

MINERÍA SOSTENIBLE. ACTIVOS AMBIENTALES

Rafael Fernández Rubio
Dr. Ingeniero de Minas. Catedrático y Profesor Emérito
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Universidad Politécnica de Madrid
Presidente de Frasa Ingenieros Consultores
rfrubio@frasaingenieros.com

RESUMEN

La minería es considerada por muchos una actividad que produce gran impacto ambiental negativo, y ha sufrido ataques muy duros desde diferentes frentes ambientalistas. No obstante son muchos los esfuerzos realizados, en tiempos recientes, para conseguir minimizar los impactos e incluso aportar activos ambientales, en tanto en cuanto es posible. En este marco se presentan ejemplos de actuaciones mineras ejemplares ambientalmente, que pueden servir de referencia de las posibilidades que ofrece la ingeniería ambiental en la rehabilitación de espacios mineros.

Palabras clave

Minería; medio ambiente; rehabilitación; activos ambientales.

ABSTRACT

Mining is considered for many as an activity that produces great negative environmental impact, and has suffered from a strong opposition since many environmentalist fronts. Nevertheless recently there are many efforts addressed not only to minimize the impacts, but including to contribute environmental assets, as is possible. In this framework are presented several mining examples that are excellent, environmentally, and that should serve as reference of the possibilities offered by the environmental engineering in the rehabilitations of mining spaces.

Key words

Mining; environment; rehabilitation.

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente la minería es censurada como actividad depredadora, que provoca grandes impactos ambientales y así, a pesar de ser imprescindible, para el desarrollo social, y para el día a día de toda la humanidad, se ha visto denostada y atacada

desde casi todos los frentes ambientalistas. No se puede negar la existencia de pasivos ambientales, especialmente como consecuencia de que, hasta tiempos recientes, los aspectos ecológicos no fueron objeto de preocupación en las actuaciones industriales y de que, en la minería, los efectos perduran por un largo plazo.

Frente a este hecho, la buena minería viene realizando un gran esfuerzo, especialmente en los últimos años, no sólo para causar el mínimo impacto ambiental, sino incluso para aportar activos ambientales, en tanto en cuanto es posible. Esfuerzo que no se ha visto acompañado de la adecuada difusión en los medios de comunicación.

En este marcotan algunas actuaciones, dentro de la minería, que reflejan ese buen hacer, y en las que, en buena parte de los ejemplos ha participado el autor, con mayor o menor responsabilidad, o ha tenido oportunidad de conocer en directo.

MINAS DE ORO DE LAS MÉDULAS (LEÓN, ESPAÑA): ESPACIO MINERO PATRIMONIO DE LA HUMANIDAD

Las explotaciones romanas de oro de Las Médulas (León) acumulan razones, más que suficientes, para justificar que hayan sido declaradas por la UNESCO como Patrimonio de la Humanidad (1997), y para que su zona arqueológico-minera fuese declarada Paisaje Cultural en tiempos bien tempranos (1931).

En pocos lugares la intervención minera (en este caso romana), a lo largo de dos siglos y medio, ha dejado tal impronta, ni la naturaleza ha ayudado a complementar un paisaje de belleza tan espectacular, en una interrelación única, en la que se mezcla el rojo del aluvión miocénico, en picachos y cortados verticales, con el verde de castaños y robles, y el azul y blanco de cielo y nubes.



Explotaciones romanas de oro en Las Médulas (León, España), declaradas Bien de Interés Cultural y Patrimonio de la Humanidad.

Esta minería intensiva, probablemente la de mayores dimensiones del Imperio Romano, se inicia en el último tercio del siglo I después de Cristo, cuando la *Legio VII* romana, estacionada en tierras leonesas, ya no es el ejército de ocupación, que domina a la población indígena de los castros fortificados, sino un ejército permanente que juega importante papel en la actividad minera, actuando de pacificador de mineros, esclavos y libres; aportando ingenieros; responsabilizándose de labores de prospección; construyendo canales para traer el agua y balsas donde acumularla (*piscinae* o *stagna*), etc. El mayor apogeo de esta actividad corresponde a la época del Emperador Trajano (finales del siglo I y principios del siglo II), extinguiéndose a principios del siglo III.

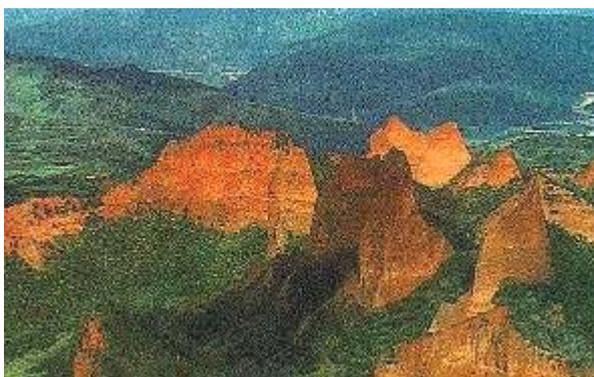


Explotación por el método de *Ruina Montium* en Las Médulas (León, España) y trabajos de desagregación del aluvión aurífero.

Plinio el Viejo (23 – 79 d.C.), en su *Naturalis Historia*, nos ha dejado descrito el método de explotación, conocido como *ruina montium*. Consistía en excavar largas galerías con sucesivos ensanchamientos y estrechamientos, en el aluvión Mioceno (de las que quedan muy buenos ejemplos), perforando la roca con cuñas de hierro y mazos, y alumbrándose con candiles. Después hacían circular agua por estas galerías, con gran carga hidráulica y presión, provocando la erosión y derrumbe de las bóvedas.

Tras separar la fracción gruesa (*murias*), el aluvión disgregado, era transportado y tratado en canales de lavado (*agogae*), cubiertos de ramas de tojo, que retenían el oro nativo. Ese tojo se quemaba y se lavaban sus cenizas, para separar el oro.

Hoy podemos recrearnos en la dinámica historia de aquellos mineros, recorriendo sus mismos itinerarios y observando la geología de estos extensos aluviones consolidados, la infraestructura hidráulica, los huecos mineros, los frentes de trabajo, los dispositivos para obtener el oro, los depósitos de estériles,... y todo ello a una escala y en un grado de conservación increíble.



Paisaje residual de las explotaciones romanas de oro en Las Médulas (León, España), entre bosques de castaños que aportaron alimento a los mineros.

Estos mineros (se barajan cifras desde 10.000 hasta 60.000), alcanzaron gran desarrollo tecnológico, y un sistema organizativo modélico, que les permitió mover más de 100 millones de metros cúbicos de aluvión, y extraer del orden de 500.000 kg de oro.

MINAS DE ORO DE RODALQUILAR (ALMERÍA, ESPAÑA): VIVERO DE ENDEMISMOS VEGETALES ÚNICOS

En las minas de oro de Rodalquilar se trabajaba ya en tiempos de los romanos. Más recientemente las explotó una empresa británica, que en 1923 las abandonó por falta de rentabilidad. En 1933 se reestableció la explotación y Rodalquilar conoció sus mejores tiempos. Tras la guerra civil española quedaron semiabandonadas, hasta que en 1956 se reinició su actividad para cerrar seis años después por falta de rentabilidad.

