

# Minería, planificación e impactos medioambientales físico-químicos

Por Federico Cernuschi y Manuela Morales\*

**La minería es una actividad esencial para proveer al mundo de materias primas. Sin embargo, como cualquier otra actividad humana, produce diversos impactos medioambientales. Esta es una actividad intrínsecamente invasiva ya que conlleva la remoción de volúmenes importantes de roca. Un modelo de desarrollo sustentable implica realizar esta actividad coherentemente con la preservación del medioambiente. (1)**

En el planeta no existen espacios geográficos que al ser modificados por el hombre no sufran impactos ambientales. Desde este punto de vista, ninguna ubicación se puede considerar óptima para realizar minería. Los recursos minerales se distribuyen heterogéneamente a lo largo del mundo y su utilización involucra necesariamente una interacción con diversos medioambientes y los impactos debe estudiarse específicamente para cada uno de ellos. En casos como el de Uruguay, la minería se inserta en un medio ya altamente modificado con suelos aptos para otros usos productivos. En montañas, estepas, bosques y desiertos de otros países, la minería se establece en contacto con nacientes de ríos y glaciares, claves para el suministro de agua potable de poblaciones lejanas, o en zonas vírgenes al impacto humano donde viven poblaciones indígenas y existen refugios de vida silvestre.

Por otro lado, un modelo de desarrollo sustentable implica explotar los recursos naturales coherentemente con la preservación del medioambiente. En la mayoría de los casos, los impactos pueden ser evitados o al menos manejados y minimizados durante la explotación minera, y el espacio ocupado por los complejos mineros puede ser posteriormente recuperado para otros usos. Sin embargo, esto es posible solamente si existe una planificación previa, controles gubernamentales y auditorías, la capacidad técnica adecuada, y la exigencia de planes de cierre y fondos destinados de antemano para este fin.

Por otro lado, la minería, realizada adecuadamente, se integra a otras actividades productivas que hacen uso del medioambiente como la ganadería, agricultura y turismo.

En este artículo se abordará a la minería y los impactos ambientales que provoca en el medio físico. Los impactos sociales y a la biota escapan a la especialidad de los autores, por lo que deben ser analizados por profesionales especialistas. Cabe destacar que la fauna y la flora se ven afectados por los impactos al medio físico y que la zona crítica es la afectada directamente por la mina, planta de procesado y circulación de maquinaria. Los impactos sociales son muy variados y dependen de las características intrínsecas de las comunidades donde se

inserta la minería, así como su experiencia con la misma, y el apoyo y planificación gubernamental.

## Exploración e impactos

Un yacimiento mineral es un lugar en la corteza terrestre donde determinados elementos, minerales o rocas de interés están concentrados de tal manera que pueden ser extraídos de forma económicamente rentable.

La búsqueda de yacimientos en un área comienza con hipótesis científicas que indican que allí se pueden haber presentado los procesos geológicos necesarios para su formación. Esto es seguido por la exploración a gran escala con la expectativa de detectar concentraciones elevadas de elementos químicos en rocas o propiedades físicas anómalas en las mismas que puedan indicar la presencia de un yacimiento en las cercanías.

Esta etapa involucra la realización de mapas geológicos y relevamientos geofísicos y geoquímicos. Si se encuentran indicadores de la existencia de un yacimiento, la siguiente fase se focaliza en un área más pequeña y trata de confirmar la existencia del mismo y determinar sus límites y magnitud. Se realizan perforaciones y cavan trincheras que habilitan observaciones en tres dimensiones para poder estimar la cantidad y concentración del recurso, o sea del mineral de interés. También se estudian las rocas mineralizadas para conocer en detalle las características del mineral de interés que definirán el tipo de procesamiento industrial para su extracción. Con esta información se pueden definir la existencia de reservas, es decir, la cantidad de recursos minerales que pueden ser explotados, y estudiar la factibilidad económica de su explotación.

Durante las etapas previas a la apertura de una mina, los impactos ambientales son bajos. La actividad más significativa en esta etapa es la perforación, tanto por los impactos que genera como por la información que se obtiene sobre el subsuelo. Puede llegar a desarrollarse durante las 24 horas del día generando ruidos molestos o vibraciones que pueden provocar impactos locales en la fauna y sociales si se encuentran cerca de poblados. El uso de combustible y agua en el proceso requiere un

manejo adecuado para evitar impactos en el medio físico. Al finalizar la actividad y realizar la recuperación del área afectada, las perforaciones tienen un huella superficial de no más de 15 cm de diámetro, y son identificadas y selladas.

