

Los efectos ambientales del beneficio de minerales metálicos*

Un marco de análisis para la historia ambiental**

*The environmental effects of the
improvement of metallic minerals*

An analysis landmark for environmental history

MAURICIO FOLCHI D.

*Académico del Área de Historia Ecológica del Departamento de Ciencias Históricas
de la Universidad de Chile; Profesor asociado del Departamento de Historia e
Instituciones Económicas de la Universidad Autónoma de Barcelona
maurofolchi@hotmail.com*

RESUMO Os efeitos ambientais das operações compreendidas no beneficiamento dos minerais metálicos variaram historicamente, de acordo com o desenvolvimento das mesmas. À medida que tais operações se tornaram mais complexas e rigorosas, provocaram efeitos ambientais cada vez mais complexos, diversos e profundos. Este artigo desenvolve um esquema de análise que permite descobrir e compreender historicamente a origem e a evolução desses efeitos.

* *Artigo recebido em: 29/08/2004 - Aprovado em: 03/10/2004.*

** *Artículo elaborado a partir de la ponencia "Las labores de beneficio y la Historia Ambiental: conceptos, problemas y perspectivas de análisis", presentada en la VIII Reunión Internacional de Historiadores de la Minería Latinoamericana, Guanajuato, 24-28 de marzo de 2004. Agradezco los comentarios y sugerencias que Enric Tello y Agustí Nieto me formularon sobre un borrador de este trabajo. También debo agradecer el apoyo del Ministerio de Planificación y Cooperación de Chile y de la Facultad de Filosofía y Humanidades de la Universidad de Chile.*

Palavras-chave efeitos ambientais, beneficiamento de minerais metálicos, contaminação

ABSTRACT The environmental effects of the operations comprised in the improvement of metallic minerals have varied historically, according to their development. As such operations became more and more complex and rigorous, they have caused environmental effects increasingly more complex, diverse and profound. This article develops an analysis scheme with the objective of historically discovering and understanding the origin and evolution of these effects

Key words environmental effects, metallic mineral processing, contaminating

1. Introducción

El beneficio de minerales metálicos puede entenderse como un conjunto de operaciones mecánicas, químicas o biológicas destinadas a obtener ciertos elementos metálicos contenidos en algunas rocas de la corteza terrestre, en las que se movilizan, transforman y consumen grandes cantidades de materia.

Algunas de esas operaciones son: la trituración de los minerales a golpe de martillo o en molinos, la decantación de partículas en piscinas, la aspersion de ácido sobre rocas amontonadas, y la fundición con leña o carbón mineral. Todas estas acciones (a las que habría que añadir las de tipo indirecto) han provocado a lo largo de la historia algún *efecto* sobre el entorno en el que tuvieron lugar.

La historia de estos efectos está determinada, en primer lugar, por el desarrollo de las faenas mineras en cuanto a la escala de la explotación y a su expansión geográfica (la tendencia ha sido al desarrollo de operaciones cada vez a mayor escala y a afectar a una porción cada vez más amplia de las regiones mineras). Por otra parte, estos efectos se han ajustado a las características geológicas de los yacimientos explotados, los cuales han cambiado a lo largo de la historia explotándose yacimientos de progresiva menor ley y de composición mineralógica más compleja. Pero, por sobre todo, los efectos ambientales del beneficio han variado históricamente de acuerdo a los cambios técnicos de estas labores, cada vez más complejas y exigentes, y que han tenido unos efectos ambientales cada vez más diversos, complejos y profundos.¹ Como

¹ Conviene explicitar que en este trabajo sólo hacemos referencia a los efectos ambientales de las *labores de beneficio* y no a las restantes fases de la actividad minera (prospección y extracción). Asimismo, este estudio se restringe a las labores de beneficio de la minería metálica, y especialmente, de los metales no ferrosos.

se comprenderá, la obtención del oro nativo mediante selección en bateas con agua desviada de algún estero, accionadas por trabajadores manuales, típica de los primeros siglos coloniales, acarrea unos efectos ambientales bien distintos a los de las grandes plantas construidas a principios del siglo XX que obtenían el metal en soluciones de cianuro.

2. Las labores de beneficio

La tradición distingue dos tipos de labores en la explotación minera: las labores de *extracción*, que corresponden a la minería propiamente tal, y que se refieren a las operaciones de excavación (subterránea o superficial); y las labores de *beneficio*, que comprenden todas las operaciones que siguen a la excavación destinadas a separar el material 'estéril' y obtener, con el mayor grado de pureza posible, el metal contenido en las rocas.²

Todas estas operaciones han evolucionado de manera incesante desde la Edad del Bronce hasta la actualidad. El avance ha hecho posible la explotación progresiva de nuevos minerales, ya sea para conseguir metales nuevos u otros conocidos, pero de difícil obtención. Las primeras técnicas de beneficio que conoció la humanidad apenas permitían obtener unos pocos metales, y sólo a partir de cierto tipo de minerales, que se fundían a temperaturas relativamente bajas (cobre, hierro, estaño y plomo, los primeros).³ En la actualidad, se obtienen setenta metales distintos de todos los tipos de *minerales* existentes. Además, se han ido consiguiendo resultados cada vez mejores en cuanto a la calidad de los productos intermedios y finales, lo cual se ha traducido en incrementos constantes de la eficiencia general del beneficio, lo que ha conducido, a su vez, a una reducción progresiva de la *ley de corte* de los yacimientos.⁴ A fines del siglo XIX, por ejemplo, los adelantos en las técnicas de molienda y concentración de minerales de cobre permitieron pasar de una ley mínima del 5,0% a una ley de 0,5% o menos.⁵

En términos muy generales, las *labores de beneficio* incluyen cinco operaciones sucesivas: molienda, selección, concentración, reducción y afino. En lo que respecta a las operaciones de molienda, selección y concentración, el progreso ha consistido en el desarrollo de mejores dis-

2 En la actualidad, se hace una distinción un poco distinta para clasificar los procedimientos de beneficio y se habla de una etapa de 'preparación del mineral' — también llamada *mineralurgia* — que comprende las operaciones de molienda, selección y concentración, y una segunda etapa, que sería la propiamente extractiva y propiamente metalúrgica, correspondiente a la transformación química del mineral, denominada 'metalurgia extractiva'.

3 Estos metales tienen la propiedad de entrar en fusión con temperaturas que están por debajo de los 800 °C, y que se podían conseguir quemando materiales carbonáceos (leña).

4 La *ley de corte* corresponde al porcentaje mínimo necesario de metal contenido (ley) en la roca para que ésta se considere aprovechable económicamente.

5 BALLESTER, A.; VARDEJA, L.F. y SANCHO, J. (2000): *Metalurgia extractiva*, vol. I, Síntesis, Madrid, pág. 38.

positivos mecánicos (más eficientes y de mayor capacidad) y en el uso creciente de energía. En cuanto a la reducción y afino, las mejoras han sido posibles gracias al desarrollo científico (de la Física y de la Química) que se ha aplicado al perfeccionamiento de las técnicas *pirometalúrgicas* (que fueron las primeras que desarrolló la humanidad) y al desarrollo (y posterior perfeccionamiento) de técnicas nuevas como la *hidrometalurgia*, la *electrometalurgia* y la *biometalurgia*⁶ (véase cuadro N° 1).

Cuadro N° 1
Técnicas y procedimientos del beneficio de metales no ferrosos

Preparación de las menas			Metalurgia Extractiva				
<i>Molienda</i>	<i>Selección</i>	<i>Concentración</i>	↓ Tiempo ↓	<i>Pirometalurgia</i> (3.000 A. de C. → actualidad)			
<ul style="list-style-type: none"> • Martillos • Molinos de piedra. • Molinos mecánicos (de impacto, de rodillos, de bolas, etc.). 	<ul style="list-style-type: none"> • Manual • En bateas con agua • Gravimetría mecanizada 	<ul style="list-style-type: none"> • Flotación • Separación magnética. • Separación electrostática. 		<ul style="list-style-type: none"> • Fusión • Tostación • Calcinación • Conversión 	<i>Hidrometalurgia</i> (Siglo XVII → actualidad)		
				<ul style="list-style-type: none"> • Lixiviación • Purificación • Precipitación 	<i>Electrometalurgia</i> (1869 → actualidad)		
					<ul style="list-style-type: none"> • Electrólisis • Electrotermia 	<i>Biometalurgia</i> (1972 → actualidad)	

Fuente: Elaboración Propia

Como se ha dicho, los efectos ambientales derivados de las labores de beneficio están determinados por las características de cada yacimiento y por las técnicas específicas de cada explotación. Por lo tanto, estos efectos exhiben una gran variedad en cada sitio y en cada momento histórico en que estas labores se llevaron a cabo, lo cual obliga a establecer un patrón de análisis que permita identificar y estudiar la evolución histórica de estos efectos, siguiendo el desarrollo y evolución de las labores beneficio en cada lugar específico.

6 La *hidrometalurgia* se define como el tratamiento de materiales metálicos a través de métodos húmedos que producen la disolución de alguno de sus componentes y su posterior recuperación; véase BALLESTER *et al.* (2000), *op. cit.*, pág. 330. La *electrometalurgia* comprende procesos electrotérmicos similares a los pirometalúrgicos (efectuados en 'hornos eléctricos') y a la descomposición de soluciones o la disolución anódica de metales impuros, mediante electrólisis; véase MORRAL *et al.* (1982): *Metalurgia general*, Reverté, Barcelona, pág. 201. La *biometalurgia* (o biolixiviación u "oxidación bacteriana") es la técnica que se vale de una bacteria (*Thiobacillus ferrooxidans*) que tiene la propiedad de atacar y solubilizar el mineral; véase BALLESTER *et al.* (2000), *op. cit.*, pág. 397 y ss.

