



**COMPETENCIA SOBRE AGUA, ENERGÍA, MINERÍA
Y AMBIENTE**

11° CICLO – AÑO 2017

BIBLIOGRAFÍA 6° PROGRAMA:

TEMAS:

- 1) AGUAS SUBTERRÁNEAS**
- 2) ENERGÍA DE HIDRÓGENO**
- 3) ETAPAS DE LA ACTIVIDAD MINERA**

1 – Aguas subterráneas

Introducción

El agua es vida. Es un elemento esencial para el desarrollo de cualquier ser vivo de nuestro planeta. Lo es también para la agricultura, la industria y la ganadería.

El agua está en constante movimiento, tanto en la superficie como en la profundidad de la Tierra, dando lugar al ciclo hidrológico o ciclo del agua. Con la lluvia, el agua alcanza la superficie de la Tierra. Una parte muy pequeña de ella es absorbida por las plantas. Otra parte fluye hacia los ríos, lagos y océanos, mientras que el resto se infiltra bajo la superficie del terreno. Cuando una formación geológica es capaz de almacenar el agua entre poros y fracturas, recibe el nombre de *acuífero*.

Tarde o temprano, toda esta agua volverá nuevamente a la atmósfera, debido principalmente a la evaporación y la transpiración de las plantas. Al pasar del estado líquido al gaseoso, el agua deja atrás todos los elementos que pueden haberla contaminado en su estancia en la Tierra. Finalmente, al enfriarse este vapor, se forman nubes y la lluvia nos entrega un elemento limpio.

Las diferentes fases del ciclo hidrológico muestran el constante movimiento del agua en la superficie terrestre: la evaporación, la transpiración de la vegetación, la precipitación en forma de lluvia o nieve, la recarga de los acuíferos, la escorrentía a través de ríos y arroyos, la salida del agua dulce al mar... y vuelta a empezar.

Las **aguas subterráneas** forman parte del ciclo hidrológico. Parte del agua superficial, se infiltra naturalmente y llega a los acuíferos donde se acumula en forma dinámica ya que se mueve recorriendo grandes distancias. Es un recurso natural importante ya que comprende aproximadamente un 30% del total del agua dulce, y más del 90% del agua dulce no congelada en la hidrosfera. Aunque el agua subterránea es renovable, la tasa con la que se repone suele ser más lenta que la de su extracción. En áreas donde el agua subterránea es la fuente principal de abastecimiento, se la extrae mediante bombeo, con una tasa mayor que la de su reposición.

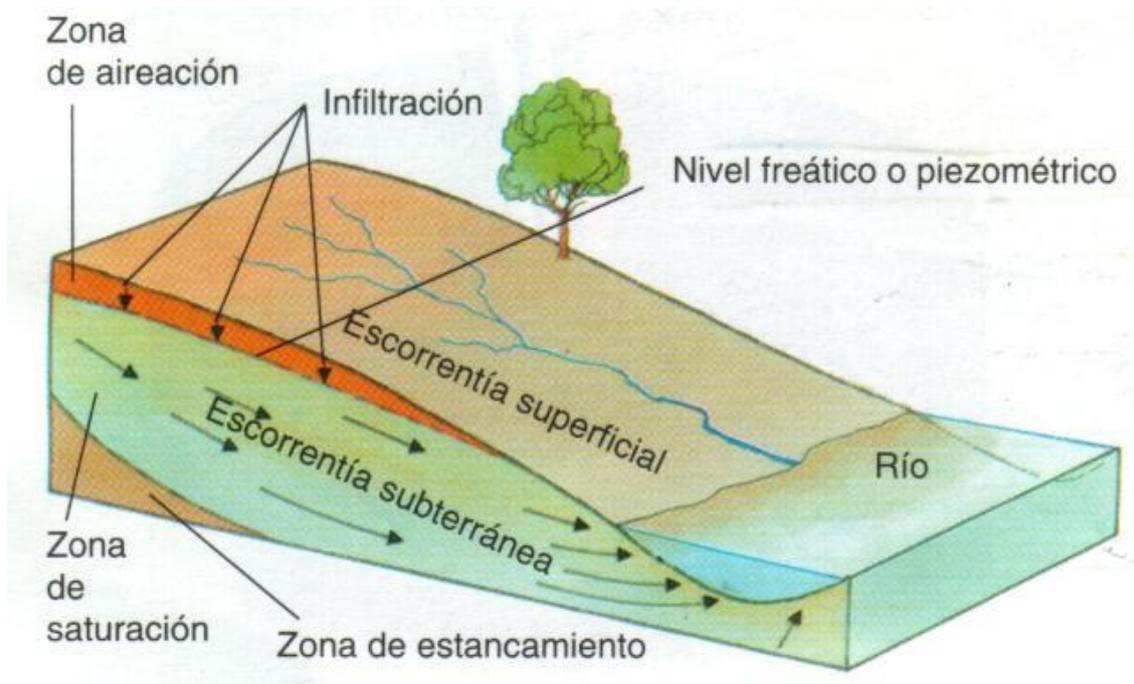
HIDROLOGÍA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El agua subterránea representa el mayor depósito de agua dulce que resulta fácilmente asequible a los seres humanos. Desde un punto de vista geológico, el agua subterránea es importante como agente erosivo. La acción disolvente del agua subterránea va minando lentamente las rocas solubles como la caliza, permitiendo la formación de depresiones superficiales denominadas dolinas, así como la creación de cavernas subterráneas. El agua subterránea es también un compensador del flujo de escorrentía y una forma de almacenamiento que mantiene las corrientes fluviales durante los periodos de ausencia de precipitaciones.

Cuando llueve, parte del agua discurre por la superficie, parte se evapora y el resto se adentra en el terreno. Esta última vía es la fuente primaria de prácticamente toda el agua subterránea.

Densas lluvias que caen sobre pendientes donde las capas suprayacentes están compuestas de materiales impermeables, provocaran obviamente un elevado porcentaje de agua de escorrentía. A la inversa, si la lluvia cae de manera suave y uniforme sobre pendientes más graduales, compuestas por materiales que son fácilmente penetrados por el agua, un porcentaje mucho mayor de agua se infiltrará en el suelo.

Algo del agua que se infiltra no viaja muy lejos, porque es retenida por atracción molecular como una capa superficial sobre las partículas sólidas. Una porción de esta humedad se evapora de nuevo a la atmósfera.



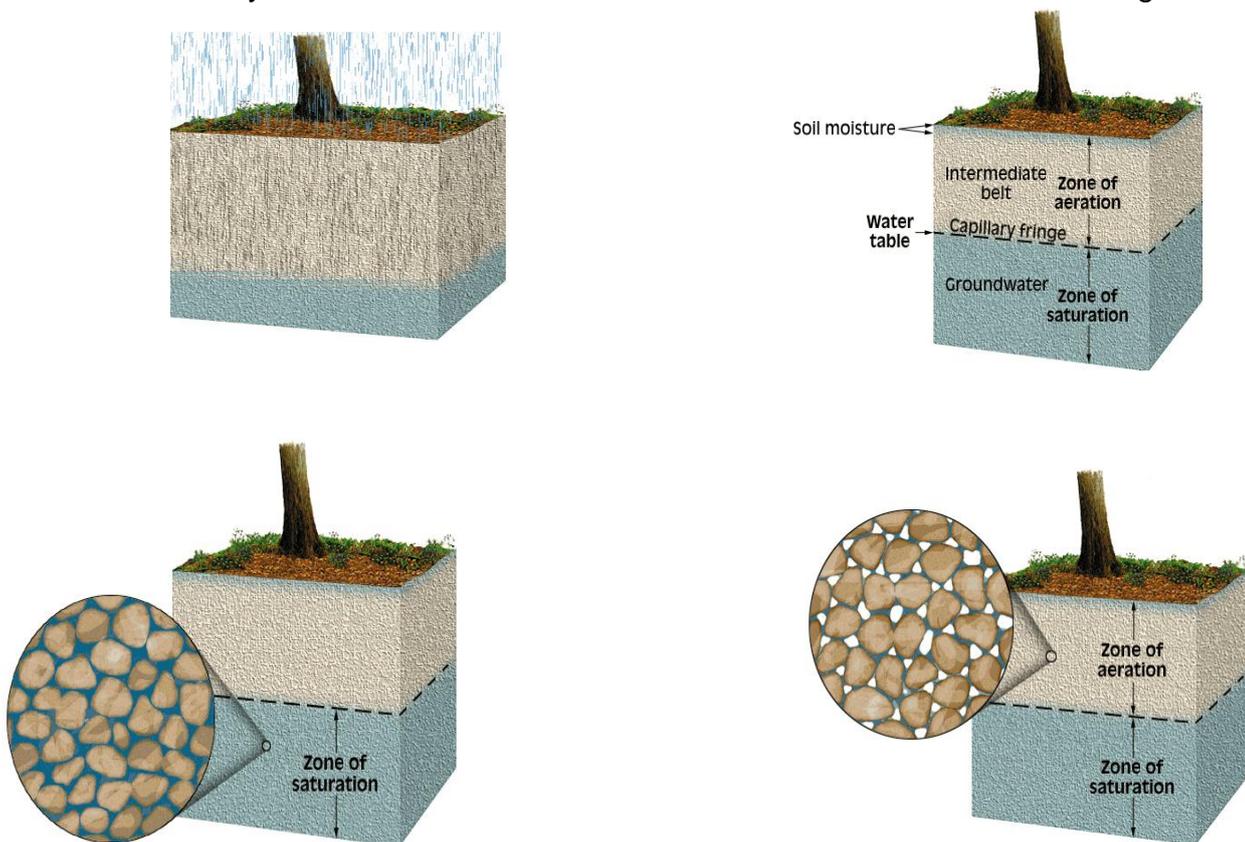
Acuíferos

Al drenar el agua por el suelo, fluye por la zona radicular y luego por otra llamada **zona no saturada** (también llamada **zona vadosa o zona de aireación**). Los poros del material geológico en la zona no saturada se llenan parcialmente de agua. La porción restante se llena de aire. El agua continúa su migración vertical por el suelo hasta llegar a un nivel en el que todos los espacios o poros del suelo se llenan de agua, la denominada **zona de saturación, zona saturada o zona freática**. El agua de la zona de saturación es el **agua subterránea**. La formación geológica por la cual el agua fluye horizontalmente y de la cual se bombea es el **acuífero**. La arena, arenisca y otras rocas sedimentarias son buenos acuíferos. También están presentes en otros materiales geológicos porosos, como la caliza, el basalto fracturado o el granito erosionado.

Acuíferos no confinados. El área superior de la zona de saturación en los acuíferos no confinados por materiales geológicos impermeables se llama nivel freático. A estos acuíferos también se los denomina acuíferos de **nivel freático, freáticos o no confinados**.

Los pequeños espacios en el material geológico justo arriba del nivel freático suelen contener agua, como resultado de fuerzas de interacción del agua con el suelo. El proceso de drenaje de agua por arriba de su nivel estático es la **acción capilar**. La zona en la que ocurre este fenómeno se denomina **franja capilar**. Aunque los poros de esta región están saturados de agua, no se la puede considerar como fuente de abastecimiento pues el agua no drena libremente por gravedad. En un acuífero no confinado el nivel freático puede variar significativamente con la precipitación pluvial y las estaciones. Por ejemplo en regiones de clima templado, donde en la primavera suele llover mucho y la fusión de la nieve y el hielo es significativa, el nivel freático está más cerca de la superficie del suelo. En contraste, cuando la tasa de infiltración es baja, como en la temporada seca o cuando la superficie está congelada, el nivel freático está más distante de la superficie. Este proceso de infiltración y migración que renueva el abasto de agua subterránea, es la **recarga**.

El **nivel freático**, el límite superior de la zona de saturación, es una característica muy significativa del sistema de aguas subterráneas. El nivel freático es importante para predecir la productividad de los pozos y explicar los caminos de flujo de las corrientes y los manantiales así como las fluctuaciones del nivel de los lagos.



Acuíferos elevados. Se trata de depósitos de agua por arriba del nivel freático circundante debido a una capa geológica impermeable, como un lecho rocoso o arcilla. Puede abarcar un área que va desde unos cuantos cientos de metros cuadrados hasta varios kilómetros cuadrados. La perforación de pozos en este tipo de acuíferos puede resultar incosteable, ya que el volumen de agua que contienen es relativamente pequeño, lo que origina que el pozo se “seque” después de un breve período de bombeo.

Acuíferos confinados. Los acuíferos delimitados arriba y debajo de la zona saturada por capas impermeables se denominan **acuíferos confinados**, y las capas limitantes, **estrato confinante**. Estos se clasifican como **acuicludos o acuitardos**. Si bien los primeros son en lo fundamental impermeables al flujo de agua, y los segundos son menos permeables que el acuífero, sin que sean realmente impermeables, es frecuente que estos dos términos se usen indistintamente.

Acuíferos artesianos. El agua de un acuífero confinado puede estar sometida a una presión considerable por la naturaleza impermeable de las capas de confinamiento, que restringen el flujo, o por diferencias de altura en el acuífero. Si el agua del acuífero está bajo presión, se le denomina **acuífero artesiano**. Este adjetivo se originó en la provincia francesa de Artois (Artesium, en latín), donde en tiempos del Imperio Romano el agua de los pozos fluía hasta la superficie del suelo. Cuando la presión en el acuífero es suficientemente alta para empujar el agua hacia arriba y rebasar los materiales geológicos del propio acuífero y la zona no saturada suprayacente hasta la superficie del suelo, el acuífero se conoce como **acuífero artesiano surgente o fluente**. El agua entra en un acuífero artesiano en un punto donde se intersectan los estratos confinantes con la superficie terrestre. Se trata

usualmente de un área de levantamiento geológico. La superficie expuesta del acuífero se llama **superficie de recarga**. El sistema es análogo a un manómetro: el acuífero artesiano está sometido a presión por la misma razón de que un manómetro pinzado, es decir, porque el área de recarga está a mayor altitud que el extremo inferior del estrato confinante superior, y de tal suerte, la altura del agua por arriba del estrato confinante ejerce presión sobre el acuífero. Cuanto mayor sea la distancia vertical entre la superficie de recarga y el extremo inferior del estrato confinante superior, tanto mayores serán la altura del agua y la presión.

Manantiales. Las irregularidades de los materiales geológicos subterráneos y de la topografía de la superficie terrestre hacen que la masa de agua en ocasiones intersecte la superficie del suelo o el lecho de corrientes, lagos u océanos. En estos puntos de intersección el agua subterránea fluye desde el acuífero y se forman lagos, corrientes o manantiales. El sitio donde el nivel freático rompe la superficie terrestre se llama **manantial gravitacional o de filtración**. Los manantiales pueden originarse en acuíferos confinados o no confinados.

Superficies y alturas piezométricas. Si se colocan pequeños tubos (piezómetros) en posición vertical dentro de un acuífero confinado, la presión del agua hace que ésta ascienda en los tubos, de igual modo que en los miembros de un manómetro, hasta el punto de equilibrio. La altura del agua en el tubo, llamada **altura piezométrica**, es una medición de la presión en el acuífero. La altura piezométrica se mide empleando el nivel de agua en el pozo. Un plano imaginario trazado por los puntos de equilibrio de varios piezómetros se llama **superficie piezométrica**. En los acuíferos no confinados el nivel freático es la superficie piezométrica. Si la superficie piezométrica de un acuífero confinado se sitúa por arriba de la superficie del suelo, un pozo perforado en dicho acuífero fluye naturalmente, sin bombeo. En este caso, el pozo penetra en el acuífero artesiano. El pozo no fluye sin bombeo cuando la superficie piezométrica está en un plano inferior a la superficie terrestre.

Los acuíferos son formaciones geológicas muy complejas y variables. Las variaciones en el flujo del agua subterránea ocurren de manera espacial en las direcciones horizontal y vertical. Los sistemas acuíferos también tienen cuencas o divisorias de aguas similares a las de las corrientes de superficie.

Flujo del agua subterránea

El movimiento de la mayor parte del agua subterránea es extraordinariamente lento, de poro a poro. La energía que hace mover el agua subterránea la proporciona la fuerza de la gravedad.