La caldera volcánica de Rodalquilar, en la que se ubica el yacimiento minero, corresponde a una estructura de colapso ovalada, de unos 8 km de largo por 4 de ancho, que se produjo hace 11 millones de años.

El complejo minero de Rodalquilar es un ejemplo de arqueología industrial, que bien hubiera merecido mejor conservación. En todo caso impresiona contemplar las ruinas de aquellas instalaciones, en el marco de colores ocres, marrones y rojizos que ofrecen las rocas volcánicas de su alrededor.



Antigua planta de tratamiento del mineral aurífero en Rodalquilar (Almería, España).

En este lugar lejano, perdido, virgen, en pleno Parque Natural del Cabo de Gata-Níjar, al abrigo de los montes que lo circundan, y junto al antiguo poblado minero, y a su iglesia, entre petrología y mineralogía, el Gobierno regional (Junta de Andalucía) ha ubicado unos viveros abancalados de plantas autóctonas: El Albardinal, que bien merecen una visita, para recrearnos en la contemplación de especies vegetales únicas en la Península Ibérica.



A lo largo del recorrido se puede observar la flora de las zonas semiáridas, de Andalucía oriental, organizada según las diferentes formaciones. Una flora perfectamente adaptada a la sequía, con algunas especies exclusivas de esta parte del mundo

(endemismos), y otras que muestran el pasado común de los continentes europeo y africano. El Albardinal acerca al visitante a gran parte de la flora rara y amenazada de este territorio; plantas que en la naturaleza serían muy difíciles de ver, por estar muy dispersas por todo el área o en lugares inaccesibles.



Flora de Andalucía oriental que muestra el pasado común europeo y africano del área de Rodalquilar (Almería, España).

En este vivero se nos hace ver cómo el hombre ha sido capaz de sobrevivir y prosperar, en condiciones semidesérticas, utilizando las plantas que el medio natural le ofrece, adaptando su aprovechamiento agro-pecuario, para resistir las exigentes condiciones ambientales. De todo ello puede encontrarse buena muestra en este jardín botánico.



Carteles indicadores en el vivero El Albardinal en las minas de Rodalquilar (Almería).

En este recorrido se puede observar el espartal y el matorral en suelos volcánicos y calizos; el tomillar; el pastizal efímero y vivaz; el pino carrasco; la vegetación zonal con matorrales béticos, halófilas, plantas dunares litorales y yesíferas; los cultivos tradicionales arbóreos, herbáceos y hortícolas; los endemismos; las plantas útiles y las plantas de jardinería: palmerales y suculentas. Todo ello con información muy útil para quien disfruta de esta visita. En fin: todo un ejemplo a copiar en otras áreas mineras.



Acebuche, olivo silvestre autóctono de Andalucía, resistente a periodos secos y a altas temperaturas.

MINA DE HIERRO DAS MANGABEIRAS (MINAS GERAIS, BRASIL): PARQUE SÍMBOLO DE LA CIUDAD DE BELO HORIZONTE

El Parque das Mangabeiras, diseñado por Roberto Burle Marx, e inaugurado en 1982, se localiza al pie de la Serra do Curral, en lo que fue una mina de hierro. Hoy es propiedad de la Municipalidad de Belo Horizonte (Minas Gerais, Brasil), y se integra plenamente en su área urbana.



Entorno natural del Parque das Mangabeiras y un detalle de sus instalaciones (Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil).

Este parque público, con 337 hectáreas, la mayor área verde de la ciudad dedicada a la conservación ambiental, escogido por la población como símbolo de Belo Horizonte, se puede recorrer siguiendo diferentes rutas: Ruta de las Aguas, Ruta de la Foresta y Ruta del Sol.



Diferentes entornos en la antigua Mina das Mangabeiras (Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil)).

Hoy esta antigua mina, no sólo es hábitat de muchas especies vegetales y animales, sino que también es punto de encuentro de millares de personas, y centro de innumerables actividades culturales.

Esté fue el marco elegido para que el Papa Juan Pablo II celebrara su misa para los jóvenes y estudiantes (1 de julio de 1980), y desde el mirador de este Parque Minero pronunciase: ¡Qué Belo Horizonte!.



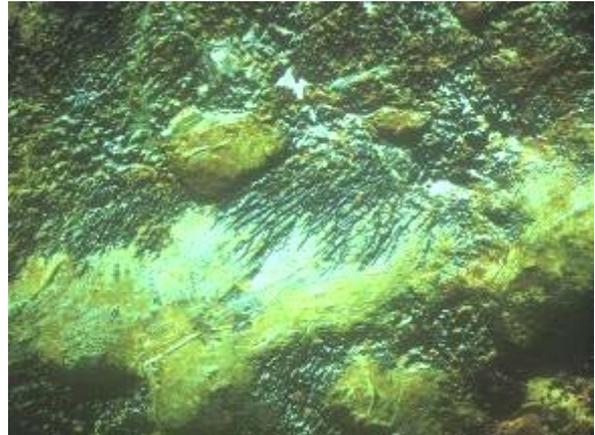
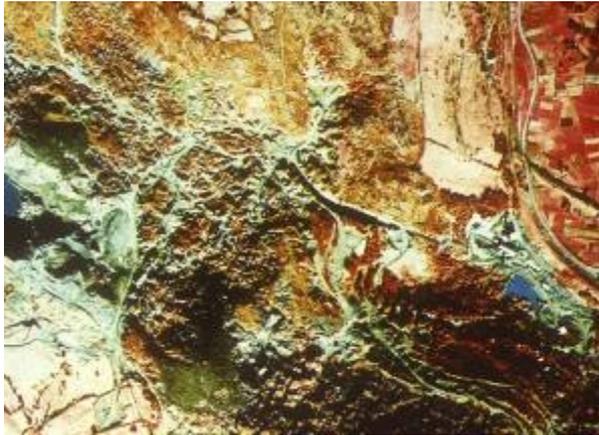
La ciudad de Belo Horizonte y, en primer término el Parque das Mangabeiras.

MINAS DE HIERRO DE CABÁRCENO (CANTABRIA, ESPAÑA): PARQUE DE LA NATURALEZA

A lo largo de más de 2.000 años se han venido explotando los yacimientos de hierro de la sierra de Peña Cabarga en Cantabria (el escritor romano Plinio ya cita estos trabajos mineros), siendo AGRUMINSA (Altos Hornos de Vizcaya) -para quien realizamos el asesoramiento geológico-, la última que los ha explotado, hasta su clausura en 1989.

Alojado este yacimiento en rocas carbonatadas del Aptense superior, en su génesis desempeñaron papel muy destacado los procesos de karstificación de calizas y dolomías,

ya que, como consecuencia de su disolución, quedó un residuo insoluble, constituido fundamentalmente por óxidos e hidróxidos de hierro, objeto de explotación minera.



Fotografías aéreas infrarrojas (falso color) de la antigua explotación de hierro de Cabárceno (Cantabria, España).

Durante muchos años, y especialmente desde la Edad Media hasta la primera mitad del siglo XX, la explotación se realizó con métodos artesanales, dando trabajo a miles de mineros que, con pico y pala, excavaron y pusieron a descubierto un magnífico karst tropical, desarrollado en pasadas épocas geológicas. Los mineros, en su duro trabajo, fueron abriendo pasillos y corredores laberínticos, con alturas de varias decenas de metros, creando una selva de rocas que la imaginación humana no hubiese sido capaz de modelar.