3. Los efectos ambientales del beneficio

3.1 Definición y aclaraciones

Un efecto ambiental (o impacto ambiental) puede definirse como cualquier alteración de los componentes de un medio ambiente dado o de la dinámica del mismo, producto de una acción no natural.

Es importante subrayar que no decimos “efectos sobre el medio *natural*”, sino “efectos sobre un medio ambiente *dado*”. Mientras la primera expresión alude a ecosistemas naturales (como bosques, manglares, humedales, ríos, estuarios, pastizales, etc.), la segunda expresión incluye los *ecosistemas domesticados* (silvícolas, agrícolas, ganaderos, acuícolas, etc.), así como los *ecosistemas contruidos* (ciudades, campamentos mineros y las propias plantas de beneficio).⁷ Esta distinción es importante porque el medio ambiente ‘dado’ que sufre un impacto ambiental, no es, necesariamente, un paraje idílico de vegetación virgen y exuberante, sino, simplemente, un medio que tiene unas condiciones de habitabilidad y una disponibilidad de recursos que los usuarios u ocupantes del mismo (agricultores, pescadores, pastores, vecinos, o incluso, los propios obreros metalúrgicos)⁸ consideran suficientes, saludables o confortables, y en los que, por lo tanto, se ha consolidado cierta regularidad de las relaciones sociedad/naturaleza.

Asimismo, es importante destacar que efecto sobre el ‘medio’, se refiere a cualquier cambio en la dinámica o condiciones de ese ambiente (ciclo del agua, estructura del suelo, calidad del aire, humedad ambiente, etc.), independientemente de la percepción y valoración social que pueda existir sobre el mismo. Los *efectos ambientales* son fenómenos físicos, químicos y biológicos, y, por lo tanto, son fenómenos relativamente objetivos y neutros (o, por lo menos, tan objetivos y neutros como objetivas y neutras sean las disciplinas científicas que los establecen), que se han producido históricamente como consecuencia de cualquier acción humana significativa sobre el medio (como las mencionadas antes, propias del beneficio de minerales), aunque nadie tuviera conciencia de su ocurrencia. Hoy sabemos con certeza que ciertos elementos expulsados al entorno, en cualquier dosis (como el mercurio o el cianuro), son indiscutiblemente nocivos para los organismos, pero este conocimiento es resultado de un devenir histórico, que

7 La distinción entre ecosistemas naturales, domesticados y contruidos en ODUM, Eugene (1995): *Ecología: peligra la vida*, McGraw Hill, México D.F., págs. 1-16 y 233-235.

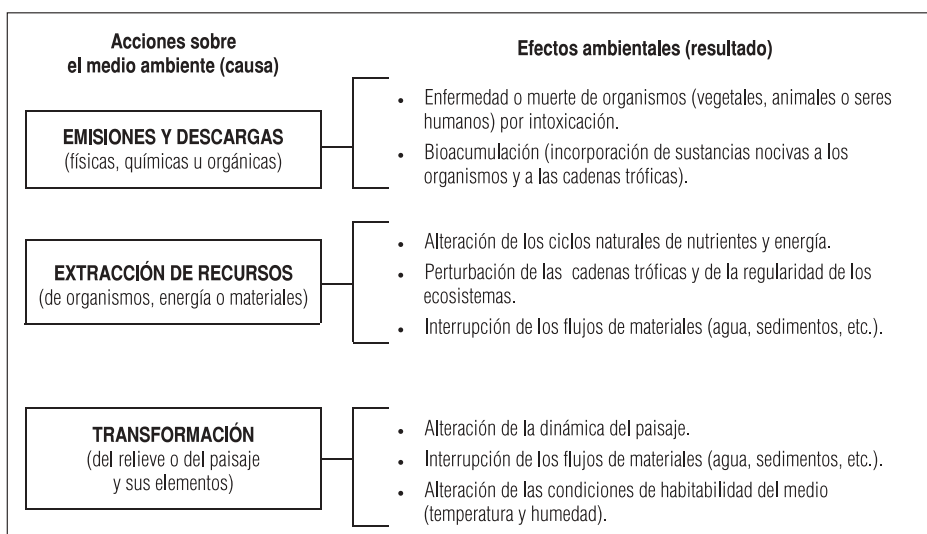
8 La historia de la metalurgia está colmada de casos en los que los propios trabajadores son los que primero se resienten por la mala calidad del ambiente. Un ejemplo de esto lo encontramos en la fundición de la Compañía Metalúrgica Mexicana (1890-1920) en San Luis de Potosí, la que llegó a contabilizar un promedio de 30 trabajadores enfermos al mes a consecuencia de respirar los gases fugitivos de la planta, cuyos conductos estaban contruidos de madera; véase GÁMEZ, Moisés (2003): “Minería y metalurgia en el centro-norte mexicano: la Compañía Metalúrgica Mexicana”, Universidad Autónoma de Barcelona, Departamento de Economía e Historia Económica, mimeografiado, pág. 26.

es posterior e independiente al hecho de que tales elementos fueran liberados al ambiente.⁹

3.2 Acciones no naturales

Una vez definido *efecto ambiental* como cualquier cambio ocasionado por una acción no natural sobre un medio ambiente dado (que incluye toda clase de ambientes), se sigue que tales acciones son muy diversas e incluso innumerables, y que, por lo tanto, un intento de identificación y clasificación causa/efecto debe combinar distintos criterios y conceptos. Así, se puede aceptar que, a escala local (que es la que aquí interesa) existen — aunque solapados entre sí — tres órdenes de acciones sobre el medio que acarrearán efectos ambientales: las emisiones y descargas de elementos extraños (contaminación), la extracción de recursos y la transformación del paisaje (véase el cuadro N°2).¹⁰

Cuadro N°2
Acciones sobre el medio y sus efectos ambientales



Fuente: Elaboración Propia

⁹ El proceso de toma de conciencia y valoración negativa de un determinado efecto ambiental por parte de la sociedad en su conjunto, o de un segmento de ella, es lo que media — a veces con notable retraso y otras con sorprendente simultaneidad — entre el *efecto ambiental* y el *problema ambiental*. Mientras lo primero es algo mensurable, observable, y en ese sentido, objetivo, el problema ambiental es la construcción social del mismo y, por lo tanto, es subjetivo, y sólo se manifiesta cuando se asienta la convicción de que esos efectos representan una merma o una amenaza para la salud, el confort o el bienestar de las personas, es decir, cuando representan un "problema". Para un desarrollo más largo de esta idea de transición entre efecto ambiental, problema ambiental y su ulterior *conflicto ambiental*; véase FOLCHI, Mauricio (2001): "Conflictos de contenido ambiental y ecologismo de los pobres: no siempre pobres, ni siempre ecologistas", en *Ecología Política* N°22, Barcelona, págs. 79-100.

¹⁰ Una de las consecuencias más importantes de la actividad humana en el medio ambiente es el cambio climático que aquí excluimos para centrarnos en los cambios a escala local.

3.3 Tipos de efecto ambiental

El *tipo de efecto* es un aspecto del problema que conviene tener claro a la hora de valorar estos fenómenos, pues no todos los efectos ambientales se dejan sentir de forma simultánea ni instantánea, tampoco aparecen siempre como una consecuencia evidente de las actividades de beneficio, y, en algunos casos, ni siquiera se producen donde estas faenas se practican. Los efectos ambientales derivados o imputables a las actividades de beneficio se pueden dar en corto, mediano o largo plazo; además pueden ser directos o indirectos; y, por último, pueden manifestarse como efectos *in situ* o como efectos *ex situ*.

Los impactos ambientales se presentan en un horizonte de tiempo variable. Mientras unos efectos, como la intoxicación por humos nocivos puede considerarse un efecto inmediato, hay otros que se presentan con considerable retraso, a consecuencia de varios mecanismos que existen en la naturaleza que le permiten resistir durante cierto tiempo los embates de la contaminación sin sufrir perturbaciones apreciables.¹¹ Pero, la capacidad de absorción de los sistemas naturales tiene un límite, y una vez que se sobrepasa cierto umbral, los daños ambientales afloran.

Otra distinción importante debe establecerse entre efectos *directos* e *indirectos*. Los primeros, son aquellos que se producen como consecuencia inmediata y directa de una acción sobre el ambiente, y que, por lo mismo, son fácilmente identificables. Los segundos, son aquellos en los que el efecto ambiental es el desenlace de una reacción posterior o de una serie de reacciones desencadenadas a partir de una primera perturbación, y que, por lo tanto, no guarda una relación evidente con el daño. La erosión del suelo, por ejemplo, es un efecto indirecto de la deforestación: los leñadores y carboneros no son quienes erosionan el suelo, sino el viento y la lluvia, que actúan una vez que el suelo ha perdido esa cubierta protectora que es la vegetación, y arrastran los sedimentos y partículas que componen el suelo.