El agua fluye a lo largo de la superficie piezométrica de las áreas de mayor altura a las de menor altura.

Como se mencionó, la superficie piezométrica es el nivel freático en los acuíferos no confinados. Dicha superficie se calcula al restar la profundidad del agua por debajo de la superficie terrestre de una referencia predefinida. En muchos casos, el dato de referencia es la altitud del extremo superior del estrato confinante con respecto al nivel del mar o la profundidad bajo la superficie terrestre.

En muchas situaciones es necesario determinar la velocidad del flujo del agua, por ejemplo para predecir la tasa de migración de contaminantes en el agua subterránea. El hidrólogo *Henri Darcy* estudió el flujo de agua por columnas llenas de arena e inclinadas sobre uno de sus lados. Descubrió que la velocidad de flujo del agua subterránea depende del *gradiente hidráulico* y de una propiedad de los materiales geológicos llamada *conductividad hidráulica*.

El **gradiente hidráulico** es la diferencia en la altura piezométrica en dos sitios, dividida por la distancia entre esos sitios.

Puede conceptuarse la **conductividad hidráulica** como una medición de la facilidad con la que ocurre el flujo de agua a través de medios porosos (como la arena, grava, etc.). Por ejemplo, cabría esperar que el agua fluya más fácilmente por la grava que por arcilla muy fina. Dado este supuesto, la conductividad hidráulica de la grava sería alta; pero el agua no fluye fácilmente por la arcilla, que tendría conductividad hidráulica baja. Esta propiedad depende de otras características de los materiales geológicos, como el diámetro del grano y la porosidad.

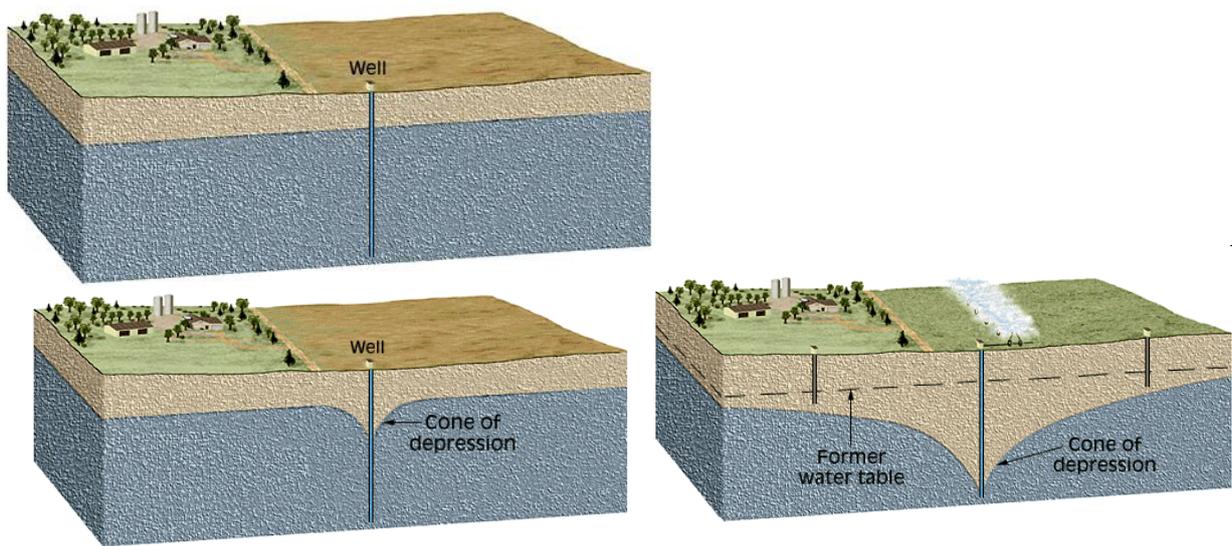
El agua subterránea como fuente de abastecimiento

El agua subterránea tiene varias características que la hacen aconsejable como fuente de abastecimiento de agua, en comparación con el agua superficial. En primer término, los sistemas subterráneos constituyen un almacenamiento natural, lo cual elimina el costo de tanques de almacenamiento, depósitos y otras estructuras. En segundo lugar, el abasto frecuentemente está disponible en el sitio de demanda, de modo que se reducen en forma significativa los costos de transporte del líquido. En tercer término, es importante destacar que los materiales geológicos naturales filtran el agua subterránea, más clara y menos turbia que el agua superficial, por consiguiente, el agua subterránea está menos sujeta a fluctuaciones estacionales y más protegida de la contaminación.

Sin embargo, a menos que se impongan mayores restricciones a fuentes de contaminantes del tipo de las instalaciones agrícolas grandes, rellenos sanitarios, fosas sépticas, gasolineras y operaciones de desechos riesgosos, las fuentes de agua subterránea estarán sometidas a una contaminación similar a la que afecta a las fuentes de agua superficial.

POZOS

El método más común para extraer agua subterránea es el pozo, un agujero taladrado en la zona de saturación. Los pozos sirven a modo de pequeños depósitos a los cuales migra el agua subterránea y de los cuales puede bombearse a la superficie. Cuando se extrae agua de un pozo, el nivel freático alrededor del pozo se reduce. Este efecto, denominado descenso de nivel, disminuye al aumentar la distancia desde el pozo.



Existen diferentes formas de acceso, o usos del recurso de agua subterránea.

- Captaciones domiciliarias de extracción manual o por bombeo.
- Captaciones por los servicios públicos de agua potable.
- Captaciones para embotellamiento (de aguas minerales o para fabricar gaseosas)
- Industrias que tienen alta demanda de agua y hacen sus propias perforaciones.

Problemas asociados con la extracción del agua subterránea

Como ocurre con muchos de nuestros valiosos recursos naturales, el agua subterránea esta siendo explotada a un ritmo creciente. En algunas zonas, la sobreexplotación amenaza la existencia del abastecimiento del agua subterránea. En otros lugares, su extracción a hecho que se hunda el terreno y todo lo que descansaba sobre el. En otros lugares hay preocupación por la posible contaminación del abastecimiento de las aguas subterráneas.

Muchos sistemas naturales tienden a establecer un estado de equilibrio. El sistema de aguas subterráneas no es una excepción. La altura del nivel freático refleja un equilibrio entre la velocidad de infiltración y la velocidad de descarga y extracción.

Contaminación del agua subterránea

Las aguas subterráneas suelen ser más difíciles de contaminar que las superficiales, pero cuando esta contaminación se produce, es más difícil de eliminar. Sucede esto porque las aguas del subsuelo tienen un ritmo de renovación muy lento. Se calcula que mientras el tiempo de permanencia medio del agua en los ríos es de días, en un acuífero es de cientos de años, lo que hace muy difícil su purificación.

La explotación incorrecta de las aguas subterráneas origina varios problemas. En muchas ocasiones la situación se agrava por el reconocimiento tardío de que se está deteriorando el acuífero, porque como el agua subterránea no se ve, el problema puede tardar en hacerse evidente. Los principales problemas son:

a) Por agotamiento del acuífero.

Un buen uso de las aguas subterráneas exige tener en cuenta que en los lugares en que las precipitaciones son escasas, los acuíferos se van cargando de agua muy lentamente y si se consumen a un ritmo excesivamente rápido, se agotan. Cuando se produce explotación intensiva, sequía u otras causas que van disminuyendo el nivel del agua contenida en el acuífero se derivan problemas ecológicos. Cuando estos acuíferos se encuentran en la costa, al ir vaciándose de agua dulce, van siendo invadidos por agua salada (*intrusión salina*) y queda inutilizados para el uso humano.

b) Por contaminación de las aguas subterráneas.

Se suelen distinguir dos tipos de procesos contaminantes de las aguas subterráneas: los "puntuales" que afectan a zonas muy localizadas, y los "difusos" que provocan contaminación dispersa en zonas amplias, en las que no es fácil identificar un foco principal.

Actividades que suelen provocar contaminación puntual son:

- Lixiviados de vertederos de residuos urbanos y fugas de aguas residuales que se infiltran en el terreno.
- Lixiviados de vertederos industriales, derrubios de minas, depósitos de residuos radiactivos o tóxicos mal aislados, gasolineras con fugas en sus depósitos de combustible, etc.

- Pozos sépticos y acumulaciones de purines procedentes de las granjas.

Este tipo de contaminación suele ser más intensa junto al lugar de origen y se va diluyendo al alejarnos. La dirección que sigue el flujo del agua del subsuelo influye de forma muy importante en determinar en que lugares los pozos tendrán agua contaminada y en cuales no.



La contaminación difusa suele estar provocada por:

- Uso excesivo de fertilizantes y pesticidas en la agricultura o en las prácticas forestales.
- Explotación excesiva de los acuíferos que facilita el que las aguas salinas invadan la zona de aguas dulces, por desplazamiento de la interfase entre los dos tipos de aguas.

Este tipo de contaminación puede provocar situaciones especialmente preocupantes con el paso del tiempo, al ir cargándose de contaminación, lenta pero continuamente, zonas muy extensas.

Depuración

Los acuíferos tienen una cierta capacidad de autodepuración, mayor o menor según el tipo de roca y otras características. Las sustancias contaminantes, al ir el agua avanzando entre las partículas del subsuelo se filtran y dispersan y también son neutralizadas, oxidadas, reducidas o sufren otros procesos químicos o biológicos que las degradan. De esta manera el agua va limpiándose.

Cuando la estructura geológica del terreno facilita una zona amplia de aireación, los procesos de depuración son más eficaces. También es muy favorable la abundancia de arcillas y de materia orgánica. En cambio en los depósitos aluviales o las zonas kársticas la purificación del agua es mucho más difícil y este tipo de acuíferos son mucho más sensibles a la contaminación.

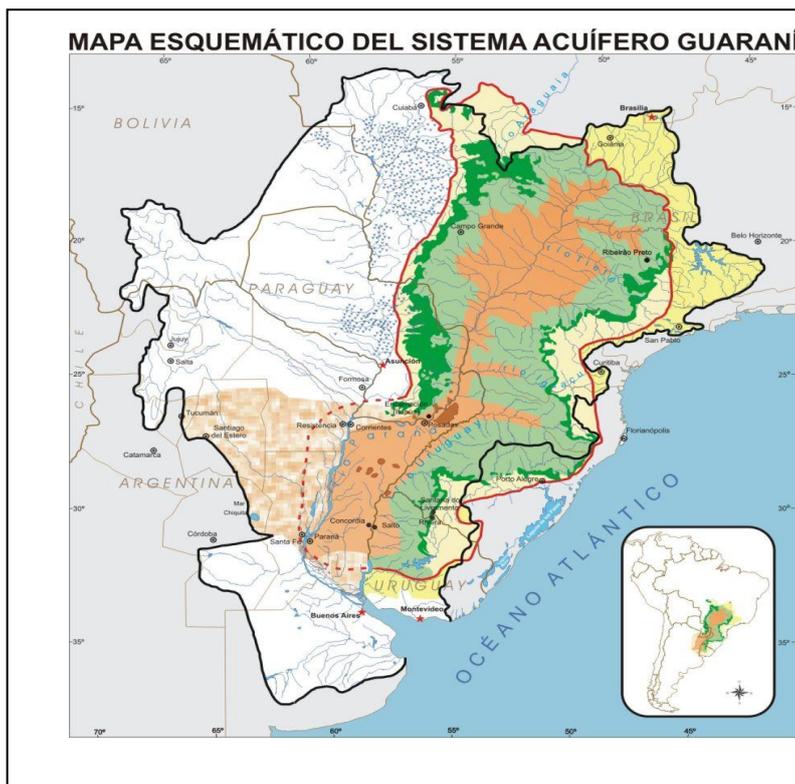
Es muy importante, de todas formas, tener en cuenta que las posibilidades de depuración en el acuífero son limitadas y que el mejor método de protección es, por tanto, la prevención. No contaminar, controlar los focos de contaminación para conocer bien sus efectos y evitar que las sustancias contaminantes lleguen al acuífero son los mejores métodos para poder seguir disfrutando de ellos sin problemas.

Cuando un acuífero está contaminado y hay que limpiarlo el proceso es muy difícil y muy caro. Se han usado procedimientos que extraen el agua, la depuran y la vuelven a inyectar en el terreno, pero no siempre son eficaces y consumen una gran cantidad de energía y dinero

El gran acuífero de la región

El denominado **Sistema Acuífero Guaraní** es uno de los reservorios de agua subterránea más grandes del mundo, encontrándose en el subsuelo de un área de alrededor de 1.190.000 kilómetros cuadrados (superficie mayor que las de España, Francia y Portugal juntas) por lo que también en un momento se lo denominó "el Acuífero Gigante del Mercosur". En Brasil abarca una superficie - en kilómetros cuadrados- de aproximadamente 850.000 (9,9% del territorio) en Argentina 225.000 (7,8%) en Paraguay 70.000 (17,2%) y en Uruguay 45.000 (25,5%).

La denominación **Guaraní** responde a que su extensión coincide aproximadamente con la Gran Nación Guaraní, población indígena que habitó en el lugar y que coincide aproximadamente con la situación geográfica de este sistema subterráneo.



El Acuífero Guaraní no coincide exactamente con la cuenca hidrográfica del Río de la Plata en los territorios de Argentina, Brasil y Uruguay. La cuenca geológica a la que pertenece el acuífero Guaraní extrapola los límites de la cuenca hidrográfica del río de la Plata, en por lo menos dos extensas regiones en Brasil: una franja al norte de Porto Alegre-RS (la cuenca Atlántica del río Jacuí) y otra en la región del alto río Araguaia. El acuífero Guaraní constituye una unidad hidrogeológica específica, cuyo inicio del proceso de formación está distante en el pasado geológico, hace ya centenares de millones de años.

De acuerdo a lo actualmente se conoce, salvo en la Argentina -que se encuentra a profundidades por debajo de los novecientos metros-, en los demás países se lo alumbraba a profundidades muy variables (entre los 50 y 1.500 metros). En general posee presión de surgencia, de manera que realizada una perforación, cuando se alcanza la profundidad del acuífero el agua se eleva naturalmente y en muchos casos emerge sobre el nivel del suelo; las temperaturas, producto de las profundidades alcanzadas (por gradiente geotérmico), van desde los 33° C a los 65° C.

Si bien el volumen total de agua almacenado es inmenso (37.000 kilómetros cúbicos, donde 1 kilómetro cúbico es igual a 1 billón de litros), en realidad el volumen explotable, estimado actualmente como reservas reguladoras o renovables, es de 40 a 80 kilómetros cúbicos por año. Estas cifras corresponden, por ejemplo, a una magnitud comparable en volúmenes a un tercio de la totalidad del escurrimiento del río Uruguay, y también representa 4 veces la demanda anual de agua de la Argentina para todos los usos. El país que más lo explota es Brasil.

En la Argentina hay explotaciones con perforaciones termales de agua dulce y una de agua salada, ubicadas en el sector oriental de la provincia de Entre Ríos, en tanto que hacia el Oeste de la misma, se ha alumbrado sólo agua salada termal, con la consiguiente problemática del efluente salado. Se desconoce la existencia del

acuífero en el resto de las provincias donde se hallan en el subsuelo las unidades geológicas que lo podrían contener.

