

El geólogo en la exploración y explotación minera

Manuel Regueiro

Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

Roberto Oyarzun

Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias Geológicas.

Universidad Complutense de Madrid

La importancia de la actividad minera y de la geología de minas

El hombre ha sido minero y geólogo desde los albores de la humanidad. Primero a través de las industrias líticas; fragmentos de rocas o minerales más o menos trabajados para su uso como herramientas o armas; luego continuó con los metales, extrayéndolos desde los minerales (edades del Cobre, Bronce, Hierro), refinándolos y combinándolos en aleaciones a medida que progresaba, de paso, inventando



Figura 1. Operación de carga de mineral oxidado de cobre en la mina Radomiro Tomic (RT) en el distrito minero de Chuquicamata (Chile).

II LA PROFESIÓN DE GEÓLOGO

la metalurgia. Ésta es una historia de búsqueda de recursos, de su minería y de las aplicaciones tecnológicas de los productos obtenidos. Se puede decir, por lo tanto, que la minería es la industria más antigua y la de minero y geólogo “la segunda profesión más antigua” (figura 1).

La humanidad progresó vertiginosamente durante el siglo XX, generando falsas ilusiones sobre lo que parecía un futuro muy alejado de sus balbucentes comienzos industriales hacia finales del siglo XVIII y comienzos del XIX. Pero, ¿cuál es la realidad presente? Lo cierto es que la sociedad sigue siendo absolutamente dependiente de los recursos minerales, con ejemplos tan clásicos como los metales hierro, cobre, cinc, o menos tradicionales pero cada vez más relevantes, como las rocas y minerales industriales. Hoy, la industria minera extrae anualmente alrededor de 40.000 millones de toneladas brutas de materiales, para producir 29.000 millones de toneladas brutas de más de 100 minerales y rocas distintos comercializables. Por otra parte, la incorporación de las llamadas economías emergentes (China, Brasil, India, etc.) no ha hecho más que incrementar de manera notable la demanda de recursos minerales.

Esas sustancias, para que tengan interés para la industria, deben poder producirse de manera legal y rentable y, especialmente hoy en día, de un modo respetuoso con el medio ambiente. Es decir, los depósitos minerales son elementos geológicos que pueden investigarse científicamente por sí mismos o como parte de un ecosistema local y como elementos económicos que deben evaluarse en lo que respecta a las autorizaciones pertinentes y su rentabilidad.

El advenimiento de las nuevas tecnologías (p.ej., microelectrónica) es complementario y no alternativo en la mayoría de los casos. Baste con poner de ejemplo los materiales requeridos para la construcción de un edificio o una carretera (arena, grava, áridos, cemento, acero, cinc, cobre, etc.), aviones o coches (una larga lista de metales comunes o especializados, materiales cerámicos), el tendido eléctrico (acero para las torres, cobre en el cableado). Analicemos por un momento el ordenador que uno tiene al frente: componentes de cobre, piezas de aluminio, un cable de cobre para enchufarlo al tendido eléctrico, o el mismo chip procesador (*silicon chips*). Por último, si nos remitimos a las tecnologías avanzadas, no olvidemos que el sistema ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) funciona a través del mismo hilo de cobre que porta la señal telefónica (figura 2).

Si se medita todo esto un momento, se llegará a la conclusión que detrás de casi cada aspecto de la vida moderna está esa actividad oculta, a veces no bien entendida, que es la minería. Al respecto hay una frase muy ilustrativa que aparece en una pegatina de la



Figura 2. Oxidados de cobre precipitados en la corta de Mina Sur (distrito minero de Chuquicamata) reflejados sobre una charca.

Nevada Mining Association: If it isn't grown it has to be mined (si no se cultiva, habrá que extraerlo de una mina). En este sentido, si bien es comprensible un cierto nivel de ignorancia sobre estas materias por una parte importante de la sociedad, no lo es tanto en lo que se refiere a los gobernantes, ya que, si ha habido una actividad perseguida por leyes progresivamente más severas, esta es la minería. Si lo que se ha pretendido es proteger el medio ambiente en España o Europa en general, el resultado final de estas medidas es la exportación del problema a terceros países. Y si bien no se quiere tener la actividad minera en casa, la demanda de productos mineros en los países de la Unión Europea no cesa. ¿Genuina preocupación ambiental o hipocresía?