Un buen ejemplo de esto, muy vinculado a las labores de beneficio, es el efecto de las emisiones de anhídrido sulfuroso (SO_2) sobre la vegetación, cuyo impacto está mediado por una serie de reacciones químicas que hacen que el SO_2 liberado a la atmósfera — que no mata directamente la vegetación — sea transformado, mediante el fenómeno conocido como “lluvia ácida”, en ácido sulfuroso (H_2SO_3), y ataque a las hojas de árboles y plantas, haciéndolas más vulnerables a la acción del viento, el frío, la sequía, las enfermedades y los parásitos.¹²

11 La *resiliencia* es la capacidad de un sistema de mantener sus funciones y controles, a pesar de estar sometido a un disturbio, ya sea por la habilidad del sistema para resistir un disturbio o de autoorganizarse y asimilar perturbaciones sin deteriorarse definitivamente. El límite hasta el cual un ecosistema puede soportar perturbaciones sin desequilibrarse definitivamente se llama “umbral de resiliencia”.

12 En condiciones atmosféricas determinadas el anhídrido sulfuroso (SO_2), liberado por oxidación, produce

Otra consideración importante es que, si bien los daños ambientales más ostensibles suelen producirse *in situ*, es decir, en el lugar mismo de las actividades mineras (como la descarga directa de residuos líquidos en cursos de agua o lagos), también es posible que se produzcan daños ambientales imputables a las actividades de beneficio en lugares apartados de éstas, ya sea porque se producen en lugares distintos a los del beneficio, o bien porque los residuos son desplazados hasta lugares apartados (a veces un país vecino) por el viento o cauces naturales, o incluso porque éstos son trasladados *ex profeso*.

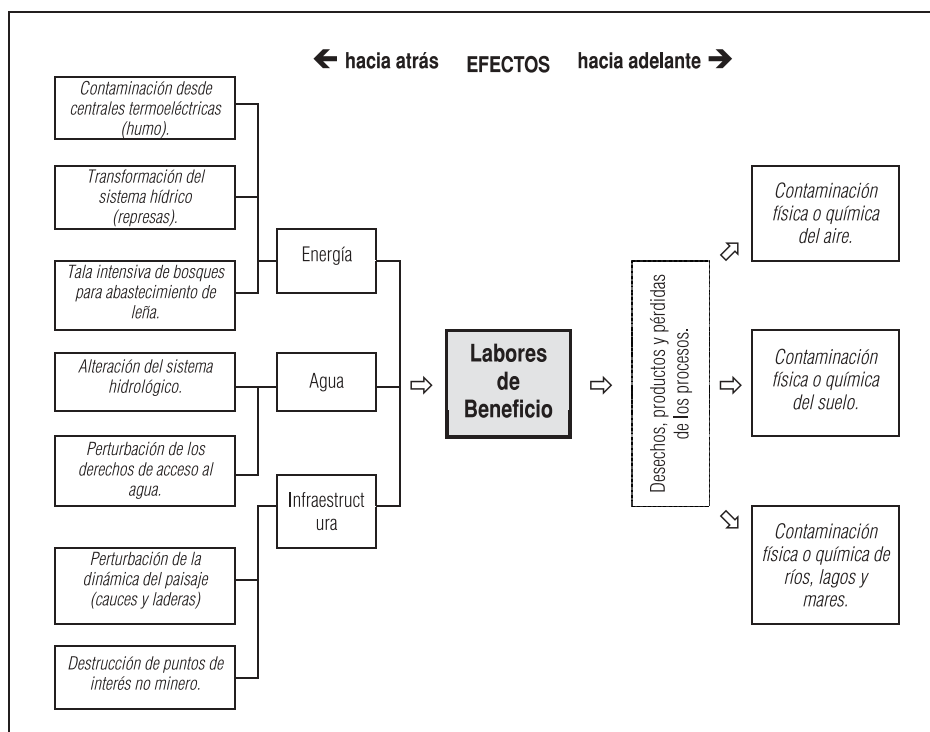
3.4 Efectos hacia atrás y efectos hacia adelante

Si bien la acción fundamental del beneficio corresponde a la operaciones que van desde la trituración de las rocas hasta la obtención de productos metálicos finales (barras, cátodos, lingotes, etc.), para efectos de establecer su responsabilidad ambiental debe considerarse también como acción sobre el medio la ejecución de las obras de infraestructura que exige el funcionamiento de un establecimiento de beneficio (construcción de caminos y puentes, desvío de cursos de agua, construcción de presas, etc.), y también los efectos derivados de la provisión de los recursos requeridos por los procesos de beneficio: principalmente, energía y agua, los cuales acarrearán efectos sobre el entorno tan o más agudos que los de la actividad principal. Todas estas cuestiones, en la experiencia histórica, son problemas que frecuentemente han resuelto las empresas mineras por sus propias manos.

Aquí llamamos efectos hacia adelante (de acuerdo al sentido del proceso productivo), a aquellos efectos asociados a “lo que sale” (*outputs*) del lugar de beneficio, esto es, los distintos productos metálicos (concentrados, soluciones, cátodos, etc.), más los desechos de los mismos (gases, ripios, escorias, aguas residuales, etc.) que son expulsados voluntaria o accidentalmente al entorno, y cuyo efecto sobre éste se puede resumir en una palabra: contaminación. Llamamos efectos hacia atrás, a todos los efectos anteriores al proceso de beneficio propiamente tal, que se derivan de la obtención de los insumos (*inputs*) (agua y energía en forma de leña o electricidad) y de la construcción de la infraestructura requerida por el mismo (la más importante: la de transporte), es decir, todo aquello que queda comprendido por las categorías *extracción de recursos y transformación del paisaje* antes mencionadas (véanse esquemas N°1 y N°3).

anhídrido sulfúrico (SO₂), y éste reacciona con el vapor de agua del aire produciendo ácido sulfuroso (H₂SO₃) o ácido sulfúrico (H₂SO₄), el que, arrastrado por las precipitaciones, provoca el fenómeno de la “lluvia ácida”, que afecta las hojas de los vegetales, despojándolas de su cubierta cerosa y provocando pequeñas lesiones que alteran la acción fotosintética. Con ello, las plantas pierden hojas, y así, la posibilidad de alimentarse adecuadamente. En ocasiones, la lluvia ácida hace que penetren al vegetal ciertos elementos como el aluminio (éste bloquea la absorción de nutrientes en las raíces), que también afectan su desarrollo.

Esquema N° 1 Efectos ambientales de las actividades de beneficio (resumen)



Fuente: Elaboración Propia

4. Las labores de beneficio y sus efectos hacia atrás

Los casos más abundantes de este tipo de impacto están asociados a la demanda energética de las plantas de beneficio. Al respecto, el hecho ambiental más frecuente y generalizado es la deforestación de extensas zonas, primero próximas y más tarde alejadas de los planteles de beneficio, con el propósito de alimentar los hornos de fundición. Si bien este es un problema que la Historia Ambiental latinoamericana no ha estudiado de forma sistemática, conocemos numerosos casos que nos informan de este fenómeno. En cada región donde se aplicaron técnicas pirometalúrgicas de beneficio durante los siglos coloniales y durante el siglo XIX, se arrasaron extensas zonas boscosas.

México es la región donde más tempranamente se produjo deforestación importante como consecuencia de la actividad minera y de dónde más ejemplos disponemos. Entre 1548 y 1576, la cal que se utilizó en la

reconstrucción de *Tenochtitlan* se obtenía del valle del *Mezquital* donde, para alimentar los hornos en que ésta se producía, se talaron y quemaron los extensos bosques de roble que existían en el área sur de este valle, en *Tezcatepec* y *Axacuba*.¹³ Más al norte, los mineros de *Ixmiquilpan* (mineral de plata y plomo) talaron sistemáticamente los bosques circunvecinos desde 1540, hasta hacerlos desaparecer de esa zona hacia finales del siglo.¹⁴ Más tarde, hacia 1599, en la cercanías de la mina de plata de Pachuca, fueron los propios indígenas de *Tilicuatla* y *Tornacustla* quienes talaron sus bosques para vendérselos a los mineros.¹⁵ A mediados del siglo XVI, dos pueblos de indios cercanos a las minas de plata de *Taxco*, se enfrentaron judicialmente por este problema. Los indios de *Tenango* querían explotar los bosques para abastecer a los mineros y los de *Teticpac* querían impedirlo. La autoridad dio la razón a los primeros e impuso “perpetuo silencio” a los segundos.¹⁶ De la misma manera, en la provincia de Santa Bárbara (al sur del actual estado de Chihuahua) la minería de la plata fue exterminando progresivamente los bosques, incluso cuando ya se había introducido el tratamiento de la plata con mercurio (1631), ya que sólo los grandes mineros podían obtener mercurio a crédito de la Corona. Los pequeños mineros, mientras tanto, continuaron beneficiando los minerales de plata por fundición directa.¹⁷ Toda esa zona, que llegó a alimentar de leña hasta cinco centros mineros a mediados del siglo XVII, hoy “es calificada como semiárida y se encuentra casi totalmente desertificada y desnuda de árboles”.¹⁸ Por último, en Zacatecas, a fines del siglo XVI, después de cincuenta años de labores extractivas, se había producido el mismo proceso. En palabras del obispo del lugar:

Había en este descubrimiento mucha arboleda y monte en estas quebradas, las cuales todas se han acabado y talado con fundiciones de madera, que si no son unas palmillas silvestres, otra cosa no ha quedado.¹⁹

En la era de la Revolución Industrial, cuando el carbón mineral se imponía como combustible en la mayor parte de las naciones que se industrializaban, la leña y el carbón vegetal siguieron empleándose ma-

13 MELVILLE, E. (1999): *Plaga de ovejas. Consecuencias ambientales de la conquista de México*, FCE, México D.F., pág. 113.

14 *Ibidem*, pág. 133.