¿Donde se aloja el agua subterránea del Sistema Guaraní? En formaciones geológicas antiguas, correspondientes a los períodos Triásico, Jurásico y Cretácico Inferior, teniendo esas rocas edades entre los 200 a 132 millones de años. En esa época, en que aún estaban unidas África y Sudamérica, los depósitos comenzaron a desarrollarse en ambientes fluviales y lacustres conociéndose en la literatura geológica como formación Tacuarembó o también Piramboiá. Luego, como resultado de un clima más seco, se desarrolló un gran desierto de arenas bien seleccionadas (semejante al actual Sahara) que también abarcó la región, constituyendo posteriormente el acuífero principal del Sistema dentro de la formación geológica denominada Botucatu o Rivera. Todos estos sedimentos abarcaron dentro de la Argentina: el litoral y región chacopampeana norte y central resultando espesores variables entre los 200 metros y los 600 metros. Luego de esta etapa, y a través de grandes fracturas profundas, todos los sedimentos anteriores fueron cubiertos por coladas de lavas basálticas, que acompañaron la separación entre los continentes mencionados, constituyendo la efusión basáltica de mayor extensión mundial comprendiendo un millón de kilómetros cuadrados en los 4 países del Mercosur. Dejó volúmenes de rocas muy diversos: en Misiones más de 800 metros de espesor de coladas de lavas superpuestas, en la margen oriental entrerriana más de 600 metros, en tanto que la región Chaco-pampeana presenta escasos metros y con presencia irregular discontinua. El máximo espesor conocido de basaltos se registra en Brasil - Estado de San Pablo - con más de 1.900 metros. Luego de todos estos eventos geológicos, que permitieron en ese entonces la depositación de más de 1.000 metros de espesor de rocas en toda el área, se comienzan a producir y reactivar fallas y estructuras geológicas que en muchos sectores alteraron el orden estratigráfico establecido, las orientaciones originales y las alturas, sumado todo ello a los procesos erosivos actuando durante varios millones de años y la conformación de depósitos más modernos producidos en el Terciario y Cuaternario. En ese escenario, considerado geológicamente casi final, y muy parecido al actual, las rocas más permeables que afloraban comenzaron a llenarse de agua por infiltración desde la superficie (producto de las lluvias y ríos), circulando muy lentamente - en el orden de los pocos metros por día - desde las áreas de afloramiento (áreas de recarga) hacia las de hundimiento y confinamiento (áreas de tránsito y descarga). Este proceso comenzó en gran escala hace más de 20.000 años (cuando en las pampas vivía el gliptodonte y en Europa el homo sapiens habitaba en cavernas) y continua...

Las reservas permanentes de agua del Acuífero son del orden de los 45.000 km³ (45 trillones de metros cúbicos), considerando una espesura media del acuífero de 250 m y porosidad efectiva de 15%. Las reservas explotables corresponden a la recarga natural (media plurianual) y fueron calculadas en 166 km³/año o 5.000 m³/s, representando el potencial renovable de agua que circula en el acuífero. La recarga natural ocurre por medio de la infiltración directa de las aguas de lluvia en las áreas de afloramientos de las rocas del Guaraní; y de forma indirecta por infiltración vertical (drenaje), a lo largo de las discontinuidades de las rocas del paquete confinante sobre yacente, en las áreas donde la carga piezométrica favorece los flujos descendentes.

Uno de los principales problemas existentes es el riesgo de deterioro del acuífero en ocurrencia al aumento de los volúmenes explotados y del crecimiento de las fuentes de polución puntuales y difusas. Esa situación exige un gerenciamiento adecuado por parte de las esferas de los Gobiernos federal, estadual y municipal, sobre las condiciones de aprovechamiento de los recursos del Acuífero.

Acuíferos de Buenos Aires

La gran mayoría de los habitantes del área metropolitana de Buenos Aires desconoce la existencia de este importante recurso, a pesar de estar parado sobre él. El acuífero Puelche es una de las mayores reservas mundiales del principal insumo químico de la biosfera: El Agua. Lo cual no es poco en un mundo cada vez más sediento. Sin embargo esta importante fuente de agua subterránea está poco investigada, se encuentra ignorada, descuidada y nadie controla cómo y quién la contamina y sobre-explota.

- **1º acuífero o Napa freática:** se ubica desde 0 hasta los 10 m de profundidad con respecto a la superficie. Posee un techo (nivel freático) que fluctúa con el régimen de lluvias.
- **2º acuífero o Pampeano:** se encuentra aproximadamente entre los 10 y 40 metros por debajo del nivel del mar, de acuerdo a la cota del terreno. Suele estar semiconfinado a presión.
- **3º acuífero o Puelche:** se encuentra aproximadamente entre los 40 y 70 metros por debajo del nivel del mar, suele estar semiconfinado a presión. Está compuesto principalmente por Arenas finas y medianas.
- **4º acuífero o Paraná:** se encuentra aproximadamente entre los 70 y 160 metros por debajo del nivel del mar, suele estar semiconfinado a presión. Está compuesto principalmente por Arenas finas y fósiles marinos.
- **5º y 6º acuíferos ú Olivos:** se encuentran aproximadamente entre los 160 y los 410 metros por debajo del nivel del mar, suelen estar semiconfinados a presión.

Los acuíferos están conectados entre sí y con el ciclo hidrológico formando parte de un sistema hidráulico.

Estado de estos acuíferos

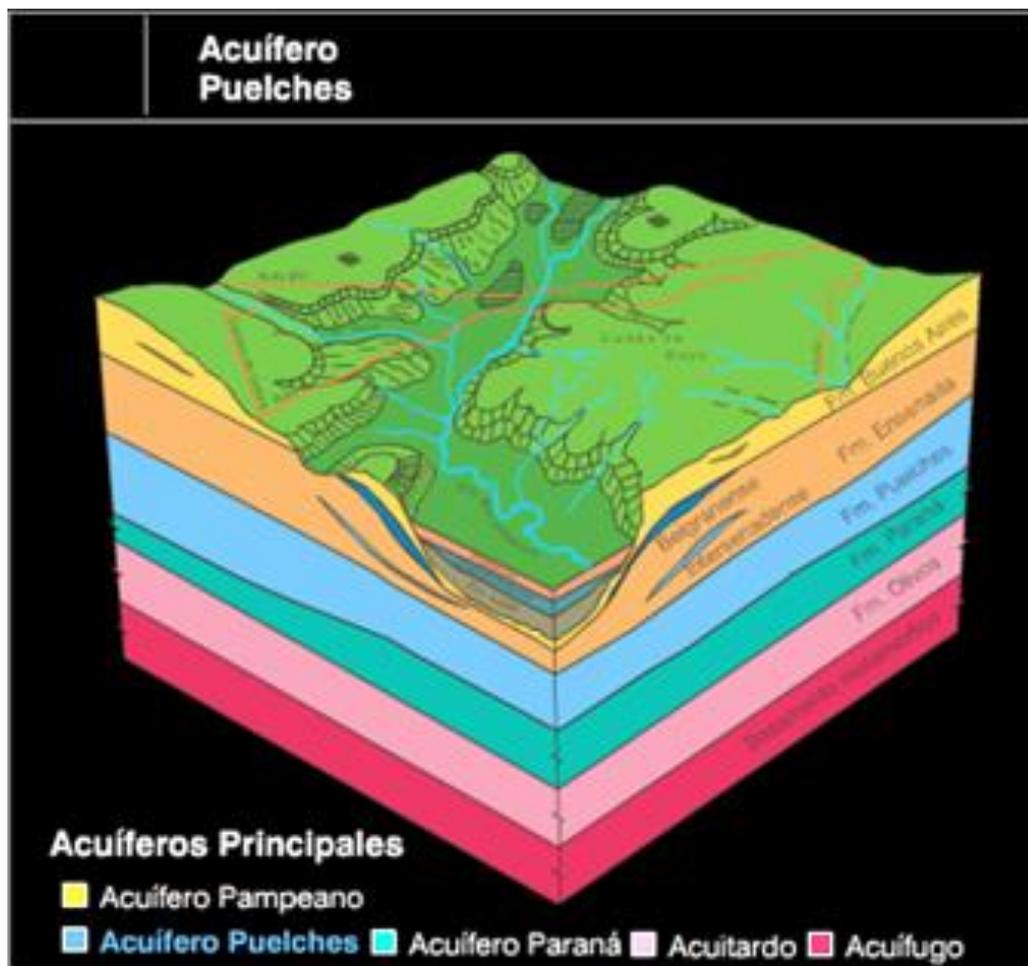
1º acuífero o Napa freática: En algunas zonas se encuentra agotada y en otras aflorando a veces como respuesta a períodos muy lluviosos, o por cese de la explotación de acuíferos inferiores a la misma. Son aguas en general de mala calidad por su contaminación química y bacteriológica con pozos sépticos domiciliarios. Su techo acompaña la morfología de la superficie. A veces emerge en forma de lagunas y en otras aparece a los 4 o 10 metros de profundidad.

2º acuífero o Pampeano: Es el primero con cierto grado de confinamiento ya que se encuentra limitado superior e inferiormente por sedimentos medianamente permeables. Los caudales de extracción que proporciona este acuífero son muy dispares y dependen de su emplazamiento. En cuanto a su calidad, las aguas de este acuífero son duras, (muchas veces con excesos de nitratos) y frecuentemente presentan contaminación bacteriológica y de elementos químicos provenientes de residuos industriales que son derivados a pozos filtrantes.

3º acuífero o Puelche: Es la segunda napa semiconfinada y su piso está formado por las denominadas arcillas verdes del Paraná (prácticamente impermeables), las cuales limitan la filtración vertical descendente. Pero su techo posee otro tipo de sedimentos (semipermeables) que le permiten la conexión hidráulica con los acuíferos superiores. Por su extensión, su fácil acceso mediante perforaciones, caudales y calidad química de sus aguas se ha convertido en el recurso hídrico subterráneo más explotado en el país, principalmente para consumo humano.

4º acuífero o Paraná: Proporciona caudales altos pero es de agua salada, a pesar de lo cual es explotado en algunas ocasiones para consumo industrial en lugares donde es más pronunciado el agotamiento o salinización del Puelche.

5º y 6º acuíferos ú Olivos: son salados y no se lo utilizan.



Acuífero Puelche

El acuífero Puelche alberga 300 billones de litros de agua, cantidad difícil de imaginar. Es una inmensa masa de agua pluvial (de lluvia) infiltrada en el suelo y contenida en un manto subterráneo de arenas y sedimentos porosos, que se ubica entre dos gruesas capas de sedimentos tirando a arcillosos y poco permeables. Se lo encuentra entre los 15 y 120 metros según el sitio de la llanura en que se ubique. Pero no bajo toda ella, sólo bajo la llamada “Pampa Ondulada”; es decir que ocupan una superficie de 230.000 kilómetros cuadrados del noroccidente bonaerense y el sudoccidente santafesino.

El Puelche llega hasta la mitad de la provincia de Santa Fe, este de Córdoba y NE de Buenos Aires hasta la Bahía de Samborombón. Hacia Córdoba se vuelve salado y hacia el Paraná es dulce. El agua que satura las Arenas Puelches proviene de las lluvias que percola desde arriba atravesando los sedimentos.

Esta especie de río subterráneo de agua y arena está en movimiento horizontal, a una velocidad de entre 2 y 10 metros por día: el acuífero se recarga de lluvia en su centro (más o menos la zona de Pilar) y se descarga hacia sus bordes, que son el Paraná y el Plata, por el Nor-Nordeste, y el río Salado, por el Sur.

Comienzos de su explotación

La Gran Aldea empezó a echar manos de él en épocas de Sarmiento, tras haber contaminado durante siglos la agua de las napas superficiales con sus pozos ciegos, una costumbre que se pagaba con epidemias a repetición de cólera y tifus.

Cuando surgió la primera red hídrica urbana del país, miles de aljibes de 10 metros de profundidad que abrevaban en el ya contaminado acuífero Pampeano cedieron paso a unas pocas estaciones bombeadoras gigantes que bajaban 20 o más metros hasta el Puelche. Se entendía que, apretado por arriba y abajo entre grandes capas de arcilla, el Puelche venía garantizado de fábrica contra contaminaciones desde la superficie.

Esto es parcialmente cierto, ya que el sistema multiacuífero Pampeano-Puelche está hidráulicamente interconectado en forma vertical. Esto quiere decir que el agua del Pampeano desagua verticalmente al Puelche a través de su capa de arcillas, aunque muy lentamente, a razón de dos milímetros por día. Es decir que el agua del Pampeano va recargando al Puelche sin prisa ni pausa.

En la década del 30, el Puelche empezó a ser sobreexplotado. A partir de 1940 la gente comienza a realizar pozos domiciliarios en el 2º acuífero (el Pampeano) y Obras Sanitarias de la Nación toma agua del 3º acuífero (el Puelche). Por lo tanto el sistema se empezó a deprimir y desapareció la primera napa y el agua se encontraba recién a los 30 metros. Por otra parte los pozos ciegos y cloacas que filtraban comenzaron a contaminar las napas.

Situación del Acuífero Puelche hacia 1980

Debido a la extracción intensiva del agua subterránea, se observan importantes fenómenos de depresión regional en las áreas más densamente pobladas. Esta sobre-explotación produjo efectos tan notorios como:

- Inversión de la circulación del agua subterránea: Naturalmente el agua escurría hacia el estuario del Río de la Plata, a fuerza de bombear desde el centro se había invertido dicha circulación; produciéndose el efecto contrario: el flujo subterráneo se dirige desde la costa hacia los centros poblados del Gran Buenos Aires.
- La inversión de la circulación subterránea del Puelche, también produjo el ingreso de agua salada (por la década del 30) provenientes de acuíferos costeros. La sal provenía del propio Puelche, pero de sus zonas de descarga (Bahía Samborombón y Río Salado).
- Depresión del nivel del recurso. El descenso de los niveles del acuífero desde los años 20, dio origen hacia 1980 a los grandes conos de depresión regionales, es decir zonas donde las napas están muy bajas o desaparecieron. Con lo cual los pozos tuvieron que bajar hasta 70 metros o más para encontrar agua.

Situación del Acuífero Puelche en la Actualidad

Algunos conos de depresión siguen existiendo en las zonas donde el agua subterránea sigue siendo una fuente importante de abastecimiento. Otros conos, en cambio sufrieron fuertes variaciones producto del traspaso en la fuente de abastecimiento domiciliaria. El abastecimiento por agua subterránea fue reemplazado por agua superficial del Río de la Plata, lo que trajo aparejado el rápido ascenso de los niveles de agua del acuífero Puelche y la desfiguración del cono afectado.

En algunas zonas sobreexplotadas se detecta un aumento de los contenidos salinos; debido al continuo avance del frente salino y a la infiltración descendente del Pampeano.

2 - ENERGÍA DE HIDRÓGENO

Introducción

"Sí, amigos míos, yo creo que el agua será empleada algún día como combustible. El hidrógeno y el oxígeno que la constituyen, utilizados aislada o simultáneamente, suministrarán una fuente de luz y de calor inagotables, dotadas de una intensidad de la que el carbón no es capaz [...] El agua será el carbón del futuro"

Julio Verne, "La isla misteriosa" (1874)

De esta manera respondía el ingeniero Cyrus, personaje de la novela de Julio Verne "La isla misteriosa", a la pregunta sobre lo que ocurriría si se agotara el carbón. De esto hace ya más de un siglo, pero parece que, como en otras ocasiones, el tiempo acabará dando la razón al escritor, tan amigo de imaginar el futuro.

En los últimos años el hidrógeno ha cobrado notoria relevancia como "combustible del futuro", ya sea a través de su combustión directa o mediante su utilización en celdas o pilas de combustible.

En los tradicionales motores de combustión interna, las celdas de combustible presentan la ventaja de convertir eficientemente la energía química de combustibles ricos en H₂ en energía eléctrica sin etapas intermedias de combustión y prácticamente con emisión cero de óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x).

Propiedades del hidrógeno

Incoloro, inodoro y no tóxico, el gas hidrógeno es el más sencillo de todos los elementos. Es un gas biatómico, inquieto y escurridizo, que condensa a -253° C (doscientos cincuenta y tres grados bajo cero). Es difícil de transportar, licuar y manipular con seguridad.

El átomo de hidrógeno común está formado sólo por un protón y un electrón. Como no tiene neutrones –las partículas sin carga pero con masa que mantienen unidos los protones en el núcleo– es también el elemento más ligero de todos, casi 15 veces más que el aire.

Responsable del brillo de las estrellas y fuente de la energía que recibimos del Sol, el hidrógeno es, además, el elemento más abundante del Universo: las tres cuartas partes de la materia cósmica son hidrógeno, que podríamos utilizar como combustible si estuviera a nuestro alcance. En Júpiter, se encuentra la acumulación de hidrógeno que tenemos más cerca, a millones de kilómetros de la Tierra.