Existe otro aspecto de la minería que la caracteriza y diferencia de las demás industrias: los yacimientos minerales están donde están y no pueden cambiarse de ubicación, como una fábrica de cualquier otro producto. En otras palabras, los recursos minerales poseen un valor "localizado". Hay que asumir por eso que como la localización de los yacimientos los dicta la naturaleza, no dependen del hombre que necesita esos minerales para su supervivencia. De esta manera, hay que tener muy claras las prioridades a la hora de decidir sobre si un determinado yacimiento se pone o no en explotación por cuestiones sociales o ambientales. En otras palabras, este tipo de decisiones pueden comprometer el futuro de la propia sociedad que se pretende defender.

En resumen, la industria minera es esencial para el desarrollo de la sociedad moderna y, además, ofrece retos muy interesantes para carreras geológicas en temas como explotación y exploración de rocas y minerales metálicos y no metálicos de uso industrial.

El papel del geólogo en la industria minera

El geólogo en las minas

El papel del geólogo en una mina cambió significativamente durante el siglo XX. En los primeros tiempos, la labor geológica en una mina (si es que se realizaba alguna) era llevada a cabo por un ingeniero de minas, con mayores o menores conocimientos sobre el tema. En este sentido parece pertinente relatar una historia muy ilustrativa del pensamiento antiguo y sobre cómo las cosas empezaron a cambiar. En la década de los años veinte, el contenido en oro del yacimiento de Homestake (Estados Unidos) decrecía y pareció que se iba a agotar el rico filón. Dos ingenieros de la plantilla encargados de analizar el futuro de la mina observaron que a niveles por debajo de los 375 metros las dimensiones de los filones disminuían rápidamente, concluyendo que éstos terminarían en roca estéril a los 600 metros; en otras palabras, Homestake se agotaba. El presidente de la compañía, Edward Clark, no daba crédito a los informes pesimistas, aunque era evidente que la producción estaba disminuyendo. Contrariamente a las costumbres de la época tomó la decisión de pedir un segundo informe a otro experto, un geólogo de minas perteneciente a una institución académica (en aquellos años, dos herejías al mismo tiempo). El geólogo elegido era Donald D. McLaughlin, profesor de la Universidad de Harvard quien, antes de dedicarse a la enseñanza, había consagrado varios años a trazar mapas de las zonas ricas en cobre de Los Andes peruanos. McLaughlin pasó el verano de 1926 estudiando la roca que afloraba en las laderas y el interior de Homestake. Lo que vio le llevó a una conclusión diametralmente opuesta a las pesimistas predicciones anteriores: lejos de agotarse, el filón era rico y extenso. Lo que había engañado a los ingenieros de Homestake era la peculiar forma del filón. McLaughlin determinó que el filón había sido originalmente una masa ininterrumpida, que posteriormente había sido atravesada por diques estériles, que encerraban bolsas de mineral. Desde el principio los mineros habían volado y transportado a superficie la roca estéril junto con la masa filoniana aurífera, procedimiento largo y costoso. El excelente mapa que McLaughlin dibujó de la geología de la mina, permitía predecir el curso del filón por las zonas aún no explotadas. Trazó luego los planos de las nuevas galerías, de manera que siguieran el filón, evitando las zonas de roca estéril. A muchos empleados de Homestake les hizo poca gracia que un geólogo de Harvard les viniera a decir que estaban haciendo mal su trabajo, y a McLaughlin le resultó difícil convencerles. Pero cuando se adoptó el plan de explotación selectiva, el valor de cada tonelada subió a más del doble. Fue así, en gran medida, que los métodos de la geología de minas, tal como los sentó McLaughlin en Homestake, se fueron haciendo imprescindibles en las minas de todo el mundo.