15 *Ibidem*, pág. 121.

16 AYALA, M.de la L.(1999): “La pugna por la propiedad de los montes y bosques”, en MARTÍNEZ, Bernardo García y JÁCOME, Alba González (comps.), *Estudios sobre historia y ambiente en América*, vol. 1, El Colegio de México, México D.F., pág. 81.

17 CRAMAUSSEL, C. (1999): “Sociedad colonial y depredación ecológica: Parral en el siglo XVII”, en GARCÍA y GONZÁLEZ, *op. cit.*, pág. 97.

18 *Ibidem*, pág. 98.

19 Citado por CRAMAUSSEL (1999), *op. cit.*, pág. 101.

sivamente en América Latina, aun en las máquinas a vapor, con las consecuencias acostumbradas. Este fue el caso de las minas de plata de Real del Monte (México), una antigua explotación de la que se hizo cargo una empresa inglesa entre 1824 y 1849. Los ingleses trabajaron con el método de beneficio de barril y consumían grandes cantidades de leña en las máquinas de vapor (necesarias para mover los barriles), que además se empleaban para desaguar las minas. Al principio, la compañía no tuvo problemas de abastecimiento, pues en sus propias tierras “existían grandes zonas boscosas”. Doce años después de su puesta en marcha, éstas se habían agotado y la empresa tuvo que adquirir nuevas tierras con bosques y firmar contratos de tala, en zonas cada vez más alejadas. En 1948, el administrador de la empresa (ya en decadencia) estimaba que las reservas de leña alcanzaban para “más que otras dos semanas”.²⁰ Una situación similar se produjo siglos más tarde en la Guyana venezolana, en el último tercio del siglo XIX, durante una especie de fiebre del oro que vivió la región; y, a pesar de que existían otros métodos de beneficio, para facilitar la molienda del mineral de cuarzo (con el que estaba mezclado el mineral de oro) se practicaba la técnica de calentar las rocas en hogueras alimentadas con leña de los bosques cercanos, que también fueron arrasados.²¹ Lo mismo ocurrió en Chile, en la extensa región denominada Norte Chico en la que, entre 1800 y 1870, se eliminaron casi todos los bosques existentes para alimentar los hornos de fundición de cobre.²² Según resumió el presidente de la Sociedad Nacional de Agricultura:

La explotación de las minas tomó proporciones colosales, los hornos de fundición cubrieron el territorio que se extiende desde el Maipo a Copiapó, y Chile, que había vivido en la creencia de que los bosques eran inagotables, supo un día con asombro, que ya no le quedaban más que restos escasos de aquel tesoro inmenso.²³

Un situación del mismo tipo describe Warren Dean en su *Historia de la Destrucción de la Mata Atlántica*, en Brasil. Durante la segunda mitad del siglo XIX, en la zona de Minas Gerais, hubo un período de auge de las “forjas africanas”, alimentadas con carbón vegetal, que provocó la tala de 2.000 Km² de bosque, precisamente, aquellos bosques que habí-

20 RANDALL, R.W. (1977): *Real del Monte: una empresa minera británica en México*, F.C.E., México D.F., págs. 181-183.

21 GONZÁLEZ DELUCA, M.E. (1992): “Estrategias políticas, minería y poblamiento en la Guyana venezolana”, en: ÁVILA, Dolores; HERRERA, Inés y ORTIZ, Rina (comps.), *Empresarios y política minera*, vol. II, págs. 27-40, INAH, México D.F., pág. 46.

22 FOLCHI, M. (2001): “La insustentabilidad de la industria del cobre en Chile: los hornos y los bosques durante el siglo XIX”, en *Mapocho*, N° 49, págs. 149-177, Santiago de Chile.

23 MOXÓ, R.L. (1872). Citado por Elizalde Mac Clure: *La sobrevivencia de Chile. La conservación de sus recursos naturales renovables*, Ministerio de Agricultura, Dirección general de producción agraria y pesquera, Santiago de Chile, 1958, pág. 14.

an sucedido a los que habían sido esquilados durante “la fiebre del oro” en los siglos XVII y XVIII . Un observador señalaba que los lugares que “hasta hace poco estaban poblados de gigantescas bignonias” estaban “casi completamente devastados”.²⁴

Otro tipo de efecto ambiental hacia atrás, vinculado al problema energético, lo constituyen las obras de generación eléctrica construidas especialmente para alimentar la maquinaria de estos planteles. Un buen ejemplo de esto es lo ocurrido con el río Necaxa (México) a principios del siglo XX, y que además es un caso muy demostrativo de lo difícil que puede ser advertir los efectos indirectos, de mediano y largo plazo, y más aún el valorar los perjuicios que éstos acarrearán para la sociedad, que a veces pueden ser muy sutiles pero profundos, como la alteración del ritmo de la vida. Siguiendo a Aboites, el desarrollo de la energía eléctrica emergió en México con la construcción de dos grandes centrales hidroeléctricas en los ríos *Necaxa* y *Tenango*, entre 1903 y 1916, que generaban energía para abastecer a los centros mineros de *Pachuca* y *El Oro*. El caudal del río *Necaxa*, a partir de entonces, no tuvo más el ritmo natural de los deshielos o de las lluvias, sino el que dictaban las necesidades mineras e industriales, más intensas durante el día y más bajas durante la noche y constantes a lo largo del año. Los agricultores que vivían río abajo (la mayoría indígenas), a partir de entonces no pudieron vadear el río en los momentos del día en que acostumbraban hacerlo, sino que debían hacerlo entre las seis y las diez de la mañana, cuando la generación era menos intensa y el caudal más bajo; en algunos casos estas personas encontraron la muerte cuando el río aumentaba su caudal repentinamente mientras lo intentaban cruzar.²⁵ Además del costo humano que supuso la alteración del caudal, con toda seguridad, el cambio también afectó a las comunidades de flora y fauna que estaban adaptadas a las variaciones del caudal del régimen natural del río.²⁶

Otro caso que ilustra esta dimensión del problema es la producción de aluminio: un metal que se obtiene a partir de la *bauxita*, pero cuyo insumo más importante durante la producción no es la *bauxita* sino la electricidad. En Jamaica — comenta Elizabeth Dore — , para sostener las minas de bauxita, “las compañías construyeron presas que inundaron fértiles valles y obligaron a los agricultores a abandonar sus tierras”. Además de eso, “el barro rojo [llamada así por el color de la bauxita] ha

24 DEAN, W. (1996): *A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira*, Editora Schwartz, São Paulo, págs. 212-214.

25 ABOITES, L. (1999): “Relación sociedad-naturaleza desde la historia de los usos del agua en México (1900-1940)”, en García y González, *op. cit.*, pág. 179.

26 Esta alteración les perjudica en tanto favorece las bioinvasiones. Un claro ejemplo de esto se ha discutido recientemente en España a propósito del proyecto de trasvase del río Ebro, río en el cual estaría amenazada la pervivencia de un bivalvo mediterráneo endémico: la *margaritifera*, por la invasión del *mejillón cebr*.

contaminado el suelo y el agua de zonas alrededor de las minas”.²⁷ Parece claro que una misma actividad de beneficio puede desencadenar impactos ambientales de distinto tipo: contaminación directa e *in situ* (barro rojo) y efectos indirectos y *ex situ* (la alteración del paisaje agrario y con ello las formas de reproducción material de una parte de la población).

5. Las labores de beneficio y sus efectos hacia delante: la contaminación

5.1 Formas de contaminación

La contaminación se define como la introducción al medio de cualquier sustancia extraña o de energía en una cantidad tal, y por un período de tiempo suficientemente prolongado, para causar, directa o indirectamente, una merma (o riesgo de merma), en el bienestar, salud y confort de las personas.²⁸ De acuerdo a la naturaleza de los contaminantes, se distinguen tres tipos de contaminación: química, física y biológica, y según cuál sea el medio afectado, ésta puede clasificarse en contaminación del suelo, contaminación de la atmósfera o contaminación del medio hídrico. Así, y sólo considerando estos dos criterios, se pueden identificar nueve formas de contaminación (véase cuadro N°3).

Respecto del origen de la contaminación, hay que tener presente que ésta no sólo se refiere a la presencia de elementos de origen industrial (artificiales e intrínsecamente tóxicos), sino que bien pueden ser elementos inocuos o incluso necesarios para la vida, que se transforman en perjudiciales, y por lo tanto adquieren la condición de contaminantes, cuando su concentración es excesiva o cuando están “fuera de lugar” (de su lugar natural).²⁹

27 DORE, E. (1994): “Una interpretación socio-ecológica de la historia minera latinoamericana”, en *Ecología Política*, N° 7, Barcelona, pág. 63.

28 LÓPEZ BONILLO, D. (1997): *El medio ambiente*, Cátedra, Madrid, págs. 117 y 236. Cabe comentar que “la contaminación”, no sólo es una acción sobre el medio (la acción de emitir gases o descargar sustancias líquidas o sólidas), sino que también un *problema ambiental*. Antes dijimos que los efectos podían ser neutros o incluso positivos; la contaminación, por definición, es siempre negativa.