### Explotación e impactos

El mineral de interés, el recurso, es extraído de una mina utilizando explosivos para desprender y fragmentar la roca que luego se retira usando excavadoras y palas. La roca estéril, que no tiene el mineral de interés, se dispone en la escombrera. El recurso se transporta a la planta de beneficiamiento (2) en camiones de gran tonelaje o cintas transportadoras. En la planta, se tritura el mineral y por procesos físicos y/o químicos se separa el mineral de interés del resto de la roca. Ese resto, se dirige a la pileta de relaves o de decantación. Se continúa el proceso de industrialización según el mineral, las capacidades instaladas en el complejo minero o el uso final del recurso.

Existen dos tipos de minas, abiertas o subterráneas. Las **minas abiertas** comienzan a nivel del suelo y son más comunes en yacimientos de gran volumen cercanos a la superficie. Para excavar en profundidad, requieren extenderse en ancho para mantenerse estables y evitar derrumbes.

El primer impacto ocurre en esta etapa, con la modificación intensa del medioambiente en el espacio donde se abre la mina y una zona crítica a su alrededor.

Algunas minas abiertas son continuadas de manera subterránea desde el fondo de las mismas, por ejemplo Minas de Corrales en el departamento de Rivera, Uruguay. En **minas subterráneas** la extracción se realiza a varios metros de profundidad por debajo del nivel del suelo y la expresión superficial de la misma está reducida a lo necesario para la entrada y salida del soporte logístico, mineral, y personal. Estas minas son preferidas para yacimientos de alta concentración y bajo volumen y/o si estos se encuentran a mayor profundidad. Estas consumen mayor energía para operar y requieren mayores cuidados respecto a la seguridad de sus trabajadores.

### Impactos en el aire

La liberación de contaminantes a la atmósfera incluye los gases producidos por la combustión en las maquinarias y de las explosiones, el anhídrido carbónico y los óxidos de nitrógeno ( $\text{CO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ), así como el polvo generado por el transporte de rocas, su molienda y por la circulación de vehículos.

La inhalación continua y prolongada de polvo produce enfermedades pulmonares (neumoconiosis). La más común, silicosis, se produce por inhalación de partículas de sílice presentes en el polvo suspendido en el aire. Este no es un fenómeno exclusivo de la minería, ya que el polvo que se levanta en la caminería de balastro produce los mismos efectos. La silicosis es totalmente evitada si los trabajadores utilizan mascarillas con filtros. Otras enfermedades como la asbestosis son menos comunes, porque son producidas por la inhalación de un tipo específico de mineral, los asbestos, raramente presentes en yacimientos aunque igualmente se deben realizar estudios para determinar su presencia.

La liberación de polvo se mitiga realizando la molienda en húmedo y manteniendo húmedas la caminería, escombreras y piletas de decantación. Para evitar la liberación de polvo durante el transporte se cubren las cintas transportadoras. Luego de realizar las voladuras, los trabajadores deben despejar la zona afectada de la mina y no volver a trabajar en el lugar hasta que el polvo decante y los gases se hayan disipado. Para evitar la propagación del polvo fuera del complejo minero se plantan árboles alrededor del mismo.

El uso de maquinaria moderna y su mantenimiento regular, así como también la regulación y monitoreo de emisiones de gases y polvo, necesarios para poder tomar medidas, si aumentan más de lo aceptado, minimizan estos impactos. El control de emisiones debe ser aún más estricto en minas subterráneas, donde la adecuada ventilación es fundamental para la salud de sus trabajadores.

Los ruidos y vibraciones de la maquinaria, explosiones y circulación de vehículos generan impactos sonoros. Las



*Trinchera en el departamento de Florida. Luego de observar la geología dentro de la trinchera y tomar muestras, la misma es rellenada y el suelo revegetado.*



*Perforaciones en el departamento de Treinta y Tres. Al finalizar la actividad y realizar la recuperación las perforaciones tienen un huella superficial de no más de 15 cm de diámetro, y son identificadas, selladas y cubiertas.*



**Arriba: Mina Golden Cross en Nueva Zelanda de oro y plata, con drenaje ácido y que utilizó cianuro para la explotación. Foto en 1994 cuando la mina estaba activa. Abajo: Foto en 2001 luego de la recuperación. Fotos: gentileza de Newmont Waihi Gold, Nueva Zelanda.**



**Arriba: Mina de hierro Wazee en Minesota, EE.UU. Abajo: Espacio recuperado. Por tratarse de un yacimiento sin sulfuros el agua que se acumuló dentro de la mina es neutra y apta para usos recreativos. La recuperación implicó dismantelar la infraestructura de la mina y construir playas y accesos al lago. Fotos: www.divebuddy.com**



medidas de mitigación hacia el exterior incluyen la utilización de barreras sonoras y hacia el interior el uso de materiales aislantes en la infraestructura del complejo minero utilizada por los trabajadores.