Esta historia real nos lleva a una segunda reflexión, la geología es antes que nada mapas. Lo segundo más importante son los mapas y, por último, siempre están los mapas. Sin mapas no hay geología, es la base que sustenta todo el entramado en nuestra profesión. Poco o nada importan los supuestos méritos curriculares de un aspirante a geólogo de minas o exploración si entre éstos no se encuentran las habilidades y destrezas necesarias para hacer un mapa geológico (figura 3).

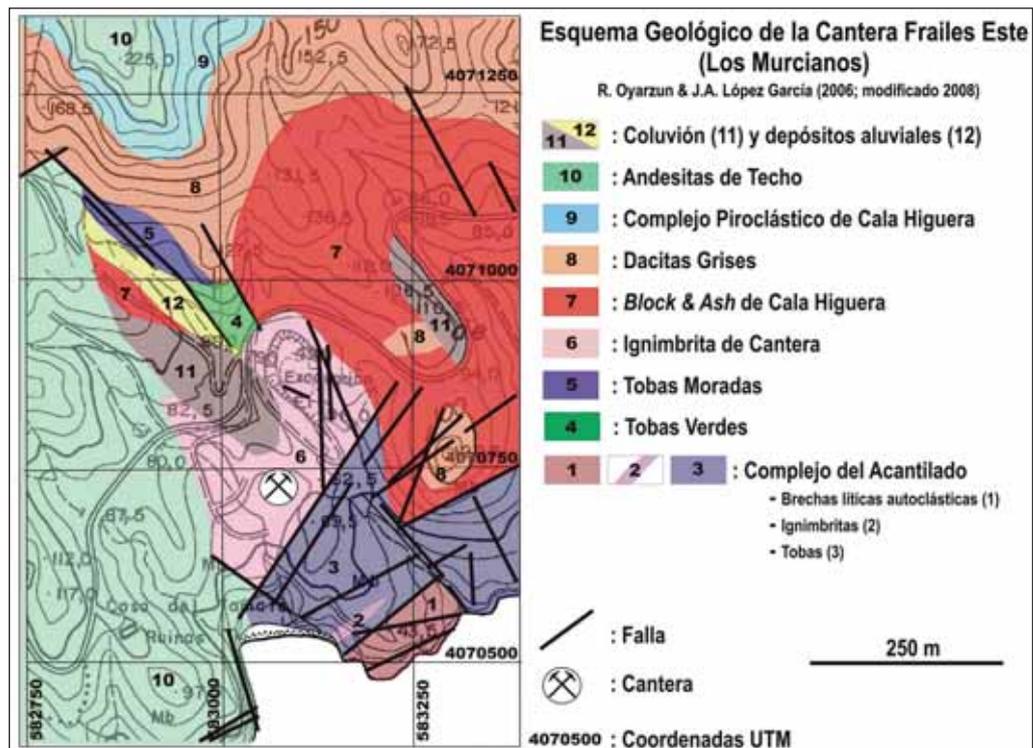


Figura 3. Ejemplo de mapa geológico realizado para un estudio geomínero en Almería.

Hoy en día, cualquier compañía minera medianamente importante dispone de un departamento de geología, sección también conocida en otros países como superintendencia de geología. Un departamento de geología puede tener hasta más de 10 geólogos, y en distritos mineros importantes, como el Chuquicamata en Chile, la cifra puede alcanzar a los 70 geólogos. Éstos cumplirán distintas tareas en la mina: cartografía, testificación de sondeos, estimación de reservas, planificación a corto, medio y largo plazo de la explotación minera, estudios geotécnicos, estudios mineralógico-texturales. A estas labores habría que sumarles las de exploración en el entorno inmediato de la explotación minera o en áreas alejadas (figura 4).

II LA PROFESIÓN DE GEÓLOGO



Figura 4. El ámbito de trabajo en las minas.

