

SEGEMAR

SERVICIO GEOLÓGICO
MINERO ARGENTINO



INSTITUTO DE
GEOLÓGIA Y
RECURSOS
MINERALES

Recursos Minerales, Minería y Medio Ambiente

Carlos Herrmann y Eduardo O. Zappettini

Serie Publicaciones Nº 173 • ISSN 0328-2325 • Buenos Aires 2014



SEGEMAR

SERVICIO GEOLOGICO
MINERO ARGENTINO



Recursos Minerales, Minería y Medio Ambiente

Carlos Herrmann y Eduardo O. Zappettini

SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO

Presidente Ing. Jorge Mayoral
Secretario Ejecutivo Lic. Pedro Alcántara

INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES

Director Lic. Roberto F. N. Page

DIRECCIÓN DE RECURSOS GEOLÓGICO MINEROS

Director Dr. Eduardo O. Zappettini

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Esta publicación debe citarse como:

Herrmann C. y Zappettini E.O., 2014. Recursos Minerales, Minería y Medio Ambiente.
Serie Publicaciones N° 173. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR,
68p. Buenos Aires.

Av. Julio A. Roca 651 - 3° piso - 1322 Buenos Aires - República Argentina
BUENOS AIRES - 2014

Foto de tapa: Mina Bingham Canyon, Utah (eeuu).
© Utah Geological Survey



ISSN 0328-2325
ES PROPIEDAD DEL INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES – SEGEMAR
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1	3.2. Contaminación natural o ambientes hostiles naturales	32
1. LOS YACIMIENTOS MINERALES EN SU ENTORNO NATURAL	2	3.2.1. Efectos de la actividad volcánica	32
1.1. La concentración de los elementos químicos		3.2.2. Efectos de la meteorización de un depósito	
en la Naturaleza	2	mineral	34
1.2. Los yacimientos minerales	3	3.3. Actividad minera y contaminación	37
1.3. Clasificación de los yacimientos según el uso		3.3.1. La explotación del recurso mineral	37
de los minerales contenidos	6	3.3.2. El Medio Ambiente en el entorno de un	
1.4. El tamaño y la forma de los yacimientos minerales	7	yacimiento: los modelos geoambientales de depósitos	
1.5. La Metalogenia	11	minerales	39
2. LA NECESIDAD DE MINERALES Y SU PROVISIÓN	15	3.3.3. Principales riesgos ambientales	39
2.1. Por qué y para qué se explotan los yacimientos	15	3.3.3.1. Generación de acidez	39
2.2. Qué debate la Sociedad sobre la Minería	16	3.3.3.2. El uso de compuestos químicos	42
2.3. La explotación de los recursos minerales	16	3.3.3.3. Dispersión física	44
2.3.1. Las variaciones de los precios de las materias		3.3.4. La modificación del relieve y del paisaje	44
primas minerales	20	3.3.5. Los riesgos de la minería informal	46
2.4. El agotamiento de los recursos minerales conocidos.		4. PRODUCCIÓN RESPONSABLE: PREVENCIÓN, RESTAURACIÓN	
Los «nuevos» recursos minerales	21	Y REMEDIACIÓN	49
3. EFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE: IMPACTO O DAÑO?	27	4.1. Remedición de sitios mineros	50
3.1. La contaminación	27	4.2. Riesgos sobre la salud y el Medio Ambiente	52
3.1.1. Contaminación y toxicidad. Excesos y		4.3. Cierre de minas: Planes de cierre y monitoreo	
defectos de elementos químicos	28	ambiental	54
3.1.2. Geodisponibilidad y biodisponibilidad		4.4. ¿Qué se hace con los residuos?	55
de elementos químicos	30	4.5. Los costos de las remediaciones ambientales	57
3.1.3. La migración de los metales desde un yacimiento		GLOSARIO	60
hacia su entorno. El «viaje geoquímico» por agua, suelo		FUENTES DE CONSULTA	63
o aire	31		



1



2



3



4

INTRODUCCIÓN

Los yacimientos minerales son anomalías de la Naturaleza en las que diversos procesos geológicos dieron lugar a la concentración de sustancias minerales metálicas y no metálicas, susceptibles de ser explotadas con beneficio económico con los medios tecnológicos disponibles, y que son requeridas como materias primas por la Sociedad moderna para asegurar el desarrollo humano. Tienen dimensiones relativamente pequeñas y, usualmente, ocupan superficies menores que 10 km². Un aspecto particular en relación con otros recursos económicos es la imposibilidad de traslado de un yacimiento del lugar donde se encuentra, lo que obliga a su explotación *in situ*.

La minería es la actividad económica que representa la extracción y procesamiento de las sustancias minerales de interés económico. Es una de las actividades más antiguas de la humanidad, con evidencias que se remontan al Paleolítico, cuando hace más de 40.000 años los hombres prehistóricos ya extraían mineral de hierro en África.

Todos los materiales utilizados por la Sociedad moderna tienen su origen en sustancias minerales obtenidas por la minería o bien su fabricación requiere de herramientas o equipos elaborados con productos provenientes de un yacimiento mineral. Incluso otras actividades del sector primario, tales como la agricultura, la silvicultura y la pesca, utilizan herramientas y máquinas fabricadas con materiales elaborados a partir de recursos minerales.

La minería, como otras industrias, puede causar daños ambientales, los que tienden a ser evitados mediante la incorporación de avances tecnológicos, evaluaciones previas de impacto ambiental, implementación de técnicas de mitigación de impactos y previsión del proceso de cierre de minas.

La extracción responsable de los recursos naturales implica satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la de las generacio-

nes futuras (desarrollo sustentable). Para el caso de los recursos naturales no renovables, la cantidad utilizada en cualquier proceso productivo debe ser sustituida por su equivalente en nuevos recursos. Por otra parte, aparece como inevitable el aumento de la demanda de recursos minerales considerando el crecimiento global de la población y el de las economías de países subdesarrollados y en vías de desarrollo. Cualquier visión que ignore a la minería como actividad económica de la humanidad en el futuro carece de realismo. De allí que el desafío para la actividad minera es extraer los recursos minerales causando el mínimo impacto o afectación al Medio Ambiente.

En este trabajo se presenta información básica sobre los yacimientos minerales en su entorno natural, los procesos que les dieron origen, su distribución en la Tierra y los conceptos geológicos que orientan su búsqueda y facilitan su localización. A continuación se analiza la necesidad de los minerales y su provisión, considerándose aspectos tales como el agotamiento de reservas, fuentes alternativas de sustancias minerales y las controversias que se plantean en torno a la actividad minera.

Se aborda el concepto de Medio Ambiente en su relación con la presencia y explotación de los recursos minerales incluyendo a todos aquellos elementos que componen el ecosistema, sin excluir por supuesto al hombre. Se analiza la contaminación natural que genera ambientes hostiles naturales para luego contrastarla con la contaminación antropogénica. En el marco de la actividad minera, se explican conceptos tales como contaminación, impacto, producción responsable, restauración y remediación. Se definen así los elementos y herramientas que permiten la producción responsable de los recursos minerales como parte integral de los planes de desarrollo regionales, respetando el principio de desarrollo sustentable.



1 LOS YACIMIENTOS MINERALES EN SU ENTORNO NATURAL

1.1. La concentración de los elementos químicos en la Naturaleza

Los elementos preponderantes en el Universo son el hidrógeno (75%) y el helio (24%). En la Tierra estos elementos ligeros no son tan abundantes, ya que la fuerza gravitatoria terrestre no los retuvo. La distribución y concentración de los demás elementos es consecuencia de procesos geológicos diversos que incluyeron, en las primeras etapas de formación de la Tierra, separación gravitacional y diferenciación química en los magmas. De los elementos conocidos, noventa y dos están presentes de manera natural en nuestro planeta, ocho de los cuales constituyen el 99% de la corteza terrestre.

Si bien se vincula la presencia de los metales con los yacimientos (y a éstos con su explotación o con la minería) en realidad todas las rocas contienen metales, sólo que en cantidades o proporciones muy bajas como para justificar su extracción. La Naturaleza se encargó, mediante diversos procesos geológicos, de acumularlos localmente, conformando yacimientos o depósitos minerales a partir de los cuales es posible su extracción y posterior utilización, restringiendo de este modo la actividad minera a pequeñas fracciones de la superficie del planeta.

La distribución de los elementos en la Tierra es simple y homogénea en su núcleo (con predominio de hierro y níquel), algo más variada en el manto (principalmente silicatos de hierro y magnesio) y muy compleja y heterogénea en la corteza, que es la capa más superficial del planeta.

El límite corteza-manto está ubicado a una profundidad media de 40 km en el área continental, en tanto el límite manto-núcleo se localiza a una profundidad cercana a los 2900 kilómetros.

La corteza terrestre es importante porque contiene todos los recursos naturales e interactúa con la atmósfera, la hidrósfera y la biósfera.

La composición química de la corteza terrestre se caracteriza por el predominio de oxígeno (el más abundante), silicio, aluminio y hierro, los cuales componen el 87% del total. A esos elementos les siguen en importancia calcio, magnesio, sodio y potasio, que participan en más de un 1% en su constitución; los ocho en conjunto son denominados *elementos mayoritarios*. En menor proporción se encuentran titanio, fósforo, manganeso, azufre, cloro y carbono, que conforman los denominados *elementos minoritarios*. El resto de los elementos, muchos de los cuales son utilizados por las diversas industrias, existen en proporciones mucho menores, algunos en concentraciones tan bajas que se miden en partes por millón. Este conjunto de elementos constituye el grupo de *elementos traza*.

Los procesos geológicos que ocurren en la corteza dan lugar a enriquecimientos o empobrecimientos locales de elementos. Cada tipo

ABUNDANCIA DE ELEMENTOS EN ROCAS COMUNES Y EN YACIMIENTOS

Metal	Contenido en las rocas (ppm cuando no se especifica; oro en ppb)				Contenido en yacimiento**	Factor de concentración o enriquecimiento
	Promedio en la corteza*	Granito	Basalto	Arenisca		
Aluminio	14,8 %***	14 %	17 %	16 %	30 a 65 % ***	2 a 4
Titanio	0,7 %***	0,30 %	1,3 %	0,8 %	≥ 2 % ***	3
Hierro	3,5 %	1,7 %	7,3 %	variable	35 a 50 %	10
Níquel	44	1 a 8	150	9	0.5 %	100
Cobre	30	8	87	30	0.4 a 3 %	200
Zinc	60	40	100	15	0,5 %	100
Oro	4	1,2 a 3,5	0,5 a 5,6	1,1 a 4,6	0,5 a 10 ppm	100
Plomo	15	20	6	7	2 a 5 %	1000
Plata	0,06	0,04	0,1	0,01 a 0,09	150 ppm	2000

* rocas ígneas de la corteza superior ** ley de mena promedio en yacimiento tipo *** % Al_2O_3 ó % TiO_2



de roca, cada ambiente geológico, está caracterizado por contenidos de elementos que pueden ser considerados valores «normales». Estas proporciones normales constituyen en cada uno de esos ambientes lo que se denomina *fondo geoquímico*. Ahora bien, en esos mismos ambientes, los procesos geológicos pueden actuar dando lugar a concentraciones selectivas de algunos elementos por encima de los valores normales. Se producen así concentraciones «anómalas» de sustancias químicas, bajo la forma de asociaciones de minerales que, puntualmente, pueden formar «yacimientos minerales».

En el entorno de los yacimientos, o en las áreas donde se agrupan varios de ellos, hay un desvío estadísticamente significativo de los valores de fondo geoquímico debido a la concentración anómala de uno o varios elementos químicos, que si bien están por debajo de los contenidos de esos elementos en los yacimientos, superan, en algunos casos ampliamente, el tenor normal de las rocas en áreas no mineralizadas.

1.2. Los yacimientos minerales

Un yacimiento mineral es una acumulación natural de uno o varios minerales que contienen elementos químicos de interés, entre ellos los metales, concentrados por encima de su abundancia media en la corteza terrestre o en las rocas que la constituyen (en el caso del hierro aproximadamente 10 veces, en el del cobre 100 veces y en el del plomo 1000 veces). El factor de concentración o grado de enriquecimiento para considerar una acumulación mineral como yacimiento varía para cada elemento en función del valor económico del metal o mineral de interés y de la tecnología disponible para su extracción y concentración.

La formación de depósitos minerales (otro modo de denominar a los yacimientos) se debe a la concentración de elementos por procesos geológicos naturales, que incluyen cambios físicos y químicos en rocas y minerales. Pueden agruparse en procesos endógenos, ocurridos en el interior de la corteza terrestre por la liberación del calor interno del planeta, o bien exógenos, es decir producidos en su superficie debido a la interacción de las rocas con la atmósfera, la biosfera y la hidrosfera.

PROCESOS GEOLÓGICOS FORMADORES DE YACIMIENTOS MINERALES			
Tipo de proceso		Descripción del proceso	Ejemplos de elementos que concentran
Endógenos	Cristalización magmática	Precipitación de minerales de mena como constituyentes mayores o menores en rocas magmáticas.	Diamantes, tierras raras. Uranio, litio, estaño, cesio (en pegmatitas).
	Segregación magmática	Precipitación por cristalización fraccionada o inmiscibilidad líquida.	Cromo, cobre, níquel, titanio.
	Hidrotermal	Deposición a partir de soluciones acuosas calientes de origen magmático, metamórfico o meteórico.	Cobre, oro, molibdeno.
	Metamórfico	Neoformación de minerales por cambios en las condiciones de presión y temperatura.	Hierro, oro, níquel, cobre. Magnesio. Talco.
Exógenos	Exhalativos superficiales, volcanogénicos	Exhalaciones hidrotermales submarinas depositadas en fondo oceánico.	Plomo, zinc, plata. Azufre.
	Sedimentarios	Alóctonos (clásticos): deposición de minerales pesados.	Rutilo, zircón, estaño, oro. Arenas.
		Autóctonos: precipitación química de minerales con o sin intervención de biota.	Hierro, manganeso, cobre. Fosfatos.
	Meteorización	Lixiviación de elementos solubles y formación de concentraciones de elementos insolubles (residuales). Precipitación de los elementos solubles <i>in situ</i> (concentración supergénica) o transportados a distancia de la fuente (exóticos).	Aluminio, níquel, cobre, oro, plata.

Como se observa en el cuadro adjunto, los procesos geológicos endógenos pueden dar lugar a la formación de minerales de interés económico a partir de un magma y/o de fluidos hidrotermales, o por procesos metamórficos, que involucran fenómenos de fusión, extracción, disolución y, posteriormente, cristalización de minerales. Los elementos químicos son así colectados y concentrados, constituyendo minerales que se agrupan en rocas y/o depósitos de minerales metálicos y no metálicos.

El magma, o masa de roca fundida, se forma en zonas profundas del planeta (usualmente a kilómetros de profundidad) y asciende pudiendo llegar a la superficie (rocas volcánicas) o solidificarse en profundidad (rocas intrusivas o plutónicas). Durante el proceso de enfriamiento se forman determinados minerales, reteniendo algunos elementos químicos (fundamentalmente los mayoritarios), en tanto otros elementos que no tienen cabida en los minerales así formados se concentran de manera residual junto con fluidos (principalmente agua a alta temperatura), cris-

Un **mineral** es un elemento o compuesto químico, de composición definida y estructura atómica determinada, formado mediante procesos naturales e inorgánicos.
Una **roca** es un sólido cohesionado natural que está formado por uno o más minerales.



Los contenidos de los diversos elementos químicos presentes en las rocas son tan disímiles que deben ser expresados en diferentes unidades, desde porcentajes (%) en el caso de altas concentraciones hasta partes por billón (ppb) para contenidos mínimos. En los yacimientos de minerales metalíferos e industriales esta concentración se denomina **ley** y se refiere al contenido del elemento o del óxido del elemento en la mena, expresado generalmente como porcentaje en peso. En el caso de los yacimientos de metales preciosos la ley se expresa en gramos por tonelada. Cuanto mayor es la ley en el yacimiento, mayor es su contenido de metal.

Equivalencias

1 ppm (una parte por millón) = 1 g/t (un gramo por tonelada) = 1 gramo por cada 1000 kilogramos = 0.0001% = 1.000 ppb (partes por billón)

El metamorfismo produce la transformación en profundidad de rocas y yacimientos preexistentes por efectos de aumento de la presión y temperatura en determinados sitios de la corteza terrestre. Esto origina nuevas rocas, denominadas metamórficas, formación de nuevos minerales, algunos de interés económico, y liberación de fluidos contenidos en las rocas preexistentes, que durante su migración a través de fracturas movilizan y eventualmente concentran elementos químicos de interés.

La formación de yacimientos minerales por procesos exógenos se relaciona con una etapa inicial de exposición de las rocas que constituyen la corteza terrestre a la acción de los agentes externos: atmósfera, hidrosfera y biosfera. Su interacción produce la desagregación y disolución de los componentes de las rocas, es decir su meteorización física y química. El transporte hídrico, eólico y gravitacional y la posterior deposición da origen a acumulaciones de sedimentos que pueden contener minerales de interés. De acuerdo

talizando en su migración hacia la superficie terrestre por enfriamiento o cambios en las condiciones físicoquímicas del medio en que se formaron las rocas, dando lugar a yacimientos minerales en donde se concentran elementos tales como el plomo, el cinc, el cobre, el oro, la plata, etc. Estos fluidos, en el caso de llegar a la superficie constituyen los denominados sistemas geotermales, usualmente asociados a actividad volcánica.

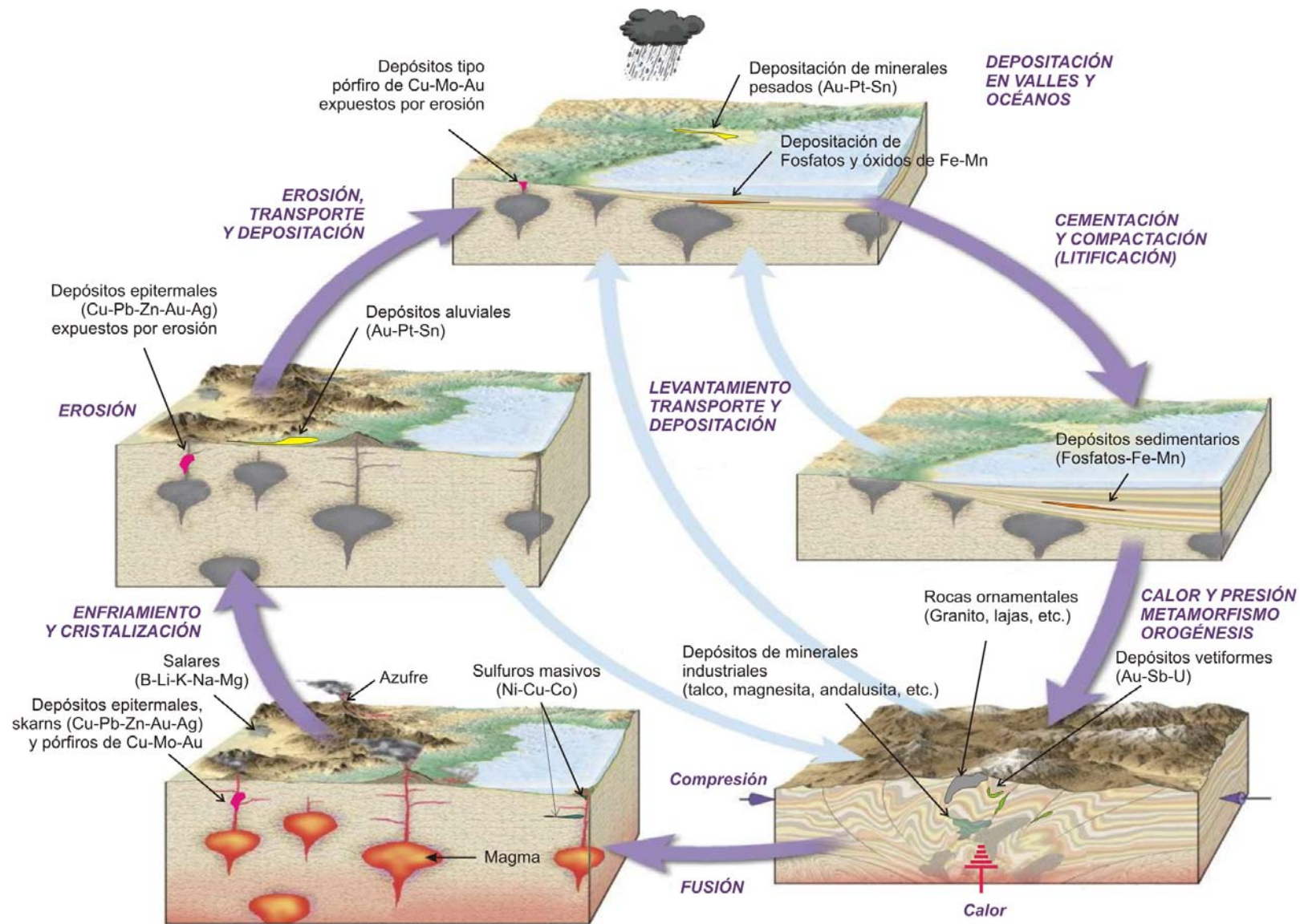
No todos los minerales presentes en un yacimiento tienen valor económico. Aquellos minerales que contienen elementos de interés, usualmente metales, se designan minerales de **mena**. Los minerales asociados a ésta, con poco o nulo valor, se denominan **ganga**. Por ejemplo, la galena es mena de plomo y la esfalerita lo es de zinc; cuarzo, baritina y calcita suelen acompañarlos como ganga.

GRANDES GRUPOS DE YACIMIENTOS MINERALES SEGÚN SU ORIGEN				
Grupos / Subgrupos	Proceso de formación	Tipos / Subtipos	Minerales / Sustancias	
MAGMÁTICOS	Magmáticos <i>sensu stricto</i> (ortomagmáticos)	Concentración de minerales por cambios físicoquímicos en el magma (inmiscibilidad, cristalización, segregación).	Según roca y proceso	Níquel, cobalto, cobre, cromo.
	Volcánicos /subvolcanicos - Hidrotermales	Precipitación de minerales a partir de fluidos (acuosos, gaseosos), más o menos alejados del cuerpo magmático.	Vetas o tipo-pórfido	Cobre, oro, molibdeno, plomo, zinc, plata, hierro, manganeso.
SEDIMENTARIOS	Precipitación química	Acumulación de compuestos químicos precipitados en fondos de lagos o mares a partir de soluciones.	Evaporitas (marinas, lacustres) / acumulaciones nodulares	Sal común, silvita, yeso, otros sulfatos. Hierro y manganeso.
	Acumulación biogénica	Acumulación de minerales y/o sustancias que portan organismos marinos en sus esqueletos o conchas.		Caliza, fosforita, diatomita.
	Acumulación clástica	Acumulación en superficie (o en fondos de lagos, ríos, mares) de partículas de minerales preexistentes liberados por erosión de sus yacimientos primarios.	Placeres	Oro, diamantes, platino, arenas negras de hierro y titanio, zircón, zafiros.
	Residuales	Lixiviación de rocas ricas, en condiciones climáticas tropicales, dejan residuos explotables.	Lateritas	Aluminio, hierro.
METAMÓRFICOS	Metamórficos	Concentración de minerales que se forman en rocas preexistentes debido a cambios en las condiciones de presión y temperatura (por calentamiento, intrusiones, soterramiento, etc.).	Skarns	Estaño, molibdeno, grafito, talco, silicatos de aluminio.

Procesos geológicos y formación de yacimientos minerales
(modificado de Pearson, Prentice Hall, Inc., 2005 "The rock cycle")



PROCESOS GEOLÓGICOS FORMADORES DE DEPÓSITOS MINERALES





Muchos depósitos minerales se encuentran a varios kilómetros de profundidad y aún no han sido hallados. Otros fueron completamente erosionados y no quedan rastros de ellos, salvo de sus raíces. El yacimiento de cobre Chuquicamata, en Chile, se formó entre 4 y 5 kilómetros de profundidad hace más de 30 millones de años. Hoy está expuesto en superficie, lo que implica que el bloque de rocas en el que se formó fue ascendido por movimientos tectónicos y luego fue erosionado, eliminándose en un lapso de unos 20 millones de años la masa rocosa existente por encima del yacimiento. Este proceso facilitó su descubrimiento en el desierto chileno y su posterior explotación mediante un open pit.

tales como caparazones, esqueletos, material vegetal, dando lugar por ejemplo a depósitos de caliza y carbón).

En un ambiente superficial también puede darse, bajo ciertas condiciones, enriquecimiento de elementos de interés económico por reacciones químicas determinadas.

El tiempo requerido para la formación de un depósito mineral, tanto a partir de procesos exógenos como endógenos, varía entre miles y millones de años. Una vez constituido el yacimiento, no significa necesariamente que se encuentre a la vista o aflorando, ni menos aún en condiciones de ser explotado. Con excepción de aquellos depósitos originados en condiciones superficiales, todos los demás – que son la mayoría – se han formado a profundidades de hasta varios kilómetros. Esto significa que, para estar «expuestos» tal como hoy lo están, debió ocurrir el ascenso de las masas rocosas que los contienen (generándose montañas por actividad tectónica) y la consecuente erosión de las mismas, dando lugar a la remoción de la masa de roca que se encontraba por encima de los yacimientos al momento de su formación, lo que técnicamente se denomina exhumación. Esta exposición, que facilita su posterior explotación, en el transcurso del tiempo geológico y por efectos de la erosión continua, puede dar lugar a la destrucción natural del yacimiento. Si bien sabemos que los yacimientos minerales no se localizan en cualquier sitio del planeta ni se originaron en cualquier momento de la historia geológica, no so-

mos tan conscientes de cuántos yacimientos pudieron de esta manera haber desaparecido sin llegar a ser explotados. Sin embargo esta destrucción puede originar, por acumulación en un ambiente sedimentario, un nuevo depósito mineral. Por ejemplo, los depósitos de oro de playa (sedimentarios) en la costa de la isla de Tierra del Fuego (sur de la Patagonia), se formaron por destrucción de yacimientos hidrotermales que ya no existen.

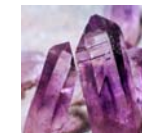
La presencia de un yacimiento desde luego implica que se preservó desde la época en la cual se constituyó hasta ahora. La gran mayoría de los yacimientos que conocemos tienen una antigüedad de por lo menos algunos millones de años, mientras que los más antiguos se originaron hace centenares de millones de años e, incluso, hace más de mil millones de años. Seguramente no son ahora tan grandes como lo fueron inicialmente, debido a que están fragmentados por efectos tectónicos y seguramente fueron alterados por su interacción con la atmósfera y la hidrósfera.

1.3. Clasificación de los yacimientos según el uso de los minerales contenidos

Si bien usualmente se asocia el concepto de los yacimientos minerales con la concentración de metales, muchas otras sustancias minerales aprovechables y requeridas por la industria en general provienen de yacimientos que proveen minerales y rocas industriales, rocas ornamentales y «áridos» (sean éstos naturales o triturados con maquinarias) para la construcción.

Las sustancias minerales denominadas no metalíferas y/o industriales son aquellas que se emplean de manera directa en procesos industriales, sea como fundentes, como materia prima para elaborar cementos, cales, cerámicas, u otros. En tanto, en el caso de los depósitos metalíferos se aprovechan los elementos químicos que estos contienen.

Las rocas que por sus cualidades físicas, tales como brillo, dureza, resistencia, distribución, forma y tamaño de granos, color, etc., tienen aptitud ornamental, se utilizan para este fin sin el agregado de tratamientos químicos, sólo son pulidos y lustrados sobre piezas en general aserradas. Son las denominadas rocas ornamentales o dimensionales.



EJEMPLOS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE SUSTANCIAS MINERALES Y LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE SU EXPLOTACIÓN		
Yacimientos de	Principales sustancias y elementos	Característica distintiva de su explotación
Metales	Hierro, aluminio, manganeso, cobre, níquel, zinc, plomo, plata, oro.	Pequeña minería o minería artesanal: riesgo derivado de la operación con metales y compuestos químicos.
		Gran minería: extrae y puede acumular grandes volúmenes de roca. Moviliza metales. Es mecanizada a gran escala.
Minerales y rocas industriales	Arcillas, calizas, sales, carbón, fosfatos.	Moviliza grandes volúmenes.
Minerales y rocas ornamentales	Granitos, mármoles, travertino, gabros.	Impacta el relieve y el paisaje.
Áridos	Arenas, gravas, canto rodado. Triturados de basaltos y granitos.	Posibilidad de equilibrar agradación y degradación en los depósitos de áridos naturales. Impacto al relieve en áridos de trituración.
Gemas	Diamantes, zafiros, aguamarinas, jades.	Diferentes técnicas según se trate de yacimientos sedimentarios (placeres) o magmáticos (en rocas).

Los minerales que se aprecian por su belleza o por el desarrollo de sus cristales constituyen otro grupo de interés económico, el de las gemas y minerales de colección.

Las características propias y diferenciales que poseen los distintos tipos de yacimientos y las sustancias minerales que proveen, condicionan los diversos aspectos de la minería relacionada con ellos, tales como su exploración, explotación y tratamiento, y también el impacto que ésta genera en su interacción con el Medio Ambiente. En razón del menor valor económico relativo de estos materiales respecto de los metales, se extraen cuando sus yacimientos afloran con poca o ninguna cobertura de material no utilizable (estéril), dado que la extracción y movilización de este último afecta notoriamente la ecuación económica de su explotación.

1.4. El tamaño y la forma de los yacimientos minerales

El tamaño de los depósitos minerales depende en gran medida de las condiciones geológicas de su formación, es decir, del proceso geológico que le dio origen. Estas condiciones (temperatura, profundidad, presión, presencia de agua y sales, entre otras) se ven luego reflejadas

UNA CUESTIÓN DE DIMENSIONES

¿Qué volumen ocupa un yacimiento?

Un yacimiento de cobre de tamaño gigante, con más de 10 millones de toneladas de metal, puede ocupar una superficie de 1000 x 1000 metros (1 km²) y extenderse hasta una profundidad de 400 metros. Implica una masa de mil millones de toneladas de roca.

En una superficie de 10 a 20 km² (es decir 1000 a 2000 hectáreas) un gran yacimiento de hierro puede contener cientos de millones de toneladas de metal.