29 ODUM (1995): *Ecología...*, *op. cit.*, pág. 107.

Cuadro N°3
Principales formas de contaminación

		Tipo de contaminación		
		Química	Física	Biológica
Medio contaminado	Atmósfera	Gases tóxicos como dióxido de azufre (SO ₂), óxidos de nitrógeno (NO _x), o monóxido de carbono (CO).	Alteración de los niveles normales de temperatura y humedad, partículas sólidas en suspensión.	Presencia de microorganismos patógenos de transmisión aérea.
	Medio hídrico	Sustancias que alteran las propiedades normales del agua: cloruros, sulfatos, fosfatos, compuestos nitrogenados y metales pesados.	Alteración de la temperatura normal, radioactividad, o incorporación de fragmentos orgánicos o sedimentos inorgánicos.	Materia orgánica que entra en fermentación y desintegración. Presencia de microorganismos patógenos (colis, estreptococos, etc.).
	Suelos	Vertido de sustancias que alteran el complejo edáfico: pesticidas, nitratos, fosfatos, restos industriales, metales. Otros contaminantes transmitidos por el agua o el viento (lluvia ácida, partículas en suspensión).	Disposición de elementos que impiden o alteran la dinámica natural del suelo.	Microorganismos patógenos en los residuos procedentes de la ganadería, componentes orgánicos volátiles.

Fuente: Elaborado a partir de BONILLO, López (1997): *El medio ambiente*, Cátedra, Madrid, pp. 117-241.

5.2 El origen de la contaminación minera

Las plantas de beneficio son, por definición, fuentes de contaminación. Si una planta beneficia menas con una ley del 6%, significa que tiene una tasa de producción de desechos del 94% (respecto del volumen de la materia prima que procesa) o, lo que es lo mismo, que por cada unidad de metal obtenido, genera quince veces más unidades de residuos, los que, salvo neutralización resuelta y efectiva, terminarán provocando alguna de las seis formas de contaminación (de las nueve posibles) que se originan en los procesos de beneficio: la contaminación física del aire, del suelo y del medio hídrico, y la contaminación química de los mismos medios.³⁰

Lo que los procesos de beneficio hacen es, justamente, movilizar o cambiar de lugar elementos que la Naturaleza tiene almacenados de

³⁰ Aunque se aplican técnicas biometalúrgicas en las que los minerales son atacados con bacterias, aún no se han documentado casos de contaminación biológica.

forma segura en el interior de la corteza terrestre y expulsarlos a la superficie en volúmenes considerables y concentraciones elevadas.³¹ Además de ello, estos procesos transforman estos elementos, convirtiéndolos en sustancias tóxicas aquellos que, originalmente, no representan ningún peligro, como por ejemplo, el azufre, que ingresa al beneficio en forma de mineral (minerales sulfurados) y sale transformado en dióxido de azufre, que luego se convierte naturalmente en ácido sulfúrico.

No obstante, no hace falta que los desechos mineros sean tóxicos para que provoquen contaminación. La distinción entre contaminación física y química es importante, porque, si bien una parte considerable de los desechos mineros pueden ser componentes inofensivos para los organismos vegetales o animales, como la *mica*, la *ortosa* o el *cuarzo*, su gran volumen y mala disposición, habitualmente se traduce en problemas de contaminación física, tan indeseables o lesivos como pueden ser los fenómenos de contaminación química (tóxica).

La historia minera está plagada de casos de *contaminación física*. Así por ejemplo, el administrador del Ferrocarril del puerto de Chañaral (en el Norte de Chile), a principios del siglo XX, consultado por la autoridad respecto del estado de la infraestructura portuaria de dicha localidad, sostenía que:

El asunto más serio que hay a este respecto es el embancamiento al costado del muelle de este Ferrocarril por la escoria del Establecimiento de Fundición [que] desde tiempo atrás se ha arrojado [...] muy a orillas de la playa, de donde, por las fuertes olas y corrientes es arrastrada y paulatinamente se ha depositado alrededor del referido muelle impidiendo [...] cualquiera operación de carga y descarga de lanchas.³²

En Guanajuato (México) a fines de los años '60 del siglo XX, la población se veía en problemas, porque una de las presas construidas en el siglo XVIII para regular el caudal del río que atravesaba la ciudad y asegurar su abastecimiento de agua, se encontraba completamente 'azolvada' (colmatada), lo que provocaba que "las aguas de las avenidas [...] brinquen a todo lo largo de la cortina [del muro] causando grandes destrozos". El origen del problema se encontraba en los "loseros" (canteras para extraer losa) que funcionaban río arriba, ya que "los trabajadores acostumbran labrar la losa en la entrada del losero, tirando ahí mismo los fragmentos que resultan de labrarla, los cuales son posteriormente ar-

31 Es de reconocer que también existen episodios muy excepcionales de contaminación natural en los que ciertos elementos son movilizados desde la corteza por lixiviación natural o arrastre fluvial.

32 "Carta al Ministro de Industrias y Obras Públicas", desde la Dirección General de Ferrocarriles del Estado, Santiago, 09.10.1901. (Archivo Siglo XX, Fondo Ministerio de Obras Públicas, vol XLII, ff. 4254 y ss.).

rastrados por el agua [del Río de los Loseros] y depositados en las presas”.³³

Si nos concentramos en las formas de *contaminación química*, es decir, en las formas tóxicas de contaminación, podemos advertir que los elementos contaminantes provienen de cuatro fuentes distintas.

En algunos casos, el elemento en explotación es, en sí mismo, un elemento tóxico o perjudicial para el medio ambiente. En estos casos, cualquier imperfección o fallo del proceso de recuperación supone la introducción inmediata al ambiente del elemento nocivo. Y lo mismo ocurre en caso de que haya defectos o pérdidas en el almacenamiento o transporte de estos productos. En este sentido, el plomo, el arsénico, el cromo el cadmio, y el mercurio son los ejemplos más evidentes, dada su alta toxicidad; pero otros elementos, como el cobre, el níquel, el estaño, la plata, el hierro, o el zinc — varios de los cuales son necesarios para los organismos en minúsculas dosis — a partir de ciertas concentraciones tampoco se consideran inocuos. Cada vez que la recuperación de estos elementos es ineficiente, ya sea de forma sistemática o accidental, la pérdida se traduce en una alteración inmediata de los ecosistemas en los que estas operaciones se llevan a cabo, y, muy especialmente, en un perjuicio inminente para la salud de las personas que trabajan o viven en esos ambientes contaminados.

En segundo lugar, aun cuando el proceso de obtención del elemento deseado fuera perfecto, es decir, se consiguiera recuperar de forma segura el 100% del metal contenido en las rocas, o bien, si las pérdidas fueran insignificantes desde el punto de vista ambiental, dada la baja o nula toxicidad del elemento o la pequeña proporción de la pérdida, el acto de separar completamente el elemento deseado del resto de la materia contenida en las rocas — la llamada ‘ganga’ y el ‘estéril’ — , implica, por definición, la expulsión al ambiente de muchos otros elementos potencialmente contaminantes.

³³ ÁLVAREZ, T.: “Consideraciones relativas al azolve de las presas de La Olla y de San Renovato”, Guanajuato, 25.01.1968. (Archivo Histórico de la Ciudad de Guanajuato, Salubridad y Asistencia, Tomo XI, s.f.).

Cuadro N° 4
Principales minerales de plata, plomo y cobre y sus componentes

Mineral	Fórmula	% de composición (por elementos)			
		Principal	Otro ₁	Otro ₂	Otro ₃
Minerales de Plata					
<i>Argentita</i>	Ag ₂ S	87,06 Ag	12,94 S	----	----
<i>Estefanita</i>	Ag ₅ SbS ₄	68,33 Ag	16,25 S	15,42% Sb	----
<i>Prousitita</i>	Ag ₃ AsS ₃	65,41 Ag	19,44 S	15,14% As	----
Minerales de Plomo					
<i>Galena</i>	PbS	86,60 Pb	13,40% S	----	----
<i>Piromorfita</i>	Pb ₅ (PO ₄) ₃ Cl	76,38 Pb	14,15% O	6,85% P	2,61% Cl
<i>Mimetita</i>	Pb ₅ (AsO ₄) ₃ Cl	69,61 Pb	15,10% As	12,90% O	2,38% Cl
Minerales de Cobre					
<i>Calcopirita</i>	CuFeS ₂	34,63 Cu	34,94 % S	30,43 % Fe	----
<i>Bornita</i>	Cu ₅ FeS ₄	63,31 Cu	25,56 % S	11,13 % Fe	----
<i>Calcocita</i>	Cu ₂ S	79,85 Cu	20,15 % S	----	----
<i>Tetraedrita</i>	(Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	34,80 Cu	25,37 % S	29,64 % Sb	10,20% Fe
<i>Bourbonita</i>	PbCuSbS ₃	13,04 Cu	19,75 % S	42,53% Pb	12,50% Sb

Fuente: Criddle, A.J. y C.J. Stanley (1993): *Quantitative data file for ore minerals*, London, Chapman & Hall.; y Klein, Cornelis y Cornelius S. Hurlbut (1997): *Manual de mineralogía: basado en la obra de J.D. Dana*, 4a ed, Barcelona, Reverté.

La explicación de esto es que las rocas de las que se obtienen los metales nunca contienen el elemento deseado en estado puro y aislado, sino como un componente más de un *mineral* específico, formado por varios elementos.³⁴ Así, por ejemplo, la *tenantita*, Cu₁₁FeAs₄S₁₃, que es un mineral que interesa por su contenido en cobre (48%), está compuesta también por *azufre* (28%), *arsénico* (20%) y *hierro* (4%). En consecuencia, la obtención de un metal específico conlleva, inevitablemente, la remoción y liberación al entorno de un conjunto de otros elementos no deseados que, perfectamente, pueden resultar tóxicos u ocasionar algún daño en los ecosistemas aledaños. De acuerdo con este ejemplo, para obtener una tonelada de cobre, hay que, necesariamente, desecharse unos 583 kg. de azufre, 416 kg. de arsénico, y 83 kg. hierro.