Paisaje de karst tropical exhumado por los antiguos trabajos mineros en Cabárceno (Cantabria, España).

Al cesar la explotación, y fruto de un acuerdo entre el Gobierno de Cantabria y Agruminsa, se ubicó un Parque de la Naturaleza (inaugurado en 1990), sobre una superficie de 750 hectáreas, donde hoy no sólo se puede gozar de un espectacular paisaje kárstico, con espacios de singular belleza, sino también de un lugar de ocio y esparcimiento, en contacto con la naturaleza, con una variadísima fauna de los cinco continentes, que incluye a más de 50 especies en peligro de extinción, que aquí encuentran protección total.



En el Parque de la Naturaleza de Cabárceno (Cantabria), antigua mina de hierro clausurada, la fauna se distribuye en amplios espacios, con una muy bien trazada red de carreteras.

Aquí los animales viven y se reproducen, en régimen de semilibertad, rodeados de la vegetación apropiada, que da vida y color a una naturaleza increíble.



Animales en libertad en la antigua Mina de Cabárceno (Cantabria, España).

El espectáculo de la naturaleza se puede disfrutar a través de magníficos miradores, y de una red de caminos y carreteras, muy bien trazada, con decenas de kilómetros, que permiten contemplar una variada fauna que encuentra aquí protección, refugio y alimento.



En las antiguas minas de Cabárceno (Cantabria) encuentra refugio fauna de los cinco continentes, con más de 50 especies en peligro de extinción.

El visitante contempla, en 21 amplios espacios, a escasa distancia pero sin producir interferencias, a cientos de animales, de todas las comunidades zoológicas, entre los que se podrían citar a muchos antílopes africanos, jaguares, jirafas, leones, tigres siberianos y de bengala, leopardos, hienas, bisontes, elefantes, hipopótamos, rinocerontes, dromedarios, camellos, llamas, cebras, avestruces, etc. , junto a la fauna de Cantabria, con lobos, ciervos, corzos, rebecos, jabalíes y la reserva más importante de osos pardos de España. Todo ello dentro de condiciones de seguridad, con barreras perfectamente integradas en el paisaje.

Completan este espacio excepcional, varios lagos, implantados en lo que fueron explotaciones de hierro a cielo abierto, que acogen a una variada avifauna, y donde se puede practicar la pesca. Igualmente se cuenta con un complejo de restaurantes y cafeterías, aparcamientos, tiendas de recuerdos, y un reptilium con una especializada colección de serpientes,

Así este espacio minero rehabilitado aporta, a Cantabria y a España, una atracción cultural y científica sin igual, que justifica el que ya haya recibido más de diez millones de visitantes.

MINA DE ZINC-PLOMO DE TARA (COUNTY MEATH, IRLANDA): MINA VERDE EN UNA ISLA ESMERALDA

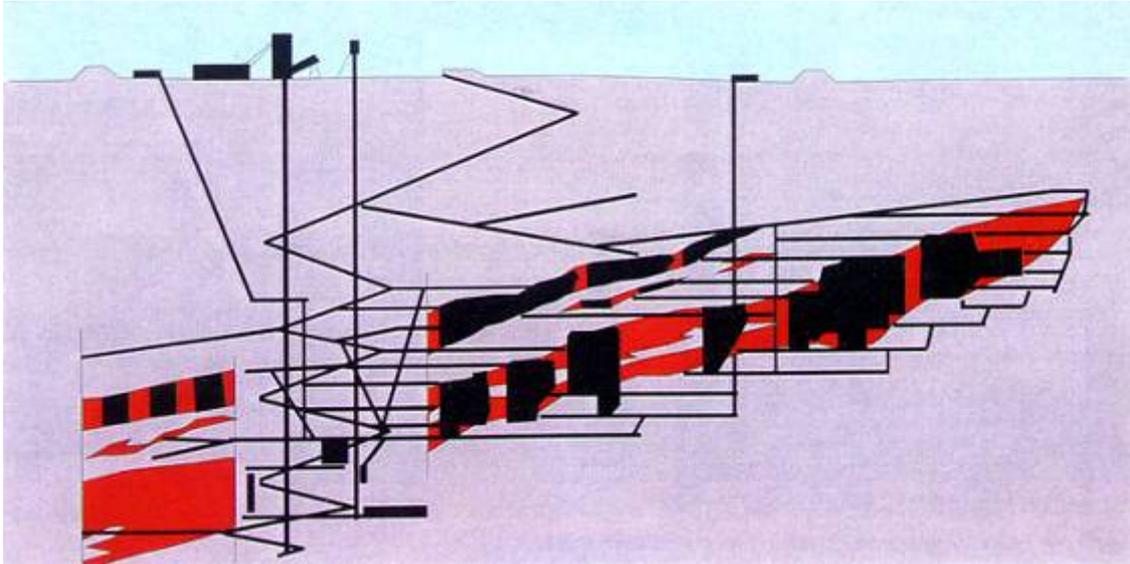
En 1969 se descubrió un gran yacimiento de zinc-plomo, en County Meath (Irlanda), localizado en calizas y dolomías del Carbonífero Inferior, que ha dado lugar a la mina de Tara, la cual en 1986 pasó a ser propiedad del Grupo Outokumpu (Finlandia).



Entrada a la Mina Tara (County Meath, Irlanda).

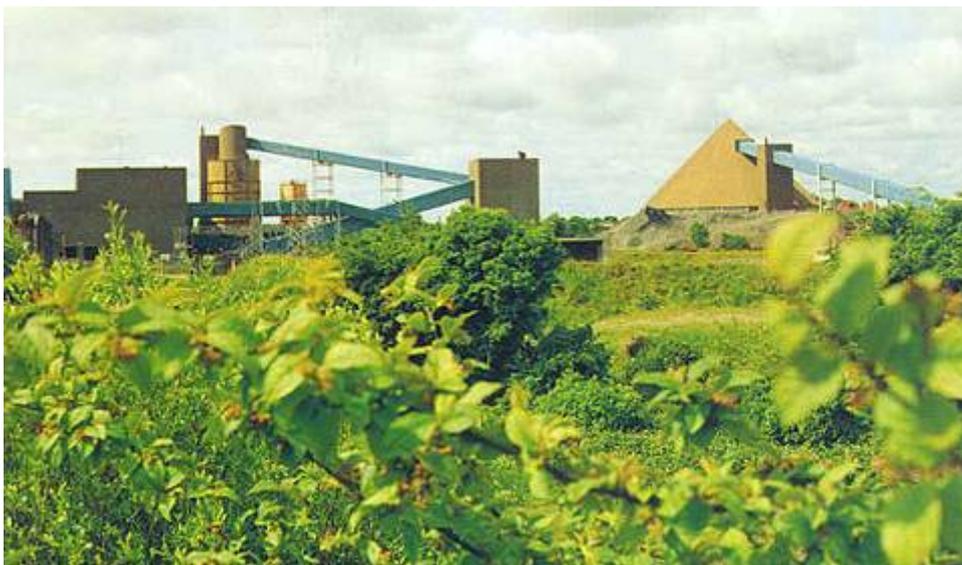
La operación minera, que comenzó en 1977, ha puesto en evidencia la posibilidad de coexistencia ambiental de una gran explotación minera (la mayor mina de plomo-zinc de Europa), en un escenario rural famoso por su ganado vacuno y su alta productividad agrícola, todo ello en un área residencial densamente poblada y a sólo 40 km de la capital de Irlanda (Fernández Rubio, 1992).