El departamento de geología deberá tener un diálogo fluido y permanente con algunos departamentos de ingeniería (explotación, metalurgia). Esto es vital, ya que el ingeniero debe conocer de la manera más precisa posible el sector de la mina que se va a explotar, empezando por las características geotécnicas de la roca. En lo que se refiere a la parte metalúrgica, la labor del geólogo es doble. Por una parte, debe indicar de manera exacta las leyes del mineral que entrará en la planta de tratamiento y, por otra, las características mineralógicas y texturales de la mena y la ganga. Lo normal en un yacimiento mineral es que la abundancia relativa de los minerales varíe, lo cual puede tener repercusiones enormes. Supongamos a manera de ejemplo que la ley de cobre en una mina no varía substancialmente en profundidad, pero que la mena principal pase de calcopirita a enargita. Este último mineral contiene arsénico, lo cual significa que habrá repercusiones técnicas y ambientales; en otras palabras, habrá que adaptar los procedimientos metalúrgicos. Por otra parte, el tipo y grado de molienda tendrá que adaptarse a las variaciones del grado de liberación de la mena. O qué decir de las explotaciones auríferas que operan con el método de lixiviación en pila. El que la mena de oro sea rica o no en sulfuros tiene grandes implicaciones ya que el principal reactivo empleado (cianuro: CN^-) tiende prioritariamente a formar compuestos con el azufre (tiocianato) (figura 5).

En lo que respecta a la exploración minera, reseñaremos aquí algunos casos interesantes, donde la labor geológica jugó un papel decisivo.



Figura 5. Cianuración en pila en la mina El Solado, Chile.

Donde dije digo, digo diego: la importancia de ser adaptable. O cómo 'wrong' también puede convertirse en 'right' (Olympic Dam, Australia)

En los años cincuenta se desarrolló una auténtica revolución en el pensamiento geológico en Australia con respecto al origen de los yacimientos metalíferos del Precámbrico. Hasta entonces, estos yacimientos habían sido considerados como hidrotermales s.s., esto es, generados por soluciones calientes ascendentes provenientes de un magma granítico. Pero de pronto, empezaron a aparecer rasgos geológicos que apuntaban a que estas mineralizaciones podían ser de origen sedimentario, por ejemplo, el caso de Broken Hill. Analicemos por un instante las consecuencias de este cambio radical del pensamiento. Estos yacimientos podían ser explicados en términos sedimentarios, sin que hiciera falta la intervención de cuerpos ígneos profundos. Este pensamiento se vio reforzado por los estudios que habían realizado los geólogos ingleses (principalmente) en el Copper Belt de Zambia (en esa época: Rodesia del Norte). De acuerdo con las ideas prevalecientes, esos yacimientos de cobre (p. ej., Mufulira, Rokana, N'kola, etc.) se habían generado por procesos sedimentarios, en los que habían intervenido probablemente también, procesos bacterianos, electroquímicos y exhalativos. Sumemos a esto que se suponía (y supone), que el cobre se había derivado del basamento de

II LA PROFESIÓN DE GEÓLOGO

la secuencia proterozoica que alberga las mineralizaciones estratiformes del Copper Belt. De esta manera, con sentido común, los geólogos australianos hicieron un rápido ejercicio mental percatándose de que en principio también ellos disponían de un basamento antiguo y una cubierta proterozoica-cámbrica, de tal manera, que ¿por qué no podía haber en Australia yacimientos de cobre equivalentes a los del Zambian Copper Belt? En Australia del Sur estaban las rocas muy antiguas del cratón Gawler y, encima de éstas, en discordancia, las facies sedimentarias del Stuart Shelf. Reforzando aun más este pensamiento estaba la presencia de un pequeño yacimiento estratiforme de cobre emplazado en las facies del Stuart Shelf: Mount Gunson. Utilizando datos indirectos, tales como intersecciones de lineamientos gravimétricos y magnéticos de carácter regional-continental, los geólogos de la compañía minera Western Mining decidieron que el punto donde hoy está Olympic Dam era el más promisorio. Este modelo de exploración (teórico en muchos aspectos) se veía reforzado por el hecho de que el yacimiento de Mount Gunson estaba precisamente asociado a uno de esos lineamientos. Los sondeos comenzaron en 1975, cortando el primero de ellos sedimentos horizontales del Cámbrico y el Proterozoico (facies del Stuart Shelf). Luego, el sondeo pasó la discordancia (con el cratón Gawler) y cortó 40 metros de mineralización de cobre de baja ley (~ 1 por ciento Cu), y no fue hasta el noveno sondeo que se encontraron leyes económicas. Los geólogos de la Western Mining rápidamente se dieron cuenta de que había dos cosas que no encajaban con el modelo: la zona mineralizada estaba en el basamento, no por encima de éste, y la roca encajante de la mineralización eran cuerpos de diatremas hematíticas, no sedimentos. Digamos que los hechos modificaron radicalmente la perspectiva dictada por el modelo de exploración. A continuación, a medida que se estudiaba en mayor detalle la geología del yacimiento, se continuó refinando el modelo. Los hechos pueden ser resumidos de la siguiente manera:

1. Modelo de exploración (pre-sondeos): yacimiento estratiforme de cobre en la cubierta sedimentaria de un basamento antiguo.
2. *Debris flow* de brechas y avalanchas de roca a lo largo de los escarpes de fallas activas. Las brechas habrían sido mineralizadas por las soluciones provenientes de actividad geotermal en relación con un vulcanismo.
3. El modelo avanzado: yacimiento principalmente hidrotermal formado hace unos 1.600 millones de años, asociado a diatremas que se formaron en relación con un vulcanismo ácido.

A partir de esta historia extraiga sus propias conclusiones, sin olvidar que la exploración necesita de mentes con ideas lo suficientemente flexibles, sin embargo, como para que un modelo (que puede ser correcto o no) jamás atenace nuestras decisiones. *La cratonización es un fenómeno que debe afectar a las rocas, no al pensamiento.*

El descubrimiento de Kalamazoo (o cómo San Manuel recuperó su otra mitad)

Pocos ejemplos ilustran mejor la importancia de los estudios geológicos estructurales como el descubrimiento del yacimiento tipo pórfido cuprífero de Kalamazoo en la década de los sesenta, en el cual participó de manera fundamental el geólogo americano J. D. Lowell. Dicho descubrimiento está rodeado de varios aspectos notables entre los que habría que destacar, sobre todo, el estudio integral del problema. Si no entendemos la geología de una zona, poco podremos hacer en lo que respecta a exploración, salvo que se confíe en la suerte como elemento esencial del proceso. Esto cobra especial relevancia si lo que se está buscando es un cuerpo que puede no aflorar.

Los años setenta estuvieron marcados en el campo de la geología económica por la publicación de una serie de trabajos sobre alteración hidrotermal (pórfidos cupríferos) en la revista americana *Economic Geology*. Quizá el más significativo de ellos es un clásico en el tema: *Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits* (Lowell y Guilbert, 1970). Una de las ilustraciones más conocidas del trabajo muestra la zonación espacial de las facies de alteración hidrotermal en San Manuel-Kalamazoo (Arizona, EE UU). En la actualidad, dicha figura se encuentra en prácticamente todos los textos de estudio sobre yacimientos minerales. Sin embargo, un detalle a veces poco señalado (y en ocasiones omitido) en dicha figura es la presencia de una falla que corta el esquema de manera oblicua. Se trata de la falla San Manuel y, como veremos a continuación, bajo el punto de la aplicación de métodos estructurales al estudio y exploración de yacimientos minerales, es un rasgo extremadamente importante, paradójicamente, poco o nada señalado en los textos de estudio. San Manuel-Kalamazoo no es ni económica ni geoméricamente un yacimiento único; por el contrario, se trata de dos cuerpos mineralizados basculados: San Manuel y Kalamazoo, notablemente separados en el espacio por una falla normal de bajo ángulo (falla San Manuel). Si bien originalmente constituían un solo cuerpo mineralizado, el movimiento normal de la falla cortó el cuerpo mineralizado generando los dos segmentos actualmente conocidos. San Manuel (más cercano a la superficie) se localiza a muro de la falla y Kalamazoo 1,6 kilómetros hacia el Oeste (a una profundidad de 800-1.220 metros) a techo. Lo importante: si bien San Manuel era conocido, el descubrimiento de Kalamazoo (Lower K) fue la consecuencia de un trabajo geológico integrador, que relacionó las facies de alteración y la mineralización con la estructura. El razonamiento básico de exploración fue el siguiente (Lowell, 1968):

1. San Manuel representaba sólo una parte de un cuerpo mayor.
2. El cuerpo se encontraba basculado.

II LA PROFESIÓN DE GEÓLOGO

3. La falla que cortaba San Manuel era normal y de bajo ángulo. Conclusión, un segmento de San Manuel tenía que estar más abajo, sobre la falla.
4. Resultado: efectivamente, más abajo, hacia el oeste yacía un cuerpo mineralizado, luego bautizado como Kalamazoo (Lower K).

