm a differentiation by zones was done, because the geographic location of each one of the regulated sources is associate to meteorological and topographic characteristics, with a distribution of human and natural resources different between each one from them. ^b Roasting Plant (closed), ^c Copper-gold concentrate, ^d Similar emissions for year 2002
^e If will not exist mining camps, within a radius of 8 kilometers measured from the emitting source, will not be applied to this value
^f If will not exist mining camps, within a radius of 2.5 kilometers measured from the emitting source, will not be applied this value
Source: Comisión Nacional del Medioambiente, CONAMA Chile, www.conama.cl

- **Decreto de Ley 165 (1999) regula las emisiones de arsénico al aire desde fundiciones de cobre.**
- **El máximo de emisiones de arsénico permitidas a la atmósfera no debe exceder los estándares de acuerdo al tipo de fuentes y a los planes de descontaminación de cada fundición.**
- **Hoy estas regulaciones están siendo revisadas a objeto de mejorar la metodología para calcular las emisiones de arsénico en cada fuente.**

DESAFIOS EN LA HIDROMETALURGIA DEL COBRE

- **Recuperación de cobre:**
 - Mejorar la recuperación y reducir el ciclo operacional de los minerales de cobre sulfurado.
 - Lixiviación eficiente y económica de sulfuros primarios (calcopirita).
- **Eficiencia en los procesos:**
 - Manejo eficiente de minerales de baja ley.
 - Tecnologías de caracterización "on line".
 - Impurezas.
- **Medio ambiente:**
 - Material particulado en minas a rajo abierto
 - Neblina ácida, efluentes
 - Energía
- **Calidad en los cátodos finales**

Juan Enrique Morales, Hydrocopper 2007

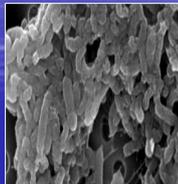


Scientific Research

• Specific Microorganisms Supply



Bacteria Wonalén DSM 16786
Property of BioSigma
Patent Pending N°CL 2731-2004



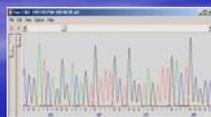
Bacteria Licanantay DSM 17318
Property of BioSigma
Patent Pending N° CL 2101-2005

• BioCompatibility MOs and Minerals



- Bioleaching Measurements
- Gas Balance (on line)
 - CO₂
 - O₂
 - Solution Characterization (input/output)
 - Cu
 - Fe(T)
 - Fe(II)
 - Free acid
 - Sulphate
 - pH
 - ORP
 - MOS Identification
 - MOS Counting
 - Other
 - Temperature

• BioInformatic & Biomonitoring



DNA sequencing and genes identification



Microarray
Differential genetic expression



Juan Enrique Morales, Hydrocopper 2007

MODERN PROCESS TO LEACH CONCENTRATES

Pressure Leach (Sulfate Media)

- Placer Dome.
- Activox.
- Dynatec.
- Anglo American/UBC.
- Brisa.

Pressure Leach (Chloride Media)

- Noranda Antlerite.
- BHAS.
- CESL.
- Hydrocopper.

Bacterial Leach

- BioCop.
- Geocoat.
- BioHeap.

Today there is "available" technology for partial/total leach, particularly the pressure leach alternatives.

(Comminution-Flotation)

Partial/Total Leaching

SX-EW

J. Menacho, Presente y Futuro de la Hidrometalurgia, Minería Chilena N° 291, Septiembre 2005, pp 89 – 93.

EL GRAN PUZZLE PARA LA HIDROMETALURGIA

Cerca del 90% de las reservas de cobre son sulfuradas y sólo el 10% oxidadas. 70 a 80% de los sulfuros son calcopiríticos.



From J. Menacho, Hydrocopper 2007

NEXT STEPS

Resource	Grade, % CuT	Preferred Process Alternative	
		Current	Short-Term (2007 – 2015)
Oxide	0.6 – 0.7	Heap Leach – SX – EW	Heap Leach – SX – EW
	< 0.4	Dump Leach – SX – EW	Dump Leach – SX – EW
Secondary Sulfide	0.6 – 0.7	Heap Leach – SX – EW	Heap Leach – SX – EW
	< 0.4	Flotation – Smelter – Refinery	Flotation → Smelter – Refinery Leach – SX – EW.
Primary Sulfide	0.6 – 0.7	Heap Leach – SX – EW	Heap Leach – SX – EW
	< 0.4	Flotation – Smelter – Refinery	Flotation → Smelter – Refinery Leach – SX – EW.
		Dump Leach – SX – EW	Dump Leach – SX – EW

From J. Menacho, Hydrocopper 2007

REGULACIONES AMBIENTALES

PROCESO REGULATORIO A NIVEL MUNDIAL

- Hasta 1970: - Situación crítica
- Regulaciones basadas en procesos particulares
- Desde 1970: - El Estado comienza el desarrollo de regulaciones ambientales para regular las emisiones de SO₂, material particulado, principalmente en Japón, Estados Unidos, países Europeos
- Década 90 - Países de América Latina y Asia comienzan también a aplicar principios generales para la regulación ambiental y establecer instrumentos legales.