El sentido de responsabilidad ambiental, adoptado desde el inicio de la operación minera, se basa en la aplicación estricta de las técnicas de la ingeniería ambiental, en una planificación a largo plazo.



Corte mostrando la infraestructura de la Mina Tara.

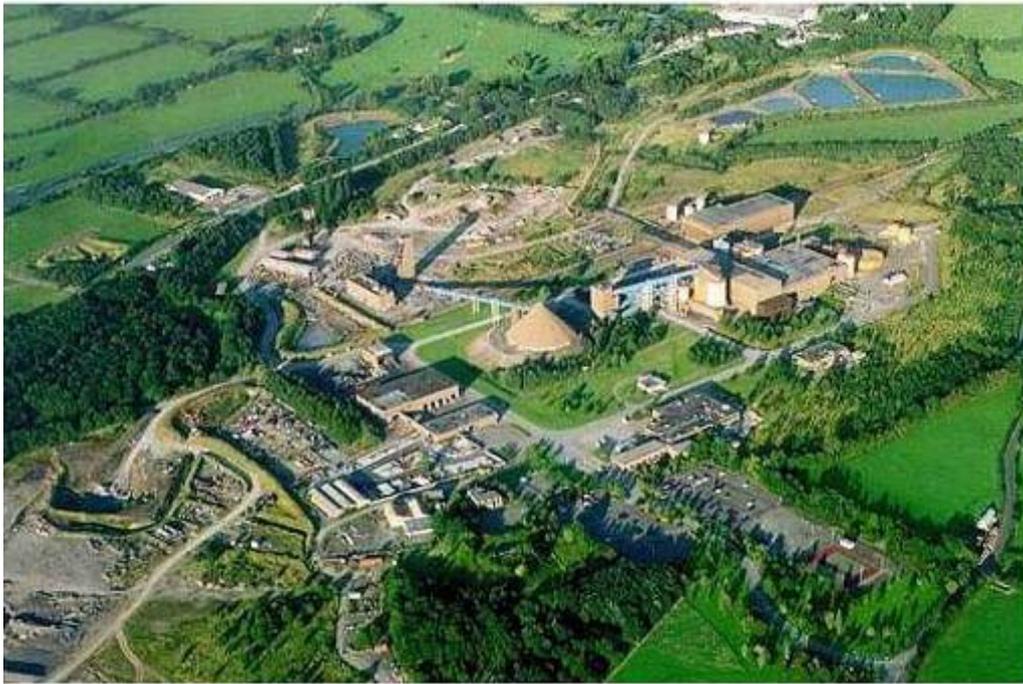
Este yacimiento se sitúa a sólo 1.500 metros del centro de Navan, ciudad de 16.000 habitantes, y adyacente a un área rural residencial. Se encuentra, por otro lado, en la confluencia de los ríos Boyne y Blackwater, el primero de los cuales es uno de los más importantes ríos salmoneros, en un país que da el máximo valor a su pesca fluvial. En estas condiciones el éxito de la planificación y operación dependía del apoyo de la comunidad y de las autoridades municipales.



Vista de las instalaciones principales de la Mina Tara (Irlanda).

El recelo de la población local era justificable por la escasa tradición minera de Irlanda, comparada con su dilatada herencia agrícola. Un desafío inicial fue proyectar la

operación minera, en este entorno, de tal manera que no sólo fuese respetuosa con la legislación nacional, si no que, además, cumplierse con futuras regulaciones, especialmente las muy estrictas de la Unión Europea, a la que Irlanda se adhería en 1973, justo cuando Tara planificaba su inicio.



Vista general del entorno de la Mina Tara (Irlanda).

En 1971, seis años antes de iniciarse la producción minera, se realizó un estudio medioambiental de base muy detallado, que sirvió de referencia para el control de todos los parámetros ambientales: agua, aire, suelo, ruido y vibración. Desde entonces los controles y experiencias se realizan rutinariamente, en campo y laboratorio, y la empresa somete mensualmente un informe ambiental al Consejo Municipal. Hay que significar que Tara mantiene una política de puertas abiertas, en la cual los ciudadanos, algunos de los cuales viven literalmente sobre el yacimiento, son estimulados a expresar cualquier queja que tengan.

Aunque la mayor parte de los controles y análisis se realizan en los laboratorios de la mina, regularmente se envían muestras a laboratorios independientes. Por otra parte, el equipamiento de control ambiental se actualiza cada vez que se producen avances en el *estado del arte* tecnológico. Con todo ello se asegura el standard de calidad, y se aporta credibilidad, para evitar el escepticismo de los ciudadanos. También hay que destacar que la mina Tara acude, con frecuencia, a los servicios de Consultores especialistas en medio ambiente.

Internamente se desarrolla un programa de educación, para que cada empleado tenga la oportunidad de apreciar el trabajo realizado, en cada una de las secciones de la mina. Este proceso, unido al aumento de la conciencia ambiental, ha supuesto una respuesta positiva de los trabajadores hacia los logros ambientales, al tiempo que ha ayudado al control de la unidad responsable del medio ambiente. Simultáneamente, la mina realiza campañas educativas con los habitantes del lugar, especialmente, en las escuelas.

Aunque una mina normalmente es una gran productora de agua, en el caso de Tara se requiere de una fuente adicional (río Boyne), para el tratamiento del mineral.

El efluente del molino (estéril, agua y trazas de metal) se descarga en una gran balsa, en cuyo fondo se acumula el material decantado. Tras permanecer el agua en la balsa al menos 30 días en verano y 50 en invierno, el agua se reutiliza en el proceso.

Una parte reducida del agua clarificada, vuelve al río Boyne, cumpliendo las especificaciones que la licencia especifica, para el efluente y el agua receptora. Los controles incluyen la calidad de ambos, el ratio de dilución, así como los requerimientos relativos a la fauna piscícola y a la toxicidad, con un control muy completo de la población de salmones.



Pesca eléctrica en el río Boyne, para control de la calidad piscícola, aguas abajo de los vertidos de la Mina Tara (Irlanda).

La balsa de estériles, la mayor masa de agua en County Meath, atrae aves migratorias procedentes de Islandia, que llegan para invernar. En esta agua se controlan, desde hace varios años, los oligoelementos metálicos, e igualmente se hace con su contenido en el tejido muscular, hígado y riñón de las aves. Ningún grupo ha mostrado cambios perceptibles en el nivel de metales en sus músculos, y sólo un ligero incremento en sus órganos. Se continúan, por tanto, los estudios antes de decidir, el destino final de la balsa.



Balsa de estériles de la Mina de Tara (Irlanda), que da cobijo a una abundante avifauna.

La explotación del yacimiento, que tiene como roca encajante formaciones calizas, produce gran volumen de estériles alcalinos, parte de los cuales se emplean para el relleno

de los huecos mineros (*stope-and-pillar*). Los estériles que no retornan a la mina, constituidos prioritariamente por caliza machacada, se decantan en una balsa, localizada a 5 km de la mina.