En la Tierra prácticamente no existe hidrógeno en estado libre. Y es que es tan ligero que casi podríamos decir que no pesa: la fuerza de gravedad de nuestro planeta no puede retener un elemento con una masa tan insignificante, y el poco hidrógeno que se produce de manera natural –por ejemplo, el que contienen los gases volcánicos– se escapa rápidamente hacia la atmósfera. Si se encuentra unido a otros átomos, en particular al carbono en los hidrocarburos y al oxígeno en el agua, por consiguiente se debe consumir energía para separarlo.

Además de estar presente en el agua –de la que forma parte en una proporción del 11,19 % en peso– y de otros muchos compuestos químicos, como los ácidos o los alcoholes, el hidrógeno, esencial para la vida, forma parte de toda la materia orgánica, incluidas las personas, que somos un 10% hidrógeno.

Hay hidrógeno, por tanto, en la biomasa y el biogás; pero, sobre todo, en la biomasa. Rompiendo los enlaces de las moléculas que lo contienen mediante diferentes

tecnologías, se consigue producir hidrógeno y, una vez almacenado y transportado, utilizarlo como combustible o en otras aplicaciones.

El hidrógeno tiene una **elevada densidad energética en base másica** en comparación con el gas natural y la nafta, con lo cual el peso del combustible será menor en los tanques de almacenamiento, pero por otra parte el H₂ tiene una **baja densidad energética en base volumétrica** en relación por ejemplo con el gas natural, con lo cual se requerirán tanques de almacenamiento muy grandes y pesados o bien almacenarlo en otro estado (líquido o en forma de hidruros metálicos) lo que implica una tecnología muy sofisticada y costosa.

Debido a su alto contenido energético (en base másica) ha sido considerado como un vector energético alternativo con importantes ventajas medioambientales y de disponibilidad por sobre los combustibles fósiles tradicionales.

Sin embargo el carácter limpio y no contaminante del hidrógeno como combustible dependerá del proceso y la materia prima que se emplee para su obtención, como así también del origen de la energía requerida por dicho proceso.

Si se lo obtiene a partir de hidrocarburos, e independientemente de la tecnología empleada, se generan óxidos de carbono; por lo tanto la calificación de combustible "limpio" se pone en duda, a menos que se utilicen materias primas provenientes de la biomasa, la cual en su desarrollo consume dióxido de carbono.

Si se lo obtiene del agua, se debe recurrir a la electrólisis, tecnología que si bien no genera óxidos de carbono, consume importantes cantidades de energía en forma de electricidad. Y si esa electricidad se la obtuvo empleando combustibles fósiles, nuevamente las bondades del hidrógeno como combustible no contaminante se ven relativizadas.

Sin embargo si la electricidad que requiere la electrólisis proviene de represas hidroeléctricas, centrales nucleares, energía eólica, solar o biomasa, se puede decir que el H₂ es un combustible que no genera óxidos de carbono.

No obstante debe mencionarse que la combustión con aire en determinadas proporciones genera altas temperaturas de llama que pueden producir óxidos de nitrógeno.

Usos tradicionales y nuevos del hidrógeno

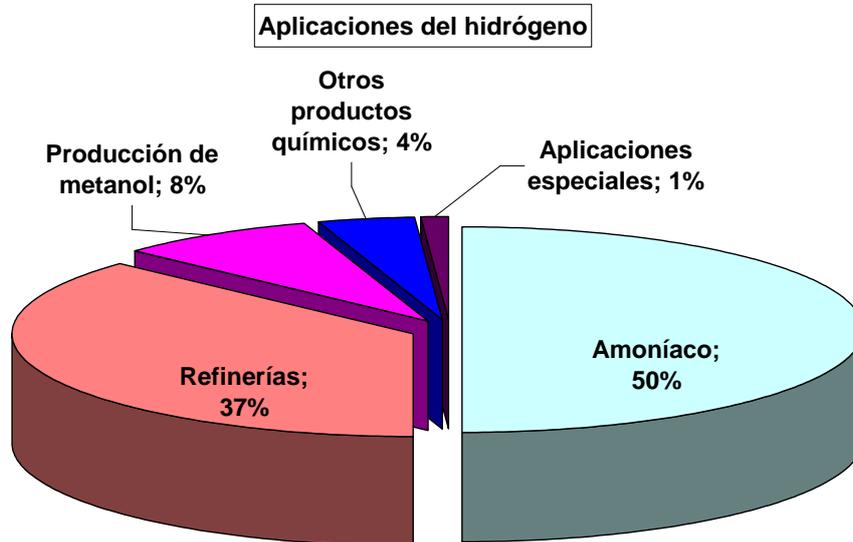
En el mundo se producen cada año alrededor de 50 millones de toneladas de hidrógeno.

Sin embargo, sólo una mínima parte de ese hidrógeno se utiliza para producir energía, principalmente en aplicaciones espaciales.

Casi la mitad se emplea para elaborar fertilizantes basados en amoníaco. También se utiliza hidrógeno en la fabricación de metanol y el agua oxigenada, así como para "hidrogenar" los aceites orgánicos comestibles derivados de la soja, los cacahuetes, los cereales y el pescado; también se usa para refrigerar motores y generadores.

Pero quien conoce bien al hidrógeno es la industria petroquímica, que lleva años utilizándolo como materia prima de una amplia gama de productos derivados del petróleo, principalmente en la síntesis de amoníaco y en la fabricación de peróxido de hidrógeno.

La utilización del hidrógeno como combustible abre a la industria del petróleo las puertas de un nuevo mercado, en el que, junto a las empresas especializadas en la producción y el suministro de gases, ocuparán un lugar privilegiado, por lo menos al principio.



¿Cómo se produce?

Desde el siglo XIX el hombre sabe cómo separar el hidrógeno y el oxígeno que forman el agua aplicando una corriente eléctrica. El proceso se llama, electrólisis y se trata de una tecnología conocida y tan sencilla que forma parte de los experimentos que se realizan en los colegios. La electrólisis, además, es limpia y produce un hidrógeno de gran pureza.

El 95% de la producción de H_2 es "cautiva" es decir, se consume en el mismo sitio de su producción. **Casi el 50% del H_2 producido mundialmente se obtiene a partir de gas natural y sólo un 4% por electrólisis.** El proceso más usado en el mundo para producir hidrógeno a gran escala es el reformado de hidrocarburos (principalmente gas natural) con vapor.

La electrólisis del agua permite obtener hidrógeno de alta pureza libre de óxidos de carbono, pero a un costo actualmente mucho más elevado que el del reformado con vapor de hidrocarburos.

La opción más barata a día de hoy es producir hidrógeno a partir de gas natural mediante la igualmente bien conocida tecnología del reformado con vapor, que consiste en romper las moléculas de gas con vapor de agua en presencia de un catalizador. Además, es también la opción menos contaminante a partir de combustibles fósiles con la tecnología actual, el gas natural parece el candidato en mejor posición para liderar la producción de hidrógeno en un futuro próximo.

Convertir el carbón en gas calentándolo hasta $900^{\circ}C$ es la forma más antigua de producir hidrógeno: así es como se obtenía el *gas ciudad*, que contenía hasta un 60% de hidrógeno.

La gasificación de carbón representa hoy el 18% de la producción mundial; y, como el carbón es un recurso abundante en muchas partes del mundo, podría seguir siendo una alternativa si se desarrollan tecnologías limpias. Y, en general, el reformado de todos los hidrocarburos y alcoholes: el 30% del hidrógeno que se consume en el mundo procede de la gasolina.

Pero el hidrógeno producido a partir de fuentes fósiles será siempre poco limpio –en su elaboración se emitirá CO_2 – y nada renovable, por lo que todos los sistemas basados en ellas serán, como mucho, tecnologías de transición.

¿Cómo se producirá?

Con agua y electricidad de origen renovable, coinciden los expertos. Pero también se investigan otras alternativas. Una posibilidad es la *fotoelectrólisis*, que básicamente consiste en sumergir en el agua una célula fotovoltaica fabricada con un material semiconductor que hace las veces de electrolizador. Combinando en uno los dos pasos de la electrólisis tradicional, se eliminan costos y se consiguen eficiencias un poco mayores.

Existen, sin embargo, dos tecnologías de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables que no incluyen electricidad, cuyo coste y, por tanto, viabilidad podrían ser interesantes a medio plazo. La primera incluye la gasificación de biomasa, un poco más cara que el reformado de gas, pero rentable donde la biomasa sea abundante y barata; y diferentes tratamientos de los análogos "bio" de los hidrocarburos y alcoholes: biodiesel, biogás y bioetanol.

La segunda opción es utilizar energía térmica de alta temperatura. Por eso también tiene muchas esperanzas puestas en el hidrógeno la industria nuclear, que trabaja en el desarrollo de nuevos reactores de alta temperatura para realizar lo que se conoce como hidrólisis térmica. Porque para separar el agua en hidrógeno y oxígeno sólo con calor hacen falta temperaturas de al menos 2.000 °C, difíciles de alcanzar con energía solar y casi imposibles de manejar.

Sin embargo, insertando una cadena de reacciones intermedias, la temperatura se rebajaría a unos 850 °C. Puede que en futuro no tan lejano ésta sea la forma de obtener hidrógeno "bueno, verde y barato" a partir de la energía solar.

Se han propuesto otras formas de obtener hidrógeno más o menos exóticas, desde la producción biológica por medio de microorganismos hasta la llamada electrólisis gravitacional, pero de momento sus resultados son puramente anecdóticos.

Un poco de historia

En 1766 el científico británico Henry Cavendish identifica el hidrógeno como algo diferente del oxígeno y describe el agua como un compuesto de estos dos gases.

En 1785, Antoine Lavoisier repite el experimento y da al "aire inflamable" de Cavendish el nombre por el que le conocemos hoy: hidrógeno, que significa en griego "generador de agua".

Menos de 10 años después los militares franceses construirían el primer generador de hidrógeno con el fin de utilizar el gas en globos de reconocimiento.

El hidrógeno comenzó a ser utilizado por la aviación en los años 20, cuando los alemanes decidieron utilizarlo como combustible secundario de los zepelín que cruzaban el Atlántico. Hasta entonces el hidrógeno servía sólo para mantener la fuerza de ascensión de dirigibles y globos. La historia acabó en 1937, cuando el tristemente célebre Hindenburg se incendió justo antes de aterrizar en Nueva Jersey (EEUU), en medio de una tormenta eléctrica, con un centenar de personas a bordo. Aunque 34 de los 36 fallecidos murieron al arrojarse por la borda aterrorizados y no quemados, aunque en



los primeros momentos las llamas eran anaranjadas y no de un tenue azul como son las del hidrógeno, aunque ni uno solo de los supervivientes había percibido el olor a ajo que se utilizaba para poder detectar un escape de hidrógeno, el mundo culpó de la tragedia al inflamable hidrógeno.

En 1997 Addison Bain, un científico de la NASA jubilado, hizo públicas las conclusiones de varios años de investigación sobre el accidente del Hindenburg: para aumentar la resistencia de la lona de algodón del zepelín se había aplicado a ésta un compuesto que contenía, entre otras sustancias, polvo de aluminio, un material altamente inflamable e inextinguible. Las conclusiones de Bain exculpan definitivamente al hidrógeno, pero el daño a su imagen, causado por 60 años de asociación a la tragedia, todavía no se ha reparado. Conseguir que la población conozca mejor a un gas inflamable, como todos los combustibles, pero no más peligroso que el resto y trasladar los protocolos de seguridad que han funcionado en la industria durante años a las nuevas aplicaciones del hidrógeno son dos de los principales retos a los que se enfrentan los expertos.

Hasta los años 50 ingleses y alemanes experimentaron con su uso en los motores de explosión de coches, camiones, locomotoras y hasta submarinos. Pero el hidrógeno ya tenía su leyenda negra. La segunda oportunidad llegó en 1973, con la crisis del petróleo, época en que los gobiernos dedicaron millones a la investigación en el potencial "sustituto del petróleo". Pero la crisis pasó.

Afortunadamente, en países como Canadá, EEUU, Alemania o Japón la industria –y en especial dos sectores, el aeronáutico y el de la automoción– nunca se detuvo. Y, cuando en 1992 el mundo empezó a preocuparse por un nuevo problema ligado al petróleo y el cambio climático, ya teníamos mucho camino andado. Gracias a ellos hoy no partimos de cero.

Hidrógeno como combustible vehicular ¿por qué?

Para empezar, porque es un buen combustible, capaz de proporcionar más energía por unidad de masa que cualquier otro combustible conocido: 33,3 kWh por kg, frente a los 13,9 kWh del gas natural o los 12,4 kWh del petróleo, por ejemplo. Se trata también un combustible limpio a nivel local, que, cuando se quema, lo único que produce, además de energía, es básicamente vapor de agua, librándonos, entre otras, de las emisiones de CO₂, el principal gas de efecto invernadero.

Y gracias a la pila de combustible el hidrógeno es, además, un intermediario energético eficiente y tan versátil como la electricidad. Como todo buen vector energético, el hidrógeno, al igual que la electricidad, puede obtenerse a partir de un amplio abanico de recursos naturales utilizando prácticamente cualquier fuente de energía, con lo que no haría falta importarlo (siempre y cuando en su fabricación se utilizaran recursos y fuentes primarias de energía autóctonas y renovables).

Pero, por encima de todo, el hidrógeno puede almacenarse. Y esta capacidad de servir de almacén de energía, -que no tiene la electricidad- es la que da sentido al "despilfarro" energético y económico que, según algunos, supone la transformación de energía eléctrica en un hidrógeno cuyo fin es convertirse otra vez en (menos) energía eléctrica; y la que convierte al hidrógeno en el complemento ideal de las energías renovables, especialmente la eólica y la solar, que sólo funcionan cuando sopla el viento y hace sol: en las horas de baja demanda el viento y el sol se utilizarían no para cargar de energía unas aparatosas, contaminantes y siempre insuficientes baterías, sino para producir hidrógeno, que podríamos utilizar después en una pila de combustible para producir electricidad en casa o viajar en un coche "movido por el viento" sin necesidad de instalar un aerogenerador en el techo del vehículo. Con el apoyo del hidrógeno, las renovables se abrirán paso en el sector de

la automoción y se convertirán en las (verdaderas) sustitutas del petróleo. Ésa es la idea.

Existen numerosos ejemplos del marcado interés de los países industrializados en la utilización del hidrógeno como vector energético:

- El gobierno de EEUU ha invertido en 2003 1,7 billones de dólares en un programa a cinco años para comercializar autos a H₂ en 2020.
- La Unión Europea, en marzo de 2004 invierte 2,8 billones de dólares en un programa a 10 años para desarrollar pilas de combustible a H₂.
- El gobierno de Japón en 2003 duplicó su presupuesto del programa I&D (investigación y desarrollo) sobre pilas de combustible.
- Las fábricas de automóviles invierten billones de dólares en el desarrollo de vehículos a H₂.
- Las fábricas de automóviles y empresas de energía han montado estaciones de servicio experimentales de H₂ en diversas partes del mundo.
- El Departamento de Energía de Estados Unidos ha dispuesto en 2015 u\$s 35 millones para avanzar en las tecnologías de pilas de combustible e hidrógeno. Esta oportunidad de financiación acelerará la innovación estadounidense en el hidrógeno y las pilas de combustible mediante el apoyo a proyectos de investigación y desarrollo, a proyectos demostrativos y al despliegue de los mercados de pilas de combustible.
- Toyota ha presentado oficialmente el Fuel Cell Sedan, un automóvil de pila de combustible y diseño futurista que salió a la venta en 2014, con un nivel de pedidos que superó las expectativas de sus directivos. La compañía se ha comprometido a bajar año a año los precios de los vehículos con esta tecnología hasta llegar a unos u\$s 20.000 en 2025.
- China acaba de anunciar la fabricación de un tranvía que funciona con una pila de combustible alimentada por hidrógeno.