Los yacimientos pequeños se explotan cuando el mineral se encuentra muy concentrado o es de gran valor, como en el caso de las vetas. Con cientos de metros de extensión y pocos metros de ancho, pueden ocupar volúmenes inferiores a 10 millones de metros cúbicos.

gico que le dio origen. Estas condiciones (temperatura, profundidad, presión, presencia de agua y sales, entre otras) se ven luego reflejadas

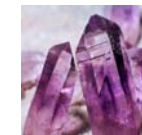
DIMENSIONES DE LOS MAYORES OPEN PITS DEL MUNDO

Continente	País	Mina	Tamaño del open pit			Sustancias explotadas
			Superficie	Profundidad	Longitud	
América del Norte	Estados Unidos	Bingham Canyon	7,7 km ²	1.200 m	4 km	Cu - Au - Ag - Mo
	Canadá	Muskeg	17 km ²	100 m	5 km	Esquistos bituminosos
		Wabush (Carol Lake)	14 km ²	220 m	8 km	Fe
América del Sur	Brasil	Carajas	23 km ²	250 m	10 km	Fe - Mn - Cu - Ni
	Chile	Chuquibambilla	10 km ²	900 m	4,3 km	Cu - Mo - Re - Au
	Colombia	El Cerrejón	9 km ²	200 m	7 km	Carbón
Asia	China	Fushun	13,2 km ²	290 m	6,6 km	Carbón - Esquistos bituminosos
	Rusia	Korkinsk	7 km ²	700 m	3 km	Carbón
Europa	Alemania	Hambach	48 km ²	210 m	8 km	Carbón
	Suecia	Aitik	2,2 km ²	435 m	2,8 km	Cu - Au - Ag - Mo
Oceanía	Australia	Kalgoorlie	5 km ²	320 m	3,5 km	Au
	Indonesia	Grasberg	3,3 km ²	700 m	2,2 km	Cu - Au - Ag



Imágenes de grandes labores a cielo abierto en el mundo.

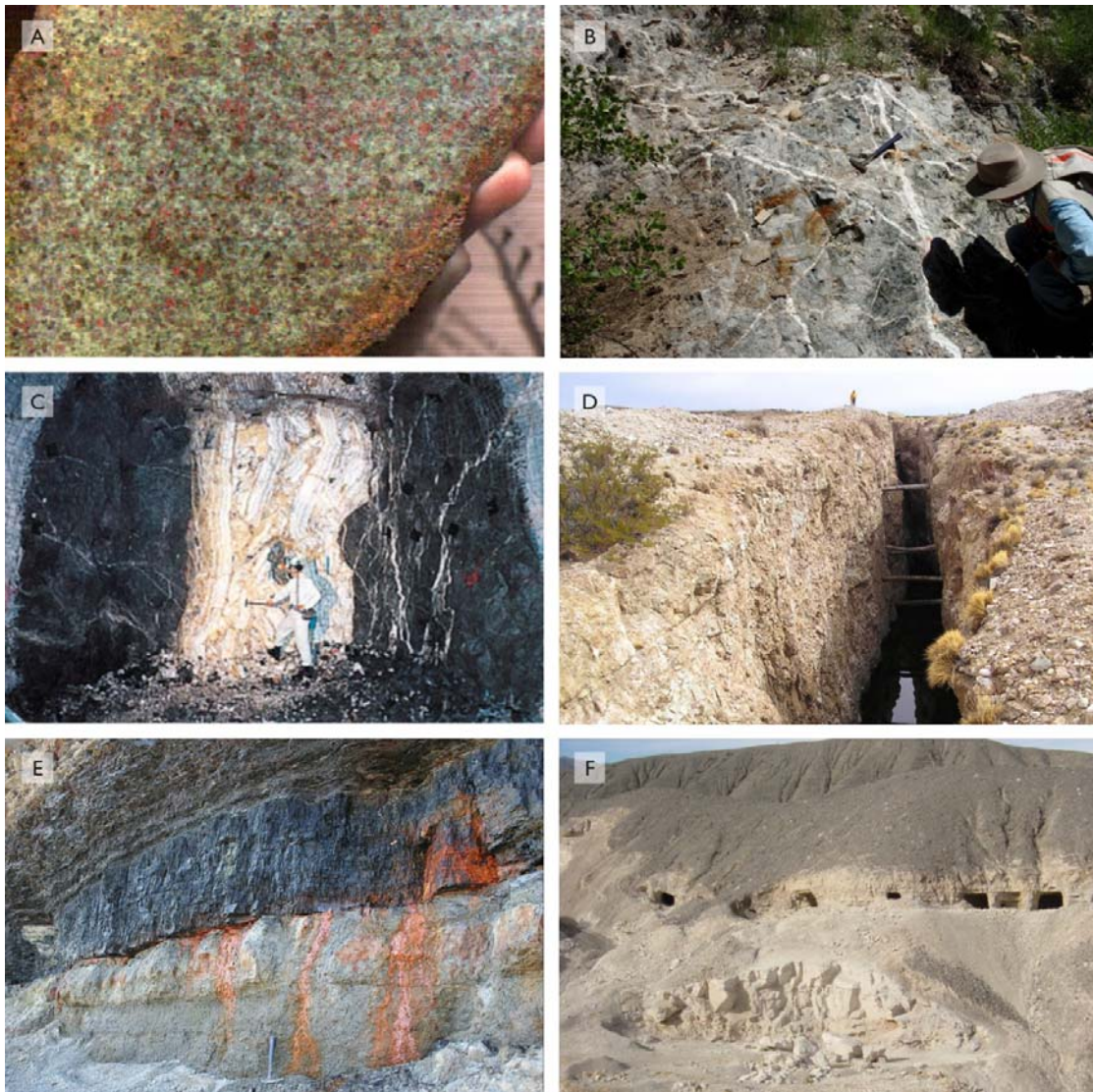
A: Mina de hierro Sishen, Sudáfrica. B: Mina de carbón Fushun, China. C: Mina de oro Kalgoorlie, Australia. D: Mina Chuquicamata, Chile. E: Mina de carbón Korkinsk, Rusia. F: Mina de bitumen Muskeg River, Canadá. G: Mina de cobre Bingham, Estados Unidos.



Grandes máquinas se ocupan de los trabajos en la megaminería.

LISTADO DE YACIMIENTOS METALÍFEROS DE SUDAMÉRICA DE TAMAÑO GIGANTE – MUY GRANDE

PAÍS	YACIMIENTO	SUSTANCIA	RESERVAS DE METAL CONTENIDO (toneladas)
Brasil	Serra dos Carajas	Fe	12.000 Mt Fe
	Mutun-Urucum	Fe	40.000 Mt Fe
	Trombetas	Bauxita (Al)	1.000 Mt bauxita
	Quadrilátero Ferrífero	Fe	16.000 Mt Fe
	Caraíba	Cu	9,6 Mt Cu
	Seis Lagos	Nb	84 Mt
	Lagoa Real	U	93.190 t U ₃ O ₈
	Poços de Caldas	U	50.000 t U ₃ O ₈
	Complexo do Barreiro	Nb	11,5 Mt Nb ₂ O ₅
Chile	Vazante	Zn	2,25 Mt Zn
	Collahuasi	Cu	25,4 Mt Cu
	Radomiro Tomic	Cu	17,65 Mt Cu
	Chuquibambilla	Cu (Mo)	58,9 Mt Cu
	La Escondida	Cu (Au, Mo)	28,8 Mt Cu
	Rio Blanco – Los Bronces	Cu, Au, Mo	54,85 Mt Cu; 198 t Au; 1 Mt Mo
	Salares de Atacama	Li	6,3 Mt Li
Perú	Los Pelambres	Cu	20,86 Mt Cu
	La Granja	Cu, Ag	9,1 Mt Cu; 5200 t Ag
	Antamina	Cu, Zn, Au, Ag, Pb	18,6 Mt Cu ; 15,45 Mt Zn ; 20.550 t Ag
	Toquepala	Cu (Mo, Au)	9,63 Mt Cu
	Cuajone	Cu, Mo (Au)	13 Mt Cu ; 0,6 Mt Mo
	San Gregorio	Pb, Zn	5,1 Mt Zn ; 1,5 Mt Pb
Argentina	San Rafael	Sn	0,65 Mt Sn
	Navidad	Ag	23.400 t Ag
	Pachón	Cu	13 Mt Cu
	Taca Taca	Cu	12.92 Mt Cu
	Aguilar	Ag, Pb, Zn	4,35 Mt Zn; 2,75 Mt Pb; 6000 t Ag
	Rincón	Li	1,4 Mt Li
	Cauchari	Li	0,93 Mt Li
	Hombre Muerto	Li	0,86 Mt Li
Chile y Argentina	Pascua Lama	Au, Ag	570 t Au; 21.000 t Ag
Venezuela	Dto El Callao	Au	2500 t Au
Bolivia	Uyuni	Li	10,2 Mt Li
	Potosí	Ag, Sn	100.000 t Ag; 2,4 Mt Sn
	Huanchaca	Ag, Pb, Zn	20.000 t Ag; 5,4 Mt Zn; 2,7 Mt Pb



Formas más comunes de yacimientos minerales

A: Mineralización diseminada (cinabrio en roca volcánica, Corchuelo, España. Foto Morales de Francisco). B: Mineralización en stockwork (cuarzo portador de cobre y molibdeno, Los Tamales, México). C: Veta de cuarzo aurífero (Hishikari, Japón). D: Vista del espacio que ocupó una veta de fluorita, luego de ser explotada; sólo permanece la roca encajonante (Río Negro, Argentina). E: Manto de carbón (Point Aconi, Nueva Escocia, Canadá. Foto Michael C. Rygelvia Wikimedia Commons). F: Explotación mediante galerías de un banco horizontal de diatomita (Río Negro, Argentina).

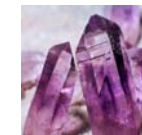
en una serie de características similares (edad, características geoquímicas, mineralogía de mena y de ganga, forma, etc.), que permiten clasificar los yacimientos dentro de «modelos» o «tipos», facilitando su estudio. El tiempo de exposición y la intensidad de la erosión reducen luego su tamaño original.

Los distintos tipos de depósitos minerales no se apartan demasiado de un determinado contenido máximo de metal, estadísticamente considerados. Así como existen límites de tamaños de yacimientos en función de la cantidad de metal que contienen, también existen «límites» (menos precisos, por tratarse de promedios estadísticos de yacimientos mundialmente conocidos y estudiados) de contenido de metal para cada tipo o modelo de yacimiento. Se establecen así categorías de tamaño (pequeño, mediano, grande y muy grande o gigante). Existe el caso extremo, y no por eso poco común, de algunos yacimientos cuyo contenido de metal es tan bajo que su explotación se encuentra impedida o limitada por resultar no económica, aun cuando su volumen sea muy grande.

En oposición a ellos, existen los yacimientos gigantes, aquellos que poseen grandes cantidades de metales. Son excepcionales; en el cuadro de la página 9, elaborado sobre una base de 27.000 depósitos minerales

El tamaño de los diferentes yacimientos de cobre

El tamaño promedio de los yacimientos de **cobre de tipo pórfiro** es de 140 millones de toneladas de mena. Con una ley de 0,54 % Cu, el contenido promedio es 756.000 toneladas de cobre metálico. En cambio, **los yacimientos de cobre en sedimentos** promedian en tamaño 22 millones de toneladas con una ley de 2,1% Cu y un contenido de cobre metálico de 462.000 toneladas. Estos datos surgen de los estudios de cientos de yacimientos de cobre de todo el mundo, a partir de los cuales se establecen los «modelos de ley-tonelaje» (o modelos de cantidad-contenido) para distintos yacimientos de un mismo metal.



de América del Sur, se observa que sólo 35 yacimientos son de un tamaño categoría Gigante ó Muy Grande.

La explotación de estos grandes yacimientos es denominada «megaminería», ya que implica la extracción y procesamiento de importantes volúmenes de rocas mineralizadas y la utilización de grandes maquinarias y herramientas diseñadas y construidas para los fines específicos de la explotación de yacimientos de estos tamaños en lapsos relativamente cortos. En general implican extensas labores «a cielo abierto» (es decir, superficiales), la mayoría de las cuales resultan en aperturas que ocupan grandes superficies del terreno y son denominadas *open pits*.

Ahora bien, si comparamos las superficies de las obras de la megaminería con la ocupada por otras obras hechas por el hombre, tales como las represas hidroeléctricas, se observa su pequeñez relativa. La represa de Akosombo, construida sobre el río Volta, en Ghana, tiene 660 m de largo y 114 m de alto. Su embalse formó el lago de mayor superficie de agua del mundo (8482 km²). Esta superficie es aproximadamente 200 veces más grande que el área del mayor *open pit* del mundo, el de la mina de carbón Hambach, situada en Alemania (48 km²).

La forma de los yacimientos es consecuencia de los procesos geológicos que acumularon el mineral de interés. Las mineralizaciones pueden estar concentradas o dispersas en una determinada roca, estrato o nivel. Entre las formas más conocidas en las que se concentran los minerales se encuentran los **bancos o mantos**, las **vetas** y las **lentes**. En general, las primeras se vinculan con un origen sedimentario y las segundas están relacionadas con procesos magmáticos e hidrotermales (ígneos); las lentiformes pueden tener uno u otro origen.

Los yacimientos en los que el mineral de interés no está acumulado localmente en la roca, constituyen mineralizaciones llamadas **diseminadas** (en las que el mineral está disperso en la roca) y en **stockwork** (cuando la mineralización forma una red de venillas distribuida en la masa rocosa). Este grupo comprende los denominados «pórfiros».

Las formas de los yacimientos tienen fuerte influencia en el método de explotación y éste en el impacto sobre el entorno ambiental.

SUPERFICIE OCUPADA POR LOS LAGOS DE LAS MAYORES PRESAS DEL MUNDO

(se indica una por continente)

Continente	País	Embalse	Nombre de la presa	Río	Área del lago
América del Norte	Canadá	Smallwood	Churchill Falls	Río Churchill	5698 km ²
América del Sur	Venezuela	Lago Guri	Presa de Guri	Río Caroní	4250 km ²
Asia	Rusia	Kuibyshev	Zhiguli	Río Volga	6450 km ²
Europa	Ucrania	Keremchuk	Keremchuk	Río Dnieper	2252 km ²
África	Ghana	Lago Volta	Presa Akosombo	Río Volta	8482 km ²
Oceanía	Australia	Lago Gordon	Gordon	Río Gordon	281 km ²

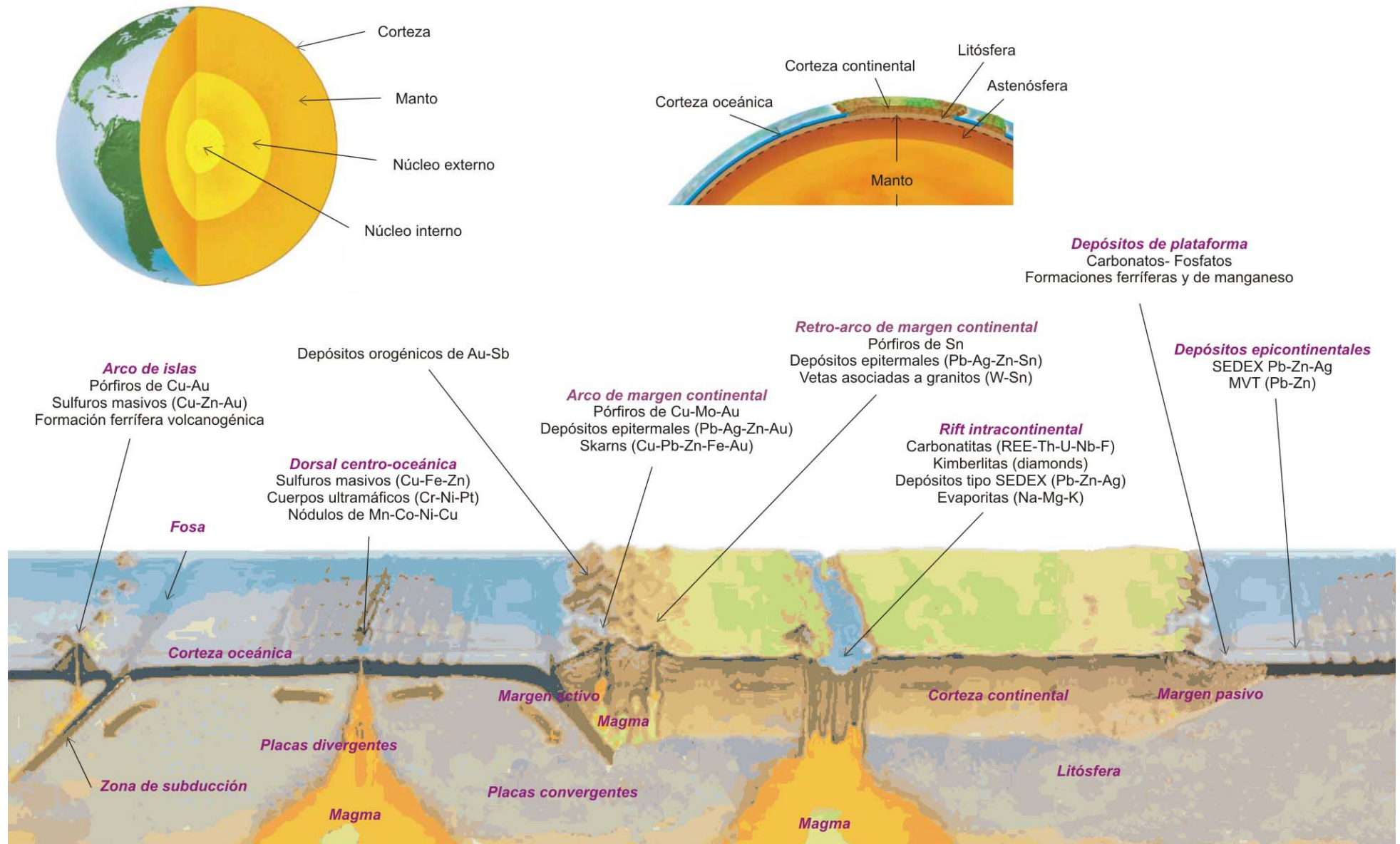
1.5. La Metalogenia

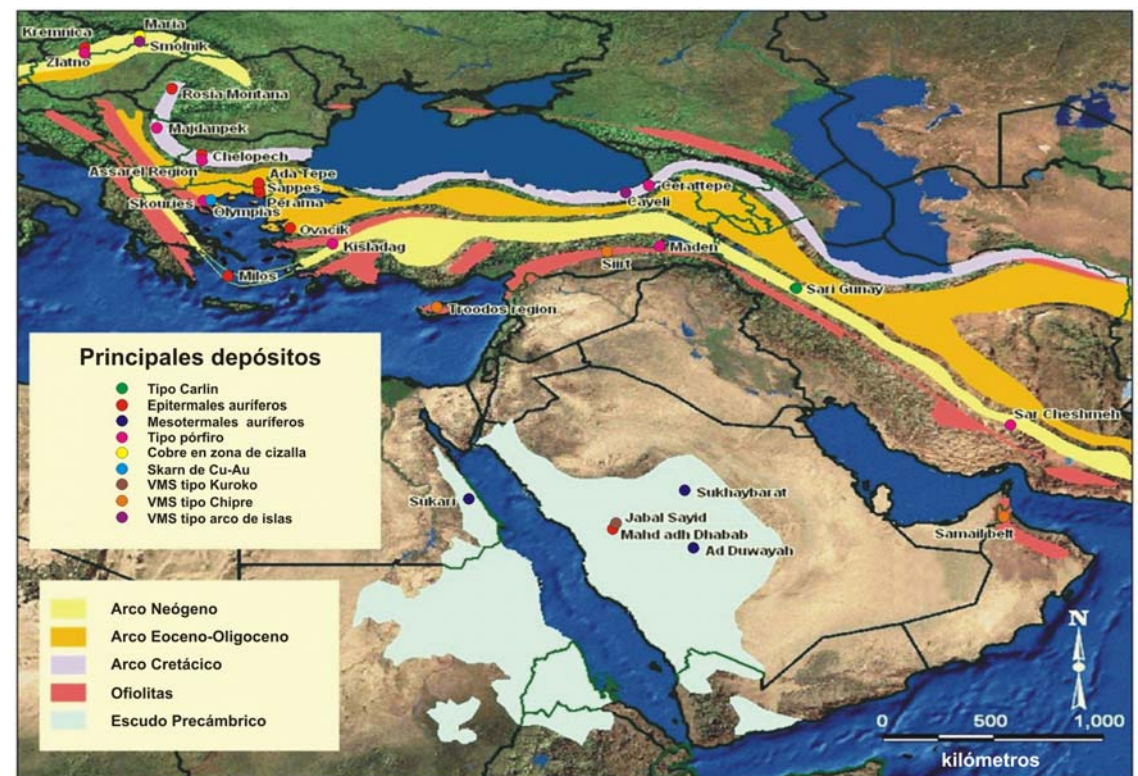
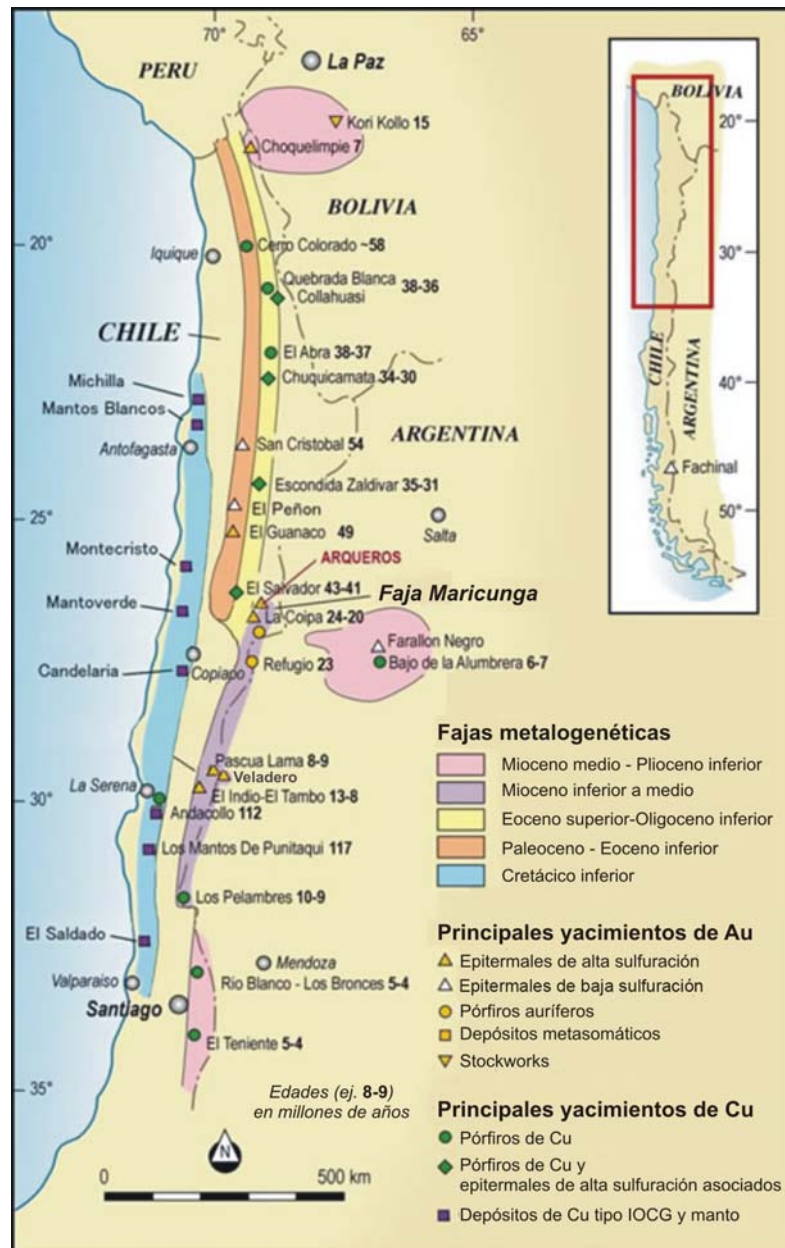
Los diversos tipos de yacimientos se originaron como consecuencia de procesos geológicos que ocurrieron en determinadas épocas y en sitios específicos del planeta. Por este motivo, las mineralizaciones se concentran en algunas áreas de la Tierra y están ausentes en otras. Por ejemplo, los principales recursos de cobre se localizan en los Andes; los de boratos en los altiplanos o en cuencas evaporíticas en cuyo entorno hubo actividad volcánica, que aportó el boro; en tanto los grandes yacimientos de níquel se ubican en los cratones (del Báltico, de África del Sur, de Australia).

En efecto, la formación de un yacimiento mineral está condicionada por las particularidades locales de la corteza terrestre (movimiento, grosor, flujo de calor, etc.). Determinados tipos de yacimientos se generan cercanos al sitio donde dos placas tectónicas convergen, o donde divergen, o están pasivas, se adelgazan o engrosan. El conjunto de estas características, que estudian los geólogos, se conoce como «ambiente tectónico» de formación de los yacimientos. Por ser éstos los ambientes con los cuales se asocian o vinculan cada tipo o cada grupo de depósitos minerales, su conocimiento permite asignar posibilidades de ocurrencia de determinados yacimientos en cada sitio del planeta. Por otra parte, la relación entre los diversos ambientes tectónicos favorables y los distintos tipos de yacimientos que en ellos ocurren es una herramienta importante para orientar la búsqueda de minerales de interés económico. De esta manera se pueden realizar mapas de favorabilidad, en los que se



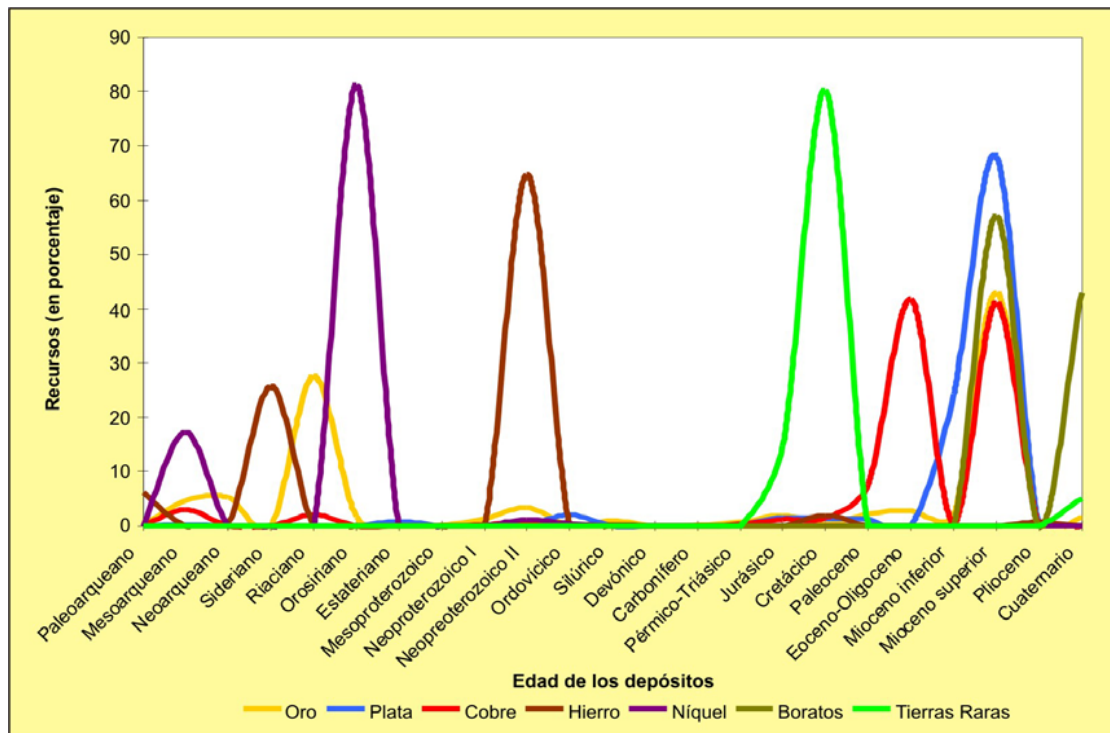
AMBIENTES TECTÓNICOS Y DEPÓSITOS MINERALES ASOCIADOS





Ejemplos de mapas metalogénicos con indicación de tipos de mineralizaciones y fajas metalogénicas. A la izquierda: Metalogenia del cobre en los Andes de América del Sur (de Sillitoe y Perelló, 2005). Arriba: Mapa metalogénico del cinturón orogénico de Tetis occidental (University of British Columbia Project).

indican las áreas con mayor probabilidad de hallazgo de minerales, en función de su historia geológica. La distribución de las mineralizaciones en el tiempo geológico permite identificar los procesos que llevaron a su formación y, de este modo, relacionarlos. En la historia geológica de América del Sur, fue el Cenozoico la era durante la cual se formaron la mayor parte de los yacimientos de cobre, con dos lapsos identificados entre 5 y 26 millones de años y entre 32 y 63 millones de años, en los cuales se originaron más del 80 % de ellos. En el caso del hierro, el 65 % de los yacimientos tienen edades entre 540 y 1000 millones de años (en el Neoproterozoico), y si se suman los conformados entre 2200 y 2600 millones de años se cuenta prácticamente la totalidad del hierro descubierto en América del Sur.



Distribución porcentual del contenido metálico de yacimientos de América del Sur en el transcurso del tiempo geológico. Nótese que en distintas épocas geológicas se concentraron distintos metales.

La **Metalogenia** es la rama de la geología que investiga la distribución en espacio y tiempo de los depósitos minerales, con el objetivo de definir los factores que han contribuido a la distribución de los metales en la corteza terrestre. Define de esta manera los modelos geológicos que permiten explicar la existencia de zonas donde se concentran metales y otras en las que éstos están ausentes.

Este análisis implica el estudio de las mineralizaciones y su clasificación mediante los denominados *modelos de depósitos*. Un modelo es un esquema en el que se describe y explica un conjunto a partir de parámetros medibles, sin pretender ser una réplica de la realidad. La función final de los modelos de depósitos es evaluar las características geológicas, geofísicas y geoquímicas de los yacimientos conocidos para descifrar su génesis y predecir mejor la localización de nuevos depósitos minera-

les. La utilización de los modelos permite realizar evaluaciones de recursos minerales más precisas y optimizar los programas de exploración.