El cuadro N°4, permite hacerse una idea de cuáles son los contaminantes potenciales que pueden ser liberados al ambiente en los proce-

³⁴ Un *mineral* se define como un sólido de origen inorgánico, que aparece naturalmente en la corteza terrestre, que tiene una composición físico-química definida, por ejemplo: CuFeS₂ (*calcopirita*), o NiAs (*niquelita*), o Ag₂S (*argentita*). Una *roca* es una mezcla de minerales (cada uno de cuales tiene una composición físico-química determinada), mientras que una *mena* es un tipo de roca de la que se puede extraer con provecho (económico) uno o más elementos químicos contenido en alguno de los minerales que la componen.

esos de obtención de algunos metales. Allí puede apreciarse que los minerales de plata contienen alguna fracción de azufre, más un porcentaje de antimonio o de arsénico; que los minerales principales del plomo contienen proporciones significativas de cloro, azufre y arsénico, además de fracciones más pequeñas de fósforo o flúor, y que, entre los minerales de cobre, el azufre aparece como un contaminante potencial muy importante, junto con el plomo y el antimonio.

Si tomamos como ejemplo el caso del cobre, podemos estimar la cantidad de azufre potencialmente liberado al entorno en forma de dióxido de azufre (SO₂). En 1993, las 2.756.000 Tm de cobre fino que se produjeron en América Latina representaban una emisión potencial de 427.000 mt³ de este gas.³⁵ Si planteamos esto históricamente, podemos estimar una curva de emisión potencial de dióxido de azufre 1880 y 1993, de acuerdo a las cifras de producción disponibles, por parte de los principales productores de este metal en América Latina³⁶ (véase gráfico N°1).

En tercer lugar, es preciso considerar que los minerales que despiertan el interés de las empresas mineras no se encuentran aislados, sino que asociados con otros minerales en la misma roca.³⁷ Por lo regular, no se encuentran yacimientos de rocas que contengan exclusivamente un único mineral. Volviendo al ejemplo de la *tenantita*, ésta normalmente se encuentra asociada a minerales como la *blenda* (zinc) o la *galena* (plomo), que son minerales que, a su vez, contienen otros elementos (que no son ni plomo ni zinc, tales como hierro, molibdeno, calcio, aluminio, silicio, etc.) que, en principio, están destinados a formar parte de los dese-

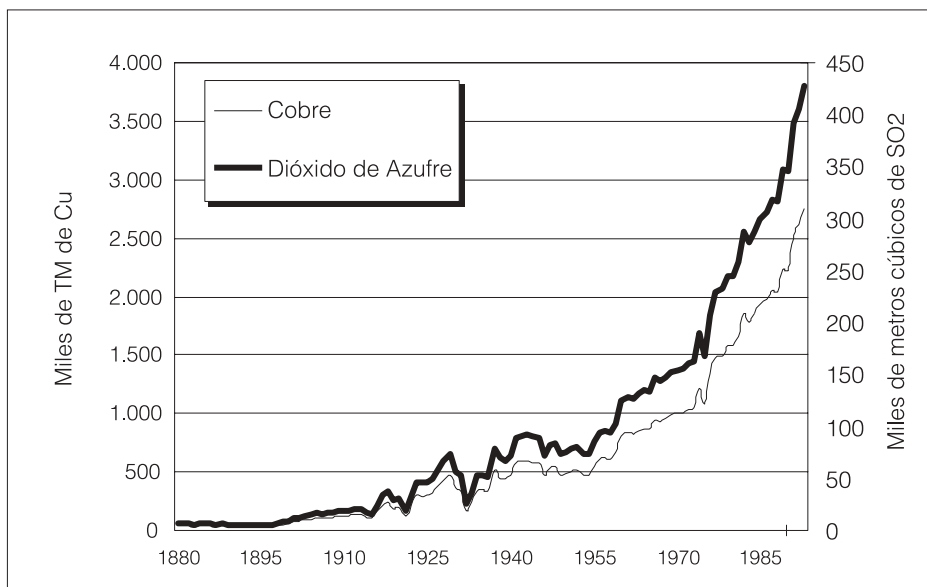
35 Una aclaración importante es que esta estimación se refiere a las emisiones "potenciales" y no a las emisiones "efectivas", pues éstas serán menores en la medida en que no todo el cobre producido es despojado de la totalidad del azufre contenido en los minerales antes de su comercialización. Una parte del cobre contenido es exportada sin refinar, ya sea como *concentrado de cobre* (30% Cu; 34% S; 27% Fe) o *eje* (45,0% Cu; 27,2% S; 27,8% Fe). Esa porción de azufre contenido en estos productos supone una transferencia al exterior de contaminantes potenciales que, en un cálculo más fino de "contaminación aparente" habría que descontar. Asimismo, en los casos en que los concentrados son sometidos a procesos de fundición y el combustible empleado es un tipo de carbón mineral que contenga azufre, la volatilización del mismo (en forma de SO₂) tendría que ser añadida a la de origen mineral.

36 Para hacer esta estimación se han tomado las cifras de producción publicadas en las estadísticas oficiales de Bolivia, Cuba, Chile, México y Perú, recogidas por MITCHELL, B. R. (1998): *International historical statistics. The Americas 1750-1993* (4th ed), Macmillan, New York, pág. 333 y ss.; y se ha supuesto, siguiendo a Habashi, que el 90% del cobre que se produce en el mundo proviene de tres minerales (*calcopirita*, *bornita* y *calcocita*) cuya media de azufre contenido es 26,9%, cifra que se ha empleado como cociente. Con este método, los datos que se ofrecen sólo pueden tomarse como una aproximación, pues la distribución de los minerales y su paragénesis puede variar considerablemente entre yacimientos distintos y al interior de un mismo yacimiento. Un cálculo preciso de esto (aunque quizá impracticable) debería partir de un inventario de los minerales que se han extraído de cada una de las "zonas de mineralización" en cada uno de los yacimientos explotados, en cada momento histórico. VÉASE HABASHI, Fathi (1997): *Handbook of extractive metallurgy*, vol. II. Wiley-VCH, Quebec, pág. 497.

37 Esto es lo que en geología se conoce como *paragénesis*, que se refiere al conjunto de minerales que componen una roca y han permanecido en equilibrio, y se generaron simultáneamente, bajo las mismas condiciones de presión y temperatura. Algunas paragénesis son muy frecuentes, como la del *granito*, que está compuesto por tres minerales: *ortosa* [KAlSi₃O₈], *mica* [XY₂Si₄O₁₀] y *cuarzo* [SiO₂], otras raras y algunas, por razones físico-químicas, imposibles. GONZÁLEZ, Ángel; et al. (1996): *Minerales. Estudio y reconocimiento*, Omega, Barcelona, pág. 12.

chos del proceso de obtención del cobre contenido en la *tenantita* (salvo que su presencia sea tan alta que haga conveniente desarrollar un sistema específico para su recuperación).

Gráfico 1
Producción anual de cobre y estimación de la emisión potencial de dióxido de azufre. Bolivia, Cuba, Chile, México y Perú (1880-1993)



Fonte: Elaboración propia

Así por ejemplo, si pensamos en la obtención del *estaño*, que prácticamente en su totalidad proviene de la *casiterita*, SnO_2 , que es un mineral que además del estaño sólo contiene oxígeno, habría que concluir que la liberación de elementos contaminantes en su explotación es prácticamente nula. No obstante, esto cambia al considerar la paragénesis de la *casiterita*, que suele estar asociada a, por lo menos, ocho minerales que en conjunto contienen calcio, flúor, fósforo, cloro, sodio, berilio y aluminio, además de pequeñas fracciones de "impurezas" tales como hierro, tantalio, niobio, zinc, wolframio, manganeso, escandio, germanio, indio, escandio y galio (Véase cuadro N°5).

Cuadro Nº 5
Minerales asociados a la *casiterita*

Mineral	Fórmula
<i>Fluorapatita</i>	$Ca_5(PO_4)_3F$
<i>Apatita</i>	$Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$
<i>Beryl</i>	$Be_3Al_2Si_6O_{18}$
<i>Albita</i>	$NaAlSi_3O_8$
<i>Cuarzo</i>	SiO_2
<i>Fluorita</i>	CaF_2
<i>Ortoclasa</i>	$KAlSi_3O_8$
<i>Moscovita</i>	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$

Fuente: Véase Cuadro Nº4

Otra evidencia de esto, que puede resultar apropiada es observar la lista de minerales presentes en el Cerro Rico de Postosí, una mina de plata de las más famosas del mundo que, no obstante, también puede considerarse un depósito natural de muchos otros elementos (véase cuadro Nº 6).