Un almacén de energía difícil de almacenar

Por las propiedades físicas del hidrógeno, almacenarlo supone todo un reto, sobre todo cuando se trata de hacerlo en un contenedor pequeño, ligero, seguro y barato, como tiene que ser el depósito de un automóvil. Puede parecer extraño, cuando se sabe que un kilo de hidrógeno genera la misma energía que casi tres de gasolina.

Sin embargo, ese kilo ocupa mucho volumen, por lo que la cantidad de energía que aporta el hidrógeno por unidad de volumen es bajísima. Tan baja que, de utilizar hidrógeno sin "tratar", los coches serían "depósitos con ruedas" o se quedarían sin combustible casi antes de arrancar. Para almacenar 4 kg. de hidrógeno, (cantidad que consume un coche a pila en una distancia de 400 km) se necesitaría un depósito equivalente a un globo ¡de más de 5 metros de diámetro!

Naturalmente, la solución al problema pasa por reducir el volumen del hidrógeno como se reduce el volumen de todos los gases: comprimiéndolo, o enfriándolo hasta licuarlo. Técnicamente, lo más sencillo es comprimirlo a una presión de 200-350 bares, pero el hidrógeno sigue ocupando muchísimo: a 200 bares, almacenar los 4 kg exigiría un depósito de 250 litros.

El desarrollo de nuevos materiales –composites de fibras de carbono con polímeros o aluminio, por ejemplo– está permitiendo almacenarlo a presiones de hasta 700 bares, que permiten almacenar mayor cantidad con menos volumen.

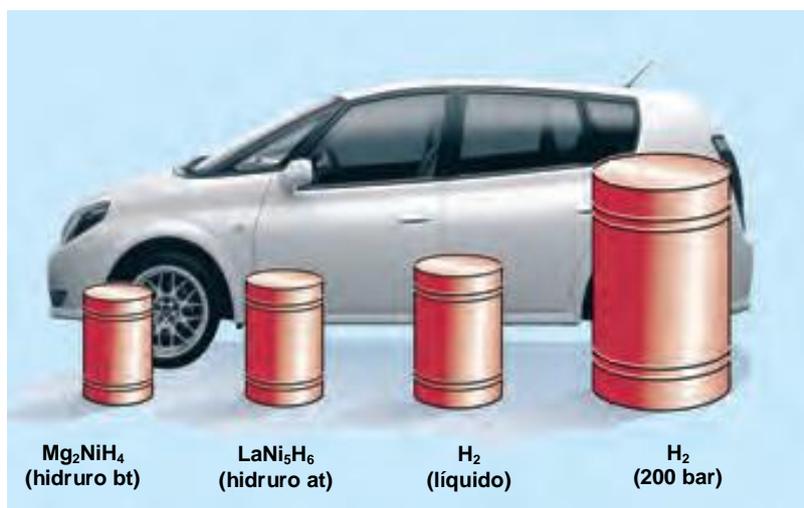
En estado líquido, el hidrógeno ocupa 700 veces menos que a temperatura ambiente y a presión atmosférica, pero se necesita frío, mucho frío, para alcanzar los 253 °C bajo cero que necesita el hidrógeno para cambiar a este estado. Y para generar tanto frío hace falta, cómo no, energía: el 30-40% de la que obtendríamos de ese hidrógeno. Aun así, un coche típico necesitaría un depósito de más de 100 litros de capacidad para mantener iguales prestaciones que uno de gasolina y añadiríamos el problema que supone mantener líquido el hidrógeno a pesar de la temperatura ambiente exterior.

En los últimos años se está investigando mucho en sistemas más eficientes. Hasta la fecha, las dos alternativas que más convencen son el almacenamiento del hidrógeno en hidruros metálicos y en nanotubos de carbono. Los hidruros metálicos son combinaciones del hidrógeno con ciertos metales o mezclas de metales, que se obtienen enfriando la mezcla metálica e introduciendo hidrógeno a presión. El atractivo de este sistema radica en que la reacción es reversible: calentando el hidruro y disminuyendo la presión, el hidrógeno se libera y puede ser utilizado como combustible. Es una forma de almacenamiento estable y segura, pero tiene el inconveniente de que los hidruros que operan a baja temperatura –que pueden liberar el hidrógeno a sólo 40-90 °C y tienen mayor capacidad de almacenamiento– son muy lentos y pesados, por lo que resulta más adecuada para otras aplicaciones.

Los nanotubos de carbono, que almacenan hidrógeno con mejor eficiencia y pueden operar a temperatura ambiente, pueden llegar a ser la solución. Pero aún queda mucho por hacer en este aspecto.

De momento, algunas marcas han optado, como solución transitoria, por incorporar en el vehículo un reformador que convierte en hidrógeno otro combustible primario que ocupe menos –metanol o gasolina, por ejemplo– mientras el coche anda.

El volumen de 4 kg de H₂
Según el método de compactación y en relación con el tamaño de un coche



LA PILA DE COMBUSTIBLE

¿Qué es una pila de combustible?

Una pila de combustible es una especie de batería de alta tecnología que convierte la energía química del combustible que la alimenta en energía eléctrica. Pero hay una gran diferencia: una batería común almacena en su interior la energía química que convierte en electricidad; cuando se termina esa energía química, la batería se tira; o, en el mejor de los casos, se recarga en un largo y tedioso proceso. La pila de

combustible, en cambio, convierte en electricidad la energía química de un combustible que recibe del exterior y **es capaz de suministrar energía eléctrica de forma continua mientras se mantenga el aporte de este combustible**. Uno de los reactivos de la pila es siempre el oxígeno, que actúa como oxidante en el cátodo y que, dada su disponibilidad en el aire, generalmente no es necesario almacenar.

El combustible propiamente dicho es habitualmente el hidrógeno, que –suministrado de forma directa o a partir del reformado de un primer combustible (metanol o etanol, por ejemplo)– alimenta la pila.

La mayoría de las pilas de combustible son, en realidad, una suma de pilas individuales, que reciben el nombre de células o celdas de combustible.

Un mismo principio, cinco tipos de pilas

Aunque el funcionamiento de todas las pilas de combustible responde al mismo principio fundamental, entre ellas existen notables diferencias de diseño, características de operación y potencia. Así, se pueden encontrar desde pilas de 1w que funcionan a temperatura ambiente hasta módulos de 250 kW que operan a 1.000 °C de temperatura. La clasificación habitual de las pilas de combustible está basada en el tipo de electrolito que utilizan, ya que éste determina características fundamentales de la pila, y, en consecuencia, sus posibles campos de aplicación.

Las pilas tipo PEM son las que ofrecen mayor flexibilidad y versatilidad. Sus aplicaciones van desde la alimentación de pequeños aparatos portátiles, como radios y ordenadores, con potencias de 1 a 100 w, hasta sistemas de generación doméstica (1 a 5 kW) o residencial (200 kW), pasando por la alimentación del vehículo eléctrico. Las MCFC y SOFC tienen un enorme futuro como generadores de electricidad o de electricidad y calor, aunque su nivel de desarrollo, especialmente el de estas últimas, es mucho menor.

Tipo	Electrolito *	Ion de transporte **	Temperatura de operación (°C)
Membrana polimérica (PEM)	Polímero sólido	H ⁺	60-100
Alcalina (AFC)	Solución acuosa de (KOH)	OH ⁻	90-100
Acido fosfórico (PAFC)	H ₃ PO ₄ líquido	H ⁺	175-200
Carbonatos fundidos (MFCF)	Solución líquida de LiKCO ₃	CO ₃ ²⁻	600-1000
Óxidos sólidos (SOFC)	Y-ZrO ₂	O ²⁻	600-1000

* La membrana más utilizada en el tipo PEM es el naftión; KOH: hidróxido de potasio (potasa); H₃PO₄: ácido (orto)fosfórico; LiKCO₃: carbonatos de litio y potasio, aunque son posibles otras combinaciones de carbonatos alcalinos; Y-ZrO₂: óxido de zirconio (zirconia) estabilizado con una pequeña cantidad de itrio; un material cerámico.

** ion que se desplaza de un electrodo a otro. En las de los tipos PEM y PAFC las cargas positivas que se han formado en el ánodo se desplazan hasta el cátodo, donde reaccionan con el oxígeno; en el resto de los tipos ocurre lo contrario: son los iones negativos los que atraviesan el electrolito para combinarse con el hidrógeno.

Fuente: Los Alamos National Laboratory



Pila de combustible de los autobuses de Madrid y Barcelona

COCHES Y AUTOBUSES A PILA

Los autobuses que ya circulan por Madrid y Barcelona son un ejemplo de las ventajas de una tecnología que se presenta como una alternativa real, limpia y silenciosa a los actuales motores de combustión interna. Así se moverán también algún día las motos, los camiones, los submarinos y hasta los aviones; pero, sobre todo, los coches.

En los últimos diez años DaimlerChrysler, Ford, General Motors/Opel, Honda, Hyundai, Mazda, Mitsubishi, Nissan, Peugeot-Citroen, Renault, Honda, Toyota y Volkswagen han desarrollado al menos un prototipo de coche a pila cada uno. Alimentados por diferentes combustibles (hidrógeno frente a metanol o gasolina con bajo contenido en azufre reformados) y con sistemas de almacenamiento diversos (hidrógeno gaseoso, líquido e incluso combinado en hidruros metálicos), todos ellos se mueven parcial o totalmente gracias a la electricidad que genera una pila tipo PEM, que es la más utilizada en automoción. Además de por su tamaño y una buena relación potencia/volumen, porque la baja temperatura a la que funciona permite que el coche arranque rápidamente y que responda de forma inmediata a las variaciones de demanda energética del motor, habituales durante la conducción.

El objetivo de la Unión Europea es que en 2020 se muevan con pilas de combustible alimentadas por hidrógeno el 2% de los coches europeos.



El primer vehículo en serie alimentado con hidrógeno

El Mirai, palabra japonesa que significa futuro, es el primer vehículo de propulsión a hidrógeno fabricado en serie en el mundo. Lanzado a fines de 2014 en Japón con un nivel de pedidos que superó ampliamente lo planificado, el Mirai se presentó en Estados Unidos y Europa en el mes de octubre de 2015.

El Mirai incorpora el TFCS (Toyota Fuel Cell System), una fusión de la tecnología de celdas de combustible con la tecnología híbrida, que alcanza una mayor eficiencia energética que la de los motores de combustión interna y se caracteriza por emitir solamente vapor de agua. La eficiencia de generación eléctrica asegura la generación uniforme de electricidad en la superficie de las celdas, lo que da lugar a un tamaño compacto y un alto rendimiento, así como una densidad energética de primera clase, de 3,1 kW/L.

Alcanza una potencia máxima de 114 kW y posee la comodidad y una autonomía del mismo nivel que los vehículos con motor de combustible fósil, así como un tiempo de recarga de hidrógeno de unos tres minutos y una autonomía de entre 550 y 650 kilómetros.

El sistema propulsor del Mirai lo componen, a grandes rasgos, los siguientes elementos: un motor eléctrico, una pila de combustible, dos depósitos de hidrógeno y una batería.

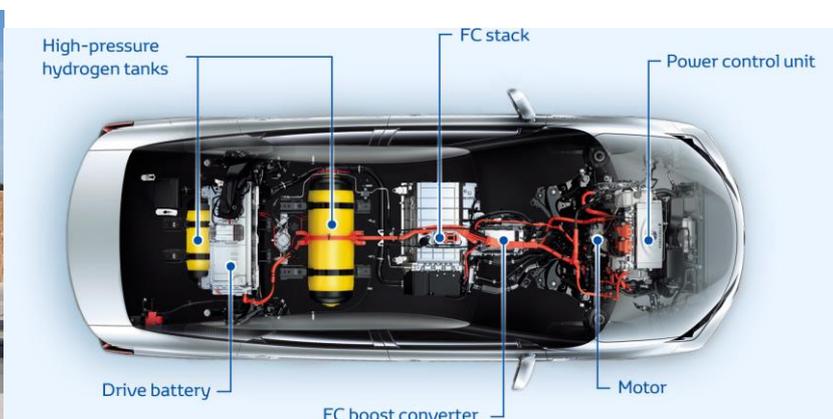
Por el momento este avance tecnológico es prohibitivo: unos 66.000 euros (sin impuestos) en Alemania, Dinamarca y Reino Unido, únicos países europeos con una red mínima de “hidrogeneras” (estaciones de abastecimiento de hidrógeno) que haga viable su comercialización. Pero lo importante del Mirai es que confirma la madurez técnica de la pila de combustible como alternativa viable a medio plazo para lograr la sostenibilidad del automóvil.

Toyota quiere que el Mirai repita el papel que hizo su modelo “Prius” un auto híbrido (eléctrico-naftero), pero en el hidrógeno. El Prius lleva vendidos ocho millones de coches con esa tecnología desde 1997. Ahora, casi 20 años después, el nuevo pionero ha empezado el camino con buen pie dentro de su modestia: estaba previsto hacer 700 unidades en 2015 y 1.000 en 2016, pero la demanda en Japón ha obligado a subir a 2.000 ya el año que viene.

El motor eléctrico está colocado por delante del eje delantero. La electricidad que lo alimenta proviene principalmente de la pila de hidrógeno, que está ubicada bajo los asientos delanteros. El oxígeno se obtiene del aire y el hidrógeno de dos depósitos, colocado uno bajo los asientos traseros y otro por detrás de ellos (a la altura del eje trasero). En total, pueden almacenar «aproximadamente» 5,0 kilogramos de hidrógeno a 700 bares de presión.

La pila de combustible del Mirai está formada por 370 celdas, y cada una incluye dos electrodos separados por una membrana. Su funcionamiento podría resumirse así: el hidrógeno (H_2) del depósito entra por el electrodo positivo (ánodo) y el oxígeno del aire (O_2) por el negativo (cátodo). Al interactuar ambos elementos, las moléculas del hidrógeno desprenden sus electrones y forman la corriente eléctrica, que se potencia a 650 voltios antes de llegar al motor eléctrico para mover el coche. Lo que queda del hidrógeno es un protón que viaja al cátodo y, al encontrarse con el oxígeno, forma el agua (H_2O) que sale por el escape. La recarga de los 5,6 kilos de hidrógeno lleva de tres a cinco minutos.

De acuerdo con el ciclo de homologación NEDC, el Mirai consume una media de 0,76 kilogramos de hidrógeno por cada 100 km y tiene una autonomía de 550 kilómetros. La batería es de tipo NiMH (níquel e hidruro metálico) y tiene una capacidad de 1,6 kWh Toyota da una garantía de 5 años o 100 000 kilómetros para todos los elementos relacionados con el sistema de hidrógeno y de 3 años o 100 000 kilómetros para el resto de componentes.



Un abanico de aplicaciones

Los dispositivos electrónicos portátiles son otro de los posibles campos de aplicación de las pilas de combustible. Como sus requerimientos de potencia y energía son mínimos, las micropilas PEM y las alimentadas por metanol directamente se perfilan como la mejor alternativa. Ordenadores portátiles, cámaras, teléfonos móviles o PDAs mejoran



ostensiblemente si son alimentados con una pila de este tipo, ya que éstas duran más que las baterías convencionales. Por eso grandes empresas como Motorola, NEC o Toshiba están apostando fuertemente por esta tecnología.

Pero hay más. La alta eficiencia de las pilas de combustible, su funcionamiento silencioso y sus nulas o bajas emisiones permiten que se puedan instalar minicentrales cerca e incluso dentro de los núcleos de población, de manera que cada barrio podría generar su propia energía y desconectarse de la red eléctrica. Una buena noticia también para poblaciones aisladas y grandes superficies como fábricas, hospitales, edificios públicos, hoteles o urbanizaciones, que contarían con un suministro continuo y seguro de energía y calefacción.

Aspectos de Seguridad del Hidrógeno:

- No detona al aire libre.
- No se descompone.
- No entra en autocombustión o combustión espontánea.
- No oxida.
- No es tóxico, a menos que contenga impurezas (CO, As H3 , etc.).
- No es corrosivo.
- No es radiactivo.
- No emana mal olor.
- No es vehículo de transmisión de enfermedades.
- No compromete o pone en peligro el agua.
- No causa perjuicio al feto (no es teratogénico).
- No produce cáncer (no es cancerígeno).