El análisis de la distribución de las mineralizaciones en el tiempo permite establecer *épocas metalogénicas*, es decir intervalos de tiempo geológico durante los cuales se formaron concentraciones minerales de un metal o grupo de metales.

La evaluación de la distribución geográfica de los elementos permite establecer provincias y fajas o dominios metalogénicos. Una *Provincia Metalogénica* es un área caracterizada por un contenido anómalo regional de uno o más metales («preconcentraciones») donde procesos geológicos de diferentes edades formaron diversos tipos de depósitos de minerales. Una *Faja Metalogénica* (o Franja o Cinturón o Dominio) corresponde a un sector de la corteza terrestre caracterizado por rocas originadas por un proceso geológico en un tiempo determinado y con las cuales se vinculan genéticamente un grupo de depósitos minerales.

El análisis metalogenético involucra también la identificación de los elementos geológicos que han contribuido localmente a la concentración de los minerales en sectores o sitios determinados. Estos se designan como **metalotectos** e involucran elementos tales como estructuras (fallas, fracturas que controlan el emplazamiento de vetas), litologías (por ejemplo niveles con materia orgánica que al actuar como barrera reductora promueve la precipitación de oro durante la migración de fluidos mineralizados), etc.

La Metalogenia estudia las concentraciones naturales de metales y sustancias minerales. Analiza sus mecanismos de formación, su distribución geográfica y su edad. A partir de ese conocimiento, define las guías para la búsqueda de nuevos yacimientos. Los resultados de la investigación se presentan como mapas metalogénicos, que son mapas a escala regional en los que se muestra la distribución de los depósitos minerales (metálicos o no metálicos) sobre una base geológica adecuada con el fin de destacar las características relevantes de las mineralizaciones (con una simbología apropiada para indicar la forma, tipo de mineralización y magnitud de cada depósito) y su relación con las rocas del entorno. El propósito de los mapas metalogénicos es entonces proveer una base científica para orientar las exploraciones mineras regionales.



2 LA NECESIDAD DE MINERALES Y SU PROVISIÓN

2.1. Por qué y para qué se explotan los yacimientos

Desde la Edad de Bronce hasta la era de las comunicaciones, como respuesta a la demanda de la Sociedad y en pos del progreso de la civilización,



Minería en el pasado y en el presente. Distintos métodos, igual objetivo.

la minería se ha ocupado de proveer metales, minerales y rocas, utilizando las herramientas y métodos disponibles de acuerdo con los tiempos históricos.

Si bien desde el punto de vista del desarrollo colectivo la nuestra fue denominada «la civilización basada en los metales», también es cierto que el desarrollo humano individual, en aspectos tan sensibles como la salud, la vivienda e incluso la alimentación, ha sido claramente beneficiado por esta actividad, que se aboca a la búsqueda y extracción de los materiales que la Sociedad y las personas demandan, a partir de los recursos naturales existentes en el planeta.

La minería es el primer escalón para convertir un recurso que provee la Naturaleza en un objeto utilizable, a la que siguen otras etapas que comienzan con las industrias básicas y continúan con las industrias de

CLASIFICACIÓN DE METALES SEGÚN SUS PRINCIPALES APLICACIONES		
Categorías	Metales	Principales usos
Metales ferrosos	Hierro, manganeso, cromo.	Transporte, construcción, máquinas y herramientas.
Metales ligeros	Aluminio, magnesio, titanio.	Transporte, construcción, máquinas y herramientas.
Metales base	Cobre, zinc, plomo, níquel, cobalto, antimonio.	Comunicaciones, máquinas y herramientas.
Metales raros	Estaño, wolframio, molibdeno, vanadio, niobio, tierras raras (lantánidos La-Lu, e Y).	Transporte, construcción, máquinas y herramientas, industria química.
Metales muy raros	Berilio, gadolinio, germanio, indio.	Medicina, electrónica, telecomunicaciones.
Metales radioactivos	Uranio, torio, actínidos y transuránidos.	Medicina, energía
Metales preciosos	Oro, plata, elementos del grupo del platino.	Electrónica
Metaloides	Arsénico, antimonio, selenio, telurio.	Industrias varias
Metales alcalinos y alcalino térreos	Litio, rubidio, cesio.	Baterías, electrónica.



RECURSOS HUMANOS PARA LA EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE UN YACIMIENTO (Plantilla tipo)				
Geólogos	Operadores de equipos	Administradores	Geoquímicos	Ingenieros civiles
Ingenieros mecánicos	Técnicos	Geofísicos	Cartógrafos	Supervisores
Ingenieros de minas	Ingenieros metalurgistas	Abogados	Economistas	Ingenieros y Lic. ambientales

transformación. Su objetivo final es satisfacer la necesidad del hombre, expresada a través de su demanda de metales.

Una de las principales divisiones geoquímicas separa entre los elementos que forman rocas y aquellos que se encuentran en proporciones muy menores en las rocas. Son, respectivamente, los elementos mayoritarios (silicio, aluminio, hierro, calcio, magnesio, titanio, sodio, potasio) y los elementos minoritarios y trazas (la mayoría de los metales). Por otra parte, existen también clasificaciones que separan los elementos químicos según sus usos industriales, como muestra el cuadro adjunto.

El estudio de los yacimientos minerales, a partir de su hallazgo, es complejo. Compete a la labor de especialistas de distintas disciplinas, ya que deben conjugarse aspectos variados, que incluyen desde la etapa previa de búsqueda del yacimiento, a su posterior evaluación, diseño de explotación, estudio de la viabilidad económica de la operación, análisis del mercado demandante del metal, como también factores políticos, sociales y, por supuesto, ambientales.

2.2. Qué debate la Sociedad sobre la Minería

De acuerdo con las experiencias iniciales de países con gran desarrollo minero, y aquellas posteriores obtenidas en países con menor desarrollo minero, la respuesta a la disyuntiva «**sí o no a la Minería**» encuentra variaciones según el nivel de desarrollo y conocimiento de la Sociedad. Los planteos se centran fundamentalmente en los siguientes ejes:

- la competencia entre los recursos naturales disponibles (fundamentalmente agua, también espacio),
- la competencia entre actividades económicas,
- las capacidades de los organismos estatales (nacionales o provinciales) encargados del contralor ambiental,

- los antecedentes de otras explotaciones en la región / país, fundamentalmente el grado de impacto producido,
- el grado de responsabilidad de las empresas mineras que actúan,
- el tipo de operación minera (a cielo abierto, megaminería, uso de químicos, etc.).

De todos estos importantes aspectos, algunos están estrictamente relacionados con el Medio Ambiente y su abordaje es de índole científica. Los restantes temas, económicos y regulatorios, son objeto de consideración política y no científica. De todos modos, es claro que en relación con cualquier actividad industrial existen responsabilidades compartidas entre los Estados (como delegados de los habitantes de un país para defender sus intereses) y las empresas encargadas de la actividad.

2.3. La explotación de los recursos minerales

No todas las concentraciones minerales o yacimientos tienen interés económico. Su explotación se decide cuando confluyen favorable-

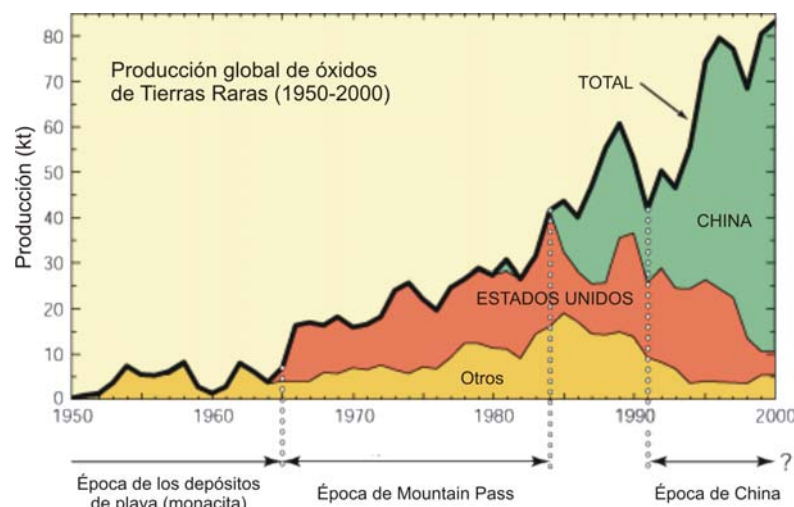
COMPLETAR EL CICLO DE EXPLOTACIÓN MINERAL ES CUIDAR EL AMBIENTE

Muchos yacimientos contienen minerales que, aunque se los extrae junto con los minerales de mena, no son aprovechados. El caso paradigmático, aunque no único, es el de la pirita (sulfuro de hierro), el mineral metálico más abundante de los yacimientos de tipo pórfiro (que son la mayor fuente de cobre y oro). Este mineral es liberado al procesar la roca que lo contiene junto con los minerales de cobre y oro, y es luego acumulado en colas y/o escombreras, ya que no es industrializado; constituye la fuente principal de generación de drenaje ácido con el consecuente impacto en el Medio Ambiente. Sin embargo, de la pirita es posible obtener, mediante distintos procesos, el azufre y el hierro contenidos. La excelente flotabilidad de este mineral hace factible técnicamente su recuperación a partir de residuos mineros. El consecuente análisis económico debería tener en cuenta que al recuperar la pirita se podrían evitar los costos del tratamiento necesario para asegurar el aislamiento del mineral en las colas.



mente una serie de factores entre los que se destacan el valor económico de los metales a extraer, su concentración o ley, el volumen de las reservas, la distancia al sitio de consumo, la factibilidad técnica de su extracción y concentración, y la demanda y oferta del metal. Como puede observarse, estos factores son de índole tanto geológica como económica y técnica, algunos previsible y otros no tanto. Por otra parte algunos de ellos pueden variar en el tiempo, como por ejemplo el precio del mineral o metal, o el costo de la tecnología requerida para su extracción. Hay casos en los cuales, al no conjugarse favorablemente todos estos factores, un yacimiento mineral no es explotado en determinada época y puede serlo en otra.

Un aspecto inicial al evaluar un yacimiento es determinar el contenido mínimo de mineral (o metal) para que la explotación sea redituable económicamente. Si bien es función del precio de los metales, las posibilidades que brinda el continuo adelanto en tecnologías de explotación y beneficio hacen que se considere factible explotar yacimientos con **tenores** cada vez menores de metales. Un depósito mineral con 0,5 % de cobre no se hubiera explotado 30 años atrás, mientras que sí se explota en la actualidad. Esto se debe no sólo al incremento en el precio del metal sino a la mejora tecnológica, que hace rentable lograr



TIERRAS RARAS

Tierras raras es el nombre común de 17 elementos químicos: los pertenecientes al grupo de los lantánidos (lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prometeo, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio), más el escandio y el itrio. Se conocen desde 1794, cuando J. Gadolin descubrió el itrio. No son tan escasos en la corteza terrestre como su nombre parece indicar (una denominación muy antigua que hace referencia a los óxidos como «tierras»). De hecho el cerio es más abundante en la corteza que el cobre. El cerio, junto con el itrio y el neodimio, son las Tierras raras más abundantes.

Son elementos que usualmente se emplean en aplicaciones de alta tecnología. Se utilizan para fabricar imanes permanentes fuertes, materiales superconductores, láseres, materiales ópticos, conductores electrónicos, catalizadores y en resonancia magnética nuclear (empleados en la medicina moderna). Por ello, las encontramos formando parte de teléfonos celulares, pantallas, vehículos híbridos, lámparas, turbinas, etc., todas ellas aplicaciones de carácter tecnológico.

Las Tierras raras están presentes en más de 200 minerales. Se las extrae de yacimientos que se formaron en rocas magmáticas y otras rocas relacionadas, que se hallan en China, principal productor mundial (con más de la mitad de los depósitos minerales conocidos en el mundo), en Estados Unidos (del yacimiento Mountain Pass, que fue el principal productor hasta el comienzo de la explotación del yacimiento Bayan Obo en China) y en Vietnam. También se conocen depósitos en Australia, Brasil, India, Sudáfrica y Rusia, entre otros países, y recientemente se han descubierto grandes recursos en barros del fondo marino del océano Pacífico. La dificultad de su obtención, sin embargo, radica en la tecnología que debe aplicarse para separarlos y purificarlos de los demás elementos con los que están asociados en los minerales o rocas que los contienen.





Explotar minerales para alimentar el mundo

No siempre se percibe que gran parte de la nutrición lograda por la ingesta de alimentos se alcanza por una transferencia de elementos fundamentales (como lo son el fósforo y el potasio, entre otros) desde el suelo a los cultivos, que permite su crecimiento y desarrollo. Frente a la exigencia de alimentar diariamente millones de personas, la capacidad de los suelos agrícolas para producir cultivos es finita. De allí la necesidad de remineralizarlos, es decir, incorporarles los elementos que ellos han entregado a los cultivos, mediante la incorporación de fertilizantes. Con excepción del nitrógeno, el resto de los elementos nutrientes provienen de minerales y rocas.

Por otra parte, el ciclo de producción y consumo de estos nutrientes constituye un gran viaje (a veces de decenas de miles de kilómetros) desde sus yacimientos minerales de origen hasta los campos de cultivo. Luego, desde éstos, distribuidos en todo el planeta, a los centros elaboradores de alimentos y por fin a la mesa de la población mundial. Algunas decenas de yacimientos gigantes de fosforitas proveen de Fósforo a las principales plantas de fertilizantes del mundo, mediante la extracción de 250 millones de toneladas de roca fosfórica cada año. Así, producen más de 40 millones de toneladas de fertilizante con base fósforo (P_2O_5), que fertilizan anualmente más de 10 millones de km^2 de suelos de cultivo en todo el mundo, para producir 2500 millones de toneladas de granos (cereales y oleaginosas).

De acuerdo con la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) el desafío de proporcionar alimentos suficientes para todos en el mundo nunca ha sido mayor. La población actual de la Tierra, 7000 millones de personas aproximadamente, aumentará, según las previsiones, a unos 9000 millones en 2050. En esa fecha deberá producirse al año otros 1000 millones de toneladas de cereales y 200 millones de toneladas adicionales de productos pecuarios.

Entonces, la minería de los recursos minerales necesarios para producir fertilizantes deberá incrementarse si se pretende asegurar la fertilidad de los suelos de cultivo, volviéndolos a nutrir de los elementos extraídos. Caso contrario, ningún esfuerzo, del carácter que sea, permitirá alimentar la población mundial.

EQUIVALENTES MINERALES DE NUTRIENTES EXTRAÍDOS DE LOS SUELOS DE CULTIVO

Elemento	Soja		Trigo		Maíz		Girasol	
	Nutriente extraído		Nutriente extraído		Nutriente extraído		Nutriente extraído	
	kg elemento / t de grano	kg mineral* / t de grano	kg elemento / t de grano	kg mineral* / t de grano	kg elemento / t de grano	kg mineral* / t de grano	kg elemento / t de grano	kg mineral* / t de grano
Azufre	6,71	37	4,55	25	4,02	22	5,53	30
Calcio	16,84	73	3,00	13	3,00	13	18,00	78
Potasio	33,05	63	20,70	40	19,50	37	28,40	55
Fósforo	7,59	85	5,13	59	4,20	48	5,13	59

Fuente: INTA. Cruzate y Casas (2003) para extracción de nutrientes. Cálculos propios para equivalentes de minerales.

* Un mineral representativo, entre los que portan el elemento nutriente, a los efectos del cálculo (azufre= yeso; calcio= yeso; potasio= silvita; fósforo= fosforita 20 % P_2O_5). Los valores no representan dosis de fertilización.

cobre metálico de altísima pureza (99 % Cu) partiendo de un contenido natural en el yacimiento tan bajo como 0,5 %, y al concepto de economía de escala que domina la explotación de grandes yacimientos. Esta situación tiene fuerte impacto positivo sobre los efectos adversos del agotamiento de los recursos, al obtener recursos a partir de yacimientos con proporciones muy bajas de ellos.

La posibilidad de explotación de yacimientos de baja ley permite entonces, de manera indirecta, incrementar las reservas de una región o de un país. En efecto, se incorporan así al negocio minero volúmenes de roca mineralizados no considerados previamente, cuando no era rentable su explotación. Sin embargo, este hecho también conlleva otra condición, que es la explotación de mayores volúmenes de roca, situación que desafía a científicos y tecnólogos para minimizar el impacto ambiental de las megaoperaciones.

Existen yacimientos que por sus grandes dimensiones se explotan durante décadas, incluso más de un siglo. La mina El Teniente, en Chile, una de las más grandes del mundo explotadas subterráneamente hasta más de 1800 m de profundidad, fue descubierta en 1706 y tiene registros de producción, con minado manual y transporte con animales, que datan de 1819. Su explotación continúa, por lo que se acerca a los doscientos años «de vida». Con los yacimientos que se descubren en la actualidad

UTILIZACIÓN DE AGUA

En la producción de un **viñedo** se registran consumos netos del orden de 3000 m^3 de agua por cada hectárea de vides, a contabilizar mediante los aportes de riego que complementan en mucha mayor proporción a los pluviales o naturales.

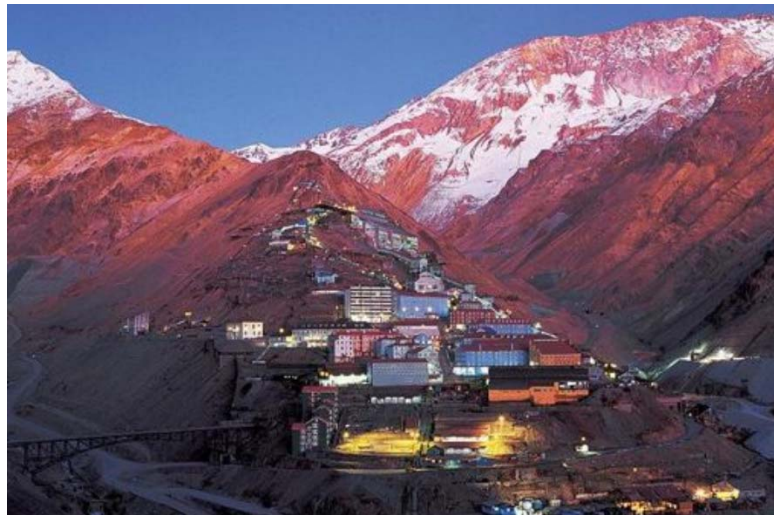
La producción de una **hortaliza** muy demandante de agua y de consumo común, como es el caso de la cebolla, requiere de aproximadamente 12.000 m^3 por cada hectárea cultivada.

La mina Veladero, en los Andes de Argentina, es uno de los cinco mayores yacimientos de oro del mundo. Produce anualmente 28 toneladas de **oro y plata**. Para ello, utiliza 1,8 millones de m^3 de agua, es decir el equivalente al riego de 150 hectáreas cultivadas con cebolla o 600 hectáreas de viñedos.

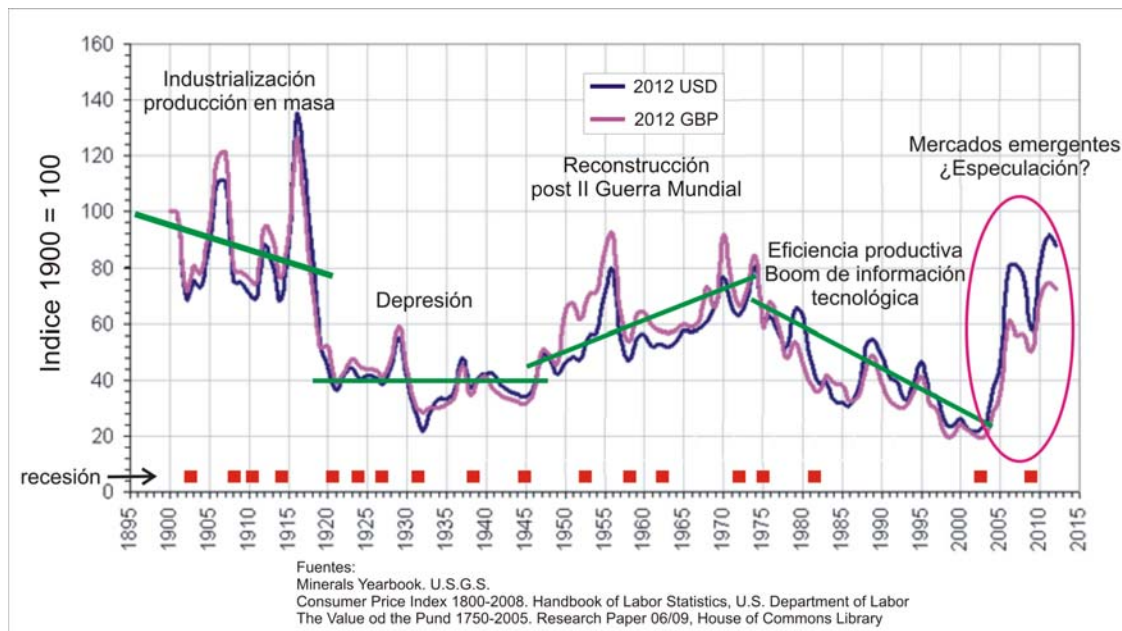
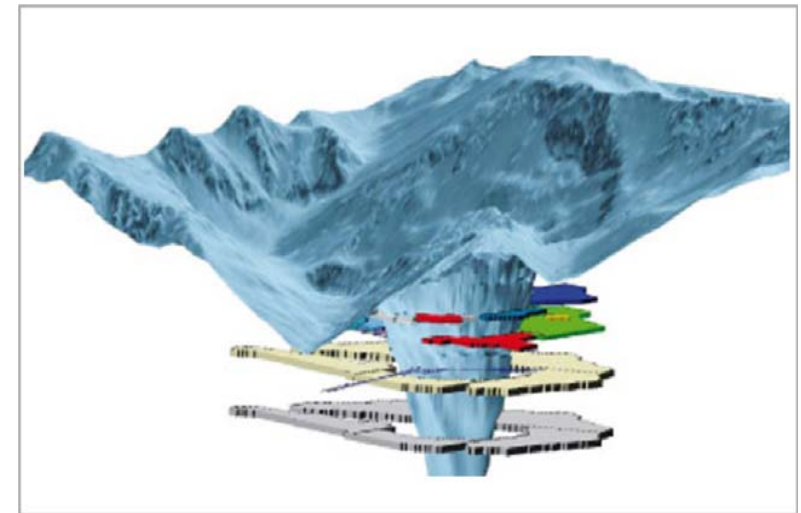


Minerales y sus usos.

A: Mina de fosfatos de Araxá, Brasil, y campo sembrado fertilizado. B: Cantera de cuarzo en Ontario, Canadá y una edificación vidriada. C: Mina de titanio Lac Tio, Canadá y una construcción emblemática con láminas de titanio, el Museo Guggenheim de Bilbao, España. D: La mayor mina de hierro de Europa, Kiruna en Suecia, y un ferrocarril. E: La mina de cobre Bajo de la Alumbrera, Argentina, y líneas de alta tensión transportadoras de energía. F: Cantera de áridos de trituración, Argentina, y una carretera.



Mina El Teniente, Chile. Modelo de desarrollo de la mina en profundidad.



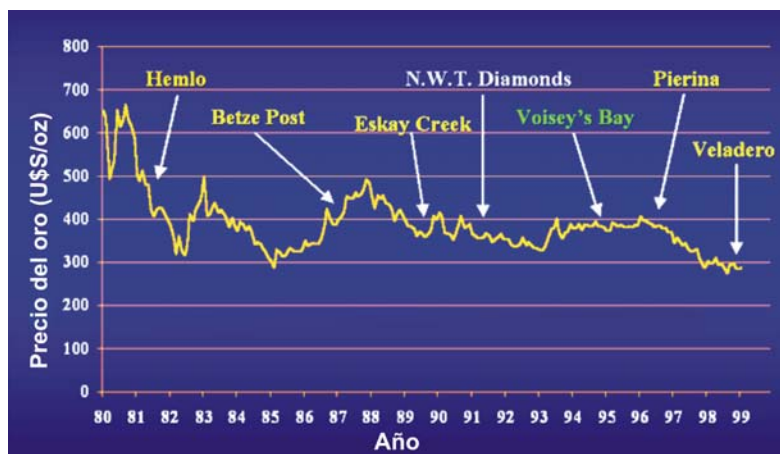
Evolución del precio del cobre en el período 1885-2015, con indicación de los eventos macroeconómicos globales.

esto no suele suceder y se prevé, para la mayoría, una vida útil del orden de varias décadas, ya que se privilegia maximizar las escalas de explotación para la obtención de mayores ganancias.

2.3.1. Las variaciones de los precios de las materias primas minerales

El ciclo de precios de los metales es también un factor crítico en la explotación de los recursos minerales. Debe tenerse en cuenta que los precios están determinados en los mercados internacionales en general de manera independiente del «negocio minero» y son reflejo de la evolución macroeconómica, eventualmente del uso de las materias primas; puntualmente las caídas de los precios coinciden con épocas económicas recesivas. Un buen ejemplo lo constituye la variación del precio del cobre, que es un típico indicador de la construcción de obras de infraestructura.

En la década 2000-2010 los precios de los metales mostraron una curva ascendente (sólo interrumpida por la crisis mundial de 2008-2009), que impulsó significativamente la inversión en minería en todas sus etapas, desde la prospección hasta la construcción de minas, incluyendo la ampliación de las capacidades de las existentes.



Los descubrimientos de yacimientos son independientes de los precios de los metales. Las flechas indican el precio del oro en el momento del descubrimiento de cada yacimiento citado.
Datos International Copper Study Group ICSG.

La importancia de estos ciclos de precios altos, tanto en países mineros maduros como en aquellos con potencial para desarrollarlo, se verifica en el aumento de la recaudación fiscal de los Estados, en el aumento de la inversión en todo el ciclo minero, en la incorporación de mineral marginal subeconómico a la categoría de económico, lo que conlleva un aumento de las reservas, en el aumento de la mano de obra ocupada, incluyendo contratistas y proveedores, así como inversiones en infraestructura, etc.

Desde un punto de vista geológico debe destacarse aquí, entre todos los aspectos mencionados, el hecho que un ciclo relativamente extenso de altos precios de un determinado metal permite la explotación de la mayor parte de un yacimiento, al posibilitar la explotación rentable de sectores más pobres (con menores leyes), permitiendo así agotar las reservas totales de un depósito mineral.

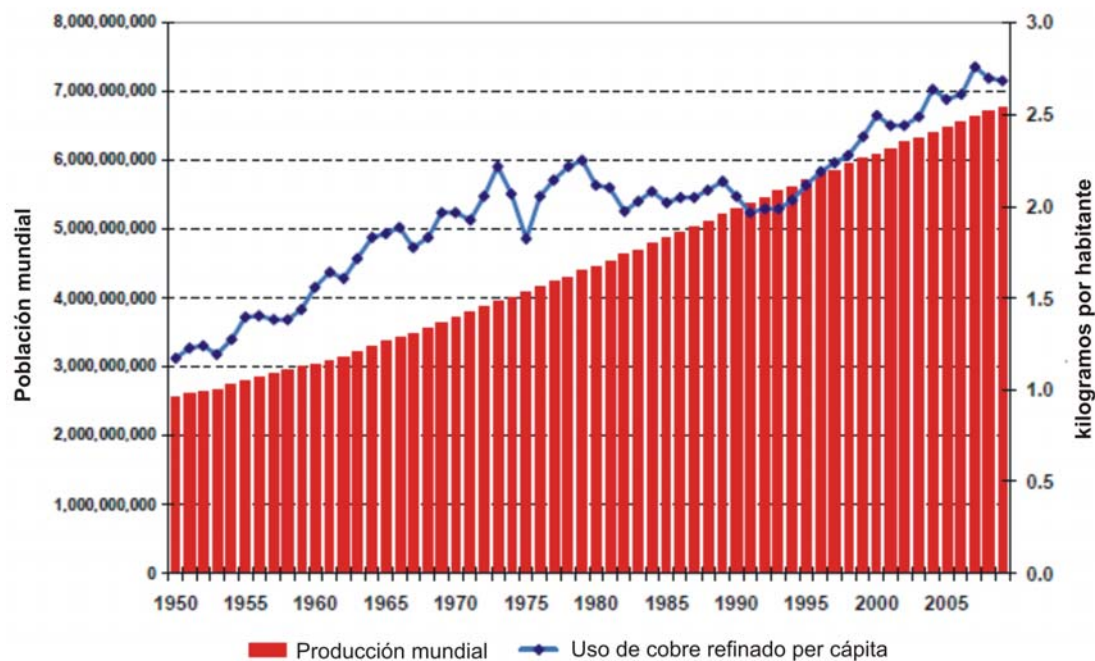
Por otra parte, en general los descubrimientos de yacimientos ocurren independientemente del precio de los metales. En efecto, debido a los extensos plazos involucrados en la prospección, hallazgo, exploración, desarrollo y explotación de los yacimientos, su búsqueda no suele estar condicionada por los precios de estos commodities.

Sin embargo, la factibilidad de los proyectos mineros es muy sensible a la variación del precio de los metales (por su alta variabilidad si se la compara con la mayor estabilidad de los precios de manufacturas y servicios) así como al riesgo derivado de los ciclos de la economía global.

La renta minera tiende a desaparecer en los períodos de recesión y aumenta en las fases de expansión del ciclo económico mundial. Subsidiariamente, permite aumentar el monto de inversiones destinadas a la exploración de nuevos depósitos minerales.

2.4. El agotamiento de los recursos minerales conocidos. Los «nuevos» recursos minerales

¿Podemos imaginar un mundo sin metales? ¿Podemos imaginar un mundo sin hierro para vehículos o herramientas, sin cobre para transmitir energía, sin litio para fabricar baterías de celulares y computadoras, y



Consumo mundial de cobre refinado por habitante y población mundial. Datos International Copper Study Group ICSG.