Cuadro Nº 6
Minerales presentes en el Cerro Rico de Potosí

1) Acantita	18) Esfalerita	35) Pirargirita
2) Alunita	19) Estanita	36) Pirita
3) Andorita	20) Fosfofillita	37) Pirostilpnita
4) Apatita	21) Franckeita	38) Plata (nativa)
5) Arsénico(nativo)	22) Freibergita	39) Siderita
6) Arsenopirita	23) Galena	40) Sideronatrira
7) Arsenosulvanita	24) Goetita	41) Siderotil
8) Barita	25) Goslarita	42) Smithsonita
9) Berndtita	26) Hematita	43) Stefanita
10) Bismuthinita	27) Jamesonita	44) Stibnita
11) Bournonita	28) Jarosita	45) Tetrahedrita
12) Calcita	29) Matildita	46) Valentinita
13) Calcopirita	30) Melanterita	47) Voltaita
14) Casiterita	31) Miargirita	48) Wavellita
15) Clorargirita	32) Nacrita	49) Wolframita
16) Cuarzo	33) Ottemanita	50) Wurtzita
17) Diaforita	34) Pickeringita	

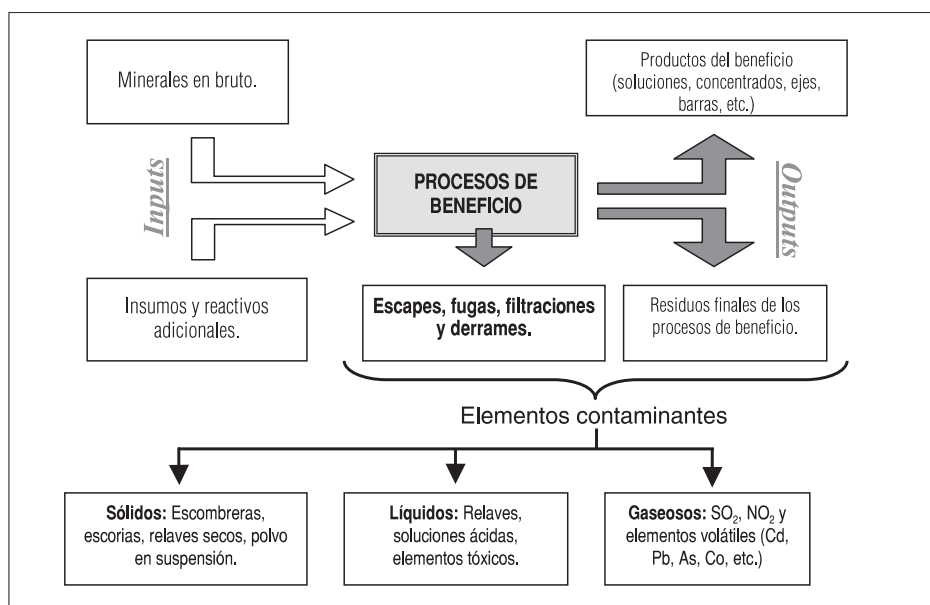
Fuente: Mineral Data [<http://www.mindat.org>]

Por último, hay ingredientes potencialmente contaminantes que no provienen de las menas explotadas, sino que se añaden en el proceso de beneficio (por ejemplo, fundentes y reactivos). Los casos más evidentes son la amalgamación de la plata con mercurio, la disolución del oro con cianuro, y la lixiviación de óxidos de cobre con ácido sulfúrico. Estos elementos añadidos pueden terminar en el ambiente, ya sea por accidentes en el transporte o almacenamiento de los mismos, o bien porque pasan a formar parte de los desechos del proceso.

5.3 La tecnología y la producción de desechos

Las técnicas de beneficio determinan las características químicas y físicas de las sustancias contaminantes que son introducidas en el ambiente. En primer lugar, de acuerdo a cuál sea el procedimiento empleado para obtener el metal, se determina el 'estado de la materia' en la que serán expulsados los residuos, esto es, en estado sólido, líquido o gaseoso; de lo cual depende, a su vez, la forma y lugar de su expulsión, y en último término, el medio afectado por la contaminación: suelo, agua o aire (véase esquema N°2).

Esquema N°2 - Generación de elementos contaminantes en las labores de beneficio



Cada uno de estos medios presenta unas interacciones determinadas con los desechos mineros, siendo el medio acuático, probablemente, el más sensible de ellos, puesto que propicia la disolución de ciertos compuestos, y además, resulta ser el medio idóneo para la dispersión natural de los contaminantes. Mientras que en medios áridos las sustancias contaminantes tienden a quedar depositadas, en los medios de altas precipitaciones éstas son rápidamente incorporadas a los suelos, infiltrándose hasta el sistema hídrico subterráneo, alcanzando desde éste, el sistema hídrico superficial y el mar, extendiéndose así el problema en una amplia zona.

Por otra parte, dependiendo de cuál sea el surtido de elementos del proceso de beneficio y cuáles sean las reacciones químicas que forman parte de los mismos, los residuos tendrán una composición específica, que puede tener un efecto sobre el ambiente más o menos agudo. Por ejemplo, en el caso de los residuos del beneficio del plomo, las reacciones resultantes de la descarga en el ambiente no serán las mismas si se trata de un residuo rico en óxido de plomo (2PbO) que de un residuo compuesto de sulfato de plomo (PbSO_4), mucho más estable. Cada compuesto se comporta de una manera específica en cada ambiente, unos son más estables que otros, y por lo tanto, no todos tienen la misma peligrosidad: mientras algunos penetran directamente en los organismos y en la cadena alimenticia, otros pueden ser fijados o neutralizados naturalmente en el medio.

El ejemplo histórico más generalizado respecto de la repercusión ambiental de la tecnología, es la generación de dióxido de azufre (SO_2) a partir de minerales sulfurados como la *galena* (Pb), la *argentita* (Ag), la *calcopirita* (Cu), la *millerita* (Ni) o la *blenda* (Zn). El método más recurrente para separar el metal deseado del azufre que lo acompaña, ha sido tradicionalmente la volatilización del segundo (en forma de SO_2), lo cual se consigue con un proceso de *calcinación* o *tostación* de los minerales, ya sea en hornos o al aire libre.³⁸

El caso más emblemático en la historia ambiental minera en relación con las emisiones de anhídrido sulfuroso (SO_2) a partir de minerales sulfurados, probablemente sea lo ocurrido en las famosas minas de Río Tinto (Huelva, España) a fines del siglo XIX.

El método de beneficio del cobre empleado en Río Tinto, se iniciaba con la *calcinación* al aire libre de los minerales, que consistía en hacer pilas de rocas ('teleras') encima de ramajes secos y prenderles fuego para que ardieran, ininterrumpidamente, entre seis y doce meses. La reacción química transformaba el azufre en anhídrido sulfuroso que era liberado a

³⁸ La tostación o calcinación se practica para reducir el contenido de azufre en los minerales que impide la fusión directa de los metales.

la atmósfera en enormes cantidades, las que se fueron incrementando en la medida que se intensificó la actividad extractiva en la región.

En respuesta a la contaminación provocada, se organizó un movimiento “antihumista” en el que participaron los agricultores vecinos, cuyos cultivos se veían mermados por efectos de los humos, y los propios trabajadores de la empresa cuya salud se veía directamente afectada.³⁹ Las presiones que se ejercieron contra las teleras de Río Tinto (y sobre las demás empresas de aquella región minera), apuntaban principalmente hacia el reemplazo del método de beneficio y al pago de compensaciones por los daños en la agricultura.

En febrero de 1888 (el “año de los tiros”), en un contexto de creciente tensión, agricultores y trabajadores de la mina convocaron a una manifestación en el Municipio de Río Tinto, en las que las reivindicaciones antihumistas se mezclaban con demandas laborales. La manifestación fue objeto de una represión violentísima por parte de las fuerzas de orden del gobierno provincial, que se saldó con la muerte (oficial) de trece personas. A consecuencia de estos sucesos, el gobierno se vio en la obligación de aprobar un Real Decreto por el que prohibía las calcinaciones al aire libre. Éstas, no obstante, no se abandonaron por completo hasta 1907.⁴⁰

Otro ejemplo que puede citarse respecto de la condición determinante de la tecnología en la generación de los residuos, es el caso de las técnicas de concentración por vía húmeda (*flotación* o *espumación*), patentada en Alemania hacia 1877. Esta técnica, especialmente apropiada para las menas sulfurosas (de cobre o de níquel, por ejemplo), consiste en mezclar las menas trituradas con agua y cubrir las partículas del mineral con un reactivo que tiene la propiedad de adherir estas partículas a burbujas de aire, con lo cual éstas flotan, mientras los restantes elementos precipitan, lo cual permite su fácil selección y recogida. El desarrollo de la flotación implicó la generación de un nuevo tipo de desecho: el material sobrante del proceso, un compuesto formado por agua, reactivos, algún porcentaje de elementos metálicos y materiales estériles contenidos en los minerales asociados al mineral principal en las menas, al que se denomina ‘relaves’ (o ‘aguas ácidas’, o ‘colas’, o *tailings*, o ‘lodos tóxicos’, o ‘jales’) y que generaron un tipo de impacto ambiental no conocido hasta entonces.

39 El SO₂ es un gas incoloro y con sabor ácido picante, perceptible por el olfato en concentraciones de 3 ppm. a 5 ppm. Cuando se encuentra en niveles de 1 a 10 ppm. induce al aumento de la frecuencia respiratoria y el pulso. Cuando alcanza las 20 ppm. produce una fuerte irritación en ojos, nariz, garganta, incrementa la crisis asmáticas y recrudece las alergias respiratorias. Si la concentración y el tiempo de exposición aumentan, se producen afecciones respiratorias severas. Una exposición a 400-500 ppm, aunque sea breve, puede resultar fatal para el organismo al producir o agravar ciertos padecimientos cardiovasculares.

40 FERRERO BLANCO, M.D. (1998): *Capitalismo minero y resistencia rural en el sureste andaluz. Río Tinto, 1873-1900*, Universidad de Huelva, Huelva.