Los aspectos más destacados del **H** en lo que hace a la seguridad, siempre han sido su inflamabilidad y su “flotabilidad”. El **H** es altamente inflamable, lo que significa que reacciona fácilmente con el oxígeno y cuando quema produce agua. Es precisamente esta característica lo que lo hace muy adecuado como combustible limpio.

El **H** no tiene mucha más peligrosidad que el petróleo, el gas natural o la nafta. Con la debida atención a sus propiedades físicas y químicas y a las reglas del manejo seguro, el **H** no es particularmente peligroso. En ambientes cerrados deben preverse buena ventilación y precauciones adicionales de seguridad. La industria química ha usado Hidrógeno durante cien años y las experiencias relativas a su seguridad son positivas.

VENTAJAS MEDIOAMBIENTALES

La pareja hidrógeno-pila de combustible es una gran aliada de la naturaleza. La oxidación del hidrógeno –sea en un motor de explosión, sea a través de una pila– no genera emisiones de SO₂, hidrocarburos no quemados y, sobre todo, CO₂. Por el tubo de escape de un coche a pila sólo sale vapor de agua. Las altas temperaturas que se generan en el interior de un motor térmico provocan la formación de óxidos de nitrógeno (NOx), que, sin embargo, pueden reducirse con ayuda de catalizadores que disminuyan la temperatura del proceso.

La eficiencia de la pila permite también reducir el número de emisiones de CO₂ y otras sustancias aunque se empleen combustibles menos limpios que el hidrógeno: como, para el mismo número de kilómetros, un coche a pila necesita menos

combustible que uno con un motor tradicional, en su recorrido habrá emitido menos contaminantes.

Dado que el **H₂**, en contraste con otros combustibles, permite mayor libertad en los procesos de combustión, es posible disminuir las emisiones de NO_x en comparación con las producidas por la combustión del gas natural o el petróleo. Para alcanzar este propósito se puede lograr una baja intensidad calorífica mediante el empleo, por ejemplo, de alta admisión de aire en la combustión.

El **H** es también un transportador secundario de energía (carrier) y nos ofrece la posibilidad de introducir la alternativa flexible y diferente de acumulación de las energías renovables en el mercado de los combustibles.

Legislación y desarrollo de la tecnología en Argentina

En Agosto de 2006 se promulgó y sancionó la Ley 26.123 de promoción del hidrógeno, declarando de interés nacional el desarrollo de la tecnología, la producción, el uso y aplicaciones del hidrógeno como combustible y vector de energía.

En el Capítulo I se declara de interés nacional el desarrollo de la tecnología, la producción, el uso y aplicaciones del hidrógeno como combustible y vector de energía, y se promueve la investigación, el desarrollo, la producción y el uso del hidrógeno como combustible y vector energético, generado mediante el uso de energía primaria. La Ley regula, además, su utilización en la matriz energética. Sin embargo la ley todavía no pudo entrar en vigencia, ya que falta promulgar el decreto reglamentario y la autoridad de aplicación.

En Argentina hay indicadores que son favorables para que se desarrolle una “economía del hidrógeno”. Algunos de esos indicadores son:

Existe una gran experiencia en la industria, ya que hay en funcionamiento plantas de producción de hidrógeno y/o de gas de síntesis (mezcla de hidrógeno y óxidos de carbono) para producir fertilizantes, metanol, oxoalcoholes, hierro esponja, entre otros productos. Esto implica que tenemos recursos humanos en la industria con experiencia en el manejo de plantas de producción de hidrógeno.

Nuestro país es pionero en el empleo del GNC como combustible para vehículos, con lo cual existen recursos humanos con experiencia en la tecnología asociada al manejo de gases a alta presión.

En 2010 el Ministerio de Ciencia y Tecnología aprobó y financió un megaproyecto sobre producción, purificación, almacenamiento y aplicaciones del hidrógeno que tuvo una duración de cinco años e involucró a más de 200 investigadores y becarios distribuidos por todo el país, y también a empresas.

Argentina, junto con Brasil y España, son los tres países de Iberoamérica con mayor actividad en I+D en hidrógeno y pilas de combustible.

Esto significa que tanto en la industria como en los institutos de investigación y en universidades, existen recursos humanos (los recursos más importantes) con capacidad y experiencia para participar en desarrollos relacionados con el hidrógeno y para llevar a cabo emprendimientos vinculados con el hidrógeno como vector energético.

03 - ETAPAS DE LA ACTIVIDAD MINERA

Introducción

El progreso del hombre y la sociedad está indisolublemente unido al uso de los minerales. En la medida en que el ser humano fue aprendiendo a valerse de los minerales para su vida cotidiana fue desarrollando la inteligencia que lo caracteriza y llegó a la industrialización de estas sustancias, en forma cada vez más variada y compleja.

Tal vez lo primero que haya hecho el hombre primitivo con los minerales es usar las rocas como proyectiles, para cazar o para defenderse, y para dar golpes, a manera de martillo. Posteriormente se debe haber dado cuenta que apilando una piedra sobre otra podía construir una pared. Después aprendió a valerse de ciertas piedras que se podían «cantear» produciendo bordes filosos, como el pedernal, la calcedonia, el ágata, para confeccionar sus primeras herramientas y armas de caza, como puntas para flechas y lanzas, hachas y cuchillos. Con otras piedras duras y coherentes como los pórfidos y los granitoides confeccionó mazas y primitivos morteros y otros dispositivos para la trituración y molienda. El pedernal y otras rocas silíceas que producen chispas al rozarse, le permitieron encender fuego. El manejo del fuego tuvo una gran importancia y puede considerarse el comienzo de la industrialización, porque permitió entre otras cosas el desarrollo de la alfarería, «cocinando» piezas hechas con barro (arcillas con agua) de formas y tamaños cada vez más variados, fabricando recipientes y otros elementos muy útiles. El mismo fuego sirvió más adelante para descubrir que calentando cierto tipo de minerales se podían obtener metales como el oro, la plata, el cobre y el estaño. Con la mezcla de estos dos últimos se obtuvo el bronce, una aleación que revolucionó el mundo y permitió desarrollar la industria metalúrgica, fabricando gran variedad de manufacturas.



Después se desarrolló la industria del acero, una aleación mucho más dura y resistente que el bronce, hecha con minerales de hierro y carbón mineral. Entre otras cosas, la industria del acero, junto con la metalurgia del cobre y otros metales posibilitó la fabricación de las más diversas máquinas y vehículos autopropulsados. Con aleaciones metálicas se hicieron generadores de energía eléctrica, cables para su transporte y baterías para su almacenamiento. La industria del aluminio posibilitó hacer máquinas más livianas. El primer combustible usado para las máquinas y vehículos fue el carbón mineral. Luego sobrevino el aprovechamiento de los hidrocarburos, y se generalizó la fabricación de materiales plásticos hechos a base de petróleo o gas. No puede dejar de mencionarse el desarrollo de otras industrias como las del vidrio, la cal, el cemento, el aluminio, la cerámica, y muchísimas sustancias más, producidas a partir de materias primas minerales. Hoy en día, casi todas las cosas que tenemos y usamos se hacen con minerales.

CARACTERÍSTICAS DE LA MINERÍA: REALIDAD Y LEYENDA

Como toda actividad económica, la minería funciona sobre la base de normas y encuadres específicos de tipo legal, técnico y comercial.

La minería tiene algunas diferencias importantes con las otras actividades productivas. Esas diferencias son: la superposición de la propiedad minera con la del terreno, la existencia de una etapa de riesgo (exploración) y el carácter no renovable de los recursos.

Dejando de lado esas diferencias, el negocio minero funciona de la misma forma que cualquier otro negocio. Sin embargo, en la imaginación de mucha gente, se la suele incluir en un contexto de aventuras y leyendas, como si fuera una actividad totalmente dependiente del azar. El descubrimiento de una manifestación mineral puede ser un acto de suerte, pero no debe compararse con el hallazgo de un tesoro o con ganarse la lotería. La suerte es sólo una pequeña parte, como en cualquier actividad, pero el porcentaje mayor siempre corresponde al trabajo, la inteligencia, el esfuerzo, la dedicación y la perseverancia. Y no hay que olvidar que todo eso tiene un costo.

La imagen azarosa de la minería tiene una explicación lógica a partir de la información que a la gente le llega, como así también de la que no le llega. A través del cine, por ejemplo, se han mostrado muchas historias fantásticas con exageraciones y distorsiones que no se ajustan a la realidad. Las famosas «fiebres del oro» existieron en muchas partes, incluso en nuestro país. En todos esos casos, mucha gente terminó en la ruina, y los que lograron mantenerse lo hicieron en base a un trabajo muy duro e insalubre que sólo les permitió alcanzar el precario sustento personal y de su familia, a la espera de tiempos mejores. Otros relatos se refieren a la búsqueda de la mina abandonada o mina perdida. Cuando los buscadores encuentran la mina, festejan como si hubieran encontrado un tesoro y termina la película. En realidad el mundo está lleno de minas abandonadas. Y las minas se abandonan, lógicamente, cuando no dan ningún beneficio.

Tradicionalmente, cuando un negocio es muy bueno, se lo califica diciendo que «es una mina de oro». Falta explicar que, en la vida real, la mayoría de las minas de oro que se explotaron fueron un pésimo negocio en el que sus dueños terminaron quebrados.

Estos ejemplos se refieren deliberadamente al oro para corregir otra distorsión muy común referida a la importancia relativa de una sustancia con respecto a otra. De hecho, explotar un yacimiento de arena para la construcción es, normalmente, más sencillo y mucho mejor negocio que explotar una mina de oro. En general la población padece de una falta de información sobre la minería. En primer lugar, la mayoría de la gente no tiene oportunidad de ver minas porque casi siempre se ubican en lugares alejados de las ciudades y rutas más transitadas. En segundo lugar, la información que se recibe a través de las escuelas, es muy escasa e inadecuada para alcanzar un conocimiento mínimo razonable sobre el tema.

Por eso es importante explicar el significado de la palabra **mina**. De acuerdo al ordenamiento legal vigente en nuestro país, las autoridades mineras otorgan **minas** a cualquier ciudadano que las solicita con el solo requisito de que demuestren haber descubierto la presencia de un mineral determinado.

En este caso mina es, simplemente, el nombre de la propiedad minera, independientemente del valor económico del mineral. En consecuencia, no debe asociarse mágicamente a un concepto de riqueza, como a veces se hace. En cambio desde el punto de vista de la economía minera, debe hacerse la inversión necesaria para explorar ese descubrimiento y estudiar sus posibilidades hasta ejecutar un estudio de factibilidad que demuestre que ese mineral descubierto es explotable con beneficio. Una vez hecho y con resultados positivos, se está en condiciones de construir una **mina, en sentido económico**.

Al igual que en otros casos, existen explotaciones grandes, medianas y pequeñas, de modo que en este sector también hay empresas grandes y PYMES. Cuando la explotación minera se hace en forma individual y con métodos principalmente manuales (como por ejemplo la extracción de oro de arenas fluviales de la zona de La Carolina, San Luis) se prefiere hablar de minería artesanal.

Desde un punto de vista práctico, y atendiendo al destino que se da a los minerales, se acostumbra dividirlos en cuatro grupos:

1. Minerales metalíferos: Se utilizan para obtener un determinado metal
2. Minerales industriales: Se usan como insumos o materias primas para obtener sustancias o productos industriales.
3. Sustancias combustibles y minerales energéticos: Sirven para producir energía.
4. Rocas de aplicación y materiales de construcción.

ETAPA DE RIESGO MINERO O DE PREINVERSION

La actividad minera tiene dos etapas: la primera, de **riesgo minero**, y la segunda, de **negocio minero**, también llamada de explotación o de producción.

La etapa de riesgo comprende la búsqueda del mineral, su descubrimiento, la determinación de su cantidad y calidad, y el estudio de factibilidad de explotación. Desarrollar esta etapa no es fácil. Es necesario realizar trabajos y estudios (técnicamente llamados de prospección y exploración) que llevan su tiempo y tienen un costo. Con respecto al tiempo, por lo general esta actividad es de muy largo plazo.

La prospección y la exploración deben hacerse siguiendo sucesivos pasos, algo equiparable a un proceso de investigación cuyo avance se hace sobre la base de las conclusiones del paso anterior. Además, una vez que se termina la exploración aún quedan muchas cosas por estudiar y resolver, relacionadas fundamentalmente con la tecnología, la economía y las normas vigentes. Por ejemplo, en los casos de minas importantes como Cerro Vanguardia, Bajo de la Alumbrera o Veladero, desde que se descubrieron hasta que comenzaron a producir pasaron más de dos décadas. Otras como Pachón, San Jorge, Lama, Agua Rica y Río Colorado, cuyos descubrimientos datan de varias décadas atrás, no han entrado en producción todavía. El costo de los trabajos de prospección y exploración es muy variable y depende del tipo de yacimiento, de su ubicación, de su heterogeneidad, y de otras características. Por ejemplo, la exploración de yacimientos como Pachón, Bajo de la Alumbrera o Agua Rica, demandó, en cada caso, varias decenas de millones de dólares.

Terminada la exploración se elabora el estudio de factibilidad. Si bien este estudio abarca todos los aspectos del proyecto, la factibilidad económica es la que decide el futuro del proyecto. Si su resultado es negativo, el yacimiento no se explota y lo invertido hasta ese momento se pierde. Por eso esta etapa se llama **etapa de riesgo minero**, y diferencia a la minería de otras actividades económicas.

Las estadísticas muestran que más del 90% de las prospecciones y exploraciones no tienen éxito, es decir que de cada cien trabajos que se inician sólo unos pocos llegan a un estudio de factibilidad positivo. En este último caso, cuando el estudio de factibilidad es positivo, se construye el proyecto y se inicia la etapa de producción o de negocio minero.

Para ejemplificar la inseguridad que trae aparejada el riesgo minero en materia económica, hay que señalar que ningún banco del mundo presta dinero para esta etapa de la minería, con excepción de algunas instituciones del Estado que respondan a una política específica de promoción, en su país o en el extranjero. Por eso, los economistas suelen llamarla **etapa de pre inversión**.

BÚSQUEDA Y DESCUBRIMIENTO

El descubrimiento de una ocurrencia mineral puede hacerse por casualidad o como resultado de una búsqueda racional, utilizando técnicas con bases científicas y elementos tecnológicos adecuados.

En el pasado, la mayoría de las minas se descubrieron por casualidad. En nuestro país, los puesteros eran los más frecuentes descubridores de minas debido a que, por su trabajo de trasladar rebaños en zonas de montaña, eran los que más oportunidades tenían de hallar manifestaciones minerales a simple vista. El avance científico y tecnológico, unido al hecho de que cada vez son menos frecuentes los hallazgos casuales, ha motivado el desarrollo de una nueva disciplina de búsqueda racional de yacimientos, que se llama **prospección**.

PROSPECCIÓN

La prospección se hace sobre la base de sólidos conocimientos científicos y técnicos. Para llevarla a cabo es necesario contar con una «infraestructura» útil para ese fin: mapas de distinto tipo, fotografías aéreas, imágenes satelitales, antecedentes mineros, geológicos, geofísicos, geoquímicos, catastrales, económicos, etc. Esta «infraestructura» casi siempre es provista por el Estado, (En Argentina a través del Servicio Geológico –SEGEMAR-) y, en algunos casos, por empresas especializadas.

La ejecución de las tareas de prospección (trabajos de campo y de laboratorios) está en manos de especialistas, que cuentan con la ayuda de la tecnología apropiada para cada caso, vehículos, equipos, instrumental, laboratorios, etc.

A esta altura es conveniente desmitificar algunas exageraciones que se hacen a raíz de los avances científicos y tecnológicos. A veces la gente pregunta si los norteamericanos conocen todos nuestros recursos mineros a través de la información satelital. La respuesta es no. A pesar de los enormes adelantos tecnológicos, no hay ningún método que permita conocer, dimensionar y calificar un recurso minero en forma indirecta. En la práctica, los avances científicos y tecnológicos proporcionan herramientas importantes para mejorar la prospección, haciéndola más simple, más rápida, menos costosa y más eficaz, pero la información satelital no elimina los trabajos e investigaciones de campo.