Metal industrial	Producción mundial (Millones de t)	Consumo habitante / año
Hierro	1900	270 kg
Aluminio*	40	5,7 kg
Cobre	17	2,5 kg
Zinc	12,8	1,8 kg
Manganeso	16	2,3 kg

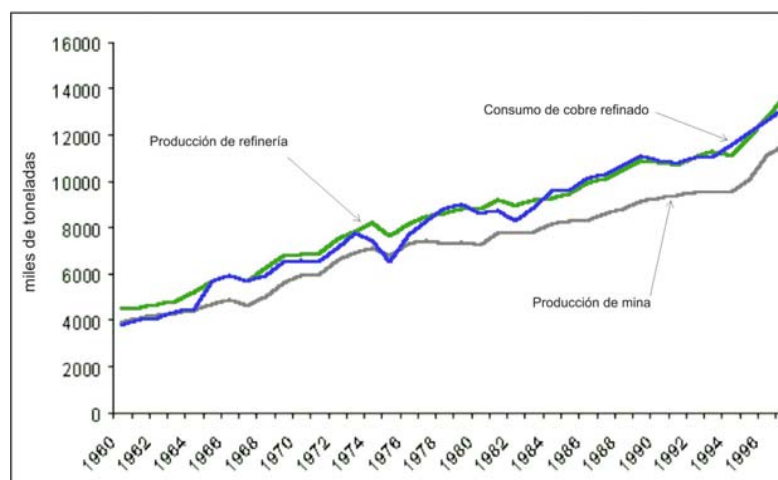
Producción de metales de minas para abastecer la sociedad mundial (datos para el año 2012).

Dato de población mundial año 2012: 7000 millones de habitantes.

*El dato corresponde a aluminio primario elaborado.

sin medio centenar de otros elementos químicos utilizados en una lista interminable de aplicaciones antiguas y modernas?

El aumento en el consumo de muchos metales y minerales está directamente relacionado con el crecimiento poblacional. Tal vez el caso paradigmático sea el del cobre, cuyo consumo ha crecido rápidamente con el aumento de la demanda por parte de países con economías emergentes a partir de mediados de 1990 (por ejemplo Brasil, India, Indonesia y China).



Producción y consumo «van de la mano». Datos de producción de cobre de mina y cobre refinado. Consumo de cobre refinado.

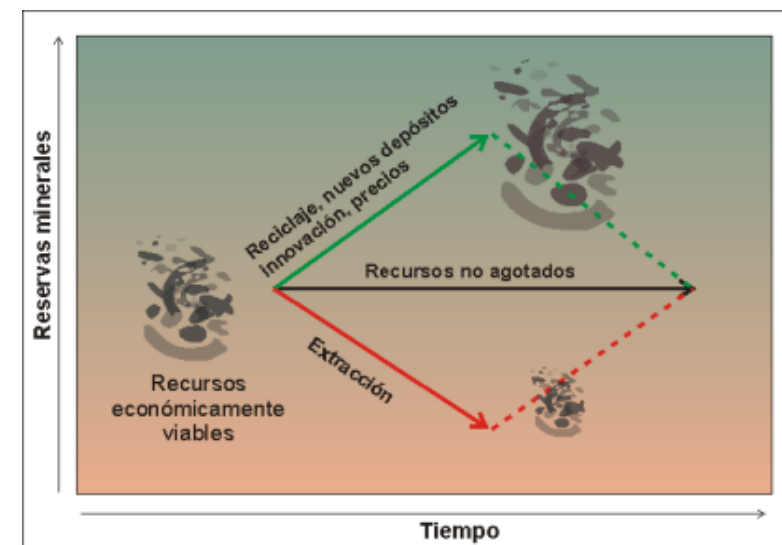
En el cuadro se muestra la cantidad de metal «individualmente utilizado» por los habitantes del planeta, estadísticamente considerados, a partir de un cálculo simple de producción anual / población mundial. Un abordaje que se realiza más adelante en esta publicación sorprende aún más, cuando se tiene en cuenta el volumen de roca que debe ser explotado para satisfacer el requerimiento de metales por habitante y, por ende, el impacto generado sobre el Medio Ambiente.

¿Nos quedaremos en algún momento sin metales? ¿Sin yacimientos de donde obtenerlos? Para contestar estas preguntas deberían considerarse y proyectarse tantas variables que la respuesta tendría poco grado de certidumbre.

Hay enfoques que permiten contrarrestar la idea de que existe un límite o amenaza a la disponibilidad global de recursos minerales.

Como puede observarse en la figura, el incremento en el consumo de una materia prima, en este caso el cobre, siempre fue acompañado por un aumento en la producción minera para satisfacer la demanda creciente.

Y, paralelamente con este crecimiento, a través de la inversión en exploración se han acrecentado las reservas globales de metal gracias a

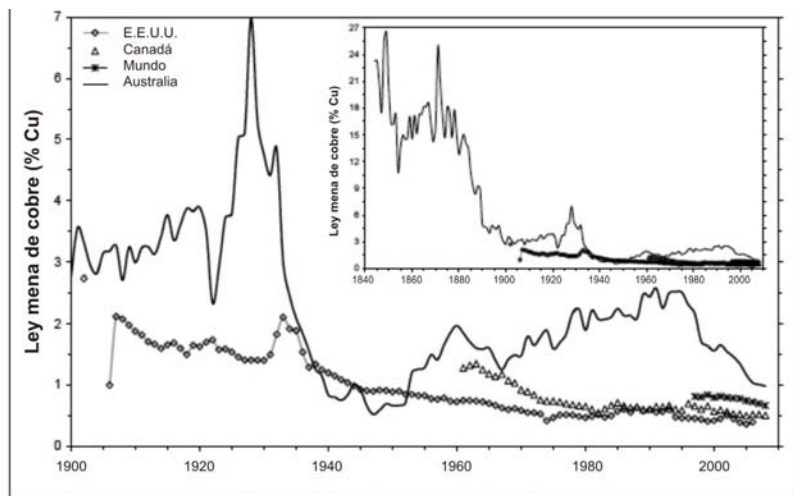


Ciclo de desarrollo de las reservas mineras globales.

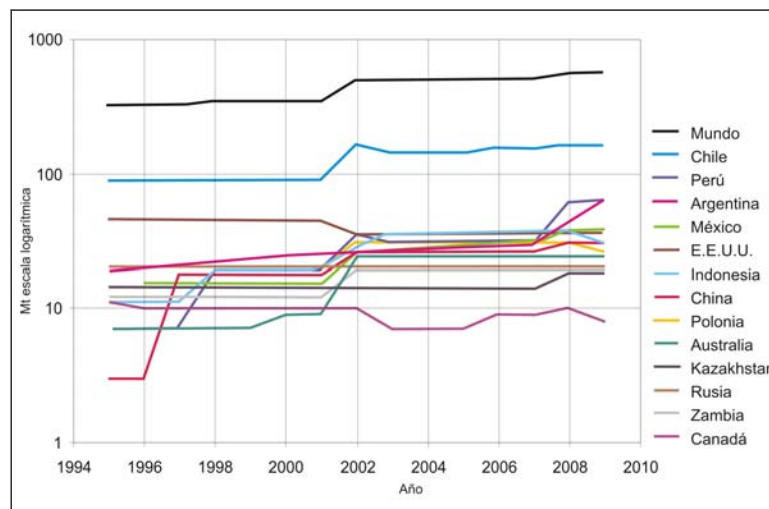
la labor de exploración de los Estados y las empresas, lo que permite aportar nuevas reservas y «reemplazar» aquellas extraídas.

Tomemos nuevamente el caso del cobre. En la figura adjunta se puede observar cómo las reservas a escala global se han incrementado de manera consistente en los últimos quince años, aun considerando el crecimiento del consumo. El comportamiento por país, en cambio, es variable, de acuerdo con las políticas que promueven o no la exploración.

Por otra parte, en el pasado sólo se minaban yacimientos con altas concentraciones de metales (con hasta varios kilogramos de metal en cada tonelada de roca); hoy se explotan yacimientos con contenidos tan bajos que los geólogos de hace más de un siglo los hubieran considerado despreciables. En otras palabras, se agotan los yacimientos con leyes de más de 1% de cobre y entran en producción aquellos con leyes menores, extendiendo las reservas mundiales disponibles de este metal. En el futuro se extraerán metales de rocas hoy calificadas «sin valor económico». Véase a modo de ejemplo la variación en la concentración de cobre de los yacimientos explotados en el transcurso del tiempo, a partir de 1840. De manera consistente se han ido reduciendo las leyes de mena, de más de 15% de cobre contenido en los yacimientos que estaban en



Variación de la ley de cobre de los yacimientos explotados a escala mundial y en algunos países productores (Gavin Mudd, 2009).



Incremento de reservas de cobre entre 1994 y 2010. Datos globales y por país.

¿Mayor o menor valor? Los metales que a veces no se pagan

Existen metales que, cuando están presentes en los concentrados de mineral que se obtienen de la mina dificultan o elevan el costo del tratamiento metalúrgico.

Tal es el caso del mercurio, bismuto, antimonio y arsénico, entre los más conocidos, y también del hierro cuando está presente en los concentrados de zinc, o del azufre en los de plomo. Su presencia en estos concentrados es objeto de penalizaciones económicas, es decir, el comprador abona menos por los concentrados que los contienen. No obstante, estos mismos metales pueden ser comercializados cuando están presentes en otras menas minerales o concentrados, de los que se pueden recuperar mediante procesos rentables.

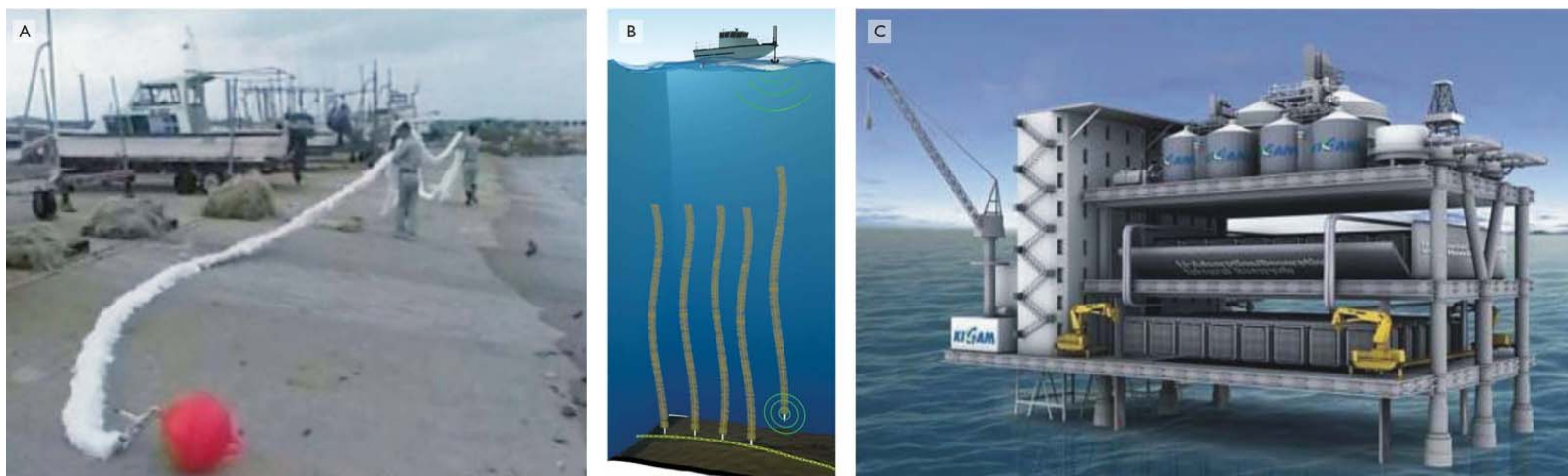
Entonces, el valor neto del producto concentrado que vende una mina no es la suma de todos los metales que contiene, sino la ecuación resultante del valor del metal o los metales que efectivamente se pueden recuperar en el proceso metalúrgico, menos los gastos del proceso de fundición y/o refinación (maquila) y de las penalidades por el contenido en elementos indeseables. Por ejemplo, si se considera un concentrado de cobre que contiene arsénico, se castiga todo contenido por encima de 0,2% de este elemento. Si se toma un caso con 0,5% de arsénico, del valor del concentrado deberá deducirse la multa por el 0,3% de exceso de arsénico presente.



FUENTES NO CONVENCIONALES DE METALES Y EL IMPACTO PREVISIBLE DE SU EXPLOTACIÓN

Fuentes	Metales y no metales contenidos	Características	Posible afectación al Medio Ambiente
Menas de bajo grado	Disminución continua, en el transcurso de tiempo, de los contenidos mínimos de metal en roca que son explotados económicamente (menores <i>cut-off</i>)	Reducción de la ley media explotada en el transcurso del tiempo. > 2 % Cu año 1950; 0,8 % Cu año 1990; > 0.3 % Cu año 2010.	Incremento de superficie impactada. Mayor afectación al relieve. Incremento del volumen de roca extraído y tratado. Incremento en volumen de estéril.
Fondo oceánico	Corteza oceánica enriquecida en metales. Nódulos de Fe-Mn. Fangos de fondo oceánico. Nódulos del Pacífico contienen 18 % Mn, 17 % Fe y metales traza (Co, Ni, Cu, REE, Mo, V, Pb). Clatratos (Rec. Energéticos).	Dificultades técnicas y tecnológicas para minado. Territorialidad.	Debe minimizarse la afectación de fauna y flora marina en sitios de extracción. No afecta poblaciones humanas.
Agua de mar	Contiene Mg, K, Li. En sitios cercanos a emisiones hidrotermales submarinas: Fe, Mn, Cu, Zn.		Diferencial de concentraciones salinas luego de extracción puede modificar condiciones locales de vida marina.
Carbones fósiles e hidrocarburos	Carbones enriquecidos en metales traza (V, Cu, Ni, Ag, Mo). Carbones uraníferos.	Ventaja en las recuperaciones, por el carácter no-volátil de la mayoría de metales.	Disminución (en muy baja escala) de la dispersión de metales al Medio Ambiente.
Rocas “comunes” o levemente enriquecidas	Algunas rocas contienen metales en cantidad varios órdenes mayores que el promedio. Rocas básicas y ultrabásicas contienen metales en magnitud poco inferior a las “menas”.	Rocas ígneas de la corteza tienen (promedio) 44 ppm Ni; 12 ppm Co; 70 ppm Cr y 1,39 % Mg. Rocas ultrabásicas tienen 200 ppm Co; 2200 ppm Ni; 2000 ppm Cr y 34 % Mg.	Mayor volumen de roca extraída y tratada. Menor dispersión de metales debido a menores contenidos.
Aire y otros gases	Aire, gases hidrocarburos y emisiones volcánicas contienen O ₂ , N ₂ , He, Ne, Ar, Kr, F, Cl, S, Hg		Disminución de la dispersión de elementos en la atmósfera.
Organismos vivos	Elementos traza metálicos contenidos en partes del cuerpo (hasta 1 % Zn y 0,1 % Pb en algunas especies de peces).	Sus acumulaciones naturales aún no pueden considerarse verdaderas “menas”.	Posible objeción de principios.

Datos de Laznicka (2006), Mero (1965) y Newcrest Mining Staff (1998)



El océano, una fuente no convencional de metales. A: Testeo de extracción de uranio mediante fibras trenzadas absorbentes en Japón. B: Esquema de disposición submarina de las fibras. C: Planta de extracción de litio diseñada en Corea del Sur.

producción a mediados del siglo XIX, a valores inferiores a 1% de cobre en los explotados en el siglo XXI.

Si en la actualidad la necesidad de metales se satisface con la minería convencional de yacimientos y, en menor medida, mediante el reciclado, se estima que la producción en el futuro se caracterizará por:

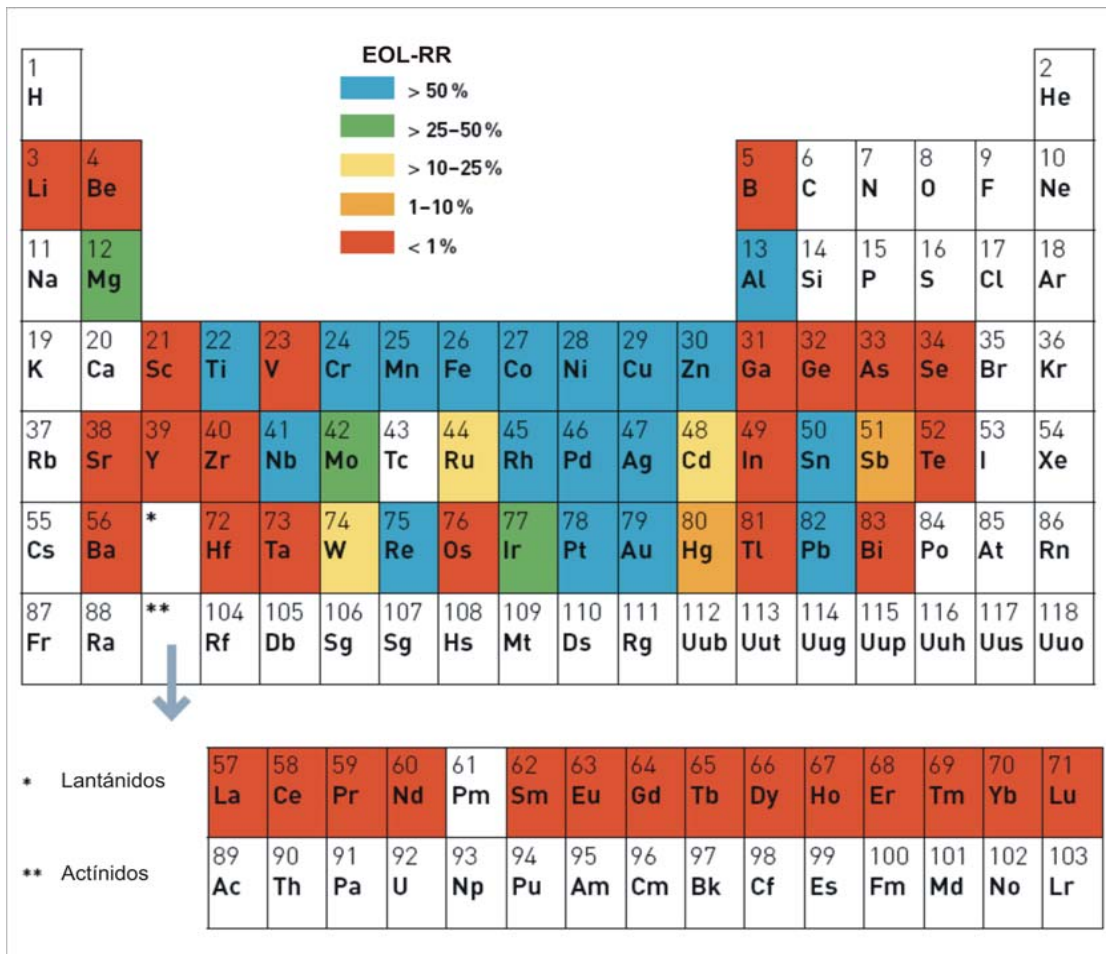
- fuerte aumento de la explotación de recursos minerales no convencionales,
- aumento moderado, luego estabilización, de la utilización de metales de reciclado,
- aumento de la explotación de grandes yacimientos,
- disminución, hasta el cese de la explotación, de yacimientos de tamaño medio y pequeño.

Ahora bien, esta perspectiva y las alternativas citadas deben ser necesariamente analizadas también por sus implicancias ambientales, considerando principalmente en un futuro cercano el incremento de la explotación de grandes depósitos en detrimento de los de menor magnitud. Al privilegiar el tamaño de los depósitos frente a cuestiones de localización (entornos de los yacimientos) se dejan de lado las eventuales consecuencias ambientales.

Pero no debemos preocuparnos, la provisión de metales en el futuro puede asegurarse a partir de:

- Menas primarias con contenidos menores de metales.
- Menas localizadas a mayor profundidad, extraíbles mediante el empleo de nuevas tecnologías.
- Extracción de metales de otros minerales (ya que los metales se encuentran presentes en muchos más minerales de los que la industria procesa en la actualidad). Implican el desarrollo de metodologías económicas de extracción de metales contenidos en otros minerales, incluyendo un menor uso de energía.
- Fuentes minerales «no convencionales»: entre estas fuentes se cuentan el agua de mar, el fondo marino, rocas levemente enriquecidas en metales, el aire y otros gases, carbones e hidrocarburos fósiles y organismos vivos. La característica común es que la viabilidad económica de su explotación y, en algunos casos, la viabilidad técnica, es todavía incierta. Aun así, estas alternativas continúan siendo estudiadas.

Extraer recursos minerales de los planetas o satélites cercanos, tal el caso de Marte o la Luna, es una posibilidad que se ha planteado



Tasa de reciclado al final de la vida del metal, para diversos metales. Indica cuánto metal es recuperado y entra en la cadena de reciclaje, tanto como metal puro como aleación (UNEP, 2011).

en algunos foros como una alternativa frente al impacto que producen las explotaciones mineras en la Tierra. Sin embargo, en la actualidad es un desafío desde muchos puntos de vista, desde tecnológicos

hasta económicos. Pese a eso, ya se están generando mapas de composición mineral de la superficie lunar con el uso de tecnologías remotas como lo es el uso de espectrómetros de rayos gamma, o bien *in situ* mediante la recolección de muestras con robots. Estas técnicas han probado la presencia de elementos como torio, potasio, oxígeno, magnesio, silicio, calcio, hierro, titanio y hasta un isótopo del helio de utilidad para la producción de energía. Las previsibles e imprevisibles dificultades que puede implicar este desarrollo no lo tornan viable en un futuro cercano frente a las alternativas de disponibilidad y fuentes de metales y elementos químicos todavía existentes en varios sitios de nuestro planeta (entre ellas los fondos oceánicos y la atmósfera).

Cuando llegue el momento de sus explotaciones, estas «nuevas» fuentes también traerán aparejados impactos al Medio Ambiente, algunos predecibles y otros no completamente, debido a los diferentes grados de interacción con el medio.

Debemos considerar, asimismo, que la utilización de metales a partir del reciclado es la componente más sustentable desde un punto de vista ambiental, aunque su participación en la provisión total de metales es muy variable según el metal que se trate; su incremento está estrechamente relacionado con los avances tecnológicos y los costos involucrados.

Otro aspecto relevante es la sustitución de metales y compuestos por parte de la industria, aún para los mismos fines. El cobre ya fue reemplazado como conductor de datos por los haces de fibra óptica, cuya base es el silicio (que se obtiene de la minería del cuarzo), un material más liviano y seguro. Lo mismo ocurre con el plomo, que ha sido ampliamente sustituido por materiales plásticos.

Este hecho implica a largo plazo la no dependencia de recursos minerales «agotables» pero, por otra parte alerta sobre la importancia de explotar los recursos en el momento oportuno, es decir en tanto tengan utilidad. En otras palabras, un yacimiento explotable desde un punto de vista técnico y económico puede no serlo el día de mañana por haber declinado la necesidad de la materia prima que contiene.



3 EFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE: ¿IMPACTO O DAÑO?

En este capítulo se analizan los conceptos básicos relacionados con la contaminación y, a continuación, se dan ejemplos de algunos tipos de contaminación natural, que dan lugar a los denominados «ambientes hostiles naturales». Luego, se analiza la explotación de los recursos minerales en sus diversas formas (mecanizada, gran minería y artesanal o informal) y las condiciones en que éstas producen impacto ambiental y sus características. Para los diversos escenarios se describen los procesos y reacciones fisicoquímicas, así como los efectos que ocurren como resultado de la interacción de los minerales con la hidrosfera, atmósfera y biosfera.

3.1. La contaminación

La contaminación es la introducción o presencia de sustancias, organismos o formas de energía en ambientes a los que no pertenecen o en cantidades superiores a las propias de esos ambientes, por un tiempo y en condiciones tales que interfieren con la salud de las personas, dañan los recursos naturales, alteran el equilibrio ecológico del área involucrada y aún el clima. Ocurre cuando se excede la capacidad de la Naturaleza para degradar y reincorporar estas sustancias o elementos a los ciclos de transformación de la materia y la energía.

La contaminación puede tener origen natural o bien antrópico.

Entendemos por contaminación de origen natural a aquella originada por la actividad natural de la geosfera, la biosfera, la atmósfera y la hidrosfera. Incluye, entre otras:

- la emisión de cenizas y gases tóxicos de una erupción volcánica,
- las variaciones fisicoquímicas producidas en el Medio Ambiente por disolución y dispersión natural a partir de concentraciones minerales en la litosfera expuestas a intemperismo,
- los incendios forestales generados naturalmente y que emiten CO₂, óxidos de nitrógeno, humo y cenizas,
- las descargas eléctricas producidas por tormentas, que forman óxidos de nitrógeno por oxidación del nitrógeno del aire,
- la concentración anómala de polen y esporas que provocan alergias respiratorias conocidas como polinosis.

La contaminación antropogénica, también denominada artificial, es aquella derivada de la actividad humana. En su mayor parte se relaciona con la utilización de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón). Se genera:

- en la industria (minera, siderometalúrgica, química, papeleras),
- en la agricultura y ganadería (uso intensivo de fertilizantes, herbicidas y plaguicidas, elevada concentración de ganado vacuno que provoca un aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera),
- en el transporte (uso de combustibles, en particular en núcleos de población urbana),
- en los procesos de eliminación de residuos sólidos (por incineración o disposición sin reciclado) y
- en el hogar (uso de combustibles).

La contaminación puede afectar al suelo, al agua y al aire, y por tanto, a todos los seres vivos. Se definen a todos ellos como **receptores**, es decir algo que puede ser dañado, incluyendo desde el Medio Ambiente en general hasta la salud humana. **Receptores ecológicos** son todos los organismos vivos (excepto los seres humanos), el hábitat en el que se en-

Contaminantes	Partículas	SO ₄ ²⁻	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	As	Cd	Pb	Se
Origen natural	75	63	94	71	33	24,5	11,6	4	27
Origen humano	25	37	6	29	32* + 34**	75,5	88,4	96	73

* energía ** agricultura y ganadería

Contaminación natural versus contaminación antropogénica en porcentajes (fuentes: Ginou et al., 2012; Chin, 1996; Duxbury, 1994; Johnson y Johnson, 1995; Pacyna, 1986)



cuentran o los recursos naturales que podrían ser afectados negativamente por contaminantes.

La contaminación antropogénica es la más común y la que podemos controlar en mayor medida, mediante la aplicación de medidas de prevención, corrección y disminución. Ante la degradación acelerada del Medio Ambiente, hay que considerar que la implementación de estas medidas, en el largo plazo podrá implicar cambios en las estructuras sociales y económicas como así también cambios en los estilos de vida.

Si bien las emisiones de origen natural en general son mayores a escala global, las antropogénicas lo son a escala regional o local. Por lo tanto la contaminación antropogénica es más importante en zonas urbanas o industriales, donde tiende a circunscribirse.

De acuerdo con su estado físico, los contaminantes son clasificados en gaseosos, líquidos y sólidos. Los gases afectan sobre todo a la atmósfera y varios de ellos se agrupan con el nombre de gases de efecto invernadero. Entre los líquidos, que tienen efecto nocivo esencialmente en los cuerpos de agua y los suelos, se incluyen aceites, solventes, petróleo y sus derivados. Los sólidos comprenden metales pesados, vidrio y plásticos, e impactan principalmente a los suelos.

Si se consideran los tipos de contaminantes involucrados, la contaminación puede ser clasificada en química, física o biológica. Puede producir efectos adversos variados de tipo tóxico (sobre los organismos) y ecotóxico (sobre los ecosistemas), pero también de tipo estético, económico y sociopolítico.

3.1.1. Contaminación y toxicidad. Excesos y defectos de elementos químicos

El nivel seguro de exposición a una determinada sustancia es aquel situado por debajo del límite para el que no se observan efectos adversos o nocivos; es también denominado valor de toxicidad de referencia. Existen sustancias químicas CON y SIN umbral, las primeras con un nivel de exposición límite sobre el cual pueden tener lugar efectos adversos sobre la salud y las segundas con posibilidades estadísticas de producirlos aún en pequeñas dosis (por ejemplo las sustancias cancerígenas, para las cuales se mide el aumento de riesgo de contraer cáncer a partir del aumento de exposición a esa sustancia, como un índice de número de casos).

*Contaminante no es un elemento químico, sustancia o mineral determinado, sino **una concentración** de ellos **superior al límite** a partir del cual puede constituir un riesgo para la salud.*

En un medio tan sensible como es el suelo, el desarrollo de la mayoría de las especies vegetales depende de los contenidos de elementos químicos esenciales conocidos como macronutrientes (potasio, fósforo, azufre, calcio y magnesio) y también de pequeñas concentraciones de otros elementos (micronutrientes u oligoelementos como zinc, molibdeno, manganeso, cobre e incluso boro). Si los suelos no los poseen en cantidad adecuada (**defecto**) y en condición de biodisponibilidad, las plantas sufren trastornos fisiológicos o mueren.

Sin embargo, un **exceso** de estos elementos por sobre un nivel crítico es también perjudicial para el desarrollo vegetal, por un efecto que se denomina **biotoxidad**. El rango entre el mínimo requerido y el máximo tolerado depende de la especie vegetal y el elemento químico, pudiendo ser de pocos gramos por tonelada en el caso del boro, y de cientos de gramos por tonelada para el cobre y el zinc.

***Bioacumulación** es el proceso de acumulación de sustancias químicas en organismos vivos, por el que éstos alcanzan concentraciones más elevadas que las del medio ambiente o los alimentos. Las sustancias propensas a la bioacumulación alcanzan concentraciones crecientes a medida que se avanza en el nivel trófico en la cadena alimenticia.*

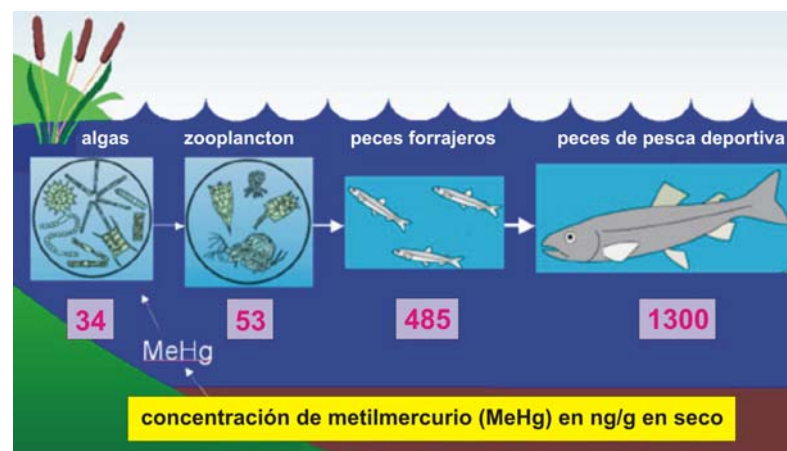
***Biomagnificación** es el proceso de bioacumulación de una sustancia tóxica (por ejemplo, plaguicidas). Ésta se presenta en bajas concentraciones en organismos al principio de la cadena trófica y en mayor proporción a medida que se asciende en ella, lo cual también significa que las presas tienen menor concentración de sustancias tóxicas que el predador.*



Síntomas en hojas de plantas de tomate, por falta de: A. Zinc. B. Molibdeno. C. Cobre. (Fuente: M. de la Rosa, Fisiología Vegetal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México).