Puesto que la empresa deberá entregar sus propiedades a la comunidad al final de la explotación, se viene realizando un concienzudo programa de investigación, acompañando de un amplio estudio de rehabilitación, incluyendo la construcción de ecosistemas mediante humedales y pantanales, en el ámbito de la balsa de decantación, con plantación de especies nativas propias de pantanales.

Al estar los rechazos del concentrador desprovistos de nutrientes y bacterias, se añaden fertilizantes, hasta conseguir la autofertilización del suelo, y establecer un ecosistema natural, con toda una gradación de áreas húmedas a áreas secas. Las áreas secas se revegetan de manera convencional, con pasto, arbustos y árboles, controlando en los pastos el contenido de metales, mientras que en los humedales se plantan especies propias de los pantanales.

Dada la proximidad a la población, se ha hecho todo lo razonable para reducir el nivel de ruido alrededor del emplazamiento: bermas y terraplenes de tierra para atenuar el ruido, y mantenimiento y reparación de los vehículos. Uno de los principales sistemas de ventilación, localizado en superficie e integrado por dos ventiladores centrífugos de 2,94 m de diámetro, cada uno de los cuales proporciona 118 m³/s, con dos motores de 500 kW, tiene una atenuación del nivel de ruido tal que no es perceptible a 120 m de distancia, donde se localiza la vivienda más próxima (el nivel de ruido está por debajo de 29 dB (A)).



Sonómetro para control acústico de la actividad minero-industrial en la Mina Tara (Irlanda).

Igualmente, todos los edificios de superficie, incluido el molino y la instalación de compresores, están insonorizados, para reducir el nivel de ruido.

Con respecto a las voladuras se controla la cantidad de explosivo utilizado, mediante estaciones de registro acústico y vibratorio, para verificar que se cumplen los requerimientos ambientales planificados. Las explosiones se diseñan para que, en cualquier vivienda, el límite de vibración producida no sea superior a la mitad del límite autorizado. Todos los instrumentos de registro de ruido y vibración se calibran diariamente, para asegurar que se cumple la regulación nacional e internacional, y el ingeniero de la Cámara Municipal visita mensualmente el centro de datos para inspeccionar los registros.

Por todo ello hoy se puede observar que lo que más acusan los registros sónicos, en el entorno de la Mina de Tara, es el canto de los pájaros.

MINA DE ORO DE BETZE-POST (CARLIN TREND, NEVADA, USA): AGUA PARA RIEGO Y RECARGA DE ACUÍFERO

Este importante yacimiento, que hemos tenido la oportunidad de estudiar, corresponde a un depósito epitermal de oro diseminado (óxidos en la parte superior y sulfuros en la inferior), tipo *strata-bound*, localizado en carbonatos metamorfizados, del Devónico y en rocas intrusivas, que aportaron el oro. Sus condicionantes hidrogeológicos son un tanto especiales, por la presencia de un importante acuífero, con aguas a elevada temperatura (Fernández Rubio 2002).

Esta mina, operada por Barrick, es una de las varias explotaciones a cielo abierto situadas en el sector NE del estado de Nevada (alguna de las explotaciones tiene continuidad en trabajos subterráneos).

Este distrito minero de Goldstrike, considerado como la mayor área de explotación de oro de América del Norte, y una de las mayores del mundo, tiene la mayor red de refrigeración subterránea del mundo.



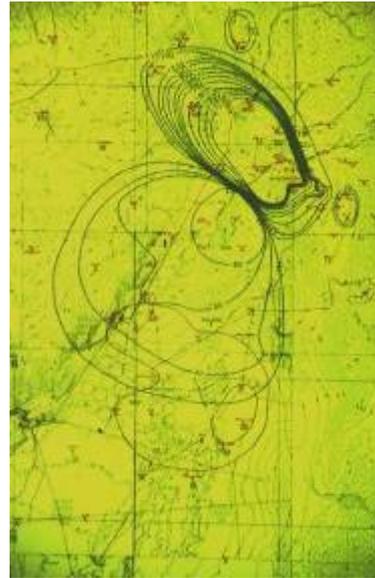
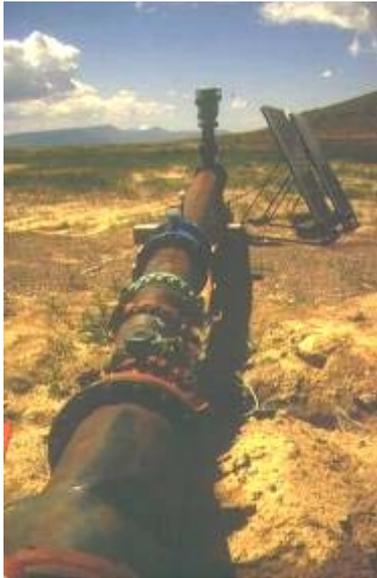
Vista de la mina de oro de Betze Post (Nevada, USA).

El drenaje de la mina se realiza desde sondeos perimetrales y en el interior de la corta, con un caudal bombeado de 3.670 litros/segundo. Cuidado especial se pone para no contaminar esta agua, consiguiendo una calidad perfecta.



Sondeos de drenaje en el interior y en la periferia de la mina Betze Post (Nevada, USA).

De esta agua aproximadamente un 5% se destina al consumo de la mina; un 10% se destina para el riego de unas 2.000 hectáreas (superficie en continuo incremento); el 85% restante se reinyecta en el mismo sistema hidrogeológico, a distancia, mediante sondeos profundos y recarga a través de embalses de superficie (Fernández Rubio, 2002).



Sondeo de re-inyección y conoides de drenaje minero y de recarga del acuífero.

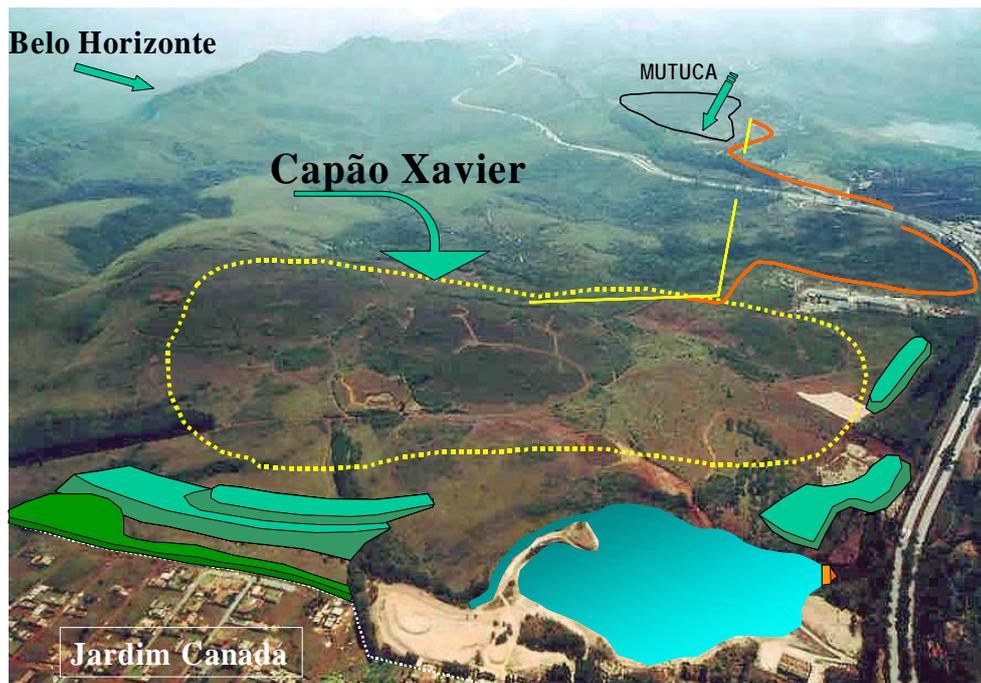


Embalse de recarga en el acuífero.