IMPACTO DE LA REGLAMENTACION:

Salud, calidad de vida, protección del medioambiente (turismo, impacto visual)

ELABORACION DE UN ESTANDAR DE CALIDAD AMBIENTAL

SE CONSIDERAN TRES OBJETIVOS

- PROTEGER SALUD HUMANA
- PROTEGER MEDIO AMBIENTE DE LA POLUCION
- PROTEGER FUENTES NATURALES Y PATRIMONIO HISTORICO CULTURAL

LOS ESTANDARES DEBEN TENER UNA BASE CIENTIFICA Y ALCANZABLES POR LAS EMPRESAS. DEBEN PROTEGER EL MEDIO AMBIENTE SIN DESACTIVAR LA ECONOMIA

SE CONSIDERA AL SECTOR MINERO COMO UNO DE LOS MAS CONTAMINANTES PERO A SU VEZ UNO DE LOS MAS INSERTOS EN LA ECONOMIA INTERNACIONAL

ENVIROMENTAL MINING POLICIES AND REGULATIONS

Regulations for Liquid and Solid Wastes

Some selected pollutants and their maximum concentration levels for discharges into water, which must be fulfilled by the Chilean industry, including mining operations. In general, the limits imposed in Chile are similar to those employed in other mayor metal mining countries.

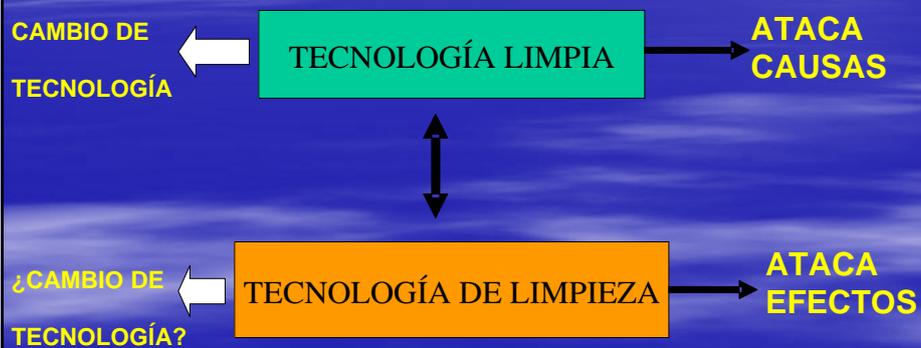
Pollutant	As	CN ⁻	Cu	Dissolved Iron	Mo	Hg	pH	Sulfate
Fresh water	0.5	0.2	1	5	1	0.001	6 - 8.5	1,000
Fresh water with dilution	1	1	3	10	2.5	0.01	6 - 8.5	2,000
Lake water	0.1	0.5	0.1	2	0.07	0.005	6 - 8.5	1,000
Sea water (littoral)	0.2	0.5	1	10	0.1	0.005	6 - 9	-
Sea water (non protected littoral)	0.5	1	3	-	0.5	0.02	5.5 - 9	-

Chilean Standard for discharges of industrial liquid wastes into water (mg/L)

Valenzuela et al, Copper'07

HACIA UNA PRODUCCIÓN LIMPIA

TECNOLOGÍA LIMPIA vs TECNOLOGÍA DE LIMPIEZA



ALTA PRIORIDAD  BAJA PRIORIDAD 	GESTIÓN	ACTIVIDADES	APLICACIONES
	REDUCCIÓN EN FUENTES	<ul style="list-style-type: none"> -MODIFICACIONES AL PROCESO -CAMBIOS TECNOLÓGICOS -CAMBIOS ALIMENTACIÓN -CAMBIOS EN PRODUCTO -MEJORA PROCEDIMIENTOS 	<ul style="list-style-type: none"> -MODIFICACIONES EN EQUIPO / TECNOLOGÍA -AUMENTO EFICIENCIA EN USO DE ENERGÍA / AGUA -AUMENTO RECUPERACIÓN -MINERÍA IN SITU -USO MAT. NO TÓXICOS
	RECICLAJE	<ul style="list-style-type: none"> -REUTILIZACIÓN -RECICLAJE EN CIRCUITO CERRADO 	<ul style="list-style-type: none"> -RECICLAJE SOLVENTES -REPROCESAMIENTO DE COLAS -RECUPERACIÓN AGUA
	TRATAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> -ESTABILIZACIÓN -NEUTRALIZACIÓN -PRECIPITACIÓN -EVAPORACIÓN -INCINERACIÓN 	<ul style="list-style-type: none"> -DESTRUCCIÓN DE CIANUROS -TRATAMIENTO AGUAS DE DESECHOS
	DISPOSICIÓN	<ul style="list-style-type: none"> -DISPOSICIÓN EN SITIOS PERMITIDOS 	<ul style="list-style-type: none"> -DISPOSICIÓN DE RELAVES