En un extremo máximo, existen especies vegetales hiperacumuladores de metales pesados (acumulados a partir de la disponibilidad del elemento en el suelo, por no poseer la planta efecto de barrera) que se desarrollan perfectamente en suelos con concentraciones tan elevadas como 2000 ppm (gramos por tonelada) de plomo o de cadmio y hasta 10.000 ppm de cinc.

En las aguas superficiales los metales pesados existen en forma coloidal, como partículas y en fases disueltas, pero las concentraciones en disolución son generalmente bajas. La contaminación por estos metales



Proceso de bioacumulación y biomagnificación en medio acuático.

ALGUNOS INCONVENIENTES DERIVADOS DE DEFICIENCIAS Y EXCESOS DE ELEMENTOS QUÍMICOS EN PLANTAS Y PERSONAS

	Plantas		Hombre	
	Deficiencia	Exceso	Deficiencia	Exceso
Hierro	Tallos cortos, delgados y curvados. Frutos pequeños. Defoliación.	No produce toxicidad salvo excepciones (arrozales sumergidos)	Anemia	Hemocromatosis (daños al hígado)
Manganeso	Reducción de floración en algunos cultivos. Necrosis. Raíces poco desarrolladas.	Acumulación de Mn^{+2} puede resultar tóxica	Afecta sistema neurológico, piel, pelo, etc.	Afecta tracto respiratorio y cerebro
Sodio	Clorosis. Necrosis. Problemas en floración.	Fuerte afectación de estructura y pH del suelo provoca déficit nutricional	Afecta funcionamiento nervioso y muscular	Hipertensión, daño a riñones.
Calcio	Acentúa síntomas de clorosis. Hojas pequeñas, deformadas y ajadas. Crecimiento deficiente. Retraso en crecimiento de raíces.	Inmoviliza nutrientes del suelo provocando déficit nutricional	Osteoporosis	Esclerosis, litiasis renal.
Potasio	Disminuye la tasa de fotosíntesis y reduce contenidos de carbohidratos de la planta.	Dificulta la absorción de magnesio	Trastornos en equilibrio hidro-electrolítico. Debilidad muscular, taquicardia, hipotensión, falta de apetito.	Problemas cardíacos



DISPONIBILIDAD Y MOVILIDAD RELATIVA DE METALES

Metal (especie y asociación)	Movilidad (posible ingreso al ambiente)
Metales asociados con sulfuros minerales	Fuerte dependencia de las condiciones ambientales locales. Bajo condiciones de abundancia de oxígeno, la oxidación de sulfuros minerales permite la liberación de metales.
Metales asociados con óxidos de Fe-Mn	Media. Los cambios en las condiciones redox pueden causar la liberación de estos metales. Algunos metales precipitan si el sulfuro mineral presente es insoluble.
Cationes intercambiables (disueltos)	Alta. Los cambios en la composición catiónica principal pueden causar la liberación de estos metales debido a intercambio de ión.
Metales asociados con materia orgánica	Media /alta. La materia orgánica se descompone / oxida en el transcurso del tiempo.
Metales fijados en la fase cristalina	Baja. Sólo disponible luego de meteorización o descomposición.

Fuente: John y Leventhal (1995)

persiste durante varias décadas en el medio acuático, dando lugar a fenómenos de **bioacumulación** y **biomagnificación** en la cadena alimenticia. Los metales pesados causan efectos tóxicos en los animales acuáticos, especialmente en los peces. El mercurio, el plomo y el arsénico son los tres elementos que producen mayores efectos adversos. Por ello, es usual el análisis de los contenidos de elementos contaminantes en los peces, que son así utilizados como indicadores de contaminación.

3.1.2. Geodisponibilidad y biodisponibilidad de elementos químicos

La presencia de contaminantes en el suelo, tanto de origen natural como antrópico, produce efectos variados. Cuando se acumulan en formas solubles, son fácilmente asimilables por vegetales y animales, y contaminan acuíferos. Los suelos, por su parte, de acuerdo con su composición (en particular su contenido en arcillas), pueden actuar como filtros que inmovilizan a los contaminantes a través de procesos físicos, químicos y biológicos. Así, el suelo asimila y amortigua los efectos de la conta-

minación mediante la incorporación de componentes hasta un nivel máximo (denominado **carga crítica**) sin que se produzcan efectos nocivos, pero cuando se excede este nivel son fuente de contaminación.

Con el objeto de conocer cuan afectado puede resultar un sitio por la presencia de un yacimiento mineral, o de una acumulación de residuos mineros, es necesario identificar los elementos químicos en el Medio Ambiente y medir su concentración o contenido. Sin embargo, el correcto análisis de este ejercicio se logra con la aplicación de los conceptos de **geodisponibilidad** y **biodisponibilidad** de los elementos químicos, ya que sólo en casos determinados el contenido de un elemento químico en un sitio impactado proviene en su totalidad de una explotación minera y puede ser además incorporado o asimilado por la fauna o flora del lugar.

La **geodisponibilidad** es la fracción del contenido total de un elemento químico presente en una roca o yacimiento mineral que puede ser liberada al Medio Ambiente (sea a la hidrosfera o a la biosfera) por procesos físicos, químicos o, en menor medida, biológicos. Esta liberación se produce como resultado de reacciones químicas, que alteran y descomponen al mineral que los contiene y, puestos en solución, son transporta-

Un ejemplo de la influencia de la «especiación» química

El **cromo** forma diversos compuestos químicos en distintos estados de oxidación. Los más importantes son los estados de oxidación II (cromosos), III (crómicos) y VI (cromatos).

En las aplicaciones comerciales industriales se utilizan principalmente compuestos de cromo en estado VI, por sus propiedades ácidas y oxidantes y su capacidad para formar sales muy coloreadas e insolubles. Son los llamados «cromatos», que tienen efectos muy tóxicos, agravados debido a que se absorben rápidamente después de la ingestión o la inhalación; son genotóxicos y carcinogénicos. Sin embargo, en los yacimientos y rocas el cromo se presenta como cromo III (cromita, un óxido de cromo y hierro; o más raramente como silicato), formando compuestos no absorbibles por ingesta. Por otra parte, el cromo III puede ser esencial para el normal metabolismo de la glucosa.



dos hacia otros receptores. La meteorización de las rocas favorece a estos procesos por cuanto aporta oxígeno y agua, cambia la temperatura y debilita su cohesión. La geodisponibilidad puede ser consecuencia de la explotación minera (ya que expone minerales que antes no estaban disponibles en el medio geológico o lo estaban de manera limitada) o del afloramiento natural o localización por encima del nivel freático de un cuerpo mineralizado (en particular en el caso de yacimientos de sulfuros que, expuestos a condiciones oxidantes, son fuentes naturales de contaminación).

Para el estudio científico de la geodisponibilidad se analiza la solubilidad de elementos potencialmente tóxicos desde fases sólidas (residuos, lodos, suelo, etc.). Se consideran, por ejemplo, las distintas condiciones para que ocurra su movilidad química a partir del agua (de lluvia o de origen níveo), el principal agente que actúa sobre los residuos expuestos a la intemperie.

Por otra parte, la **biodisponibilidad** es la proporción del total de metales geodisponibles en un sitio que pueden incorporarse a la biota del lugar. Por ejemplo, las plantas pueden absorber metales pesados a partir del suelo, siempre que estén en formas solubles o asociados a sus nutrientes.

Es decir que la concentración total de un metal geodisponible en un determinado ambiente puede no coincidir con la concentración en que ese metal está biodisponible. Lógicamente, para que haya biodisponibilidad debe existir geodisponibilidad de ese elemento químico. Por ejemplo, los sulfuros minerales pueden ser «encapsulados» en minerales químicamente inertes, como el cuarzo, y, a pesar de que existan concentraciones totales altas de metales en sedimentos y suelo que contienen estos minerales (alta geodisponibilidad), los metales no están biodisponibles, al menos fácilmente, para incorporarse en la biota. Esto significa que los efectos ambientales asociados pueden ser menores que los producidos por otras especies minerales, y que el impacto sobre la biota puede ser pequeño a pesar de existir concentraciones metálicas altas.

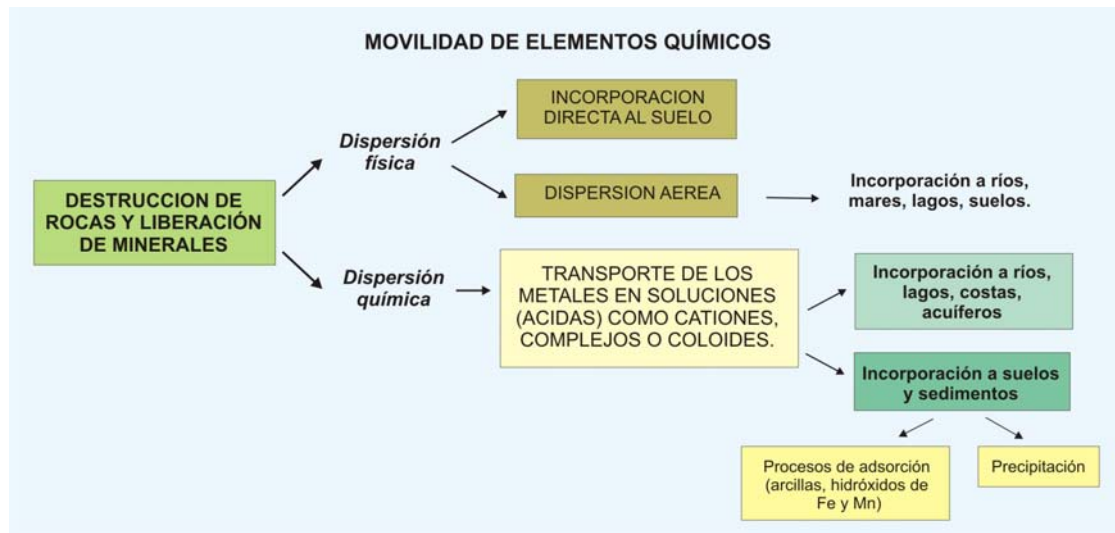
La biodisponibilidad de los metales depende de variables fisicoquímicas, biológicas y ambientales interrelacionadas y no estables a través del tiempo, de allí lo complejo de su estudio. Los metales y algu-

nos metaloides de un depósito mineral pueden ponerse en solución y hacerse biodisponibles en mayor o menor cantidad, en suelos y agua, dependiendo de factores, tales como el método con que se explota el yacimiento, la existencia o no de sulfuros, la cantidad de agua disponible, la capacidad de neutralización de la roca de caja, la forma química en la que se encuentra el elemento (la especiación) y su solubilidad, la presencia de materia orgánica, de óxidos de hierro y manganeso y la concentración de otros elementos en el agua. La biota, por su parte, es fuertemente dependiente de las condiciones locales (clima, geografía, ambiente) en que se desarrolle.

3.1.3. La migración de los metales desde un yacimiento hacia su entorno. El «viaje geoquímico» por agua, suelo o aire

La **migración** de un metal o elemento químico desde un yacimiento al Medio Ambiente que lo rodea comienza con la destrucción de la roca y la liberación del mineral que lo contiene (por disolución), lo que facilita su **movilidad**, prosigue con su transporte a través de una ruta de exposición (*pathway*) a partir de la cual el receptor es expuesto y finaliza con la fijación en otro medio (suelo o agua). Si bien esta fijación resulta en cantidad y especie variable, existen casos extremos de acumulaciones por encima de valores de riesgo (toxicidad). Cada elemento químico tiene características propias que determinan su movilidad.

EMISORES, MEDIOS Y RECEPTORES		
Fuente o emisor de metales	Un yacimiento (depósito mineral)	
	Una acumulación (escombreras, relaves)	
Forma o medio de transporte	Mecanismos de transporte y dispersión	Natural
		Antrópico
Medio afectado o Receptor primario	Agua	Superficial
		Subterránea
	Suelo	
	Aire (atmósfera)	
Receptor secundario	Hombre, biota	



Si se considera el viaje completo de un elemento químico en el Medio Ambiente, siempre habrá una fuente o emisor de donde provenga (una roca, un depósito mineral, una escombrera, un dique de colas), el medio que lo transporte y/o mecanismo que lo disperse y el receptor afectado. Agua, suelo y aire pueden ser receptores, pero a la vez son medios para que los elementos se incorporen a la biota e incluso al hombre, ambos posibles receptores últimos.

El conocimiento de las condiciones de este viaje permite predecir cómo se comporta cada elemento químico en determinado medio, si se acumula o no, en forma de qué compuesto químico, en qué rangos de temperatura o acidez, en qué dirección y cuán lejos puede viajar (¿alcanza un acuífero, un río o una laguna?), cómo condiciona su movilidad la presencia de bacterias y muchos otros aspectos.

El clima es un factor de fundamental importancia en este análisis. El aporte de agua en climas húmedos no sólo tiene incidencia en las reacciones de oxidación que generan ión férrico a partir de minerales sulfuros ya oxidados, como se explicó, sino que también decide la dirección de movilidad de los metales en solución, en este caso hacia el subsuelo, contrariamente a los climas áridos donde se movilizan hacia la superficie vía transporte capilar.

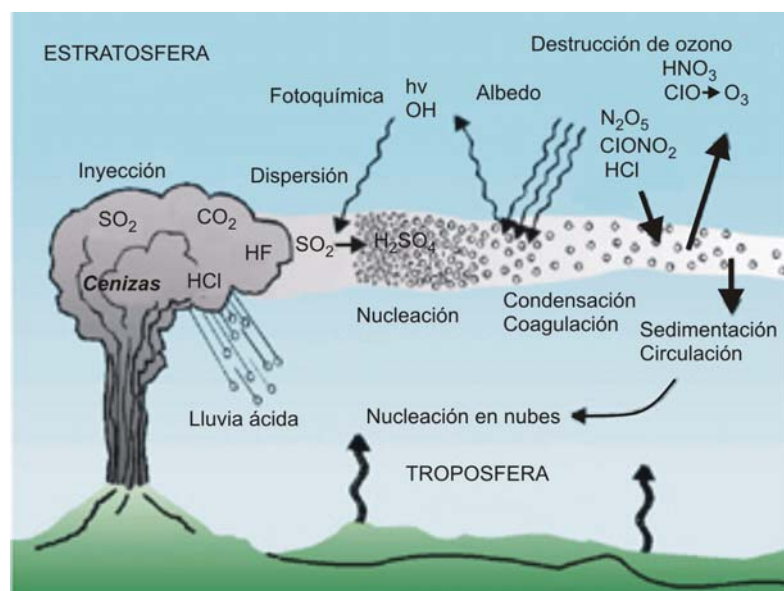
3.2. Contaminación natural o ambientes hostiles naturales

Todos los ambientes poseen una característica particular, como resultado de los procesos naturales físicos y químicos que en ellos sucedieron y continúan sucediendo. Si bien es usual suponer un ambiente continuamente amigable, debido al preconceito o imagen de la Naturaleza en estado prístino (cuyo significado, sin embargo, es «original» o «no modificado»), esta característica no suele ser estable en el tiempo. Muchas de estas condiciones naturales pueden ser tan extremas que, en determinados períodos o circunstancias, convierten estos sitios en ambientes hostiles naturales. Los ambientes áridos concentran sales, los húmedos aluminio o hierro férrico, los volcánicos pueden hacerlo con boro o azufre, y todos estos ejemplos suceden aún sin considerar que exista un yacimiento en estos ambientes.

3.2.1. Efectos de la actividad volcánica

La actividad volcánica produce, en general, contaminación natural a través de la liberación de gases y/o cenizas.

De acuerdo con las características del volcán en cuestión, puede emitir magma de distintas composiciones, gases y partículas sólidas. Las emanaciones gaseosas están constituidas en su mayoría por vapor de agua, siguiendo en abundancia dióxido de carbono y dióxido de azufre. Otros gases presentes son ácido sulfhídrico, ácido clorhídrico, hidrógeno, monóxido de carbono y ácido fluorhídrico, cuyas concentraciones varían de un volcán a otro. Las emisiones de dióxido de carbono contribuyen al calentamiento global. Los ácidos clorhídrico y fluorhídrico se disuelven en el agua y caen a la tierra como lluvia ácida (como en el caso del volcán Lonquimay, Chile, cuya erupción de 1988, particularmente rica en ácido fluorhídrico, tuvo efectos catastróficos sobre la flora silvestre y cultivos aledaños). El dióxido de azufre, por otra parte, se convierte lentamente en ácido sulfúrico que se condensa en finas partículas, constituyendo un aerosol de sulfatos que reflejan la radiación solar, enfriando la tropósfera y, al absorber el calor de la Tierra, calientan la estratósfera. Estos aerosoles promueven la destrucción del ozono y a su vez facilitan la



Efectos de una erupción volcánica.

nucleación de nubes tipo cirrus, lo que afecta adicionalmente el balance de radiación de la Tierra.

Las emanaciones de partículas («material particulado») son extremadamente peligrosas cuando se encuentran en el rango de tamaño que permite su respiración e introducción en los alvéolos pulmonares; aun cuando pueden no contener metales pesados siempre contienen sílice y son muy abrasivas. Pueden producir trastornos en los aparatos respiratorio y digestivo de los seres vivos afectados.

El volcán Chichón, en México, liberó al menos 8 millones de toneladas de aerosoles de azufre en la atmósfera, que produjeron cambios medibles de temperatura tanto en la tropósfera como en la estratósfera.

Tomemos por ejemplo el volcán Krakatoa, que se localiza en Indonesia, al oeste de la isla de Java. Entró en erupción en 1883 provocando un tsunami que causó más de 36.000 víctimas, considerado una de las mayores catástrofes naturales producidas en tiempos históricos. En el lugar donde originalmente estaba el Krakatoa, en el siglo XX surgió del mar el volcán Anak

Krakatoa, que ha desarrollado frecuentes erupciones, la última registrada en el año 2012. La erupción de 1883 produjo 21 km^3 de material eyectado a la atmósfera (aproximadamente 25.000 millones de toneladas) que alcanzó regiones distantes hasta 6000 km del lugar de emplazamiento del volcán. Las cenizas alcanzaron una altura de 80 kilómetros y constituyeron un cinturón continuo en la atmósfera superior en la zona ecuatorial que duró varios meses, produciendo al año siguiente un descenso generalizado de la temperatura del planeta de $1,2^\circ \text{C}$.

Las emisiones de los volcanes pueden alcanzar áreas no volcánicas. Estas emisiones aportan toneladas de metales y millones de metros cúbicos de gases y de partículas abrasivas (polvo natural compuesto por vi-



Erupciones del volcán Krakatoa en el siglo XIX y del Anak Krakatoa en los siglos XX y XXI.



EMANACIONES VOLCÁNICAS TÓXICAS: EL LAGO NYOS

El lago Nyos o Lwi está localizado en el oeste de Camerún, en el campo volcánico Oku. Ocupa un cráter formado hace 400 años debido a una **erupción freatomagmática**. El 21 de agosto de 1986 a las 21:30 horas, una nube formada por dióxido de carbono y agua salió violentamente del lago Nyos a una velocidad de 100 km/h, matando 1800 personas y 6000 cabezas de ganado, además de animales salvajes y aves. Se calcula que la emisión de unos 80 millones m³ de gas avanzó a casi 50 km/h, expandiéndose 23 km a la redonda siguiendo los valles circundantes. Alcanzó 50 m de espesor y desplazó el aire, que es menos denso, lo que produjo la asfixia de seres humanos y animales.

Se trata de la **erupción límnic** más grave de la historia. El dióxido de carbono estaba originalmente disuelto en las aguas del fondo del lago, las que a profundidades cercanas a 200 metros pueden contener hasta 5 litros de dióxido de carbono por cada litro de agua. La liberación de esa gran nube de gas fue provocada por la rápida acumulación de agua de lluvia fría que, por tener mayor densidad que el agua del lago, descendió y originó el desplazamiento del agua cargada con dióxido de carbono desde el fondo. Así, este agua, al ascender, se descomprimió, produciendo la exsolución y una consecuente rápida y violenta expulsión del gas. Desde 1990, un equipo de científicos franceses ha trabajado para desgasificar el lago, y se ha instalado una serie de tuberías a fin de prevenir las acumulaciones de dióxido de carbono.



drio volcánico y pequeñísimos fragmentos de roca) en tamaños respirables, y que pueden afectar la salud, que la acción de los vientos se ocupan de dispersar en el Planeta, cubriendo amplias superficies e impidiendo el uso agrícola, ganadero o industrial de la superficie afectada.

Estos son algunos ejemplos de la existencia de ambientes naturalmente hostiles y, de todos modos prístinos para la vida del hombre y de determinada fauna o flora, sin que haya estado involucrada la actividad antrópica en la alteración de las condiciones originales.

Es decir que el «estado original» de un ambiente puede ser modificado de dos maneras: por una acción antrópica, o por procesos naturales que, en determinadas circunstancias, alcanzan a alterarlo al extremo tal que impida o limite el desarrollo de la vida.

Por último, se deben considerar también dentro de los ambientes impactados a aquellos que sufrieron desastres naturales (inundaciones, tsunamis, etc.). Estos producen siempre consecuencias negativas sobre el ambiente, las que se ven aumentadas por su imprevisibilidad e instantaneidad.

EFFECTOS ADVERSOS PERO BENEFICIOSOS A LARGO PLAZO

El 8 de agosto de 1991 el volcán Hudson, ubicado en el lado chileno de los Andes Patagónicos, entró violentamente en actividad. Expulsó cenizas volcánicas que, impulsadas hacia el este por los vientos del Pacífico, cubrieron 150.000 km² de la Patagonia argentina. Los efectos iniciales fueron devastadores. Años después, si bien la ceniza no actuó como fertilizante de los suelos, mejoró las condiciones de permeabilidad y aireación del sustrato, mejorando la producción frutícola de la región.

3.2.2. Efectos de la meteorización de un depósito mineral

La meteorización es la alteración y destrucción de las rocas por procesos físicos y químicos (a través de agentes tales como el agua de lluvia, la nieve, el agua subterránea, el viento y la acción solar) que genera productos que tienden a estar en equilibrio con el Medio Ambiente. En el caso de afloramientos en los que hay presentes sulfuros (tal el caso de yacimientos expuestos en superficie), éstos son sometidos a dispersión física (como sedimentos en los cursos fluviales) y a oxidación, disolución y migración de los metales liberados.



DATOS DE UN AMBIENTE HOSTIL EN EL PARQUE YELLOWSTONE (Estados Unidos de Norteamérica)

El Parque Nacional de Yellowstone, ubicado en los estados de Wyoming, Montana e Idaho, es conocido por su gran diversidad de vida silvestre, por sus características geotérmicas únicas. Uno de los sitios más importantes e interesantes dentro del parque son las lagunas ácidas. La mayoría de estas lagunas geotérmicas se ubican en zonas cercanas a la Norris Geyser Basin, incluyendo los manantiales muy calientes ricos en metales Roaring Mountain Springs, así como en el Mud Volcano y zonas de calderas con azufre. Ambientes similares se pueden encontrar en los drenajes ácidos de minas ricas en pirita en todo el mundo.

Roaring Mountain es una gran zona hidrotermal ácida con muchas fumarolas. Al igual que en las otras lagunas ácidas, contienen altos niveles de moléculas inorgánicas reducidas. Con la presencia del magma entre 1,6 y 2,2 kilómetros debajo de la superficie en esta parte del parque, es la zona más caliente del Parque Nacional de Yellowstone. El pH es inferior a 2 y la temperatura es de alrededor de 40 °C.

El volcán de lodo y las zonas de calderas con azufre, al norte del lago Yellowstone, constituyen el sector más ácido, con manantiales de agua a alta temperatura o fumarolas de lodo burbujeante. La temperatura de estas áreas, como el Black Dragon Cauldron, puede superar 89 °C debido a la actividad volcánica. En estas áreas, el pH puede alcanzar 1,2 que es un valor casi idéntico al del pH del ácido de las baterías.



Aguas termales ácidas en el Parque Nacional Yellowstone.
A: Black Dragon Cauldron. B: Norris Geyser Basin.



Drenaje ácido natural de rocas portadoras de sulfuros (© Andrew Mattox, Ground Truth Trekking).

Las particularidades geológicas y mineralógicas de los depósitos minerales y los procesos geoquímicos que tienen lugar en ellos y en su entorno, ejercen un control fundamental sobre la manera en que estos depósitos interactúan con el Medio Ambiente. Estas particularidades controlan los potenciales efectos que la meteorización de un yacimiento puede producir en el área circundante al sitio mineralizado (también llamados efectos geoambientales). Además, la caracterización de los parámetros de mayor relevancia geoambiental para cada tipo de yacimiento aporta datos para entender y predecir el comportamiento ambiental de depósitos minerales geológicamente similares, tanto en condiciones naturales o al ser explotados.

El impacto del que aquí se habla puede definirse como la variación en las condiciones del Medio Ambiente en el área donde se encuentre un yacimiento (es decir su entorno), se lleve o no a cabo su explotación. Estos cambios pueden ser de tipo químico (dispersión de concentraciones variables de determinados elementos o sustancias químicas en el suelo o en el agua) o de tipo físico (modificaciones del relieve, de la permeabilidad de las rocas, de la resistencia de las rocas a la meteorización, etc.). Un yacimiento, aún uno de gran tamaño, tiene una con-



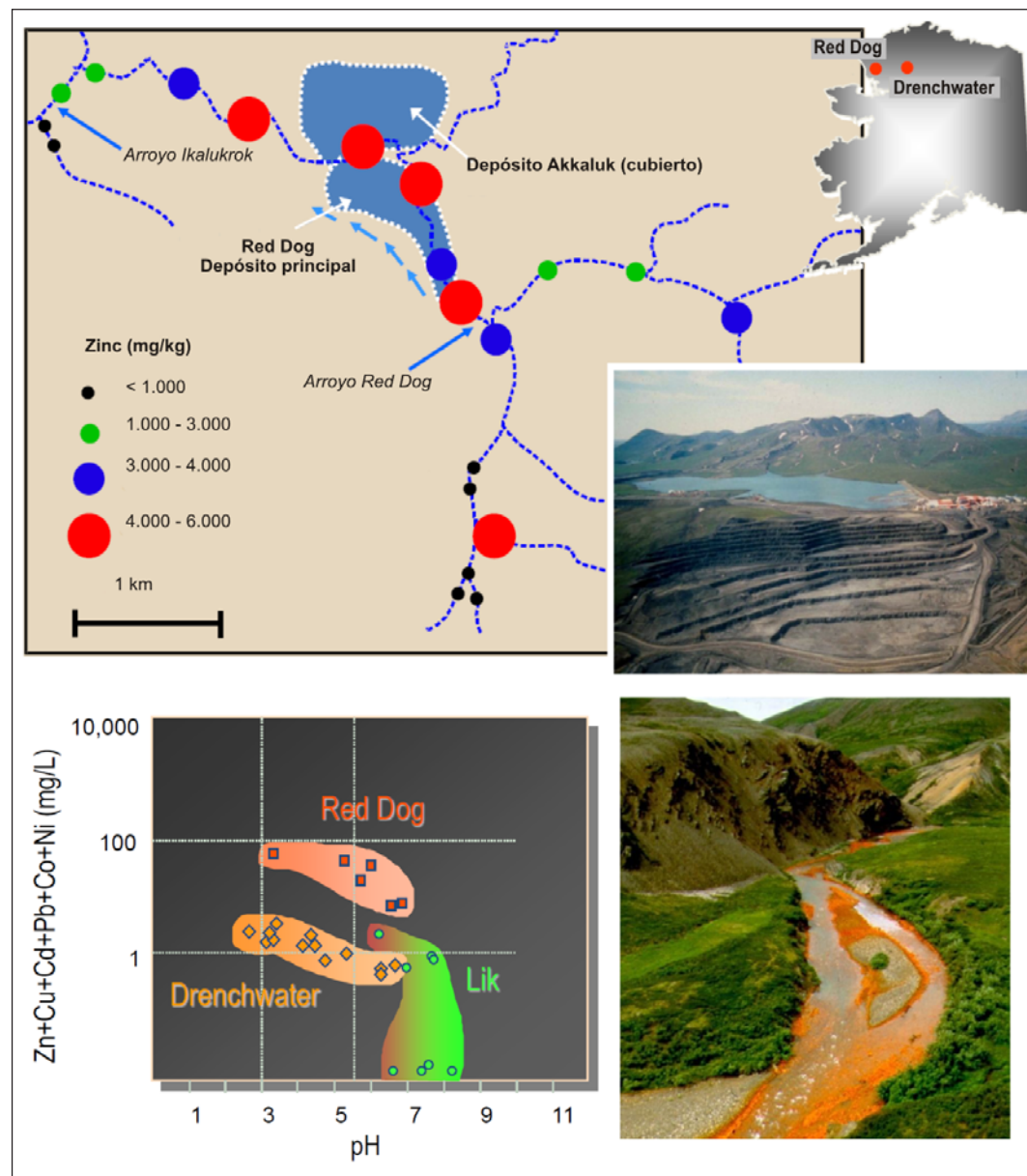
DATOS DE UN AMBIENTE HOSTIL: EL YACIMIENTO RED DOG, ALASKA.