La prospección puede hacerse de distintas maneras y con diferentes técnicas, de acuerdo al tipo de yacimiento que se busque. El resultado de la búsqueda (cuando es positiva) es el **descubrimiento de una manifestación mineral**.

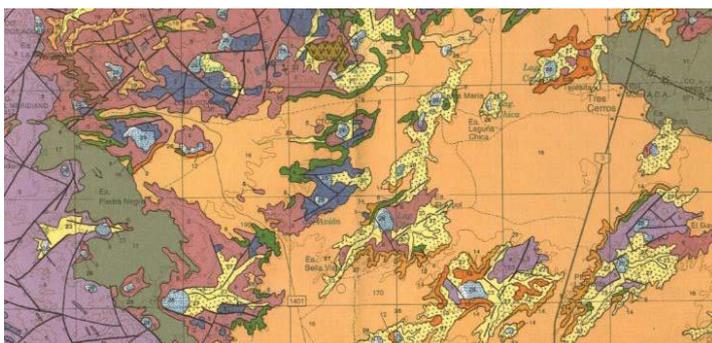
Es importante agregar que, previamente a cualquier trabajo de campo, el responsable de la prospección, debe asegurarse los permisos de acceso a la zona de búsqueda y los derechos mineros sobre lo que llegue a descubrir. Para ello, tiene que solicitar ante la Autoridad Minera un permiso de exploración (así se denomina en el Código de Minería el permiso de búsqueda o de cateo) que abarque esa zona. Además, debe presentar un Informe de Impacto Ambiental y esperar su aprobación por parte de la Autoridad para iniciar los trabajos.

Descripción muy sucinta de las tareas de prospección

1. Prospección geológica. Consiste en la aplicación de los conocimientos de la geología a la búsqueda de yacimientos. Cada concentración mineral se presenta en un determinado ambiente geológico que es favorable a su presencia. Por ello, muchas veces se busca primero el ambiente geológico favorable y luego se trata de encontrar un yacimiento dentro de ese ambiente.

- **Antecedentes:** Un buen trabajo de prospección siempre comienza con una recopilación y análisis de antecedentes. Entre esos antecedentes se cuentan

los mapas geológicos existentes y los informes relacionados con ellos. La existencia de un yacimiento anteriormente descubierto en un lugar es un antecedente muy valioso. Muchas veces se descubren nuevos yacimientos en áreas donde hubo una explotación anterior.



Un antecedente importante es la carta geológica de la zona



Los geólogos estudian los antecedentes científicos y técnicos

- Uso de fotografías aéreas e imágenes satelitales:** Ambos elementos se utilizan como importantes herramientas para la búsqueda de yacimientos. Para ello se utilizan técnicas que permiten obtener información geológica útil directamente aplicada al objetivo planteado. Por ejemplo, hoy en día es posible identificar en imágenes satelitales, minerales producidos por alteración hidrotermal que se asocian a ciertos sulfuros metálicos.

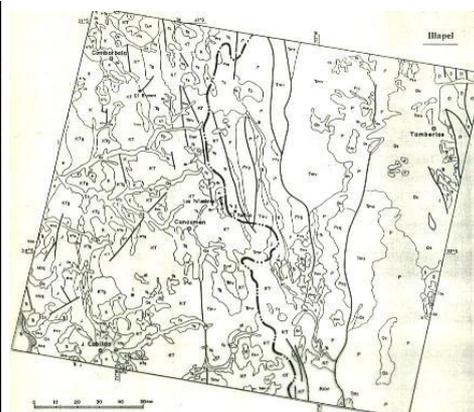
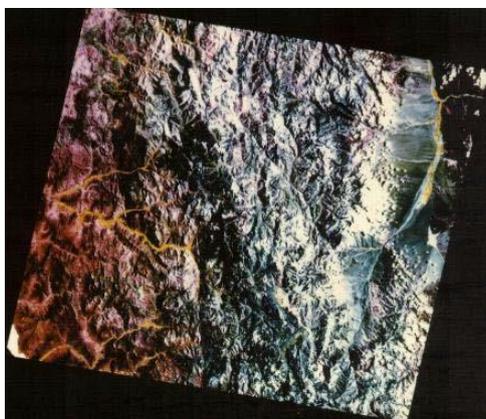


Imagen satelital Landsat de un sector de la cordillera de San Juan y la interpretación geológica de la misma

- Trabajos de campo. Uso de indicadores:** El estudio de antecedentes y el uso de productos obtenidos a partir de sensores remotos, es en general poco costoso y se lleva a cabo en gabinete. Sin embargo, ese trabajo siempre es seguido de una imprescindible fase de investigación de campo. Esta fase se ve simplificada por la anterior, pero no puede dejar de hacerse. Aquí se realizan observaciones directas de los tipos de rocas y de las estructuras del área que se investiga, poniendo énfasis en la búsqueda de «indicadores» de posibles mineralizaciones de interés.



- **Uso de planos y perfiles.** En la prospección, como en cualquier etapa de la minería, es fundamental el uso de planos y perfiles para representar la información en las tres dimensiones. Un **plano** es una representación sobre una superficie horizontal. Las palabras carta y mapa significan lo mismo pero abarcan superficies más grandes. Un **perfil** es una representación en un plano vertical (un corte) que permite representar datos en profundidad. Incluso se construyen los llamados bloques diagrama, que son representaciones tridimensionales que integran la información de planos y perfiles.
2. **Prospección geoquímica.** Se miden las variaciones en los contenidos de ciertos elementos químicos presentes en las rocas y en los suelos de una región con el objeto de detectar contenidos francamente anormales con respecto a los promedios de cada elemento. Tales anomalías se llaman **anomalías geoquímicas**. Este tipo de investigación requiere un trabajo de campo que consiste en coleccionar muestras de manera sistemática (de suelos, sedimentos de corriente o rocas) para hacer el análisis químico de las mismas. Lo más conveniente es planificar la prospección de manera de hacer este muestreo junto con el trabajo geológico de campo.
 3. **Prospección geofísica.** Comprende distintas técnicas en las que se efectúan mediciones de parámetros físicos, desde la superficie del terreno o desde aeronaves, para obtener información del subsuelo. Esta información siempre requiere de una interpretación adecuada.
 - **Magnetometría:** Se miden las variaciones que se producen en el campo magnético terrestre. Esas variaciones son localmente producidas por la presencia de estructuras y rocas de distinta susceptibilidad magnética. Un ejemplo de anomalía magnética muy violenta es cuando la brújula se «enloquece» encima de un yacimiento de magnetita, que es el óxido de hierro magnético. El trabajo de campo se hace con magnetómetros que pueden ser operados en superficie o desde aeronaves.
 - **Radimetría:** Se miden diferencias de radiactividad que pueden originarse localmente por la presencia de minerales radiactivos en las rocas. Se usan cintilómetros y contadores tanto en superficie como desde aeronaves.
 - **Sísmica:** Cuando se hace sísmica de refracción se mide la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo. En cambio, en sísmica de reflexión, se determinan en el subsuelo, planos que reflejan dichas ondas. En ambos casos se provocan microsismos artificiales y se usan detectores para captar su reflexión o refracción. Este es el método que tiene mayor penetración en profundidad. Es el más usado en prospección de hidrocarburos.
 - **Gravimetría:** Se miden variaciones de la gravedad terrestre provocadas localmente por masas rocosas de distinta densidad.
 - **Geoeléctrica:** Se miden las diferencias de conductividad eléctrica que poseen diferentes rocas y minerales. También la presencia o ausencia de agua en el subsuelo genera diferencias de conductividad detectables con instrumental adecuado.
 4. **Laboreo y perforaciones.** Si bien estas tareas son propias de la exploración, y por ello serán descritas en detalle al tratar ese tema, muchas veces, durante la prospección es necesario realizar excavaciones o perforaciones para obtener información no expuesta en superficie.

EXPLORACIÓN

Una vez descubierto un cuerpo mineral (en forma casual o a través de una prospección) es necesario delimitar su **forma** y determinar su **tamaño** y la **calidad** del material que lo compone. Para eso se realiza la **exploración**.

La exploración se hace mediante labores mineras superficiales (calicatas, pequeños pozos, etc.) y labores subterráneas (pozos profundos o piques y túneles) con las cuales se reconoce el cuerpo mineral en sus tres dimensiones. Las labores subterráneas suelen reemplazarse por perforaciones con herramientas que permiten obtener muestras del cuerpo mineral a todo lo largo del sondeo, ya sea en forma de *testigos* (cilindros de roca) o de triturados y polvo.

Algunos detalles de las tareas de exploración

1. **Exploración en superficie:** A veces los yacimientos pueden estar expuestos en superficie, o cubiertos por una capa de poco espesor de rocas alteradas, sedimentos, suelos o vegetación. En estos casos se lleva a cabo una primera exploración mediante labores superficiales sencillas y de bajo costo. Normalmente consisten en pequeñas excavaciones en forma de pozos o zanjas, que no exceden unos pocos metros de profundidad. Estas labores se denominan **destapes, calicatas o trincheras**. De esta manera se atraviesa la cubierta y se deja expuesto en la labor el mineral del yacimiento. Así se reconoce y estudia el yacimiento en las dos dimensiones visibles en superficie. En la práctica, el conjunto de trabajos que se hacen en estos casos puede abarcar los siguientes pasos:

- Observaciones geológico- mineras
- Interpretación de afloramientos
- Ejecución de planos a escala minera
- Labores superficiales - destapes, pozos, calicatas o trincheras
- Toma de muestras
- Geoquímica de detalle
- Geofísica
- Análisis y ensayos de laboratorio

2. **Exploración subterránea** Pequeños pozos, calicatas o trincheras solo permiten reconocer el mineral en dos dimensiones (siempre y cuando el yacimiento sea superficial). El reconocimiento de la tercera dimensión (profundidad) debe hacerse mediante métodos de exploración subterránea. Fundamentalmente hay dos maneras de hacerlo: con **labores mineras o con perforaciones**. En el primer caso el hombre accede a los niveles profundos que explora. En el segundo caso, solo accede una herramienta manejada por el hombre.



Perforación con recuperación de polvo



Perforación con recuperación de testigos a más de 1.000 m de profundidad

2.1. Labores subterráneas: Son excavaciones del tipo de pozos y túneles que, de acuerdo a su posición y características, reciben distintos nombres:

Socavón: Túnel horizontal, abierto desde la superficie

Galería: Túnel horizontal interno

Pique: Pozo vertical, abierto desde la superficie o desde una galería (pique interno).

Chiflón: Pique inclinado

Rampa: socavón o galería inclinada

Chimenea: «pozo» o «agujero» vertical o inclinado, abierto desde abajo hacia arriba

La extensión de estas excavaciones depende del tamaño del cuerpo mineral que se está explorando, o del volumen mínimo de mineral que se quiere poner en evidencia.

El avance de las labores, comúnmente se hace de la siguiente manera:

- a) Perforación del frente de avance (varios agujeros de acuerdo a diseño previamente establecido). Si se usan martillos neumáticos comunes, cada agujero tiene entre 20 y 40 mm de diámetro. La longitud de cada agujero, en secciones pequeñas, casi nunca pasa de dos metros.
- b) Los agujeros se cargan con explosivos adecuados para el tipo de roca y el grado de fragmentación deseado.
- c) Voladura simultánea o escalonada de todas las cargas, usando mechas y fulminantes o detonadores eléctricos y cables.
- d) Ventilación de la labor para extraer gases y polvo
- e) Carga de la broza (material fragmentado) producida por la voladura y transporte de la misma al exterior.
- f) Se repite nuevamente el ciclo.

2.2. Exploración mediante perforaciones. Existen diferentes sistemas de perforación:

Por percusión

Por roto - percusión

Rotativa a) Con inyección de agua

b) Con inyección de aire

c) Con circulación de «aire reversa»

Cubicación de reservas

La **cubicación de reservas** es el objetivo final de la exploración. Consiste en la determinación de la cantidad y calidad del mineral del yacimiento, en relación con la calidad comercial de dicha sustancia.

Mediante la ejecución de labores mineras o perforaciones, según el caso, se ubican los límites del cuerpo mineral en las tres dimensiones, determinando la **forma** del yacimiento. Utilizando métodos y fórmulas adecuadas se calcula el **volumen** del yacimiento. Luego se debe determinar el **peso específico** de la sustancia, para

calcular finalmente la **cantidad** expresada en toneladas (En algunos casos se expresa en metros cúbicos).

La **calidad** del mineral se determina mediante minuciosos análisis, ensayos y estudios, realizados sobre muestras que se extraen del cuerpo mineral de acuerdo a técnicas de muestreo que varían según el tipo de yacimiento. Tanto la extracción de muestras como su manejo posterior deben hacerse con extremo cuidado porque cualquier error o dato fraudulento que se incorpore puede arruinar todo el trabajo realizado o crear una base falsa para el trabajo posterior.

La cantidad de mineral, con su calidad promedio determinada, constituye lo que se llama las **reservas de la mina**. La palabra **reservas** debe emplearse cuando hay cierta seguridad de que ese mineral es comercializable con beneficio. En cambio, si **no hay ninguna seguridad** de que esa cantidad de mineral sea explotable económicamente, los expertos prefieren usar la palabra **recursos** en lugar de reservas.

Clasificación de reservas

Existen distintas formas de clasificar a las reservas y recursos de los yacimientos. Si bien hay clasificaciones más modernas y mejor ajustadas en términos técnicos y económicos, la forma más sencilla para entender los conceptos es la siguiente:

1. Mineral medido (también llamado positivo o probado). Es aquél cuyo tonelaje se computa utilizando las dimensiones reveladas en afloramientos, labores y/o perforaciones y cuya ley es el resultado de un muestreo detallado. Los sitios de inspección, muestreo y medidas están tan próximos y el carácter geológico tan bien definido que se puede establecer bien el tamaño, forma y contenido mineral. El tonelaje y la ley computados júzganse exactos dentro de límites que se establecen y ninguno de estos límites se considera que difiere del tonelaje o la ley computados en más del 20%.

2. Mineral probable (o indicado). Es aquél cuyo tonelaje y ley se computan, en parte, de medidas específicas, muestras o datos de producción y, en parte, por proyección del cuerpo mineralizado por una distancia razonable basada en evidencia geológica. Los sitios de inspección, muestreo y medidas están demasiado alejados, o sino, inapropiadamente espaciados, como para delimitar completamente el cuerpo mineralizado o establecer su ley media con seguridad.

3. Mineral supuesto (o posible o inferido). Es una cantidad de mineral que solamente se supone que existe. Es aquél cuyas estimaciones cuantitativas se basan en gran parte en un amplio conocimiento del carácter geológico del depósito y para el cual hay pocas (o ninguna) muestras o medidas. Pueden incluirse aquí cuerpos completamente ocultos, si existe evidencia geológica específica de su presencia.

En la práctica, **las reservas medidas** son las realmente comprobadas con un ínfimo porcentaje de error, y las únicas que sirven para fundamentar cálculos económicos precisos acerca de la futura explotación. No obstante, en muchos casos se acepta incluir el 50% de las reservas probables en los cálculos económicos. El resto de las reservas probables y las inferidas deben ser objeto de exploraciones futuras y, en caso de comprobarse su existencia, darán lugar a la extensión de la vida útil del emprendimiento minero.

Estudio mineralúrgico e ingeniería del proyecto

La etapa de riesgo continúa con el estudio de la **ingeniería del proyecto**. Para ello se plantean y estudian las diferentes alternativas sobre métodos de explotación y tratamiento. Entre los temas de fondo hay que tener en cuenta la infraestructura e

instalaciones necesarias, el equipamiento a adquirir y la mano de obra a emplear, la inversión requerida y los costos de operación, para finalmente calcular los costos de producción, según las alternativas planteadas.

Estudio de factibilidad

El último paso de la etapa de riesgo es el estudio de factibilidad, en el que se usan y comparan todos los parámetros técnicos y económicos obtenidos en los estudios realizados con otros datos tomados del mercado en el que se piensa colocar la producción.