CONCLUSIONES

EN RESUMEN... PARA LA HIDROMETALURGIA:

- La biolixiviación para minerales calcopiríticos de baja ley es hoy técnicamente posible.
- Resta como variable crítica el control de transferencia de calor, el cual puede solucionarse con el tamaño adecuado en los minerales a tratar, para asegurar la transferencia interna de calor.
- El calor externo suficiente y la minimización de las pérdidas calóricas pueden asegurar el crecimiento y estabilidad de la población bacteriana y por ende la lixiviación de los minerales de cobre.
- Sin embargo, es probable que la ruta química para lixiviar calcopirita esté más cerca que la biolixiviación.
- En todo caso, la lixiviación minerales calcopiríticos de baja ley es improbable que sea una práctica corriente antes del 2025.

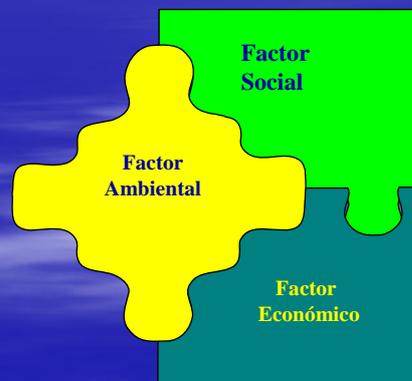
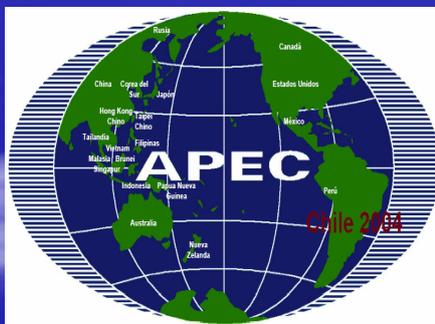
From J. Menacho, Hydrocopper 2007

EN RESUMEN... PARA LA PIROMETALURGIA:

- Existen aún algunos aspectos ambientales por solucionar, particularmente en lo que se refiere a la reducción ulterior de las emisiones de dióxido de azufre y las emisiones de arsénico.
- Esto significa mejorar los sistemas de captura de gases secundarios y fugitivos, y también el desarrollo de nuevos procesos para tratar concentrados de cobre con altos contenidos de impurezas, el arsénico entre otras.
- Respecto a la disposición de arsénico, éste normalmente es removido desde los polvos de fundición por lixiviación y posterior precipitación, principalmente como sulfuros arsenicales o arsenatos férricos, para su posterior disposición. Otras formas más estables, como la escorodita, debieran ser más investigadas y aplicadas.
- Un manejo integral del arsénico debiera ser un buen camino para mejorar el manejo ambiental de las fundiciones de concentrados de cobre. Ello asegura también la apertura internacional de mercados para los productos mineros.

El Desarrollo Sustentable en Minería

El gran desafío que nos demanda este proceso, es reflexionar cómo el desarrollo sustentable aplicado a la minería puede ser un factor diferenciador de competitividad económica en este mundo globalizado.





8th International Conference
**Clean Technologies for the
World Mining Industry**
Santiago - Chile / 13 - 16 April 2008
During **EXPOMIN2008**

MAIN TOPICS

- | | |
|--|---|
| 1. Effluent treatment | 15. Solid waste disposal |
| 2. Environmental and economic factors in process design | 16. Treatment of high arsenic copper concentrates |
| 3. Cleaner mineral processing | 17. Smelter gas handling systems |
| 4. Pyrometallurgical processes environmentally cleaner | 18. Environmental Improvements in smelting and slag treatment |
| 5. Clean technology associated to hydrometallurgical processes | 19. Advances in cleaner processes |
| 6. Environmental improvements in electrometallurgy | 20. Land rehabilitation |
| 7. Waste disposal and rehabilitation of tailing dams | 21. Pollutant removal in waste water |
| 8. New cleaner separation technologies | 22. Arsenic abatement in aqueous streams |
| 9. Acid mine drainage control | 23. Biological wastewater treatment technology |
| 10. Biotechnologies and biochemical processes | 24. Recycling and metals recovery from mine wastes |
| 11. New trends in waste water treatment | 25. Technologies for water and energy efficient usage |
| 12. Treatment of cyanide containing effluents | 26. Reduction of greenhouse gases |
| 13. Arsenic and Sulphate ions removal | 27. Environmental regulations for the mining industry |
| 14. Removal of pollutants by flotation | 28. Miscellaneous |

www.ctwmi.com

24