Los yacimientos de zinc, plomo y plata de Brooks Range, Alaska, consisten en capas ricas en sulfuros que se encuentran dispersos en pizarras y chert. Comprende los depósitos Red Dog, Lik y Drenchwater. Red Dog es uno de los mayores yacimientos de zinc en el mundo y su explotación comenzó en 1990, en tanto Lik y Drenchwater no han sido aún explotados. Los tres depósitos están expuestos en la superficie y fueron descubiertos por la coloración naranja de las laderas circundantes y por la contaminación con metales pesados en los arroyos que drenan los depósitos.

Datos de calidad del agua de los arroyos que drenan el depósito de Red Dog antes de iniciada la actividad minera revelan que las aguas eran ácidas y con niveles tóxicos de cadmio, plomo y zinc, que exceden los estándares de agua potable de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA). Los contenidos de otros metales, tales como aluminio, cromo, cobre, hierro, manganeso, mercurio, níquel y plata, superan ligeramente los criterios de calidad del agua de EPA para la vida acuática.

Las aguas que drenan el depósito Drenchwater tienen valores de pH bajos y altas concentraciones de sólidos disueltos. El agua más ácida en la región (pH 2,8 a 3,1) se encuentra en False Creek Wager. Estas aguas contienen altas concentraciones de aluminio disuelto, arsénico, hierro, cadmio, cobre, plomo, manganeso, níquel y zinc. Las concentraciones de sulfato son también altas. A nivel local, las aguas ricas en hierro y sulfato han precipitado un material de color naranja brillante constituido predominantemente por el mineral jarosita.

Las aguas recogidas del depósito Lik difieren de las del depósito Drenchwater, sobre todo en el pH y las concentraciones de metales disueltos totales. Las aguas que drenan el depósito Lik son aproximadamente neutras y la mayoría de las muestras de agua contienen bajas concentraciones de metales disueltos totales. El zinc es el único metal detectado en concentraciones consistentemente altas en muestras agua abajo del depósito. Las diferencias químicas entre el depósito Drenchwater y el de Lik se atribuyen a la presencia de rocas carbonatadas en este último, que neutralizan el ácido en el agua y reducen su capacidad para llevar a la mayoría de los metales en solución, salvo el zinc.



Características geoquímicas del área de drenaje natural del yacimiento Red Dog, Alaska, previo a la actividad minera.



dición «puntual» si se lo compara con el área del entorno con la que interactúa.

Es decir que cada característica relevante de un depósito mineral, sea esta su mineralogía, litología, forma y tamaño, contenido de metales, distribución de la mineralización, presencia de fallas y diaclasas, alteración hidrotermal, etc., condiciona los procesos químicos y/o físicos que afectan al yacimiento y que, al suceder, indefectiblemente impactan en su entorno.

Una región donde existen varios yacimientos, en general de una misma asociación de metales y de origen común, se define como **distrito metálico**. Puede abarcar una superficie extensa que involucra áreas montañosas y valles y, consecuentemente, ríos y arroyos, además de poblaciones enteras y sus entornos, que deben convivir con el ambiente donde se han establecido. Un área con varios yacimientos de zinc, por ejemplo, donde las rocas de distribución regional contienen este metal en cantidades desde algunas partes por millón hasta cientos o miles de gramos por tonelada, puede abarcar cientos de kilómetros cuadrados sin interrupción. La meteorización que ocurre en un área como la mencionada puede dar lugar a la dispersión de zinc tanto física (como granos de sulfuro de zinc incorporados en los sedimentos aluviales) como química (coloides dispersos por las corrientes fluviales o incorporados en las napas subterráneas). Un ejemplo característico es el yacimiento Red Dog, en Alaska.

3.3. Actividad minera y contaminación

3.3.1. La explotación del recurso mineral

No es común que se plantee si la presencia de un yacimiento en su estado natural produce un impacto sobre el Medio Ambiente, mientras que sí se discute sobre el impacto que causa su explotación. Como hemos visto, la inmensa mayoría de los yacimientos existen desde hace millones de años; luego, expuestos en superficie, interactuaron con otras rocas, con el oxígeno de la atmósfera o el agua de lluvia, y dispersaron al entorno sus metales por procesos naturales. Independientemente de que en algún momento se los explote, o no, impactan sobre el Medio Ambiente de diferente forma e intensidad.

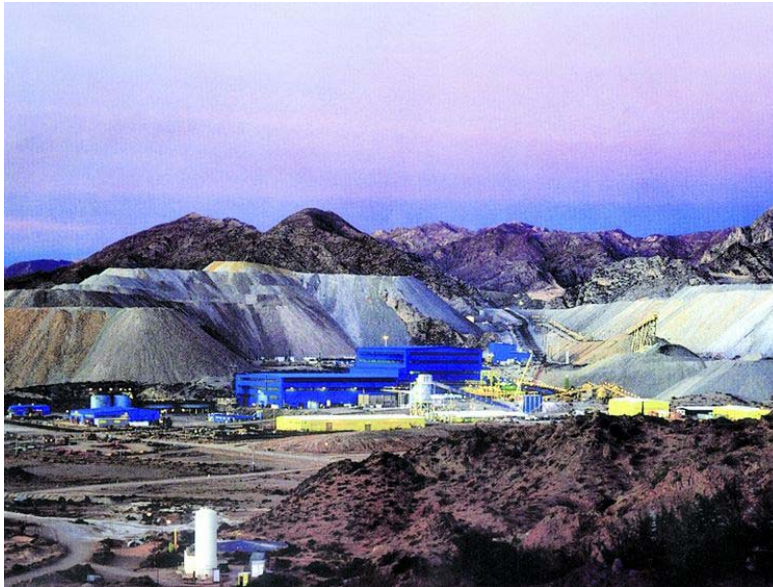
Estas diferencias radican en que los procesos de explotación y tratamiento modifican severamente las condiciones fisicoquímicas de algunos minerales, razón por la cual luego deben ser resguardados de su contacto directo con el Medio Ambiente. Los procesos a los que se someten los minerales al explotar un yacimiento incluyen su extracción, acumulación, modificación de su granulometría y equilibrio químico y además, en una etapa posterior de tratamiento o beneficio del mineral extraído, la incorporación de agentes químicos y agua.

Los métodos de explotación, es decir el conjunto de técnicas y operaciones que se realizan para extraer el mineral, pueden ser subterráneos o superficiales (estos últimos también denominados «a cielo abier-



Explotaciones mineras subterráneas y superficiales.

A: Mina de carbón en Reino Unido. B: Explotación de un manto subhorizontal mediante cámaras y pilares en Hontoria de la Cantera, España. C: Explotación de una cantera de yeso en Río Negro, Argentina. D: Open pit en Palabora, Sudáfrica.



Escombreras. Mina La Alumbra, Catamarca, Argentina. En primer plano, la planta de procesamiento.



Dique de colas. Highland Valley Copper mine, BC, Canadá.

to», entre los que se incluyen los *open pits*), dependiendo, entre otros factores, de que el mineral de interés se encuentre diseminado en el yacimiento o concentrado en estructuras, se halle en superficie o en profundidad, esté cubierto por otras rocas o aflore. Se estudian cuidadosamente durante la etapa de factibilidad del proyecto minero y luego se diseñan en la etapa de ingeniería. No pueden elegirse caprichosamente ni definirse de antemano, dado que son fuertemente dependientes de los siguientes criterios:

- la forma, el tamaño y la posición espacial del cuerpo mineralizado,
- el contenido y la distribución de los metales,
- las propiedades físicas y químicas del mineral y las rocas adyacentes o encajonantes,
- las disposiciones regulatorias de cada país y jurisdicción,
- factores económicos,
- los efectos de y sobre las operaciones subsidiarias.

La explotación de un yacimiento implica la remoción de la roca que contiene los minerales de interés. En la minería de «roca blanda», como en el caso del carbón, la sal de roca y la bauxita, no se utilizan explosivos sino que se emplean maquinarias que directamente cortan el mineral. En el caso de «roca dura» la extracción se realiza mediante perforaciones y voladuras.

Tratamientos industriales posteriores extraen los metales de la mena o bien de la roca (en caso de tratarse de mineralización diseminada). Estos tratamientos varían de acuerdo con el mineral que contenga el metal, su tamaño de grano, el tipo de roca, los minerales acompañantes y la ganga, entre otras características. La mayoría de los procesos involucran romper la roca o la mena hasta un tamaño tal que libere el mineral de interés de otros minerales componentes de la roca, es decir, lo separe. Para concentrar dicho mineral una vez aislado, se utilizan reactivos químicos. Estas etapas, denominadas «de tratamiento o concentración», son posteriores al minado o explotación del yacimiento y preceden a las de purificación del metal (metalurgia) o la manufactura de productos primarios elaborados.

Tanto la masa de roca que hospedaba el yacimiento y debió ser removida, como los minerales de ganga, son desechados del proceso. En general constituyen grandes volúmenes de materiales y por eso sus acumulaciones son inmensas. En el caso de yacimientos de tipo pórfiro con



cobre y oro, el volumen de roca desechada puede ser el 97 a 99 % del volumen total del yacimiento.

Las rocas removidas y no procesadas se acumulan en los denominados desmontes, escombreras, botaderos, botaderos de desmontes o **pi-las de estériles**, mientras que los minerales desechados durante el procesamiento de la mena componen los relaves o **colas**, que se acumulan en los denominados **diques de colas**.

Estas acumulaciones, sean de materiales ya procesados o de materiales no tratados, son objeto de controversias ambientales, fundamentalmente si contienen minerales sulfurados, dado que pueden constituir un riesgo de contaminación en caso de mala gestión o ausencia de monitoreo y control; son los llamados residuos mineros.

3.3.2. El Medio Ambiente en el entorno de un yacimiento: los modelos geoambientales de depósitos minerales

El estudio de los principales factores que controlan el comportamiento ambiental natural de un depósito mineral permite conocer de qué manera impacta la presencia de un yacimiento en su entorno cercano.

Estos estudios, de implicancia ambiental, se basan en la geología y geoquímica de los yacimientos minerales y están referidos a sus minerales y los de la roca de caja como posibles generadores o consumidores de ácido, al carácter soluble o insoluble de los minerales secundarios, y a la permeabilidad y grado de oxidación de las rocas mineralizadas y rocas de caja, entre otras características propias de los depósitos minerales. Permiten establecer los denominados **modelos geoambientales de depósitos minerales**. Estos fueron definidos por el Servicio Geológico de Estados Unidos en la década de 1990 a partir de las características de los depósitos minerales originalmente compiladas para definir los modelos de formación de los yacimientos.

De este modo se sabe, por ejemplo, que los yacimientos de tipo pórfiro poseen alto riesgo de drenaje ácido y, en cambio, los yacimientos metasomáticos neutralizan el ácido naturalmente ya que los minerales carbonáticos presentes en su entorno reaccionan y anulan su efecto. Por otra parte, diferentes tipos de alteraciones hidrotermales pueden incrementar o atenuar la generación de ácido. En cuanto a la permeabilidad de la roca, determina la posibilidad y tasa de ingreso de agentes meteóricos de los cuales

dependen la estabilidad o reactividad de los minerales y la dispersión natural de los metales contenidos. Estos y otros aspectos resultan en el impacto global de un yacimiento sobre el entorno.

La aplicación de modelos geoambientales permite predecir el comportamiento ambiental de un yacimiento no sólo cualitativamente sino también cuantitativamente, antes de comenzar su explotación, incluso mucho antes que la misma se prevea. Es una herramienta de gran utilidad para el desarrollo racional del recurso minero desde el punto de vista técnico, económico y ambiental, en un claro ejemplo de la sinergia favorable de estos tres conceptos trabajados en armonía.

3.3.3. Principales riesgos ambientales

Los riesgos derivados de la actividad minera están relacionados con a) la generación de acidez que, si bien puede ser natural, es fuertemente incrementado en magnitud y velocidad por la explotación minera de menas que contienen sulfuros, b) el uso de compuestos químicos en los procesos de separación y concentración de minerales y metales, y c) la generación de polvo.

3.3.3.1. Generación de acidez

El drenaje ácido de minas es considerado uno de los principales riesgos al Medio Ambiente, derivados de esta actividad. Sin embargo, el continuo avance en el conocimiento de este proceso, fundamentalmente desde los campos de la química, la mineralogía, la cinética de reacciones y la microbiología, permitió desarrollar métodos y herramientas para minimizar e incluso eliminar dicho riesgo.

Existe una preocupación adicional que consiste en el riesgo de generación de drenaje ácido una vez que cierra un yacimiento (al término de

*El ácido generado por las reacciones químicas que suceden al exponer al medio ambiente los minerales sulfuros de un yacimiento o de una acumulación que los contenga es denominado **drenaje ácido**. Sucede al oxidarse los sulfuros con el oxígeno del aire en combinación con la presencia de agua, dos elementos (aire y agua) sin los cuales no se genera ácido.*



MINERALES GENERADORES DE ACIDEZ Y NEUTRALIZADORES

Minerales generadores de acidez bajo condiciones oxidantes		Minerales neutralizadores de acidez	
Pirita, marcasita	FeS_2	Calcita	CaCO_3
Pirrotina	Fe_{1-x}S	Dolomita	$(\text{Ca,Mg})(\text{CO}_3)_2$
Bornita	Cu_5FeS_4	Magnesita	MgCO_3
Arsenopirita	FeAsS	Smithsonita	Zn CO_3
Enargita	Cu_3AsS_4	Malaquita Azurita	$\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$
Tennantita/tetrahedrita	$(\text{Cu,Fe,Zn})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ / $(\text{Cu,Fe,Zn})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	Aluminosilicatos (Feldespato potásico, plagioclasa)	KAlSi_3O_8 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
Calcopirita	CuFeS_2	Calcosilicatos (Diópsido, wollastonita, granates)	$(\text{Ca,Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$ $\text{Ca}_3(\text{Si}_3\text{O}_9)$ $\text{Ca}_3(\text{Al,Fe,Cr,V})_2(\text{SiO}_4)_3$; $(\text{Mg,Fe,Mn})_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
Covellina	CuS		
Esfalerita	ZnS		
Galena	PbS		

su «vida útil») ya que el ácido puede continuar produciéndose a partir de las acumulaciones de minerales sulfurados en diques de colas y escombreras. Esto puede suceder cuando las acumulaciones no fueron correctamente diseñadas o bien permanecen expuestas, por condiciones fortuitas o no, o son trasladadas sin recaudos. Por ello es necesario su monitoreo y control continuo y permanente.

Si bien la forma de prevenir la generación de ácido es no dejar expuestos a las condiciones atmosféricas los grandes volúmenes de roca que contienen pirita (el más difundido de los sulfuros), evitando así su oxidación, esto requiere grandes obras de «aislamiento».

Así como existen minerales generadores de acidez también hay otros con capacidad para neutralizar la acidez una vez generada. Muchas veces, aunque no tan frecuentemente, estos minerales neutralizadores acompañan a los sulfuros en el mismo yacimiento. Con menor frecuencia aún, lo hacen en cantidades que permiten la neutralización de la totali-

dad del ácido generado. La existencia de minerales neutralizadores, en la cantidad que sea, acompañando los minerales generadores de acidez, depende del tipo de yacimiento. La rapidez y facilidad de las reacciones de generación y, fundamentalmente, de consumo de ácido, varían sustancialmente con el grupo mineral (reactividad).

Por otra parte, la acidez generada en el entorno de las grandes acumulaciones de sulfuros provoca un ambiente geoquímico que facilita la movilidad de los metales que portan las rocas de un yacimiento, al ponerlos en solución. Como consecuencia, facilita la dispersión e incorporación al Medio Ambiente de estos metales a través del mencionado «viaje geoquímico».

La dispersión de metales en el Medio Ambiente, que puede darse tanto en acumulaciones minerales naturales como en las producidas por la actividad minera, es fuertemente influenciada por las características del clima, la erosión y la presencia de agua, y por supuesto por el contenido de metales (cantidad y tipo) en la acumulación; pero la generación de ácido es, prácticamente, la principal condición para que estos metales sean incorporados en el Medio Ambiente externo al yacimiento.

Los procesos de generación de acidez se incrementan fuertemente una vez que se supera la etapa de la primera oxidación de la pirita (en la cual se formó el ion ferroso), si como consecuencia del aporte de agua se produce mucha cantidad del ion férrico. Este ion tiene gran poder efectivo de oxidación de los sulfuros generando una importante cantidad de ácido. En efecto, la denominada «segunda oxidación de pirita» (con la intervención de agua y abundante ion férrico) origina 4 veces más H^+ que

Principales sitios a controlar para evitar contaminación por explotación minera (Monitoreo: ver capítulo 4)

- Acumulaciones de roca estéril o no tratada (escombreras o desmontes)
- Diques de cola o Relaves
- Minas subterráneas
- Open pits abandonados



¿ POR QUÉ PRODUCE IMPACTO AMBIENTAL UN DEPÓSITO MINERAL ?

Características del yacimiento	Procesos químicos y físicos y su impacto al ambiente
Contenido de sulfuro de hierro	Su oxidación genera ácido. Provee hierro, que como ión férrico es un oxidante muy fuerte.
Contenido de sulfuros de otros metales	Muchos de estos minerales (no todos) pueden generar ácido durante su oxidación
Contenido de carbonatos, aluminosilicatos y otros minerales no sulfuros	Muchos de estos minerales pueden consumir ácido. Bajo ciertas condiciones los carbonatos de Fe y Mn pueden generar ácido.
Resistencia de los minerales a la meteorización	La meteorización facilita reacciones químicas de oxidación. Depende del mineral (cada mineral es meteorizado a diferente "tasa"), su textura y los elementos traza que contenga.
Mineralogía secundaria	Minerales secundarios solubles pueden almacenar metales y luego liberarlos al ambiente al disolverse. Minerales secundarios insolubles pueden "blindar" a minerales reactivos restringiendo el acceso de agentes meteóricos.
Extensión de la zona de meteorización y oxidación (previa a la explotación o a la erosión)	La oxidación natural previa al minado reduce fuertemente el potencial de generación de ácido de los yacimientos de sulfuros
Composición de la roca de caja o roca hospedante	Dependiendo de su composición, la roca de caja puede consumir o generar ácido. Algunas características físicas (porosidad, permeabilidad) controlan el acceso de agentes meteóricos al yacimiento.
Alteración de la roca de caja o roca hospedante	Dependiendo del tipo de alteración hidrotermal, puede aumentar o disminuir la capacidad de la roca de caja para neutralizar ácido y para la circulación de agua. También puede incrementar o disminuir la resistencia a la erosión.
Elementos químicos mayoritarios y trazas en el yacimiento y en la roca de caja	Las características ambientales de un yacimiento son reflejo de la composición química elemental del depósito mineral y la roca de caja
Distribución de la mineralización (en vetas, diseminada, masiva)	Puede controlar la distribución de los impactos (dependiendo de la mineralogía)
Porosidad y conductividad hidráulica de la roca de caja	Controlan el acceso de los agentes de meteorización
Presencia de fallas y diaclasas abiertas	Controlan el acceso de los agentes de meteorización
Ley de mena y tamaño del depósito mineral	Controlan la magnitud de los impactos

Efectos de las principales características geológicas de los depósitos minerales sobre el Medio Ambiente (basado en Plumlee et al. 1998).

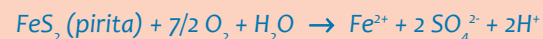
la «primera oxidación» (con oxígeno de la atmósfera). Además de la participación en estas reacciones de los elementos químicos aportados por los minerales y las condiciones atmosféricas, también intervienen determinadas bacterias, ya que la producción del ion férrico puede ser acelerada cuando éstas se hacen presentes. En consecuencia, evitar la formación de ion férrico es primordial en la gestión de los residuos mineros.

Si bien la neutralización de la acidez generada puede ocurrir por reacción química con los minerales acompañantes (silicatos y, sobre todo, carbonatos), en una explotación minera la neutralización se asegura mediante el agregado de calces en los diques de colas. Este agregado puede cuantificarse y de este modo calcularse su rendimiento y efectividad en la neutralización de la acidez.

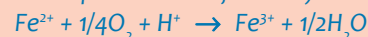


¿Cómo se forma el drenaje ácido ?

Primero: Al tomar contacto con el oxígeno del aire y el agua de lluvia, se oxida el azufre de la pirita y genera ácido (aunque poca cantidad).



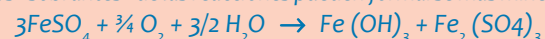
Segundo: En esas condiciones, se oxida el hierro ferroso a hierro férrico (y neutraliza un poco del ácido formado).



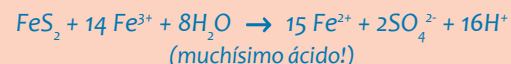
Tercero: Se hidroliza el hierro férrico y vuelve a generarse otro poco de ácido. Se observan limonitas.



Con los «sobrantes» de las reacciones pueden formarse más minerales.



Cuarto: En la etapa más peligrosa para el Medio Ambiente, el hierro férrico se convierte en un gran oxidante de la pirita y genera gran cantidad de ácido (drenaje ácido). Esto sucede bajo ciertas condiciones, tales como la presencia de determinadas bacterias y de agua, la ausencia de oxígeno y sobre todo con gran cantidad de hierro férrico producido en las etapas anteriores.



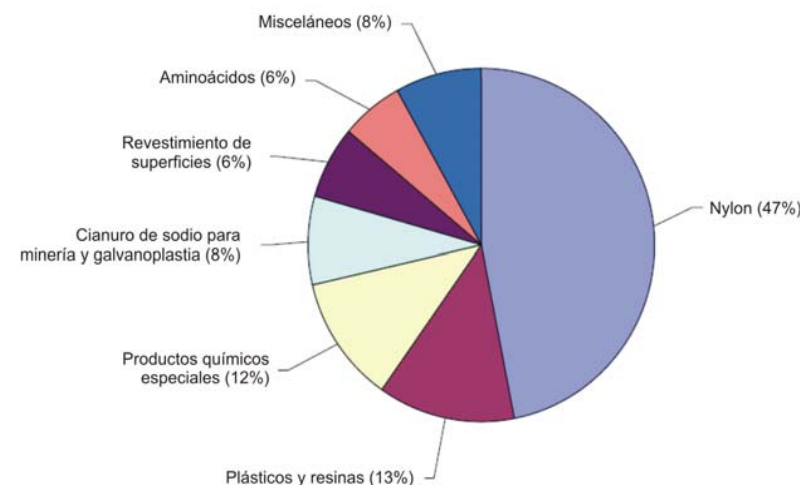
3.3.3.2. El uso de compuestos químicos

La minería, como otras industrias, usa sustancias potencialmente tóxicas en los procesos de concentración de minerales y metales. Entre ellos hay reactivos químicos que actúan como colectores, espumantes, depresores, modificadores de pH que facilitan la separación y concentración física de los minerales de interés. Otros extraen los metales a partir de la mena por disolución, técnica que se denomina lixiviación y utiliza compuestos como el ácido sulfúrico, el cianuro y otros.

El cianuro es la denominación de un grupo químico en la que el cianuro es el anión (CN⁻), y puede combinarse con otros elementos tales como potasio, sodio, e incluso hidrógeno para convertirse en un ácido. Es utilizado en la fabricación de pinturas, adhesivos, plásticos, goma, nylon, papel, cosméticos, medicinas, ciertos alimentos, y en otras industrias entre las que se cuenta la minera, ya que permite separar el oro de la roca que lo contiene. Su aplicación industrial data de más de un siglo; en la actualidad uno de los usos menos conocidos es el de extraer metales pesados contaminantes de los alimentos y bebidas que consumen las personas.

El empleo de un compuesto de cianuro como agente de exterminio durante la Segunda Guerra Mundial es posiblemente uno de los motivos que ha promovido la atención social, y en algunos casos el rechazo, sobre las aplicaciones de este químico que es, a todas luces, un importante insumo industrial.

En minería se aplica cianuro de potasio sobre las rocas que contienen oro, previamente trituradas y molidas, para extraer de ellas por disolución el metal. Luego, por distintos métodos hidrometalúrgicos,



Usos del cianuro. Se producen anualmente 3 millones de toneladas de ácido cianhídrico en el mundo, de las cuales 8% se convierte en cianuro de sodio, cuyo principal destino es la minería.



se separa el metal precioso de la solución cianurada. Estos procedimientos integran un circuito industrial cerrado que prevé la reutilización de gran parte del cianuro. Para tratar la solución a la que se le «quitó» el oro, pero que continúa con cianuro, se somete ésta, en instalaciones diseñadas especialmente, a procesos denominados «de atenuación», basados en degradación natural, oxidación química, precipitación, o biodegradación.

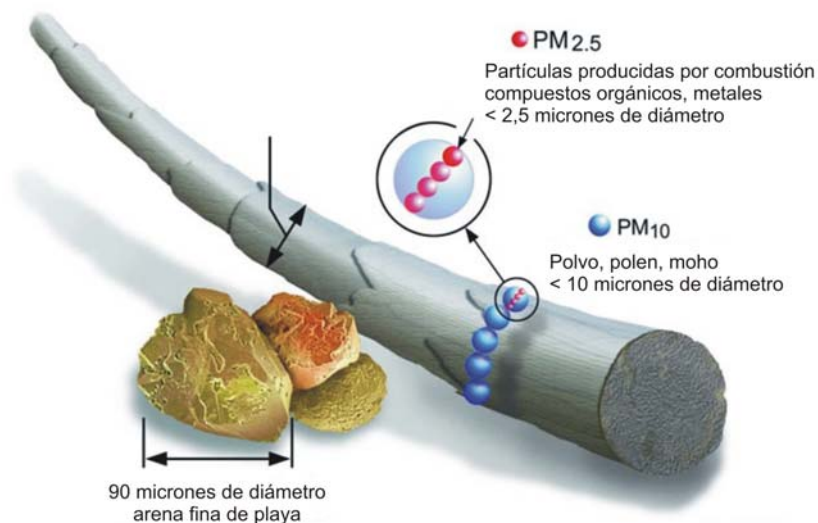
Por ser un compuesto tóxico, el cianuro requiere de cuidados especiales para su manipulación y transporte; el mayor riesgo es el de inhalación del compuesto HCN en estado gaseoso. En el Medio Ambiente el cianuro no es persistente, ya que se destruye por acción de la luz solar descomponiéndose por oxidación en gases de tipo COx y NOx no agresivos, motivo por el cual es biodegradable naturalmente.

En general la minería hace en la actualidad un manejo responsable y controlado del cianuro respondiendo a varios factores, entre ellos la existencia de normativas cada vez más exigentes para las numerosas empresas usuarias y para las pocas productoras, el mayor grado de responsabilidad social y empresarial, y también consideraciones económi-



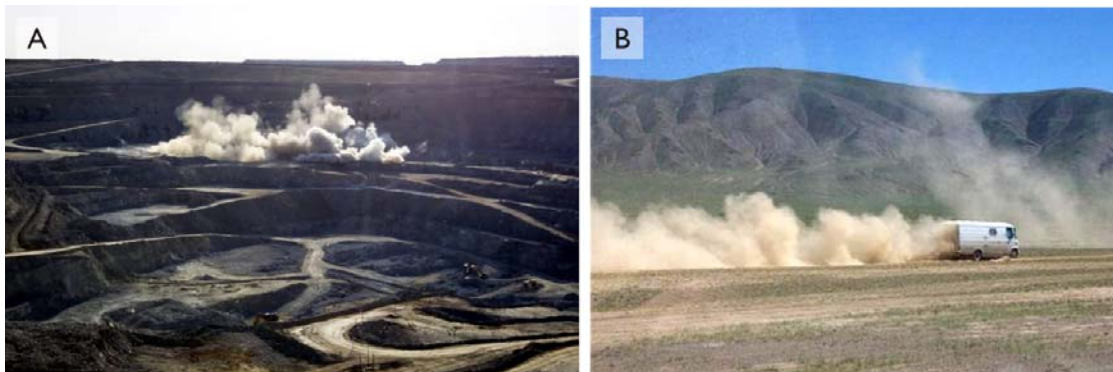
Lixiviación de menas de oro y plata con cianuro.

A: Pila de lixiviación. B: Pileta de lixiviación. C: Planta de flotación y lixiviación en La Parrilla, México. D: Planta de lixiviación en Lake Cowal, Australia.



Tamaño relativo del material particulado (imagen U.S.EPA).

cas, dado que es un insumo costoso. El «Código Internacional para el Manejo del Cianuro para la Fabricación, el Transporte y el Uso del Cianuro en la Producción de Oro» es un programa voluntario de la industria para compañías mineras de oro, diseñado por una Comisión Directiva de múltiples partes interesadas bajo el amparo del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y el Consejo Internacional de Metales y el Medio Ambiente (ICME), cuyo objetivo es mejorar el manejo del cianuro utilizado en la minería del oro y ayudar en la protección de la salud humana y en la reducción de impactos ambientales (ver <http://www.cyanidecode.org/>).



Generación de polvo en diversos ambientes. A. En una explotación minera a cielo abierto (mina de oro Altyantau, Kazakhstan, foto Reuters) B. En una ruta de ripio en ambiente semidesértico.

CONCIENCIA DEL CONSUMO

*Al ritmo actual de consumo de metales, globalmente considerado (cálculo de producción de metal / cantidad de habitantes), para obtener la cantidad de cobre que una persona utiliza durante su vida (en la actualidad casi 200 kg) es necesario excavar **8 metros** de yacimiento, en una superficie de **1 m x 1 m**, extraer esa porción de **20 toneladas de montaña**, triturarla, transportarla y procesarla. Si el yacimiento no es tan rico y en lugar de una ley de 1% Cu tiene 0,5% Cu, se necesitarán entonces 40 toneladas de montaña.*

*Puede realizarse el mismo ejercicio para otro metal muy útil, el hierro. La misma persona, que también utiliza casi 20 toneladas de hierro (metal) durante su vida, requeriría minar una superficie de **1 m x 1 m** hasta una profundidad de unos **6 metros**. Esto equivale a más de 30 toneladas de mineral de un yacimiento muy rico en hierro. Estas cifras se exponen con el objeto de dar una dimensión real al consumo de metales y trasladarla hacia el origen del producto mineral demandado, es decir, los yacimientos de donde aquellos son extraídos. No pretenden servir como datos estadísticos y por ello no consideran las tasas de urbanización, englobando así a todos los habitantes del planeta. Lógicamente el habitante urbano es, por lejos, quien consume las tasas más altas de metales.*

3.3.3.3. Dispersión física

Durante las actividades mineras el polvo puede tener múltiples orígenes, tales como voladuras y otros procesos de arranque en mina o cantera, carga y transporte, trituración, molienda, vertido a escombreras y acción del viento sobre la roca aflorante o sobre las escombreras. La diseminación a través del aire se produce cuando las partículas son de granulometría muy fina y las acumulaciones se encuentran expuestas a la acción de vientos. Este polvo se denomina técnicamente material particulado.