### Impactos en el agua

Los impactos más importantes en el agua son la introducción de sedimentos en los cursos de agua y los cambios de la composición química y acidez (pH) del agua superficial y subterránea. El drenaje ácido y metalífero es uno de los impactos ambientales más serios relacionados con la minería. Este se genera por la oxidación de sulfuros como la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) o calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) en presencia de agua y oxígeno. Esta oxidación, mediada por bacterias, libera el azufre de los minerales, que en el agua forma ácido sulfúrico aumentando su acidez. La disolución de sulfuros, y otros minerales que son solo solubles en las nuevas condiciones de acidez, cargan al agua de la mina con otros metales (si estos están presentes en las rocas del yacimiento), como aluminio, manganeso, cadmio, cobre, plomo, arsénico y mercurio. Cuando el agua se neutraliza, los metales precipitan y son retirados del agua. En algunos casos puede haber una salinización del agua, ya que el azufre se mantiene en solución como anión sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

Estas reacciones ya ocurren naturalmente antes de la explotación minera, pero la remoción de grandes volúmenes de roca durante la misma expone mayor cantidad de estos minerales al ambiente y se aceleran los procesos.

Por otro lado, en algunos yacimientos las rocas poseen minerales que neutralizan la acidez del agua, como feldespatos y carbonatos, minerales muy comunes en la corteza terrestre. En estos casos si bien los sulfuros en la roca generan acidez, esta es neutralizada naturalmente en el lugar, como ocurre en los yacimientos de oro en Minas de Corrales.

Los yacimientos que no poseen sulfuros, o en los cuales estos se encuentran en muy baja concentración, no generan drenaje ácido y metalífero. Esto sucede en la gran mayoría de los yacimientos de hierro del mundo y es lo que ocurriría en los yacimientos de hierro de Valentines en el centro del país si entran en producción. También ocurre lo mismo en las canteras de piedra partida y caliza en Uruguay. Por ejemplo, en las canteras "El Terrible" en Salto que se formaron para extraer basalto para la construcción de la represa de Salto Grande en 1977, por las lluvias, vertientes y filtración del lago, se llenaron de agua y hoy allí se practica buceo. Por otro lado, ciertos depósitos presentan grandes cantidades de sulfuros y bajas concentraciones de minerales que puedan neutralizar las aguas y tal vez no deberían ser minados, por ejemplo en Summitville, Colorado, EE.UU. donde las malas prácticas mineras en la década de los 80 produjeron contaminación presente aún hoy en día. Para el correcto manejo ambiental se debe evitar que el drenaje ácido y metalífero llegue a aguas superficiales y subterráneas. El tratamiento incluye la neutralización de las aguas de mina utilizando rocas carbonáticas (e.j. caliza) o cal y el cubrimiento de las escombreras con membranas especiales o suelo y cobertura vegetal, para impedir que el agua entre en contacto con la roca portadora de sulfuros y ocurran las reacciones químicas que generan drenaje ácido y metalífero.

El agua también puede ser afectada por los diferentes compuestos químicos que se utilizan durante la explotación de la mina: desde combustibles y aceites para la maquinaria a los utilizados para la beneficiación de elementos metálicos. Estos incluyen el cianuro utilizado principalmente en la minería de oro y plata, como en la mina de oro en Minas de Corrales. Si bien es un compuesto tóxico, no es persistente y es degradable bajo radiación solar, lo que simplifica su manejo. De todos modos, si su manejo no es correcto, la rotura de diques de las piletas de tratamiento puede resultar en accidentes de gran magnitud, como el ocurrido en Baia Mare, Rumania, en el año 2000.

La minería de oro artesanal utiliza mercurio, el cual sí es extremadamente tóxico y persistente en el medioambiente. La minería de otros metales, como cobre o uranio, utiliza distintos tipos de ácidos (ej. ácido sulfúrico)

para separar el elemento de interés del mineral donde se encuentra (ej. calcopirita). Estos deben ser correctamente manejados y reciclados para no entrar en contacto con las aguas superficiales o subterráneas. Otros elementos metálicos, como el hierro que se encuentra en la magnetita, pueden ser separados por métodos físicos (con electroimanes) y no es necesaria la utilización de ácidos, como sería el caso de explotarse los yacimientos de hierro de Valentines.

### Impactos en el suelo

Cuando no existe un correcto manejo de las aguas superficiales, el suelo sufre los mismos impactos químicos de acidificación, contaminación por metales y salinización descritos anteriormente para el agua.

Los impactos físicos más notorios en las minas a cielo abierto son la pérdida de cobertura vegetal y suelo que ocurre al excavar la tierra y abrir las minas. En minas subterráneas puede haber subsidencia del suelo, es decir un hundimiento vertical del suelo, causada por la remoción de roca en profundidad. Otros impactos pueden ser provocados por fallas en la ingeniería de obras, como roturas de la pileta de relaves (residuos del proceso de molienda y beneficiación), o de las escombreras, que pueden provocar erosión y flujo de sedimentos como la reciente rotura de la pileta de relave de Mount Polley, en Canadá, que generó impactos físicos en el suelo y agua.