En Chile, los relaves se dieron a conocer en 1911, en la mina 'El Teniente', propiedad de la empresa norteamericana Kennecott Copper Co., situada en la Cordillera de los Andes. Los relaves de la planta primero fueron descargados directamente al río, y más tarde depositados en unos embalses muy precarios contruidos sobre el mismo lecho del río (previamente protegido por un acueducto), que se desplomaron en repetidas ocasiones. El resultado de ello fue la contaminación de un río que se usaba para riego agrícola en el extenso y rico valle del Cachapual. Los grandes propietarios de dichas tierras, vieron con espanto cómo las aguas bajaban "arrastrando sustancias nocivas", y se movilizaron con diligencia y efectividad. En 1916 el Parlamento chileno dictó una ley que prohibió a las empresas mineras arrojar sus desechos directamente a los ríos.⁴¹

Una historia similar se puede contar respecto del beneficio del oro por 'vía húmeda', y del desarrollo de las técnicas hidrometalúrgicas en general. El principio de la hidrometalurgia moderna fue determinado hacia 1844, en Rusia, por P. Bragation o, hacia 1846 por L. Elsner en Alemania, quienes establecieron la reacción de disolución del oro en soluciones de cianuro, pero fue J.S. McArthur y los hermanos Forrets quienes, varios años más tarde (1887), desarrollaron y patentaron el proceso de *cianuración* de minerales de oro, que empezó a aplicarse casi de inmediato en Nueva Zelanda y Sudáfrica.⁴²

Hacia 1907, en México, el antiguo mineral de El Oro, en el que se había trabajado antes por fundición directa y por amalgamación con mercurio, se encontraba en su tercera fase tecnológica: la concentración por cianuro o *cianurización*. Los agricultores vecinos, que al parecer habían logrado sobrevivir a los métodos anteriores, se quejaron entonces del "envenenamiento de las aguas del río por el cianuro que mata nuestros ganados, esteriliza las tierras y torna las propias aguas en imposibles para los usos domésticos y aun para el lavado de la ropa".⁴³

6. Síntesis y conclusiones

Las labores de beneficio son, por definición, generadoras de efectos ambientales. Al remover y procesar ciertos minerales de la corteza terrestre para obtener un elemento específico contenido en los mismos (a

41 Pero la historia no terminó ahí. Con posterioridad a la promulgación de esa ley, se siguieron produciendo problemas con los relaves de esta y otras minas, a veces con desenlaces trágicos. Más antecedentes en Folchi, Mauricio (2003): "El beneficio del cobre por 'vía húmeda' y su impacto en el medio ambiente (Chile, 1904-1990)", *Simposio de Historia Ambiental Americana*, Santiago.

42 HABASHI, F. (1987): "One hundred years of cyanidation", *CIM Bulletin*, Vol 80 (905), págs. 108-110. Ese mismo año, Karl Josef Bayer patentó en Alemania el proceso de lixiviación de la bauxita, seguido de la precipitación electrolítica del metal por vía seca, utilizando el proceso de Hall-Heroult. Véase Ballester, et al (2000), *op. cit.*, pág. 331.

43 Citado por ABOITES (1999), *op cit.*, pág. 184.

veces en una proporción muy pequeña), inevitablemente, se movilizan una gran cantidad de materiales, perturbando la dinámica de un territorio y transformando en desechos sólidos, líquidos o gaseosos ciertos elementos asociados al elemento deseado. Todas estas acciones sobre el medio provocan, directa o indirectamente, a corto o largo plazo, un menoscabo en el bienestar o la salud de los ocupantes y habitantes del medio en el que éstas se llevan a cabo.

Los efectos de las operaciones de beneficio sobre el entorno biofísico en el que éstas se realizan, deben buscarse tanto hacia adelante como hacia atrás (en el sentido del proceso productivo), es decir, tanto en la fase de aprovisionamiento de insumos y ejecución de las obras que estas labores requieren, como en la fase final de descarga de los desechos generados (véase esquema N°3). Esto nos lleva, en otras palabras, a construir un balance *input/output* en términos físico-químicos de estas labores, identificando qué es “lo que entra” y qué es “lo que sale” del proceso de beneficio.

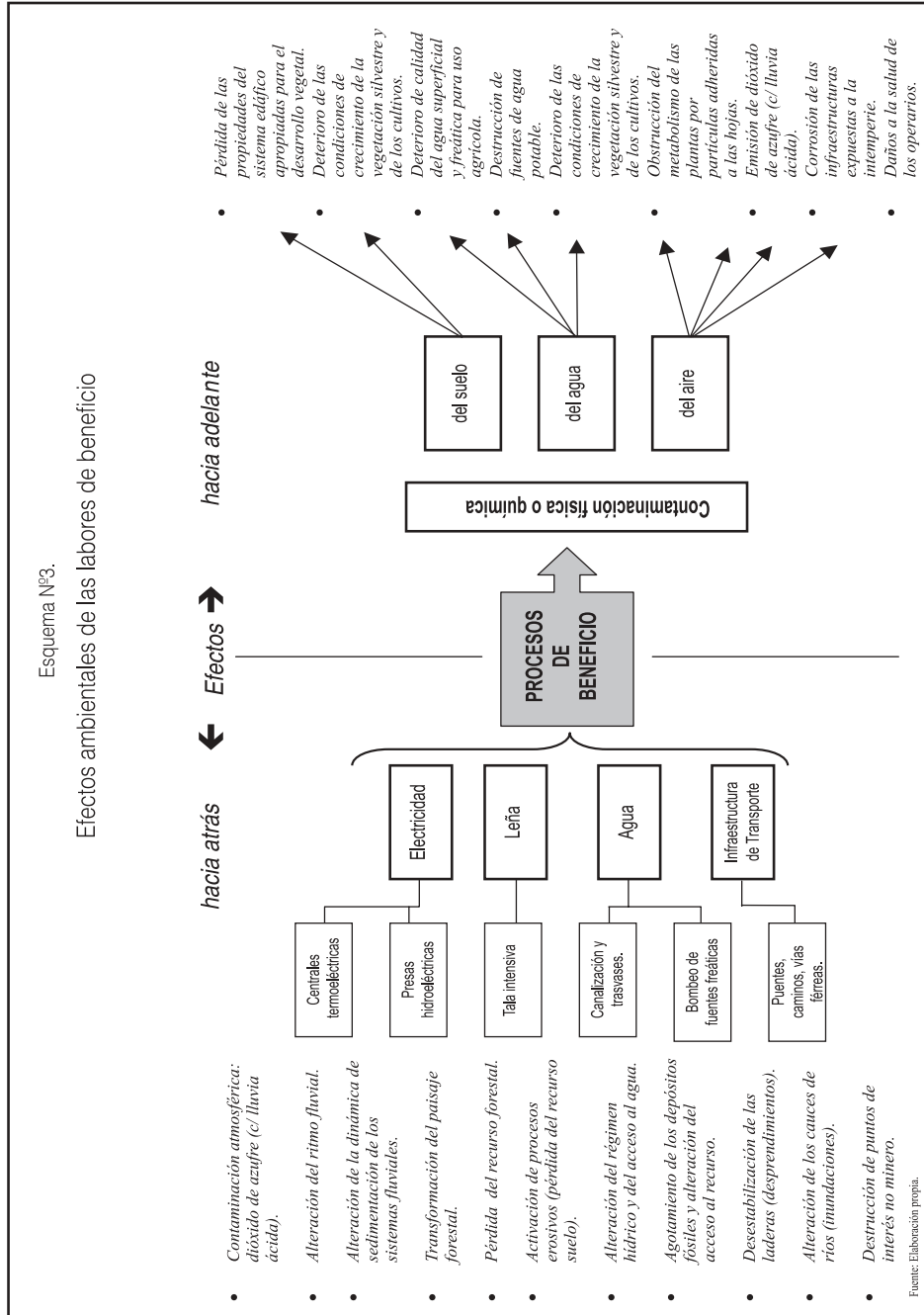
Para hacer esto, es necesario determinar cuál es la composición de la materia prima (las rocas de las que se obtiene el elemento deseado), y conocer con exactitud los sistemas tecnológicos empleados en su tratamiento, especialmente el funcionamiento de los dispositivos que lo integran, pues son éstos los que determinan cuáles son los insumos requeridos y cuál es el tipo de desecho formado.

Así como las labores de beneficio han experimentado una transformación notable a lo largo de la historia, los efectos ambientales derivados de las mismas han tenido un desarrollo histórico análogo. Esto nos lleva a situar en el tiempo y en el espacio el desarrollo y difusión de los distintas técnicas de beneficio, determinando qué procesos y qué operaciones se realizaban en cada momento y lugar (molienda, calcinación, lixiviación, flotación, cementación, etc.), y con qué máquinas y reactores se efectuaban tales procesos (molinos, teleras, pilas, celdas de flotación, cubas, etc.). A partir de ese conocimiento, se podrán inferir los efectos ambientales previsiblemente ocurridos y buscar las evidencias de los mismos.

Sobre esta base, la historia ambiental puede comprender históricamente el origen y evolución de los efectos ambientales de las labores de beneficio, en términos de transformación del paisaje y de degradación ambiental (agotamiento de recursos y deterioro de las condiciones de habitabilidad para personas, animales y plantas), junto con sus consecuencias consabidas: desestructuración socio ambiental (cambio en las reglas de acceso a los recursos, redistribución del uso del territorio), y detrimento de las bases de la reproducción material de las comunidades afectadas.

Esquema N°3.

Efectos ambientales de las labores de beneficio



Fuente: Elaboración propia.