Para definir la calidad del aire de un sitio, y establecer si implica riesgos para la salud humana o para la biota del lugar, se analizan las partículas que contiene (distribución de tamaños, forma, densidad y composición). Los estudios de calidad de aire, ineludibles en áreas pobladas, determinan el contenido y la composición de las fracciones «respirables» dispersas en el aire que pasan a través de la tráquea e ingresan al tracto respiratorio (conocido como material particulado PM 10 ya que el tamaño de partícula es menor de 10 micrones), y de aquellas que pueden depositarse en lo más profundo de las vías respiratorias (PM 2,5 ya que el tamaño de la partícula es menor de 2,5 micrones). El análisis mineralógico y químico de las partículas permiten identificar la fuente de proveniencia de las partículas en el aire y eventualmente brindan elementos para establecer planes de contingencia ambiental.

3.3.4. La modificación del relieve y el paisaje

En una explotación minera, el relieve se ve afectado por excavaciones que modifican perfiles o cavan hoyos o aberturas, como así también por la presencia de acumulaciones de distintos volúmenes de roca y/o materiales (desmontes, relaves). Independientemente de su composición química, el sólo hecho físico de la existencia de material acumulado implica una variación al relieve que modifica el paisaje. Otras variaciones al paisaje pueden deberse a la extracción de rocas de coloración o características físicas determinadas (bandeadas, moteadas, etc.) que las hacen de especial atención.

Las modificaciones al relieve no deben considerarse sólo como un impacto visual; cuando son de gran magnitud pueden tener incidencia en el escurrimiento superficial y subsuperficial e incluso en la dinámica



de niveles freáticos, impactar localmente alterando las condiciones del hábitat de fauna y flora, o constituir un grave riesgo para la seguridad de animales y personas, entre otras implicancias negativas.

Explotaciones sin control en un cauce fluvial pueden modificar el nivel de base local, cuya reducción origina un exceso de energía y produce la erosión del cauce para establecer un equilibrio con el nuevo nivel



Un ejemplo de modificación profunda del paisaje: Las canteras de mármol en Carrara, Italia.



Explotación de grava. A: en un curso fluvial (Waikakiriri, Nueva Zelanda, foto: C. Fenwick). B: en una cantera (McLean Lake, Canadá).

de base, erosión que puede traer aparejada la eventual destrucción de terrazas en su margen y la afectación de las actividades antrópicas allí desarrolladas (cultivos, emplazamientos urbanos).

En otro tipo de explotaciones mineras, escasamente consideradas pero muy comunes, tales como aquellas de salinas o incluso de los materiales áridos naturales (gravas y arenas en cauces de ríos y en valles), la modificación al relieve tiene otras características. En el caso de gravas y arenas de cauces activos de ríos y arroyos, debe controlarse el equilibrio entre aporte natural y extracción (**agradación** versus **degradación**), la profundidad de los cauces y el mantenimiento de los perfiles naturales. Para depósitos que son geológicamente más antiguos (paleocauces), en los que ya no circula agua y generalmente se hallan cubiertos por otros sedimentos, con formas lenticulares o tabulares, las alteraciones en el relieve suceden por la abertura de canteras. En las salinas se desarrollan generalmente explotaciones sin modificaciones al relieve ya que se explotan niveles de espesores mínimos y se mantiene el relieve prácticamente llano, aunque pueden ocurrir alteraciones en el Medio Ambiente, régimen y ecosistema particular salino, las que deben ser atendidas.

3.3.5. Los riesgos de la minería informal

La minería informal es aquella que se realiza sin control técnico ni sujeción a marcos regulatorios, usualmente empleando métodos ma-



Serra Pelada, Brasil. A: Foto de época (1980) de la explotación informal por parte de miles de garimpeiros. B: Extensión de la mineralización en profundidad y desarrollo de los trabajos para su explotación mecanizada (extraído de Colossus Minerals Inc.). En el sector derecho se observa el lago formado por la inundación del open pit creado por los garimpeiros.

nuales y mano de obra poco calificada, y no comparte muchas de las características que se han discutido. Sin embargo, ha sido y continúa siendo, en los sitios donde aún se practica, una causante de gran afectación en el Medio Ambiente y de daños irreversibles a las personas, que se traduce tanto en la contaminación de las aguas como en la deforestación de las zonas explotadas. Un caso paradigmático es la explotación de recursos auríferos en la región amazónica.

Sierra Pelada está ubicada en el estado de Pará, una zona del municipio de Curionópolis en Brasil, donde en 1976 se descubrió oro. A partir de 1979 se desató una «fiebre moderna del oro» que atrajo hasta allí a decenas de miles de *garimpeiros* (nombre que se le da en Brasil a buscadores de oro y piedras preciosas). El 21 de mayo de 1980 el gobierno militar brasileño, que venía perdiendo popularidad, intervino la zona, y promovió que la gente migrara hacia la región amazónica. Casi 80.000 *garimpeiros* trabajaron allí durante los años siguientes mediante permisos de explotación, concedidos por el gobierno,

que cubrían una superficie de 2 x 3 metros cada uno. En total se concedieron cien hectáreas de las 10.000 con que contaba la mina, propiedad de la empresa minera Vale do Rio Doce. La mayor producción tuvo lugar en 1983, alcanzando a 13,9 toneladas de oro. Luego fue decayendo paulatinamente, hasta 13 kilos en 1991, y en 1992 cesaron los permisos. En total se extrajeron alrededor de 90 toneladas de oro. En el año 2001 los *garimpeiros* recuperaron sus cien hectáreas por vía judicial, si bien ya casi no quedaba mineral. En las operaciones se utilizaron todo tipo de tecnologías, desde el uso de canaletas hasta biolixiviación. El open pit original está hoy ocupado por un lago. El impacto de la minería artesanal incluyó deforestación, sedimentación en los ríos, envenenamiento por mercurio, invasión de reservas indígenas, diseminación de la prostitución y de enfermedades, depresión de recursos no renovables, destrucción del suelo, etc. Menos del 10% de los *garimpeiros* tuvieron éxito económico en su trabajo en Serra Pelada.



Debido al uso de mercurio para la extracción del oro, grandes áreas alrededor de la mina están peligrosamente contaminadas, y se detectó que la población que consume pescado aguas abajo de la explotación presenta elevados contenidos de mercurio. Ya en 1984 se obtuvieron evidencias de bioacumulación de mercurio en peces. Los estudios de peces en la región amazónica a principios de la década de 1990 mostraron que alrededor de 30% de los peces estudiados superaban el límite de 0,5 ppm de mercurio establecido por el gobierno brasileño como límite seguro para su consumo. El impacto de los altos contenidos en mercurio se observa en los altos niveles en sangre de la población (10 a 206 mg Hg/l) que contrastan con los niveles normales (6 a 12 mg/l). La gravedad de la situación es evidente. Los nativos de la región del río Madeira tienen más mercurio en sangre (32 mg/l) que los mineros (17 mg/l) debido al hábito de mayor consumo de pescado. Alrededor del 3% de esa población tiene concentraciones de metilmercurio medido en cabello que varían entre 50 y 300 mg/kg, cuando el nivel normal es entre 2 y 6 mg/kg y el nivel crítico para mujeres embarazadas es 10 mg/kg.

Por otra parte, los estudios geológicos realizados con posterioridad en el área de Serra Pelada demostraron la existencia de mineralización primaria en las rocas por debajo de los niveles explotados artesanalmente, previéndose para 2014 el inicio de la explotación, esta vez racional. de esas reservas, que además de oro incluyen platino y paladio.

Otro ejemplo de afectación de la selva amazónica puede observarse en la zona de Madre de Dios, Perú, donde la explotación informal de aluviones auríferos ha producido contaminación con mercurio y una pronunciada deforestación. La tasa anual de deforestación en esa región se ha triplicado desde 2008 debido a la rápida expansión de la minería ilegal del oro alentada por los altos precios del metal precioso, que ha crecido un 400 por ciento entre 1999 y 2012, con la aparición de miles de pequeñas explotaciones mineras clandestinas. La tasa de pérdida de foresta debida a la explotación del oro pasó así de cerca de 2000 hectáreas por año antes de 2008 a más de 6000 hectáreas anuales después de la crisis financiera global de 2008 cuando los precios del oro subieron rápidamente. De esta manera la tasa de deforestación en Madre de Dios originada por la fiebre del oro supera la pérdida de bosques producida de manera combinada por la silvicultura, la ganadería y la agricultura. Otros efectos indeseables de esta actividad marginal incluyen la



Deforestación en la región de Madre de Dios, Perú, como consecuencia de las explotaciones artesanales de aluviones de oro. A la derecha se observa la selva amazónica en 2003, previo a la explotación informal, y en 2011, donde grandes extensiones (ver escala) fueron deforestadas.



contaminación por uso de mercurio y por el vertido de sólidos en suspensión en los cursos de agua y de residuos de amalgamación en cursos de agua y suelos, así como perturbación de estos últimos.



Procesamiento de mineral de oro utilizando mercurio en Talawaan, Indonesia.

El mineral es molido en tambores a los que se agrega agua y mercurio (A, B). La amalgama formada es luego separada (C) y quemada de modo que el mercurio se volatiliza y queda aislado el oro (D). Fotos de S. Rodrigues Pereira Filho et al. 2004.

El uso del mercurio en la minería artesanal

La minería artesanal y de pequeña escala del oro es una fuente importante de ingresos para millones de pequeños mineros, especialmente en comunidades y regiones rurales donde las alternativas económicas son muy limitadas. Utilizan normalmente grandes cantidades de mercurio para procesar el mineral, por su cualidad de separar y extraer el oro de la roca en la que se encuentra al adherirse a éste formando una amalgama, a menudo en condiciones de gran inseguridad y peligrosas para el medio ambiente. En las operaciones de minería del oro en gran escala se ha eliminado el uso del mercurio, sustituyéndolo por otras tecnologías, tales como la cianuración. De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2008) las mejoras y cuidados para los mineros incluyen desde mejoras en las técnicas de uso del mercurio para separar el oro, hasta incentivos para sustituir el mercurio por el cianuro, notablemente menos peligroso.

Los mineros artesanales calientan la amalgama para recuperar el oro y lo hacen en una pala o utensilio de metal quemándola directamente sobre el fuego, a cielo abierto. Al hacerlo sin usar un objeto que atrape, condense y recupere el mercurio, éste escapa al aire. La práctica produce emisiones atmosféricas de alrededor de 300 toneladas métricas anuales de mercurio en todo el mundo y compromete seriamente la salud del propio minero y su entorno de trabajo.

El uso de las llamadas «retortas» permite capturar el vapor de mercurio, evitando que se libere en la atmósfera. Las evaluaciones realizadas por el Proyecto Mundial del Mercurio, de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, concluyeron que era posible fabricar retortas eficientes a bajo costo y que, al utilizarlas adecuadamente, más del 95% del mercurio se reciclaba y podía reutilizarse.

Otra alternativa al uso de mercurio es el mayor grado de molienda para ayudar a la liberación de las partículas de oro, que pueden luego concentrarse por gravedad, por métodos magnéticos o mediante centrifugado. Sin embargo, el método más adecuado por la amplitud de su uso y menores limitaciones es la cianuración, aunque su alto costo lo hace prohibitivo para la minería de pequeña escala.



4 PRODUCCIÓN RESPONSABLE: PREVENCIÓN, REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

La actividad minera, como la mayor parte de las demás actividades que el hombre realiza para su subsistencia, produce alteraciones de las condiciones naturales del Medio Ambiente, desde las más imperceptibles hasta las que representan claros impactos sobre el entorno en que se desarrollan.

En el pasado, la industria minera no tomaba precauciones en el proceso extractivo, ni procedía a restaurar el sitio de explotación y su entorno tras el cese de la actividad minera. Hoy, algunas de esas evidencias son herramientas importantes para la exploración minera, siguiendo el principio que donde hubo mineralizaciones pueden encontrarse nuevos recursos. Pero, a la vez, constituyen **pasivos ambientales** que deben ser evaluados y reparados.

Ahora bien, los efectos de la actividad minera tienden a ser transformadores (extracción y movilización de importantes volúmenes de rocas y minerales) y en ocasiones irreversibles (generalmente no se puede recuperar la forma de un área explotada a cielo abierto) por lo que el objetivo es minimizarlos al máximo, mediante la recuperación de las zonas afectadas, tanto desde el punto de vista paisajístico como de la eliminación de los efectos de la contaminación de suelos, aguas, etc., reconstruyendo la cubierta edáfica, vegetación y condiciones de vida de la fauna al momento previo a la explotación minera.

Se pueden diferenciar tres aspectos con relación al impacto ambiental: su **prevención** a partir de estudios previos a la etapa de explotación y aún de exploración, la **restauración** del sitio de la mina y su entorno, que consiste básicamente en volverlo al estado en que se encontraban antes de los trabajos mineros, y la **remediación** (**rehabilitación** o **reparación**), que tiene por objetivo el tratamiento para la descontaminación de los desechos mineros acumulados (escombreras y colas), con el objetivo de eliminar o minimizar la contaminación que éstos puedan provocar. Una vez que un sitio está contaminado se plantean alternativas de limpieza, estableciéndose niveles máximos de contaminantes aceptables luego que el sitio sea sometido a una tratamiento de remediación.

*El Grado de Impacto al medio ambiente
producido por un depósito mineral depende de:*

- El tipo de yacimiento
- El tamaño del yacimiento
- Las características propias, presentes y pasadas, del sitio donde se encuentre (ubicación, litología, clima, cuenca hídrica)
- Si se lo explota, la escala y metodología de la operación

Los avances tecnológicos, la disponibilidad de herramientas y medios, así como el conocimiento científico, facilitan la tarea de remediación y restauración, que debe ser acompañada por una legislación que controle el impacto ambiental de la actividad minera. En ese sentido se han hechos significativos avances en:

- el conocimiento de los contaminantes y sus niveles de toxicidad,
- el desarrollo de la modelización de parámetros,
- las alternativas tecnológicas para los trabajos de restauración o remediación, tales como la inmovilización por vitrificación y cementación en instalaciones de confinamiento, incineración y desmantelamiento,
- el desarrollo de procesos de destoxificación ambiental mediante el diseño de procesos físicos (extracción y transferencia de contami-

*El impacto al Medio Ambiente se puede
PREDECIR*

La contaminación del Medio Ambiente se puede
1- PREVENIR para que no suceda
2- REMEDIAR en el caso que haya sucedido

*El paisaje afectado se puede
RESTAURAR*

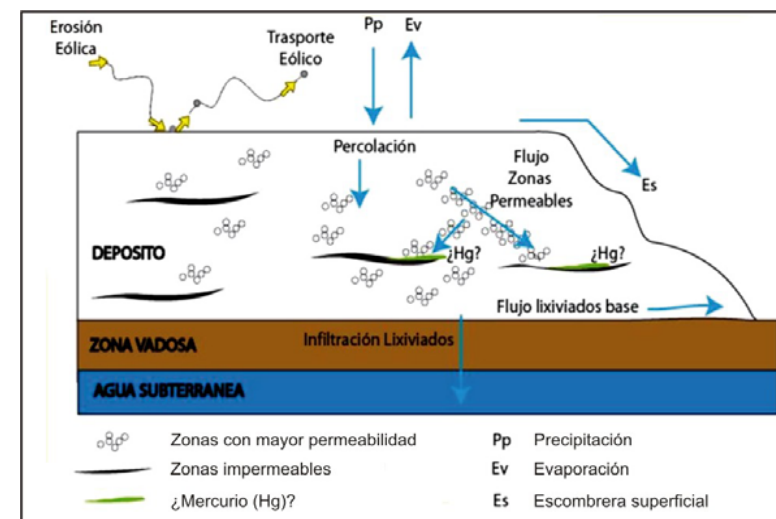


nantes), químicos (muros de tratamiento, barreras de degradación, barreras de sorción, barreras de precipitación), biológicos (tales como biorestauración, fitorestauración, fitoextracción, fitodegradación) o combinaciones de ellos,

- las capacidades analíticas de los laboratorios.

4.1. Remediación de sitios mineros

Las consideraciones hasta aquí realizadas muestran que existen herramientas que permiten, a partir del conocimiento científico y tecnológico, satisfacer la demanda de minerales mediante la explotación de yacimientos en condiciones controladas que minimicen y hagan soportable el impacto de la actividad minera sobre el Medio Ambiente. Estas herramientas no han estado siempre disponibles, dado que muchos de los conocimientos se han alcanzado a posteriori de los daños ambientales causados (como es el caso de la denominada minería histórica o de los pasivos mineros ambientales pretéritos). También es cierto que distintos factores, entre los que se cuentan la inexistencia en el pasado de los paradigmas actuales de defensa del Medio Ambiente, la falta de controles, la irresponsabilidad empresarial, la no observancia de leyes, o negligencia, entre otros, han causado severos desastres ambientales relacionados con desarrollos mineros, fundamental-



Ejemplo de contaminación, rutas de exposición y receptores relacionados con un pasivo ambiental minero (Fundación Chile, 2010).

mente en lo referente a la disposición de los residuos mineros (diques de colas y escombreras).

La remediación es una parte esencial del aprovechamiento de los recursos minerales en concordancia con los principios del desarrollo sustentable. No se trata de un proceso que puede ser considerado sólo durante el cierre de las minas. Para que la remediación resulte efectiva debe ser parte de un programa integrado de planeamiento, gerencia y ejecución durante todas las fases del desarrollo minero y sus operaciones.

Algunos de los principales aspectos de la rehabilitación de sitios mineros son:

- el rediseño del paisaje (con características muy diferentes según el tipo de explotación desarrollada),
- la estabilización física de taludes,
- el cuidado e impedimento de los accesos a labores mineras abandonadas,
- la estabilización química de residuos mineros,
- la restauración de suelos (estabilización física y química, mejoras texturales, elevación del contenido de nutrientes, regulación del pH, etc.),

PASOS PARA DECIDIR LA REMEDIACIÓN DE UN PASIVO MINERO

1º	Evaluación detallada	Evalúa objetivamente todas las características de los sitios impactados y la existencia de contaminación (en cursos de agua, suelo, personas, flora, fauna, etc.) mediante la determinación de parámetros y su comparación con estándares ambientales.
2º	Diseño de un Plan de remediación	Determina las acciones a realizar como parte de un proyecto, a ejecutar en un tiempo determinado, con recursos y costos medidos.
3º	Remediación del sitio	Ejecución de las acciones de remediación, tales como: estabilización química de materiales contaminados, construcción de celdas de disposición final, transporte de residuos, remediaciones de suelos y/o aguas, estabilización de taludes, obras de seguridad, etc.

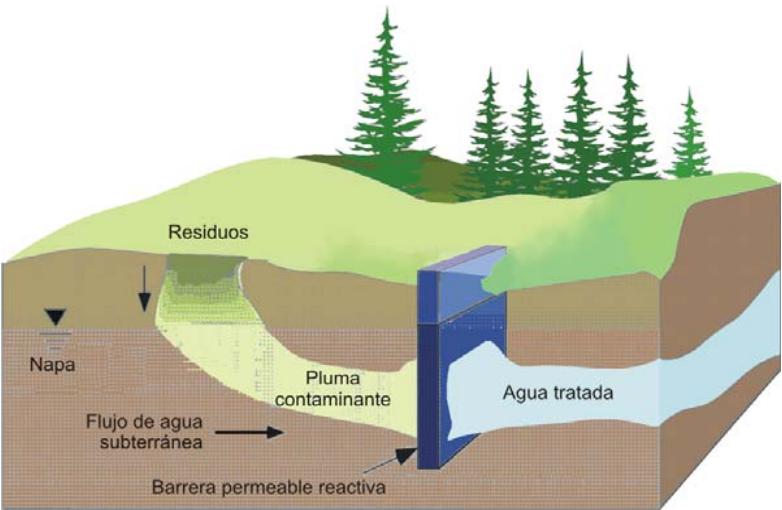


Ejemplo de restauración. Estabilización de talud mediante cobertura vegetal. Hope Mine, Colorado, Estados Unidos.

- el establecimiento de cubiertas orgánicas,
- confinamiento y aislación de residuos,
- la revegetación de sitios (para restaurar ecosistemas naturales y reestablecer la flora y fauna nativa).

Las modernas tecnologías de recuperación cuentan con herramientas tales como:

- la aplicación de cubiertas orgánicas,
- la aplicación de compuestos químicos (fosfatos, cales), de arcillas y de compuestos orgánicos,
- las obras de infraestructura de sostenimiento y de seguridad (en el caso de labores a cielo abierto o subterráneas abandonadas),



Construcción de barreras para impedir la dispersión de sustancias contaminantes.

IMPACTO Y RESTAURACIÓN SEGÚN EL TIPO DE RELIEVE		
Relieve	Afectación	Principales labores de restauración
Positivo	Modificación de perfiles	Reperfilados, estabilización de taludes.
	Presencia de canteras, hoyos, pozos, rajos, <i>open-pits</i> .	Rellenos sólidos o líquidos (reutilización del sitio)
	Acumulaciones	Remoción, nuevos perfilados, coberturas, forestación.
Llano	Presencia de pozos, grandes hoyos, rajos, <i>pits</i> .	Rellenos
	Acumulaciones	Remoción, nuevos perfilados, coberturas, forestación.



Antes y después. Restauración del relieve y cobertura en Harmony Lake, Montana, Estados Unidos.



Restauración de una cantera de caliza convertida en jardín botánico (Butchart Gardens) en la isla Vancouver, Canadá.

ETAPAS EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO

1. Identificación del escenario de peligro
2. Determinación de la probabilidad de ocurrencia
3. Estimación de la severidad de las consecuencias
4. Evaluación de la magnitud del riesgo

Los nuevos instrumentos para el Control y la Gestión Ambiental

- Sistemas de información geográfica ambiental
- Licencias ambientales
- Áreas protegidas
- Educación ambiental
- Participación ciudadana
- Auditorías ambientales
- Adecuaciones normativas

- el confinamiento de residuos en celdas de disposición final,
- el «lavado» de materiales contaminados, etc.

Todas estas herramientas permiten, en conjunto, asegurar la remediación o restauración de un sitio satisfaciendo los criterios de permanencia y estabilidad a largo plazo, cumpliendo con las metas de reducción de los niveles de exposición, que se cumplen a través de las etapas de preparación del terreno, la limpieza de los medios que contienen las sustancias tóxicas, hasta el cierre del sitio, en concordancia con las legislaciones vigentes.

4.2. Riesgos sobre la salud y el Medio Ambiente

El riesgo es la probabilidad de que suceda un evento o impacto con consecuencias adversas. Es una medida de la potencial pérdida económica o lesión en términos de la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado junto con la magnitud de las consecuencias. Para medirlo se utilizan matrices de riesgo que, en campos definidos, reflejan la combinación de los factores de probabilidad de ocurrencia y la severidad de las consecuencias calculados previamente.

Se establecen criterios para determinar la severidad de las consecuencias del estado del Medio Ambiente en un sitio y también la probabilidad que sucedan ciertas condiciones que provoquen, aumenten o disminuyan el eventual daño (identificación de escenarios de peligro ó «peligros probables»). La probabilidad de ocurrencia puede calificarse



Ruptura del dique de colas de la mina de plomo y zinc Los Frailes, Aznalcóllar, España.

numéricamente (mediante la aplicación de un índice) o bien conceptualmente (clasificándola como alta, mediana, baja o despreciable), aunque siempre surge a partir de un criterio. Por su parte, la severidad de las consecuencias de un escenario de peligro se evalúa en función de la gravedad del daño y la cantidad de receptores afectados, considerados estos como superficie, cantidad de bienes o de personas. La inclusión de personas (en términos numéricos) es un aspecto controversial en el criterio de juicio, al priorizar el concepto de población afectada por sobre el de individuo.

Estos criterios y sus procedimientos son muy utilizados en etapas de evaluación ambiental preliminar de un sitio impactado. Además, permiten clasificar pasivos ambientales por los riesgos que implican. Así, las evaluaciones de riesgo dan sustento científico a la toma de decisiones por parte de los responsables de la gestión de sitios con peligros o contaminantes que afecten la salud de las personas y el Medio Ambiente.

Con el fin de realizar una adecuada evaluación del impacto ambiental es necesario conocer y entender el entorno donde se desarrolla la actividad, a través de su evaluación o análisis mediante las variables o

factores ambientales que lo conforman. Este conocimiento se logra con los denominados estudios de línea de base ambiental, que analizan el medio físico (climatología, hidrología, geología, topografía, suelos, calidad de aire y agua), el ambiente biológico (ecología, flora, fauna, patrones de biodiversidad) y el ambiente socio-económico.

Los peligros relacionados con la actividad minera son aquellos vinculados con la seguridad, la estabilidad física y la contaminación, entre otros.

En el ámbito de una operación minera, activa o inactiva, los riesgos están relacionados con la presencia de labores abiertas (piques o rajos profundos o con diferencias de altura) que constituyan un peligro para personas y animales, o bien, como ya se explicó, con las acumulaciones de materiales en las que puede haber contaminantes (escombreras, diques de colas, residuos).

Los riesgos por el contacto con materiales perjudiciales para la salud de personas y animales implican la existencia de: a) un material o residuo peligroso presente en concentración tal que genere efectos nocivos en los receptores, b) al menos un receptor y c) una ruta de exposición mediante la cual el receptor entre en contacto directo con el componente peligroso. Por estar más relacionados con la contaminación cobran impor-

ESCENARIOS PROBABLES DE PELIGRO	POSIBLES CONSECUENCIAS
Presencia de drenaje ácido de roca	Contaminación de ríos, contaminación de suelos con metales.
Infiltración de sustancias peligrosas al suelo	Contaminación de suelos y de agua subterránea
Vientos fuertes y generación de polvo	Contaminación del aire
Fallas en canales de derivación de aguas	Erosión de material fino, contaminación de ríos y suelos cercanos.
Presencia de erosión hídrica y eólica	Contaminación de ríos cercanos, contaminación de suelos con metales y sólidos en suspensión.
Rotura de dique de colas o relaves	Contaminación de suelos y aguas, daños a infraestructura en zona aledaña.



**Los estándares de calidad del Medio Ambiente.
Concentraciones de elementos químicos que protegen la salud.
Máximos aceptables.**

Las concentraciones máximas y mínimas admitidas de elementos químicos en el aire, el suelo y el agua, según el uso al que se destinen cada uno de estos tres medios, están establecidas por normas legales y técnicas. La división más frecuente para el suelo es: actividad industrial, uso residencial o uso agrícola, mientras que para el agua es: consumo doméstico, industrial o animal y vida acuática. Estos «límites» permiten conocer y determinar con precisión la condición de aptitud del suelo, del agua o del aire en un sitio, en cualquier momento. Por haber sido elaborados por organismos o instituciones reconocidas mundialmente (EPA Environmental Protection Agency; OMS Organización Mundial de la Salud), son aceptados globalmente. Algunos límites varían de acuerdo con la norma utilizada y la adhesión de cada jurisdicción a esa norma, por lo cual es recomendable la mención de la referencia utilizada (y no un valor analítico) cuando se cita la condición de calidad ambiental apta o no apta de un sitio. También los Estados elaboran normas legales con los niveles guía de calidad ambiental y en muchos casos fijan también, mediante normativas, los protocolos con la metodología de análisis. Por ejemplo, en la Argentina se establecieron normativas ambientales específicas para la actividad minera, tales como presupuestos mínimos a cumplir en materia de protección ambiental, incluyendo el cierre de mina y la disposición de residuos (Ley 24.585), y la consulta y audiencia pública, el seguro ambiental y fondos de restauración y compensación (Ley 25.675).

tancia la ruta de exposición (es decir la forma por la cual un contaminante potencial entra en contacto con un receptor, por ingestión, contacto dérmico o inhalación), y el medio a través del cual el contaminante se propaga o dispersa (agua superficial o subterránea, aire, suelo).

La exposición de los trabajadores de la industria minera a polvos minerales puede darse en diversas circunstancias. Están expuestos quienes intervienen en la extracción de minerales y en su concentración o

purificación. Entre las afecciones que pueden presentarse en los trabajadores expuestos a estas sustancias tóxicas, las más frecuentes suelen ser las del aparato respiratorio, que incluye neumoconiosis, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, bronquitis industrial y cáncer de pulmón. La sílice, debido a su poder patógeno y a su abundancia en la corteza terrestre, es el principal mineral que origina las neumoconiosis, por lo que es común que se use el término silicosis. Se pueden prevenir estas enfermedades mediante técnicas de ingeniería que limitan la exposición de los trabajadores a estas sustancias tóxicas, complementadas con estrategias administrativas así como con el uso de equipos de protección personal.

Si bien existen criterios intuitivos para la percepción de los riesgos en el Medio Ambiente y a las personas que de él forman parte, no resulta fácil definirlos. En general se hace uso de criterios definidos para calificar y/o cuantificar los riesgos y, en función de su resultado, se los utiliza para caracterizar el estado ambiental de un sitio y decidir la ejecución de medidas de mitigación, restauración y control que, en su conjunto, se conocen como «gestión ambiental».

4.3. Cierre de minas: Planes de cierre y monitoreo ambiental

El cierre de una mina consiste en una serie de trabajos y acciones que se llevan a cabo inmediatamente después de finalizada la explotación del yacimiento mineral con el objeto de disminuir al máximo el riesgo con relación al Medio Ambiente y a las personas que puede ocasionar una labor minera abierta o una acumulación de materiales en condición de inestabilidad física (posibles derrumbes o movilización) y/o inestabilidad química (posible contaminación).