El agua que se aprovecha, dada su temperatura por encima de los 60° C, se la deja enfriar hasta 32° C, en un sistema de aireación y en una balsa, donde al mismo tiempo se rebaja el contenido soluble de CaCO₃ (procedente de las rocas carbonatadas del Paleozoico). En la nueva mina subterránea Meikle (Fernández Rubio, 2002), ubicada en su proximidad, se requiere de un sistema de refrigeración interior, dada la elevada temperatura de la roca (57° C). En este caso el agua extraída pasa por torres de enfriamiento, y se bombea a un enfriador de aire, antes de ser inyectada para la refrigeración de la mina.

MINA DE HIERRO DE CAPÃO XAVIER (MINAS GERAIS, BRASIL); COMPATIBILIDAD DE DRENAJE MINERO Y ABASTECIMIENTO URBANO DE AGUA

En este proyecto hemos tenido una participación muy activa, a petición no sólo de la empresa minera (Minerações Brasileiras Reunidas), sino también de la empresa responsable del abastecimiento de aguas en el Estado de Minas Gerais (COPASA). De manera concreta hemos realizado el Estudio de Impacto Hidrológico-Ambiental-Minero, y hemos dirigido todas las investigaciones hidrogeológicas, a un nivel de detalle muy preciso, así como la planificación de drenaje, incluyendo el diseño de todas las infraestructuras de control hidrológico, la modelización hidrogeológica, y todos los informes anuales de seguimiento (desde 1995), las propuestas de actuaciones y los planes directores (Fernández Rubio, *et al.*, 1997, 1998; Quadros Amorim, *et al.*, 1999).



Ubicación de la mina de Capão Xavier (Minas Gerais, Brasil), y entorno ambiental proyectado.

Este yacimiento, con reservas explotables de 140 millones de toneladas de hierro de alta ley, se localiza a tan sólo 15 km al sur de la ciudad de Belo Horizonte (población de tres millones de habitantes), en el denominado Cuadrilátero Ferrífero, una de las provincias metalogénicas más ricas del mundo en mineral de hierro; pero también se localiza junto a una floresta protegida, y a captaciones para abastecimiento de agua de la ciudad de Belo Horizonte. Todo ello ha obligado a una planificación minera muy cuidadosa ambientalmente, para la preservación de los recursos hidrológicos y ambientales, en un proyecto sostenible, cuyo principal objetivo fue no sólo minimizar el impacto del drenaje mineral, sino hacer que esta operación mejorara las condiciones actuales de gestión del acuífero.

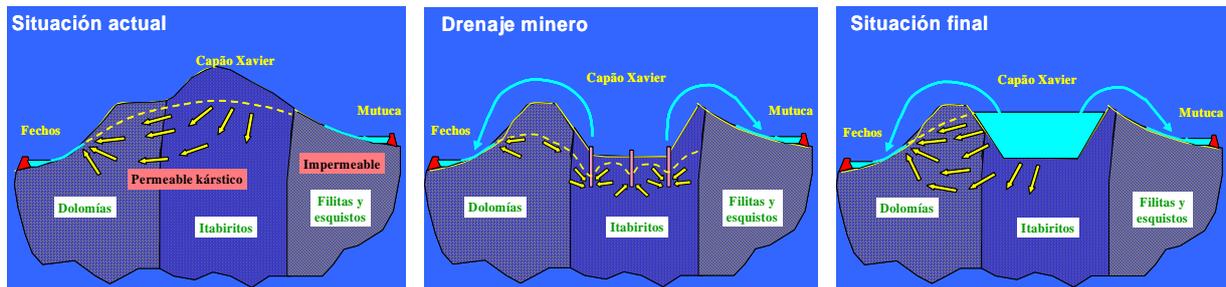
Esto se ha conseguido sobre la base de un análisis muy profundo y pormenorizado de todos los datos de base, con su informatización y tratamiento, y trabajos de geología de campo, con participación de los técnicos de ambas empresas, y de profesores del Departamento de Geología de la Universidade Federal de Ouro Preto.

El trabajo lo hemos realizado en contacto muy estrecho y fructífero con los equipos técnicos, proyectando y diseñando el equipamiento de estaciones meteorológicas completas y de aforo, piezómetros, y análisis sistemático de las aguas superficiales y subterráneas, trabajos todos ellos que han sido la base para establecer los criterios de protección hidrológica, programada a partir de un sistema de drenaje preventivo en avance (con 10 sondeos de drenaje, y decenas de piezómetros de control), y con una detallada normativa de control y seguimiento, para hacer compatible la explotación minera con las captaciones de abastecimiento a la ciudad.

Para ello se ha diseñado un sistema que permite garantizar la calidad de las aguas e incrementar las garantías de suministro, optimizando la gestión hidrológica, especialmente importante en un área con pluviometría muy irregular, que varía entre menos de 500 mm y más de 2.800 mm/año.

El activo hidrológico-ambiental de este proyecto es muy considerable, al optimizar los dispositivos de drenaje mineral, y hacerlos compatibles con el suministro de agua para abastecimiento, optimizando la gestión de este recurso, pero también lo es al planificar un

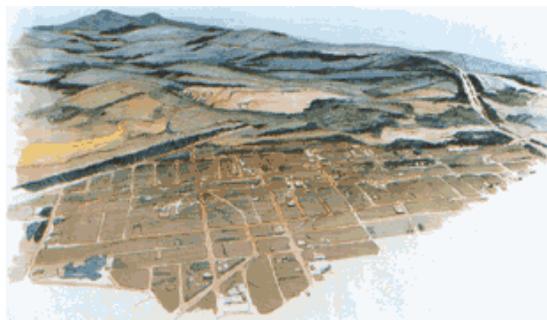
lago de corta final (de 60 millones de metros cúbicos de capacidad), que contribuirá a la biodiversidad de esta área, y conseguirá una integración paisajística y un agua de calidad, al situarse en la zona de recarga del acuífero (Fernández Rubio, 2002).



Esquema de funcionamiento hidrogeológico pre-mina, durante la explotación y post-mina (Capão Xavier, Minas Gerais, Brasil).

En este sentido se han conducido estudios detallados referentes a las posibilidades de eutrofización y salinización de las aguas, estableciendo las condiciones de entradas por precipitación y salidas por evaporación y flujo subterráneo. En todo caso hemos diseñado Sistema de Gestión Ambiental para garantizar el cumplimiento de las normativas establecidas, y la consecución de los objetivos planteados, y especialmente los efectos positivos del proyecto sobre los recursos hidrológicos.