La calidad del mineral a producir y las condiciones del mercado consumidor permiten determinar un precio de venta. La capacidad de compra o demanda del mercado y la cantidad de mineral disponible en la mina son fundamentales para calcular la magnitud y duración de la explotación y los plazos de amortización de las inversiones. También se estudia la incidencia de otros factores como los impuestos, costos financieros, regalías, seguros, provisiones, etc.

El análisis de todos los datos económicos permite calcular si la explotación será o no un buen negocio. Lógicamente, para que sea buen negocio, el estudio de factibilidad debe indicar que el precio de venta del mineral es mayor que el costo total de producción (incluidas todas las amortizaciones), y que la diferencia entre ambos, conocida como ganancia, es suficientemente atractiva para hacer la inversión (por ejemplo, cuando la ganancia es mayor que un interés bancario). En este caso se dice que la explotación es **factible o rentable**.

En la práctica existe una secuencia de estudios que se van haciendo en etapas sucesivas. Cada estudio permite una evaluación cada vez mas detallada y precisa para determinar si se encara la etapa siguiente o no. A partir de una idea, que en realidad es lo primero que se evalúa, según el catedrático de la Universidad de Chile, Augusto Millán (Evaluación y Factibilidad de Proyectos Mineros, 1996) se deben considerar los siguientes niveles sucesivos de estudios: inicial, conceptual y básico.

Estos niveles son equivalentes a los de perfil, pre-factibilidad y factibilidad que utiliza el Banco Mundial. El error aceptable es mas grande en el estudio inicial (-30% a +50%), menor en el estudio conceptual (-15% a +30%), y mínimo en el estudio básico (-05% a +15%).

Informe de impacto ambiental

De acuerdo a la Sección Segunda del Título 13 del Código de Minería (Anexos I, II, y III de las Normas Complementarias) en cada proyecto minero, las instancias de prospección, exploración y explotación requieren la previa presentación de un **Informe de Impacto Ambiental** y su aprobación por parte de la Autoridad de Aplicación mediante una **Declaración de Impacto Ambiental**. Esta exigencia tiene por objeto proteger el ambiente y el patrimonio natural y cultural de la zona donde se propone desarrollar la nueva actividad minera. El informe es un estudio detallado del medio ambiente, su afectación por los impactos del proyecto propuesto, y la forma en que se evitará producir daños y de qué manera se mitigarán y/o remediarán los impactos permanentes, como las excavaciones, escombreras y relaves. Las mismas normas exigen, además, que el informe de impacto ambiental se actualice **cada dos años**. De esta manera, ningún proyecto minero, sea de prospección, de exploración o de explotación, se puede iniciar sin haber tenido previamente la aprobación de la **Autoridad Ambiental Minera**.

En el caso de la explotación, es conveniente que el Informe de Impacto Ambiental forme parte del estudio de factibilidad. Una vez que el proyecto se pone en marcha,

la Autoridad de Aplicación debe hacer todas las inspecciones y los controles necesarios para verificar el cumplimiento de las normas y de las previsiones del proyecto. La sección del Código de Minería aludida al principio fue agregada en 1995 por la ley N° 24.585, y comprende la totalidad de las actividades mineras, incluyendo el cierre de la mina y la disposición de residuos de cualquier naturaleza. Las Normas Complementarias, por su parte, establecen con sumo detalle los contenidos mínimos que se exigen para cada informe de impacto ambiental. Por ejemplo, para la etapa de explotación, los títulos de los capítulos que debe desarrollar el informe son los siguientes:

- I. Información General
- II. Descripción del Ambiente
- III. Descripción del Proyecto
- IV. Descripción de los Impactos Ambientales
- V. Plan de Manejo Ambiental
- VI. Plan de acción frente a Contingencias Ambientales
- VII. Metodología Utilizada
- VIII. Normas Consultadas

ETAPA DE NEGOCIO MINERO O DE INVERSIÓN

Financiación y construcción

Una vez que se determinó la factibilidad del proyecto se pasa a la etapa de **explotación**. Para ello es necesario que, previamente, se consigan las fuentes de **financiación** que provean el dinero necesario para la **construcción** y la **puesta en marcha** del proyecto. La cantidad de dinero necesario depende de la magnitud del proyecto. En el Bajo de la Alumbrera, que es la mina más grande del país, se invirtieron finalmente unos 1.300 millones de dólares.

Hay distintas formas de obtener financiación. Las más frecuentes son:

- Capitales o recursos de la empresa propietaria.
- Suscripción de acciones.
- Asociación con otras empresas que aportan capital a cambio de una parte del negocio.
- Préstamos bancarios.
- Participación de bancos como socios del negocio.
- Créditos de los proveedores
- Préstamos y créditos especiales de sistemas de promoción.

Durante la construcción se hacen los laboreos necesarios para la futura explotación y se realizan las obras de infraestructura (camino, comunicaciones, campamentos, etc.), instalaciones y equipamiento, se incorpora el personal necesario y se procede a su capacitación.

Finalmente se hacen todas las pruebas que permiten verificar el funcionamiento correcto de todas las instalaciones, circuitos y equipamientos, y se pone en marcha la producción.

Explotación

Hay diferentes métodos de explotación y su aplicación depende del estado físico del mineral (sólido coherente o incoherente, líquido, gas, o sólido soluble o fusible), de la profundidad en que se encuentra y de su forma (explotación a cielo abierto o

subterránea), y de otras características. De acuerdo a su estado físico se consideran los siguientes materiales:

Coherentes: Es el grupo más numeroso ya que abarca la gran mayoría de las sustancias minerales. Son los que tienen «consistencia pétrea». En la práctica, cuando se habla de métodos de explotación minera se incluye casi exclusivamente a este grupo.

Algunas explotaciones son subterráneas, como en Mina Aguilar, Farallón Negro, Río Turbio. Otras, más numerosas, se hacen a cielo abierto (canteras u *open pits*) como Bajo de la Alumbrera, Cerro Vanguardia, Sierra Pintada, Tincalayu y todas las explotaciones de granitos, mármoles, calizas y materiales similares. En todos estos casos (excepto carbones, mármoles y granitos que requieren cuidados especiales) el material debe arrancarse mediante el uso de perforaciones y voladuras con explosivos. El mineral arrancado es cargado y llevado por diferentes medios, máquinas o instalaciones desde el frente de explotación hasta la planta de tratamiento o hasta el lugar de embarque.



Incoherentes: Una pequeña cantidad de yacimientos superficiales están integrados por materiales incoherentes. Se trata de aglomerados, arenas, sales de «cosecha» y arcillas que, comúnmente requieren métodos de arranque muy sencillos, que se resuelven con el uso de excavadoras y máquinas similares, o con pico y pala, a nivel artesanal. Se incluyen las explotaciones de arena por dragado de fondos fluviales, como el que se hace en los ríos Paraná y de la Plata.

Fluidos: Es un grupo reducido pero valioso que incluye a los hidrocarburos (petróleo y gas), a las salmueras (Salar del Hombre Muerto y Salinas del Timbó) y a los aprovechamientos geotérmicos, como el del Volcán Copahue.

Materiales solubles o fusibles: Es un pequeño grupo integrado por hidrocarburos muy viscosos, sales y azufre. En la mina Río Colorado se ha hecho una explotación experimental con el uso de perforaciones por las cuales se inyecta agua que disuelve el cloruro de potasio del yacimiento y se lo extrae en forma de salmuera.

Explotación subterránea de sólidos coherentes

En general, el caso más complejo (y más caro) es extraer materiales sólidos coherentes por métodos subterráneos.

Describiremos muy elementalmente las tareas básicas de este tipo de explotación, haciendo referencia a ejemplos de minas argentinas como Paramillo de Uspallata, Farallón Negro y Aguilar.

- a) Perforación
- b) Arranque con explosivos
- c) Carga, transporte y extracción

- d) Desagüe
- e) Ventilación
- f) Alumbrado
- g) Fortificación
- h) Seguridad y protección ambiental

Explotaciones a cielo abierto

Materiales coherentes: Bajo de la Alumbraera, Sierra Pintada, Tincalayu, Cerro Vanguardia

Materiales incoherentes: Canteras de arena, canto rodado, arcillas, salinas de «cosecha», dragado de arenas.

Explotaciones por perforaciones

El Timbó (sal), Fénix o Salar del Hombre Muerto (sal de litio), Río Colorado (cloruro de potasio), Petróleo y gas, Vapores endógenos.

Escala de las explotaciones

Económicamente se acostumbra a distinguir entre explotaciones de gran escala (Bajo de la Alumbraera y Loma Negra, por ejemplo) o **gran minería**, que siempre están en manos de grandes empresas, de aquellas de mediana o pequeña escala, explotadas por las llamadas PYMES, es decir las **pequeñas y medianas empresas**.

Cuando la explotación minera se hace en forma individual y con métodos principalmente manuales, se prefiere hablar de **minería artesanal**.

Preparación o tratamiento de minerales

La mayoría de las minas tienen una planta de tratamiento asociada al yacimiento. Esto se debe a que pocas veces las industrias pueden usar materias primas minerales tal como ellas se encuentran en la naturaleza.

Por ejemplo, la industria del cobre requiere metal puro, pero el cobre metálico prácticamente no se encuentra en la naturaleza (sólo como rareza mineralógica).

En el Bajo de la Alumbraera, cada tonelada de roca que se extrae del yacimiento sólo contiene entre seis y siete kilogramos de cobre diseminados en su masa. Por eso, el mineral debe ser procesado por distintos métodos de tratamiento para separar los minerales de cobre de la ganga y darle la forma final, apta para la industria.

Hay casos más simples, como por ejemplo los áridos para la construcción. Pero aún en estos casos pueden verse, por ejemplo, explotaciones de materiales aluvionales que, con la ayuda de plantas de clasificación, producen arena fina, arena gruesa y canto rodado.

Los procesos de tratamiento no son un tema menor, y deben ser minuciosamente estudiados como parte del proyecto minero, en forma paralela a la exploración. Cualquier dificultad seria en el tratamiento del mineral puede determinar la inviabilidad de un proyecto, ya sea porque técnicamente no se puede alcanzar la calidad requerida por la industria o porque el proceso a aplicar es demasiado costoso y el producto final no es competitivo en precio.

De acuerdo a las características físicas y químicas de los minerales a tratar, se utilizan diferentes métodos de concentración.

Producción responsable: Prevención, Remediación y Restauración

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. Algunas de esas evidencias del pasado 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 remediados.

Hoy la sociedad moderna ha tomado conciencia del impacto que produce cualquier actividad humana productiva. En particular, la minería 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. Es por ello que se han establecido normas específicas que regulan la actividad, inicialmente elaboradas en los países con mayor desarrollo minero (entre ellos Estados Unidos, cuya norma “*Colorado open Mining Land Reclamation Act*” es del año 1973).

En los países latinoamericanos, la mayoría de los sistemas normativos de evaluación y/o protección ambiental en minería se aplicaron, a partir de la década de 1990, a las minas en operación (con la excepción de Brasil, que contiene una mención explícita en su Constitución Federal de 1988). Más tarde, con una mayor conciencia y presión sociales la atención se centró en los sitios mineros abandonados con anterioridad a la promulgación de las leyes ambientales.

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. Para ello se recurre a la restauración 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 **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; y

La **restauración** del sitio de la mina y su entorno, que consiste básicamente en volverlo al estado más semejante al que se encontraba antes de los trabajos mineros.

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

Cuando un sitio está contaminado se plantean alternativas de limpieza, estableciéndose niveles máximos de contaminantes aceptables luego que el sitio

sea sometido a un tratamiento de remediación. En el caso de un accidente ambiental (derrames, desestabilización de taludes, etc.) se establecen planes de contingencia para evitar que el impacto se transforme en contaminación o daño.

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, hay significativos avances en:

- el conocimiento de los contaminantes y sus niveles de toxicidad;
- el desarrollo de modelos matemáticos de procesos;
- las alternativas tecnológicas para los trabajos de restauración o remediación;
- el desarrollo de procesos de descontaminación ambiental mediante el diseño de procesos físicos, químicos, biológicos, o combinaciones de ellos;
- las capacidades analíticas de los laboratorios.

Los instrumentos para el Control y la Gestión Ambiental

- Normas y leyes
- Líneas de base ambiental
- Sistemas de calidad
- Licencias ambientales
- Áreas protegidas
- Educación ambiental
- Participación ciudadana
- Auditorías ambientales

Remediación de sitios mineros

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),
- 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 de pH, etc.),
- 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).



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



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

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 de afectación al Medio Ambiente y a la salud o seguridad de 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).

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 denominado “informe de impacto” que las empresas mineras deben presentar previa aprobación de la construcción del emprendimiento, acorde con la legislación vigente de cada país.

Tanto las interrupciones de actividad como los cierres definitivos, 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, derivados de las grandes acumulaciones de materiales, en diques de colas o escombreras, se minimizan mediante obras de ingeniería de variada magnitud. Estas condiciones 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.

BIBLIOGRAFÍA

- *Ingeniería y Ciencias Ambientales* (Mackenzie L. Davis - Susan J. Masten) Mc Graw Hill Interamericana 2005.
- Dr. Jorge N. Santa Cruz, Coordinador Nacional Proyecto Acuífero Guaraní, INA (Instituto Nacional del Agua)
- *Proyecto de Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní-* www.sg-guarani.org
- *Apuntes sobre Aguas Subterráneas, Facultad de Ingeniería – México*
- ARIAS, A. "Acuífero Puelche: El problema invisible". *Revista de la FVSA* N° 69, pág. 24 a 29, Septiembre/Octubre 1999.
- ARIAS, D. "Un mar subterráneo está en peligro". *Diario La Nación, sección Ciencia y Salud*, 10/08/00
- SANTA CRUZ, J. del INA. *Exposición en la comisión de Recursos Naturales de la Cámara de Diputados de la Nación el 17/10/00*
- SANTA CRUZ, J.; S. AMATO; et all. "Explotación y Deterioro del Acuífero Puelches en al Área Metropolitana de la República Argentina" *Revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental* N° 31, pág. 34-44, Abril de 1997
- VIRASORO, B.; M. A. AGULLÓ; et all. "Investigación y análisis de los antecedentes de la problemática del agua subterránea en el área metropolitana". *Auditoría General de la Nación, Gerencia General de Planificación, Grupo de Auditoría de Gestión Ambiental. Documento Técnico N° 12.*
- *Epidemiología Del Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico De La República Argentina. Estudio colaborativo multicéntrico. Conarpi (Ministerio de Salud de la Nación.*
- *Combustibles alternativos*, Silvia Daniela Romano – Erenio González Suarez – Miguel Ángel Laborde
- "Hidrógeno y pila de combustible", publicación de la colección "Energías Renovables para todos" elaborada por Haya Comunicación. Dirección de la colección: Luis Merino / Pepa Mosquera, Redacción de este cuaderno: Paloma Asensio (Fundación de la energía de la Comunidad de Madrid).
- Artículo revista *Petroquímica.com* "La Ley de Promoción del Hidrógeno en Argentina: con un Plan Nacional de Hidrógeno ya redactado y a la espera de la reglamentación" por Florencia Aliaga, Federico Nores Pondal, Miguel Laborde - ITHES. Instituto de Tecnologías del Hidrógeno y Energías Sostenibles (UBA-CONICET)
- *Asociación Argentina de Hidrógeno (www.aah2.org.ar)*
- <https://ssl.toyota.com/mirai>
- <http://www.km77.com/01/toyota/mirai/2015/informacion-y-precios>
- Lavandaio, Eddy Omar Luis, 2008. *Elementos de geología, mineralogía y materias primas minerales*, 2ª edición. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Buenos Aires.
- *Minerales y rocas en el arte, la ciencia y la tecnología* (José Sellés – Martínez; Liliana N. Castro) Colección Ciencia Joven – Eudeba.
- Carlos Herrmann y Eduardo O. Zappettini. *Recursos Minerales, Minería y Medio Ambiente. Serie Publicaciones N°173 Insituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) 2014.*