Si se considera nuevamente el concepto de la explotación de yacimientos con contenido cada vez menor de metales, surge la posibilidad que un yacimiento no cierre definitivamente, ya que una elevación en el precio del metal inmediatamente coloca el mismo, o sectores de éste no contempladas anteriormente, en condición de rentabilidad y posible explotación. Existen muchos ejemplos de yacimientos en explotación continua durante varias décadas, y de otros en explotación hasta por



Los estudios ambientales detallados

Cuando las evaluaciones o estudios de carácter preliminar identifican riesgos elevados, o al menos significativos, se requiere de la posterior ejecución de estudios detallados que confirmen dicha condición. En casos positivos, sirven de base técnica para el diseño de planes de remediación y la ejecución de las obras de remediación definitiva y/o monitoreo y control.

más de una centuria con interrupciones o períodos de inactividad de varias décadas.

Es práctica habitual en la minería moderna la diagramación del cierre de minas aún antes del comienzo de la explotación, y la ejecución de algunas de las obras y estudios que competen a esta etapa aún mientras se realiza la explotación. Estos aspectos están considerados en el denominada «Informe de Impacto» que las empresas mineras deben presentar previa aprobación de la construcción del emprendimiento, acorde con la legislación vigente en la mayoría de los países con actividad minera.

Tanto las interrupciones de actividad como los cierres definitivos, al menos de un sector del yacimiento explotado, deben asegurar la completa inexistencia de riesgo para la seguridad de las personas garantizando la inaccesibilidad a sitios peligrosos y, más aún, reconstituyendo relieves de condiciones inseguras (pendientes elevadas, hoyos, rajos abiertos) a condiciones completamente seguras, mediante modificación de las pendientes y rellenos, así como el desarmado y/o demolición de las construcciones, por ejemplo. Las mismas premisas le caben por supuesto a la prevención de los riesgos por contaminación.

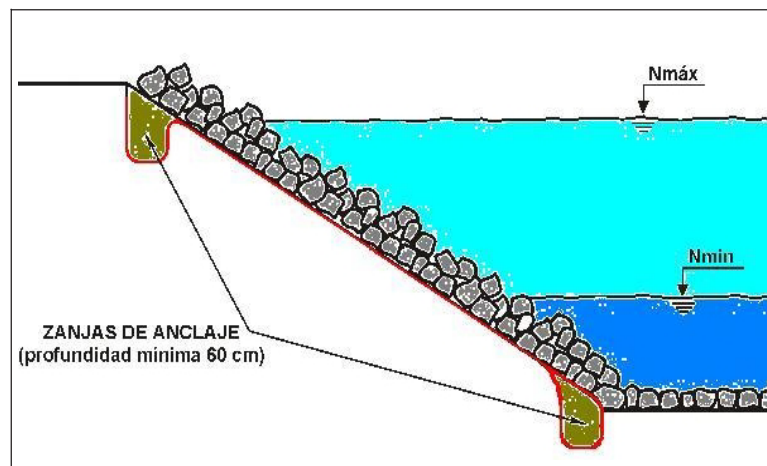
Los riesgos físicos, así como también los de índole química (contaminación) derivados de las grandes acumulaciones de materiales, en diques de colas o escombreras, se minimizan mediante obras ingenieriles de variada magnitud. Sin embargo, estas condiciones, aún seguras en el momento del cierre, cuando fueron creadas y establecidas las obras y sus materiales, deben soportar luego contingencias exógenas extremas (sismicidad de distinto grado, fenómenos climáticos) esporádicas pero

previsibles, por períodos de tiempo muy extensos, superiores aún al de vida de las personas. Esto alerta sobre lo imprescindible de los estudios de impacto ambiental previos efectuados con rigor científico, así como de los monitoreos ambientales periódicos en los entornos de los yacimientos minerales (tanto en aquellos en operación como en aquellos sin actividad minera, aunque con muchísimo más énfasis en los primeros) así como también de la sustentabilidad de las soluciones técnicas que se aplican para la estabilización química y/o física de grandes acumulaciones de residuos.

4.4. ¿Qué se hace con los residuos?

Cualquier modo de disposición de «residuos», entendiéndose como tal el modo en el cual se los acumula luego del cierre de una mina, debe necesariamente considerar como cuestiones básicas su potencial contaminante y su volumen, en función de los cuales se opta por su tratamiento y/o por su aislamiento.

Como ya se ha expuesto, los mayores riesgos con relación al Medio Ambiente se vinculan con la posibilidad que estos materiales produzcan y drenen ácido y/o que dispersen en el Medio Ambiente los metales que contienen.



Utilización de geotextil debajo de un enrocado, para protección de un talud.



Las geomembranas evitan que líquidos y residuos tóxicos afecten el suelo y las napas de agua.

Grandes volúmenes de materiales se tratan de un modo más «integrado» al ambiente, con el objeto de prevenir tanto las condiciones que generen potencial contaminación como las consecuencias de ésta, es decir que los contaminantes no estén geodisponibles ni se dispersen.

La disposición de estos materiales, sea de un modo integrado al ambiente o bien confinados en celdas herméticas, se realiza una vez estabilizados químicamente, y, en ciertas ocasiones, también con tratamientos físicos previos. Materiales con potencial drenaje ácido se disponen con el agregado previo de sustancias neutralizantes; compuestos peligrosos (plomo en especies sulfuradas, por ejemplo) se tratan químicamente para convertirlos en compuestos inertes (especies fosfatadas) donde el metal queda atrapado y no geodisponible; materiales en granulometría tan fina que pueden ser arrastrados por el viento e incluso aspirado por personas y animales son tratados con aglutinantes. Estas previsiones tienen por objetivo disminuir al máximo el potencial riesgo de la presencia de estos materiales en el Medio Ambiente.

El aislamiento de las condiciones atmosféricas es generalmente la alternativa más considerada, tanto mediante la aplicación de coberturas (productos fabricados especialmente, tales como geotextiles y mallas), o bien de determinados materiales naturales tales como arcillas especiales, incluso agua. Para prevenir la infiltración de soluciones, y los metales disueltos en ellas, se los aísla del suelo mediante un sustrato de arcillas o bien de materiales impermeables colocados previamente a la disposición.

Por otra parte, las operaciones mineras desarrolladas antiguamente -la «minería pretérita»-, han producido también volúmenes de residuos, expuestos sin tratamiento y/o aislamiento por no haber previsto en aquel momento el riesgo de sus operaciones. Para evitar sus efectos nocivos en general se ha optado, a posteriori y como parte de programas de remediación ambiental, por confinarlos en **celdas de disposición final**. Estas son grandes volúmenes de materiales residuales «empaquetados» con materiales aislantes, denominados geo-cover. Las celdas, así aisladas, cumplen con dos premisas básicas: a) impiden la interacción del residuo



Obras de estabilización, revegetación y drenaje, en antiguos diques de colas.



con las condiciones del Medio Ambiente (oxidación, humedad, bacterias), y b) guardan los metales sin riesgo para el Medio Ambiente. De esta manera se controlan los efectos de generación de polvo y la erosión, la estabilización química, el control de la infiltración de contaminantes y la provisión de un medio de crecimiento para el establecimiento de vegetación sustentable.

Estas celdas guardan, en ocasiones, verdaderos activos mineros, hasta tanto el avance tecnológico desarrolle métodos rentables para recuperar los metales que no fueron utilizados.

4.5. Los costos de las remediaciones ambientales

El alto costo económico de realizar remediaciones ambientales, es decir remediar los pasivos ambientales mineros, se debe a las grandes dimensiones de las obras que deben desarrollarse, complejas y variables, sumado al hecho de la irreversibilidad de las consecuencias de los daños ocurridos, más las dificultades técnicas de los trabajos con residuos contaminados, la necesidad de mayores y complejos estudios y el desarrollo de nuevas y más efectivas técnicas de remediación, entre otros factores. Resultan así valores de hasta centenas de millones de dólares.

Como consecuencia de haber tenido que remediar, en las últimas décadas, pasivos ambientales producidos en el pasado por el desconocimiento y falta de conciencia ambiental, la industria minera ha acumulado experiencia. Hoy se han incorporado estos costos a la ecuación económica que determina la viabilidad del desarrollo y explotación de un yacimiento y en la percepción del ahorro que significa la gestión ambiental simultánea con la gestión de explotación y aún en etapas avanzadas de la exploración del depósito mineral.

En la actualidad se discute quiénes serán los responsables de los costos de los monitoreos futuros a largo plazo y del mantenimiento de las condiciones ambientales seguras de los que fueron sitios mineros y hoy constituyen pasivos ambientales que en muchos casos no son propiedad de ninguna empresa minera. Debates semejantes han surgido para otras actividades económicas, no sólo para la minería.

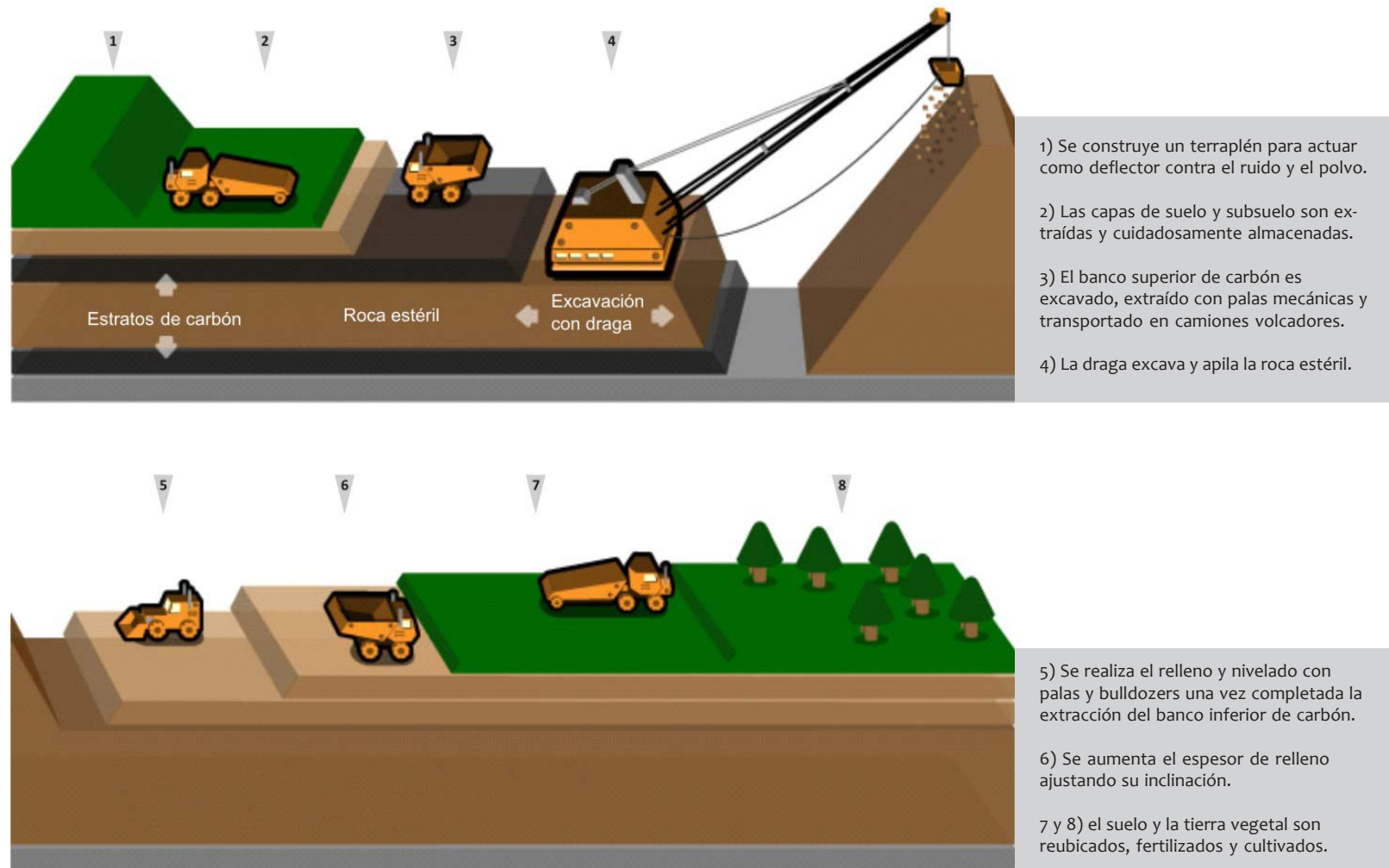
La etapa que tiene lugar después del cierre de una mina (denominada de postcierre o postoperacional), es la última entre todas las corres-

Un caso de cierre de mina: MINA ÁNGELA

El yacimiento, una mineralización polimetálica aurífera localizada en la Patagonia argentina, fue descubierto hacia 1920. La explotación tuvo lugar entre 1978 y 1992 y en 1998 se decidió su cierre. El programa de remediación consistió en el sellado de los accesos subterráneos, el desmantelamiento y traslado de la planta industrial, la demolición y soterramiento de la infraestructura, la remediación de relaves y escombreras mediante la colocación de una cubierta de roca no reactiva, reperfilaje de la superficie y construcción de muros de contención y canales de desvío de agua. Se restituyó la topografía original del terreno dejando sólo el camino de acceso al campamento. El costo total del proyecto de cierre y remediación fue de 3,3 millones de dólares.



Estabilización de talud y cobertura vegetal en una antigua mina.



pondientes a la actividad minera. Fue definida como tal debido a la particularidad de esta actividad, de continuar produciendo efectos ambientales significativos luego del cese de las operaciones.

La planificación del cierre de minas surgió a fines del siglo XX en países con minería desarrollados, como respuesta a la problemática

de la gestión de impactos sobre el Medio Ambiente en la etapa postoperacional de una mina. Así, existen en la actualidad normativas para la planificación del cierre de yacimientos, como un instrumento específico a tener en cuenta desde las etapas de explotación.



La existencia, aún hoy en día, de grandes pasivos ambientales en muchos sitios de larga tradición minera es resultado, entre otros varios e importantes factores, de considerar plazos extremadamente cortos en la gestión ambiental de la etapa postcierre de operaciones mineras.

Los desafíos que implican los grandes volúmenes de residuos a tratar, la variación de la calidad ambiental (impacto positivo o negativo), su intensidad, extensión, persistencia o duración, reversibilidad o capacidad de recuperación, la interacción de acciones y/o efectos, la probabilidad de acontecimiento/periodicidad, etc., pueden ser superados con aporte tecnológico y de conocimiento. Sin embargo, uno de los aspectos más debatidos es la incorporación de un sistema de garantía financiera para el cumplimiento del plan, y sus detalles, tales como las formas o instrumentos de garantía, el cálculo de su monto, los efectos tributarios, entre otros.

La existencia o no de sistemas de garantía para el cumplimiento de las obligaciones durante las operaciones de cierre y postcierre es

lo que diferencia claramente las normativas ambientales. Deben establecerse garantías que aseguren el cumplimiento de las actividades previstas en los planes de manejo ambiental, que contemplen los años posteriores a la finalización del período de vigencia de las concesiones, y que permitan el cumplimiento de todos los compromisos ambientales, aun los que no formen parte de un determinado plan de cierre.

Las garantías se refieren a dar seguridad tanto en el monto, la forma y las condiciones para la recuperación del área (*mine reclamation*) o para implementar medidas de protección y mitigación de daños ambientales, pactándose el depósito anual de garantía para que exista el recurso económico necesario para tales medidas y obras.

En este modelo, el responsable de la operación minera es también el encargado de la gestión ambiental completa, incluida la etapa postoperacional. En el caso que esto no ocurra, o se realice en forma deficiente o incompleta, la ejecución de la garantía por parte del Estado concedente permite financiar las obras necesarias.

*Los **nuevos paradigmas** sobre los cuales se basa la minería actual están referidos a la calidad del Medio Ambiente.*

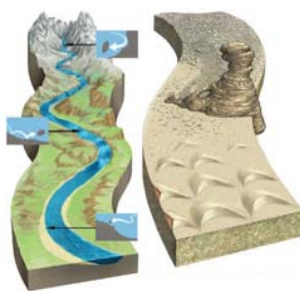
La conciencia y presión sociales, las mayores regulaciones y controles, el grado de responsabilidad técnica y de gestión, las mejores herramientas tecnológicas, el mayor conocimiento científico, los precios más elevados de los metales que posibilitan asignar fondos específicos al cuidado ambiental, son todos aspectos que permiten razonablemente asumir que existen las condiciones y herramientas para impactar con la menor intensidad posible al Medio Ambiente, procurando siempre extraer la cantidad de mineral que demande el desarrollo de las personas, a partir de los yacimientos que los científicos han identificado, en los sitios donde la Naturaleza los ha situado.



Botadero



Explosión freatomagmática



Erosión y Sedimentación

GLOSARIO

Antrópico: lo relativo al ser humano. Suele oponerse al concepto de natural.

Antropogénico: relacionado con la actividad humana (por ejemplo: factores antrópicos, riesgos antrópicos, erosión antrópica).

Agradación: acumulación de sedimentos en ríos y arroyos.

Biota: conjunto de plantas y animales de un ambiente.

Biotoxidad: acumulación de toxinas en un cuerpo a partir de fuentes biológicas (por ejemplo: insectos, víboras, hongos, bacterias).

Botadero: sitio de acumulación de residuos. En minería, donde se disponen los residuos mineros.

Commodity: metal o sustancia mineral comercializada en todo el mundo, con cotizaciones conocidas.

Concentración: la cantidad de una sustancia disuelta o contenida en una cantidad dada de otra sustancia. Por ejemplo, el agua de mar contiene una concentración de sales más alta que el agua dulce.

Concentrados (de mineral): resultado de los distintos tratamientos realizados a los minerales luego del minado de las rocas que los contienen. Estos tratamientos tienen por objeto aumentar el contenido del metal o sustancia aprovechable y disminuir el de los minerales no útiles.

Defecto: Carencia o deficiencia en el contenido de un elemento o sustancia

Degradación: deterioro de la calidad. Erosión de los sedimentos del lecho de ríos y arroyos.

Diseminado: forma de distribución de la mineralización en una roca, en la cual el mineral de mena se halla esparcido aleatoriamente.

Erosión: degradación y destrucción progresiva del relieve, provocada por la acción de diversos agentes (agua, viento, hielo). Es responsable de la modificación del relieve (montañas, valles, líneas de costa, etc.).

Estéril: roca que no contiene mineral ni sustancia aprovechable.

Escombreras: acumulación de fragmentos de roca de gran tamaño, sin contenido o con contenidos muy bajos de mineral, que resultan de la operación de minado. También llamado desmonte.

Exceso: cantidad de un elemento o sustancia que sobrepasa un nivel crítico en el medio en que se mide.

Exposición: situación en la que un individuo puede recibir la acción y sufrir el efecto de un agente químico o físico, por contacto directo (por ejemplo a través de la piel o los ojos) o por ingesta o aspiración, comportando todo ello un posible daño (riesgo) para su salud. La exposición puede ser a corto plazo (aguda) o a largo plazo (crónica).

Flotación: proceso fisicoquímico de tres fases (sólido-líquido-gas) que tiene por objetivo la separación de especies minerales mediante la adhesión selectiva de partículas minerales a burbujas de aire. Para ello se utilizan reactivos químicos o aditivos que se combinan con agua y los minerales finamente molidos.

Freatomagmática (erupción): explosión volcánica derivada de la combinación de lava con agua subterránea calentada que produce grandes cráteres o depresiones circulares denominadas maar.

Ganga: son los minerales que acompañan a la mena pero no tienen valor económico. Se llama mineralogía de ganga al conjunto de minerales que integran la ganga. Las menas metalíferas suelen tener, sílice, carbonatos y/o sulfatos como minerales de ganga.

Geotextil: lámina resistente y flexible fabricada de productos sintéticos, tales como poliéster y polipropileno. Las hay permeables e impermeables, de acuerdo con los usos, y de distintos espesores y resistencia a la tracción.

Ingestión: tragar (cuando se come o se bebe). Las sustancias químicas pueden ser ingeridas en el alimento, la bebida, utensilios, cigarrillos o manos. Luego de la ingestión, las sustancias químicas pueden ser absorbidas en la sangre y distribuidas en todas partes del cuerpo.

Inhalación: Respiración. La exposición puede ocurrir por inhalación de los contaminantes, porque éstos se pueden depositar en los pulmones, transportarse en la sangre o ambos.

Ley: contenido de metal (o de óxido del metal) en el yacimiento, expresado como la cantidad de metal que contiene una unidad de roca mineralizada o explotada. Sus unidades son variables; usualmente se utilizan g/t (gramos de metal en mil kilogramos de roca) para contenidos relativamente bajos, como el de mineralización diseminada, y % (relación porcentual entre el peso del metal y el peso de la roca) para contenidos mayores, como el de las mineralizaciones vetiformes.

Ley de corte: contenido mínimo de metal o concentración mínima de la mineralización, para que su explotación resulte rentable.

Línea de base: son las medidas de las concentraciones de elementos químicos en un sitio y momento determinado. No representan necesariamente el verdadero background del sitio. Son expresadas, para cada elemento, como un rango y no un valor único.

Magma: material fundido formado la parte superior del manto y la base de la corteza terrestre. Es un fundido esencialmente silicático, con predominio de aluminio, hierro, magnesio, calcio, potasio y sodio, que también contiene hidrógeno, oxígeno, carbono, bromo, cloro y otros elementos. Su temperatura varía entre más de 1500 °C y menos de 700 °C. Al enfriarse origina las rocas ígneas.

Mena: entre todos los minerales que integran un yacimiento, se denomina mena al mineral o conjunto de minerales que contienen el metal útil, siempre que lo contengan en una proporción que permita su extracción. Se llama mineralogía de mena al conjunto de minerales que integran la mena.

Metalurgia: técnicas de obtención, separación y tratamiento de los metales a partir de los minerales que los contienen.

Meteorización: modificación de las rocas y sus minerales por exposición a las condiciones atmosféricas.

Métodos hidrometalúrgicos: métodos que extraen y recuperan metales utilizando soluciones líquidas, acuosas u orgánicas.

Minar: extraer el mineral de un yacimiento.

Nivel de fondo: un nivel típico o promedio de una sustancia química en el Medio Ambiente. El término fondo se refiere frecuentemente

a niveles que ocurren de forma natural o a niveles no contaminados.

Oxidación: cambio de especie química que sufren los minerales al meteorizarse.

Open pit: labor minera a cielo abierto con forma de embudo, en general de grandes dimensiones, que se realiza para extraer mineralización diseminada.

Placas tectónicas: fragmentos de litosfera que se mueven como bloques rígidos sobre la astenosfera (manto superior) del planeta Tierra.

Peligrosidad: probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural más o menos violento o catastrófico de determinada intensidad en un lapso de tiempo dado.

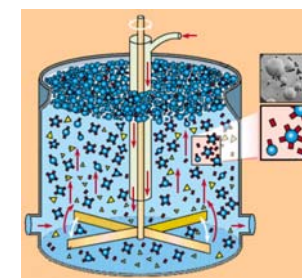
Relaves: desecho mineral sólido constituido por partículas de tamaño entre arena y limo proveniente de los procesos de concentración, que son producidos, transportados o depositados en forma de lodo. Se acumulan en los «diques de colas» o «presas de relaves».

Riesgo: probabilidad de que un territorio y la sociedad que habita en él, se vean afectados por fenómenos naturales determinados, con las consecuentes pérdidas en vidas humanas, económicas directas e indirectas, daños a edificios o estructuras, etc.)

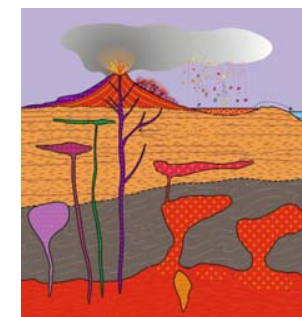
Roca de caja o roca encajonante: roca que aloja la mineralización. También llamada roca encajonante o encajante. En sentido estricto se define para rocas en las cuales se emplazan las vetas mineralizadas. En sentido amplio también se refiere a las rocas que hospedan o alojan mineralización en cualquiera de sus formas.

Ruta de exposición: la manera en que una persona puede ponerse en contacto con una sustancia química. Por ejemplo, bebiendo (ingestión) y bañándose (contacto con la piel) son dos rutas de exposición a contaminantes diferentes que pueden ser encontrados en el agua.

Sedimentación: proceso mediante el cual los sedimentos en movimiento (fragmentos de rocas o de organismos) son depositados.



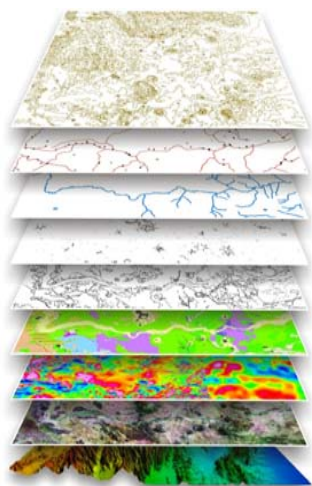
Flotación



Magma



Siderurgia



Sistema de Información Geográfica (SIG)

Siderurgia: conjunto de técnicas para separar y tratar el hierro a partir de los minerales que lo contienen.

Sistema de Información Geográfica (SIG): sistema informático que permite integrar, analizar y representar cualquier tipo de información geográfica y bases de datos asociadas a un territorio. Este tipo de sistemas facilita la visualización de los datos obtenidos y su interpretación en un mapa, con el fin de reflejar y relacionar fenómenos geográficos de cualquier tipo.

Sorción: interacción de una fase líquida con una sólida, y comprende en el detalle tres mecanismos: adsorción (acumulación de un líquido sobre la superficie de una fase sólida), precipitación superficial y absorción (incorporación de una fase líquida dentro del sólido, de forma más o menos uniforme en la estructura cristalina).

Stockwork: forma de distribución de la mineralización, dada por venillas entrecruzadas distribuidas irregularmente en una roca.

Tenor: contenido de un elemento de interés económico en una mena expresado en unidades variables (ver ley).

Trazas (para metales o elementos): son cantidades extremadamente bajas de metales o elementos químicos. A los elementos presentes en cantidades del orden de partes por millón o partes por billón se los denomina elementos traza.

Toxicidad: la toxicidad de un elemento o compuesto químico es su capacidad para afectar adversamente cualquier función biológica.

Valor «clarke»: abundancia normal de los elementos en la corteza terrestre.

Yacimiento (yacimientos mineral): concentración significativa de un mineral o roca en cantidad tal que permita su aprovechamiento. También es llamado así al depósito mineral.

Abreviaturas de unidades

ppm:	parte por millón
ppb:	parte por billón
g/t:	gramos por tonelada
ug/l:	microgramo por litro
mg/kg:	miligramo por kilo

Código de colores en cuadros

	Explicativos y presentaciones de casos
	Comentarios con datos numéricos
	Definiciones

FUENTES DE CONSULTA

- Bewers M., R. Duce, T. Jickells, P. Liss, J. Miller, H. Windom and R. Wollast. 1988. Land to sea transport of contaminants: Comparison of riverin adn atmospheric fluses. GESAMP Rept. On State of the Marine Environment. Unitd Nations Pub. Series, Geneve: WMO, n.p.
- Cruzate G. y R. Casas. 2003. Balance de nutrientes. Fertilizar. Año 8. Número especial «Sostenibilidad». pp 7-13. Buenos Aires.
- Chin, M. y D. Jacob. 1996. Anthropogenic and natural contributions to tropospheric sulfate: A global model analysis. Journal of Geophysical Research 101, D13, pp. 18691- 18691.
- Delmas R., D. Serç,a and C. Jambert. 1997. Global inventory of NOx sources. Nutrient Cycling in Agroecosystems 48: 51-60.
- Downing B.W. y Mills, C., 2014. Natural acid rock drainage and its impact upon background metal concentrations. En [http:// technology.infomine.com](http://technology.infomine.com)
- Duxbury, J. 1994. The significance of agricultural sources of greenhouse gases. Fertilizer Research 38: 151-163.
- Ginoux P., J. M. Prospero, T. E. Gill, N. C. Hsu and M. Zhao. 2012. Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on modis deep blue aerosol products. Reviews of Geophysics, 50, RG3005 / 2012. pp. 8755-1209.
- GMP, 2006. Global Impacts of Mercury Supply and Demand in Small-Scale Gold Mining. Informe presentado por el Proyecto Mundial del Mercurio a la reunión del Consejo de Administración del PNUMA en febrero de 2007.
- John D.A. and J. S. Leventhal. 1995. Bioavailability of Metals. USGS Preliminary Compilation of Descriptive Geoenvironmental Mineral Deposit Models. E. du Bray, editor. U.S. Geological Survey Open-File Report 95-831.
- Johnson, K. and D. Johnson. 1995. Methane emissions from cattle Journal of Animal Science 73:2483-2492.
- Kessler S., 1994. Mineral Resources, Economics and the Environment. Capítulo: Origin of Mineral Deposits
- Laznicka, P. 2006. Giant Metallic Deposits. Future Sources of Industrial Metals. Springer Verlag.
- Pacyna, J.M. 1986. Atmospheric trace elements from natural and anthropogenic sources. Advances in Environmental Science and Technology, 17: 33-52.
- Pearson, Prentice Hall, Inc., 2005 «The rock cycle»
- Plumlee G., 1998. The environmental geology of mineral deposits. Reviews in Economic Geology. Vol 6 A (3):71-116. Society of Economic Geologists, Inc.
- Plumlee G. and J. Thomas Nash. 1995. Geoenvironmental Models of Mineral Deposits- Fundamentals and Applications. USGS Preliminary Compilation of Descriptive Geoenvironmental Mineral Deposit Models. E. du Bray, editor. U.S. Geological Survey Open-File Report 95-831.
- Seal, B. 2011. Pre-Mining Characterization and Prediction. USGS presentation.
- Sillitoe, R. y J. Perelló. 2005. Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. Economic Geology 100 th Anniversary volume, pp. 845-890.
- Zappettini E. (Coordinador) 2005. Mapa Metalogenético de América del Sur. Anales 44 Servicio Geológico Minero Argentino. Buenos Aires.

Descargo de responsabilidad

El propósito de esta publicación es servir como divulgación científica. Si bien se tomaron todas las precauciones razonables para verificar la información contenida en la presente publicación, este material se distribuye sin garantías expresas o implícitas de especie alguna. La responsabilidad por la interpretación, comprensión y el uso del material, que pudiere ocasionar lesiones, pérdidas, daños o perjuicios de cualquier naturaleza, recae sobre el lector. Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican ni contienen, de parte de los autores, juicio alguno sobre la condición jurídica de ninguno de los países, territorios, ciudades o zonas citados o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.