Especial atención se ha puesto en reducir al máximo la incidencia de la operación minera sobre la población urbana de Jardim Canada, y en la integración del lago final de mina en el entorno.



Integración ambiental de la excavación minera y del lago final de mina (Capão Xavier, Minas Gerais, Brasil).

Por otra parte los estériles de esta mina permitirán el relleno (minería de transferencia) de una mina próxima, recién clausurada (Mina da Mutuca).

subhorizontales, que se extrae selectivamente. Los materiales de recubrimiento se apilan sistemáticamente, en una minería de transferencia, conforme avanza la explotación, y el lignito se transporta en ferrocarril a la central térmica.

El agua drenada mediante sondeos perimetrales profundos, y el agua recogida en el fondo de corta (tras ser sometida a un proceso de clarificación muy eficaz), se emplean en un 50 % para la producción de vapor y la refrigeración, mientras que el otro 50 % es vertido a los ríos Spree y Schwarze Elster.



Central térmica de Jämschwalde (Alemania).

La calidad de esta agua es tal que se emplea para la cria de peces en piscifactoría, al tiempo que alimenta a lagos con condiciones ideales para la vida de gran número de aves acuáticas (garzas, gaviotas, cisnes, cigüeñas,...).



Restauración hidrológico-ambiental-minera en el entorno de la central térmica de Jämschwalde (Alemania).

MINA DE CARBÓN DE ROTHER VALLEY COUNTRY PARK (INGLATERRA): REHABILITACIÓN MULTIUSOS

Un caso que merece especial atención, por su interés, y en el tuvimos la oportunidad de intervenir, es el relativo a la mina de carbón, a cielo abierto, de Rother Valley, explotada por la National Coal Board, desde 1976 hasta 1981, sobre una superficie de 300 ha, localizada en los municipios de Rotterdam, Sheffield y North East Derbyshire (Inglaterra), y de la que se extrajeron 1,7 millones de toneladas de carbón de alta calidad.



Aspecto general de la mina de carbón de Rother Valley (Inglaterra), durante la explotación.

Durante su explotación se realizó una consulta pública muy completa, para definir el destino final del área minera, que sirvió de base para diseñar el aprovechamiento post-mina en forma de un parque que cubriera tres objetivos prioritarios:

- crear cuatro lagos y un terreno circundante, donde desarrollar una amplia variedad de actividades recreativas, basadas en el uso del agua y el terreno,
- desarrollar diferentes tipos de hábitats, para acoger a las numerosas especies animales que habitan o migran a la zona, y
- contar con un sistema eficiente de control de avenidas, para proteger a los entornos urbanos e industriales aguas abajo.

Con estas bases, al finalizar la extracción de carbón, se impermeabilizó la excavación, mediante una capa de arcilla compactada, de un metro de espesor, y se llenó con agua limpia, bombeada desde el Moss Brock, situado a 2,5 km de distancia.



Aspecto general de la antigua mina de carbón de Rother Valley (Inglaterra), tras la rehabilitación.

Se plantaron 480.000 árboles y arbustos, y se restauró el antiguo Bedgreave Mill y los edificios cercanos, para albergar las instalaciones del parque. En mayo de 1983, apenas dos años tras finalizar la explotación minera, el parque fue inaugurado, y desde entonces recibe un número creciente de visitantes, que supera ya las 750.000 personas/año.



La antigua mina de carbón de Rother Valley (Inglaterra), escenario de deportes acuáticos.

El costo total del proyecto ascendió a cuatro millones de libras, de las cuales la Countryside Comisión aportó un millón como subvención, el Consejo de Deportes aportó 50.000 libras, y el resto fue contribución de los Consejos Locales.

Conforme la vegetación alcanza mayor desarrollo, el parque viene ganando valor para la vida animal, y nuevas actividades recreativas se van incorporando. Por otra parte al complejo del Bedgreave Mill, se le han añadido nuevos edificios. Se ha construido un Centro Náutico, perfectamente integrado ambientalmente, diseñado con los mismos materiales y apariencia de los edificios con más de 100 años de antigüedad.

En 1990 se construyó un Centro de Deportes Acuáticos, en la parte sur del Rother Valley Lake. En ese mismo año se implantó, para los que gustan de deportes más activos, un sistema de esquí acuático por cable fijo, con velocidad que puede variarse desde 27 km/hora hasta 58 km/hora, y que puede ser utilizado simultáneamente por ocho esquiadores, permitiendo realizar este deporte a bajo costo, y con un mínimo impacto ambiental.



Actividades acuáticas recreativas en la antigua mina de carbón de Rother Valley (Inglaterra).

Por otra parte, en el lago principal desarrollan sus actividades muchos clubs locales, que incluyen buceo, exhibiciones de maquetas de barcos, competiciones de pesca, etc. En 1996 se inauguró un campo de golf de 18 hoyos, con financiación privada.



Práctica de golf, en terrenos de la antigua explotación minera de carbón de Rother Valley (Inglaterra).

Muchas otras actividades tienen acogida en este parque: áreas recreativas para niños; cuatro campos de football; un campo de volleyball; cursos de orientación, con una amplia variedad de circuitos, de 2,6 a 5 km de recorrido; ski sobre hierba en una ladera de una antigua escombrera, donde se ha celebrado un Campeonato Nacional de Ski sobre Hierba; tres circuitos para bicicletas, libres de coches, de los cuales dos son sobre terreno llano y caminos compactados, ideales para niños, y el tercero está preparado con elevaciones de hasta 60 metros, y zonas encharcadas en la época lluviosa, especial para motocross; circuitos peatonales; áreas para picnics y barbacoas; cafetería; centros de información; tiendas de artesanías.

En los humedales se ha puesto especial énfasis en ofrecer un hábitat ideal para muchas especies de aves acuáticas. Uno de los lagos está especialmente preservado para fauna salvaje, con sus orillas plantadas con vegetación apropiada, con zonas pantanosas, en las que los peces desovan, las aves instalan sus nidos y las ranas completan un biotopo ideal, al tiempo que la vegetación protege frente a la erosión y favorece la sedimentación de los sólidos en suspensión. Este lago incluye una isla ideal para anidar las aves, protegidas de cualquier depredador. Un cuidadoso control del nivel del lago provee las mejores condiciones; por ejemplo, durante la migración otoñal, se rebaja algo el nivel del agua, para hacer aflorar fangos, ricos en pequeños invertebrados, de los que se alimentan las aves; en primavera se eleva ligeramente el nivel del agua, para dar lugar a numerosas pequeñas islas donde las aves anidan a resguardo de los zorros que habitan en la reserva.

Como en una rehabilitación minera la cubierta vegetal no se consigue de la mañana a la noche, la plantación se inició durante la vida de la mina, para asegurar el establecimiento de la vegetación lo antes posible. Se plantaron muchos pequeños bosquetes, hábitats preferidos por muchas especies, con fácil acceso a áreas abiertas para encontrar su alimento. A los setos se les ha dado el papel que les corresponde, como refugio de especies y corredores de fauna que se desplaza de un área a otra.



Desarrollo agroganadero en terrenos de la antigua explotación de carbón de Rother Valley (Inglaterra).