Las buenas prácticas mineras incluyen la separación y almacenamiento del suelo retirado durante la excavación y construcción de instalaciones, para recuperarlo durante los planes de cierre. También es importante la localización y construcción adecuada de embalses, escombreras y vías de drenaje impermeabilizadas. En el plan de cierre se deben estabilizar las escombreras y adecuarlas a la morfología original del área.

### Dimensiones de los impactos

Los impactos medioambientales están asociados a un área crítica en torno a las explotaciones mineras. En general, cuanto mayor es el área de la mina, mayor es la extensión superficial de los impactos medioambientales y el área a recuperar en el plan de cierre es mayor.

De todas maneras, las explotaciones industrializadas, permiten un mejor control y minimización de impactos ambientales que las explotaciones artesanales, irregulares y no planificadas, que en una zona pequeña pueden producir grandes impactos que se extiendan a una zona crítica muy extensa (ej. minería de oro utilizando mercurio en las selvas de Sudamérica).

### Planes de cierre

Estos deben estar previstos desde antes de comenzar la explotación y un fondo de contención debe ser reservado de antemano para este fin. El cierre de minas no se exigía en el mundo hasta décadas recientes. Chile, el país con más tradición minera de Sudamérica, comenzó a exigir planes de cierre a partir de Noviembre del 2012 (3) El abandono de minas era una práctica común. Esas minas abandonadas hoy son un problema heredado por las comunidades locales y gobiernos nacionales que deben convivir con ellas e invertir en su cierre o al menos minimizar los impactos ambientales que nunca fueron gestionados adecuadamente.

El cuidado del medioambiente, de la salud de los trabajadores y de los impactos sociales en las comunidades que rodean a las minas, comenzó a instalarse en la agenda política recién a partir de la década del ochenta. En parte, fue un logro de los avances científicos en ciencias ambientales y de la salud laboral, así como de los movimientos ambientalistas, gobiernos y sindicatos de obreros que obligaron a la modificación de las prácticas mineras. Hoy en día, existe una gran cantidad de regulaciones internacionales que dictaminan buenas prácticas. (4)

La mayor parte del complejo minero es de fácil recuperación, desde el desmantelado de la planta, la regeneración del suelo, y la revegetación de escombreras y piletas de relave, así como reutilización y modificación de la caminería. El área ocupada por la mina, ya sea a cielo abierto o subterránea, es más difícil de recuperar. Existen ejemplos exitosos de relleno de las mismas y recuperación del suelo. Por ejemplo las minas de Flambeau en Wisconsin, EE.UU. y Golden Cross en Nueva Zelanda. En muchos casos, donde las aguas que rellenan naturalmente las minas presentan composiciones químicas aptas para uso humano o agropecuario, pueden ser reutilizadas para almacenamiento de agua potable, piscicultura, turismo y agua para riego entre otros usos, generando así una nueva actividad económica para la zona que complementa las que existían previamente a la minería. Esto ocurre normalmente con las canteras de caliza, granitos y minas de hierro del mundo.

### Notas

1. Este artículo es una continuación de "Minería en Uruguay. Materias primas, minería y reciclaje en el mundo", publicado en la edición la N°18 de Uruguay Ciencia en julio de 2014.

2. Se llama beneficio de materiales al proceso industrial aplicado al producto de la extracción minera para mejorarlo física o químicamente, adecuándolo a determinado sector del mercado o a subsecuentes procesos de tratamiento.

3. Cierre de faenas en Chile: <http://www.sernageomin.cl/ambiental-cierre.php>

4. Normas NIOSH, EC en Canadá, Mining Safety and Health administration en EE. UU., LPSD, 2011 en Australia.



\* **Federico Cernuschi** es Licenciado en Geología por la Universidad de la República (UdelaR), Uruguay y MS en Geología Económica de Oregon State University (OSU). Actualmente es investigador asistente candidato a PhD en OSU y consultor en geología económica y geoquímica.  
[www.federicocernuschi.com](http://www.federicocernuschi.com)  
[federico.cernuschi@gmail.com](mailto:federico.cernuschi@gmail.com)

**Manuela Morales Demarco** es Licenciada en Geología por la UdelaR, Uruguay, PhD en Geociencias de la Georg-August-Universität Göttingen. Actualmente trabaja como Profesora Adjunta en Exploración Mineral, Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias, UdelaR y en ANCAP en exploración y producción.  
[manugea@gmail.com](mailto:manugea@gmail.com)