Con todo esto la rehabilitación de este espacio minero ha dado lugar a un variado mosaico de paisajes y hábitats diferentes: humedales, lagos, praderas y bosquetes.

Antes de la operación minera se producían periódicamente inundaciones en las tierras bajas. Ahora el sistema de lagos juega un papel muy importante en el control de las avenidas. Una serie de canales, situados adecuadamente, permiten derivar las aguas hacia

los lagos, con la simple elevación de compuertas, lo que permite controlar hasta la crecida centenaria (un millón de metros cúbicos); este sistema ya ha sido experimentado, con éxito, en situaciones de emergencia, consiguiendo a continuación evacuar en dos días las aguas de inundación almacenadas, para volver los lagos a su situación normal.

CANTERA DE GRANITO EN BRAGA (PORTUGAL): ESTADIO DE FUTBOL

Con motivo del Campeonato de Europa de Futbol del 2004 se ha construido, en la ciudad portuguesa de Braga un estadio municipal que tienen mucha relación con los activos ambientales derivados de la minería.

El proyecto, obra del arquitecto Souto de Moura es, sin duda, un trabajo original y magnífico, que ha permitido la rehabilitación ambiental de una cantera, de cuya excavación ha sabido extraer un gran provecho. El estadio dispone sólo de gradas laterales, según el eje mayor del campo de futbol, dejando abierto el espacio correspondiente a las porterías; de esta manera tras una de ellas se ofrece el espectáculo de las rocas fracturadas, en sus tonalidades variadas, de la antigua cantera, mientras que tras la otra se abre al paisaje verde de la inmensa planicie del río Miño, salpicada de moradas.



El Estadio Municipal de Braga (Portugal), construido en una cantera de granito clausurada.

La diferencia de cotas ha sido bien aprovechada para poder acceder al estadio por encima, a poniente, a nivel de la roca no excavada, y por abajo, a levante, a nivel del campo. Un sistema de cables, que se extiende de una grada a otra, sirve para tensar su estructura. Por otra parte el arquitecto ha sabido jugar con el hormigón, para crear juegos de formas, que se encajan en la roca que lo cobija.

Bajo el campo se ha construido una enorme sala, para albergar exposiciones o dar cobijo a espectáculos diversos, al tiempo que sirve de tránsito a la grada opuesta.

CANTERA DE CALIZA EN DALHALLA (DALARNA, SUECIA): ANFITEATRO AL AIRE LIBRE

Draggängarna (Suecia) fue una antigua cantera de calizas, formadas a partir de fangos y fauna en un mar tropical durante el Ordovícico (hace de 505 a 440 millones de años), cuando la región estaba situada en el hemisferio sur. Su explotación se inició en la década de 1940 y continuó hasta 1991. Hoy es un fantástico anfiteatro al aire libre, con 4.000 asientos y una acústica espectacular (Lovgren, 2003).

Poco después del cese de la actividad minera, Margarita Dellefords, renombrada cantante de ópera, viajaba por Suecia a la búsqueda de una localización adecuada para ofrecer espectáculos de ópera en verano. Un amigo le sugirió que visitase una cantera de

caliza ubicada en el bosque de Rättvik en la región central de Suecia (el Dalarna). Tan pronto se encontró delante de la cantera descubrió que era lo que buscaba: aquella excavación de 400 m de largo, 175 m de ancho y 60 m de alto era un anfiteatro natural. Bajó al fondo de la cantera, hasta el agua, y no pudo resistir la tentación de comenzar a cantar la ópera Tosca.

Pronto se inició la adaptación, con un costo relativamente modesto (un millón de dólares), y en 1994 se ofreció en Dalhalla el primer concierto.

Los creadores de esta obra vieron en este marco el lugar perfecto para las óperas emmarcadas en mitología de Richard Wagner, por ello, al estar enclavada en la región de Dalarna, y ser Valhalla, el "Cielo de los Héroes" en la mitología nórdica, le dieron el nombre de Dalhalla.



Antigua cantera de caliza convertida en anfiteatro para ópera y otros espectáculos (Dalhalla, Suecia)

La primera visión de Dalhalla es impresionante. Los visitantes acceden a través de un camino cruzando el bosque e, inesperadamente, se abre ante ellos la majestuosa cantera. Se desciende hasta el interior de la excavación, donde la grada se enmarca entre rocas, frente a un tranquilo lago de agua verde.

La acústica es tan fantástica que muchas óperas se realizan sin micrófonos. El público debe permanecer sin hacer ruido ya que estos se verían amplificados, y podrían interferir con el espectáculo. Es lo que han dado en denominar acústica verde.

Dalhalla ha vitalizado la industria turística de Dalarna, y se ha hecho rápidamente famosa por sus conciertos y presentaciones en verano. Atrae ya más de 100.000 visitantes al año, y se ha estimado que supone anualmente una renta adicional de turismo de trece millones de dólares.

AGRADECIMIENTOS

Se hace constar el agradecimiento a las compañías mineras con las que hemos colaborado en varios de estos proyectos, igualmente al Rother Valley Country Park por la utilización de fotografías y esquemas bajo "*copyright Rother Valley Country Park ©, all rights reserved*".

Igualmente a cuantos colegas han hecho posible estos trabajos. De manera especial a Leandro Quadros Amorim (Brasil), Raghu Singh (Australia), Christian Wolkerdoffer (Alemania), Gobain Ovejero y Mike Doyle (España), Angel Abajo y César Piret (España), Fernando Real, Pedro Carvalho y Carlos Cupeto (Portugal), Vladimir Straskrava (+) (USA)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Doyle, M.G., Ovejero, G., Videira, J.C. y Vázquez, J. 1999. *History of the environmental aspects of the Las Cruces Project* (Pyrite Belt, Spain). Mine Water & the Environment. IMWA Congress. I: 135-141 pp. Sevilla.

Fernández Rubio, R. 1992. *Tara Mine; una mina verde en una isla esmeralda*. Tecno Ambiente. Nº 18: 63-68 pp. Madrid.

Fernández Rubio, R. 2001. *La minería en el contexto de la ordenación del territorio. Proyecto Las Cruces (España)*. Mendoza (Argentina).

Fernández Rubio, R. 2002. *Agua una visión mineral*. Belo Horizonte, Brasil

Fernández Rubio, R., Amorim, L.Q., León, A., Baquero, J.C. y Lorca, D. 1998. *Compatibilidad del drenaje minero y el abastecimiento urbano de agua en el área del Cuadrilátero Ferrífero – Belo Horizonte (Brasil)*. X Congreso Internacional de Minería y Metalurgia. 375-400 pp.

Fernández Rubio, R., de León Fábregas, A., Baquero Úbeda, J.C.; Gutiérrez del Olmo, A., y Lorca Fernández, D. 1997. *Compatibilización del abastecimiento de agua a Belo Horizonte, frente a la explotación minera de Capão Xavier (Minas Gerais, Brasil)*. Tecno Ambiente. Nº 68. 47-50 pp. Madrid.

Amorim, L.Q., Fernández Rubio, R. y Flecha Alkmin, F. 1999. *The effects of mining Capão Xavier iron ore deposit on the water supply of Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil*. Mine Water & the Environment. IMWA Congress. I: 359-366 pp. Sevilla.