El trabajo del geólogo en la minería actual

Vamos a intentar dar respuesta a la serie de preguntas que se podría hacer cualquier geólogo o estudiante de geología que desee especializarse en este campo.

¿Qué es un geólogo que trabaja en la industria minera?

Es una persona que tiene como trabajo cotidiano la búsqueda, investigación y explotación de yacimientos minerales cuya explotabilidad sea económicamente rentable. El doctor Ridge decía ya en 1983 que las únicas razones por las que las compañías mineras contratan a geólogos son: encontrar yacimientos explotables con rentabilidad, o asegurarse de que la totalidad del depósito que está siendo minado es extraído, asimismo, en condiciones de rentabilidad (figura 6).

Actualmente, hay dos grandes campos de la industria minera que determinan también dos tipos distintos de geólogos especialistas:

- Minería metálica.
- Minería de rocas y minerales industriales.

Dentro de esos dos grandes campos, hay geólogos que trabajan en exploración minera exclusivamente y geólogos que trabajan directamente en la explotación de los recursos minerales en minas o canteras, en los estudios ambientales previos a la explotación, en el seguimiento ambiental de los trabajos de restauración simultáneos con la explotación y en los proyectos de restauración ambiental tras el término de las mismas. Los geólogos de exploración especialistas en minería metálica son los responsables de la localización de nuevos yacimientos o de investigar los conocidos. Para localizar un yacimiento, los geólogos utilizan técnicas tales como sensores remotos (imágenes de satélite), fotogeología, cartografía geológica, petrología, geofísica (estudios con equipos magnéticos, radiométricos, eléctricos, sísmicos o gravimétricos) y geoquímica. La fase inicial conlleva una larga y ardua labor de campo, muchas veces en sitios remotos del planeta, donde la recompensa proviene de tres fuentes diferentes aunque complementarias:

1. La posibilidad real de encontrar un cuerpo mineralizado.
2. Un salario excepcionalmente bueno.



Figura 6. Geólogos en Mina Sur (Chile).

3. El recorrer lugares remotos que la inmensa mayoría de la gente sólo sueña con ver.

Por otra parte, planifican y ejecutan campañas de muestreos superficiales y de sondeos con extracción de testigo continuo sobre cuyos testigos se realizarán los correspondientes ensayos de laboratorio. Toda la información obtenida deberá analizarse para elaborar los correspondientes informes de valoración preliminar, incluida una valoración económica previa. Una vez localizado el yacimiento o yacimientos, se planifican, en función de los conocimientos geológicos adquiridos previamente, nuevas campañas de sondeos o muestreos para definir el tamaño y calidad del cuerpo mineralizado para determinar, a fin de cuentas, si el yacimiento es o no explotable económicamente (figura 7).

Los geólogos de exploración especialistas en rocas y minerales industriales deben estar familiarizados con las características geológicas de los yacimientos de más de 50 rocas y minerales diferentes pertenecientes a todos los ambientes geológicos y geoestructurales conocidos. Estos productos mineros son utilizados simultáneamente en un importante número de industrias por sus propiedades físicas y químicas y no por la energía o elementos químicos que se puedan extraer de ellos. Deben conocer también las especificaciones de esos materiales para su empleo en las distintas industrias que, normalmente, son distintas para idénticas materias primas.

Los geólogos que trabajan en minas y/o canteras a cielo abierto se dedican a labores cotidianas de gestionar los departamentos geológicos de las empresas mineras, cuyo trabajo es establecer las propiedades geológicas y estructurales del yacimiento,

|| LA PROFESIÓN DE GEÓLOGO

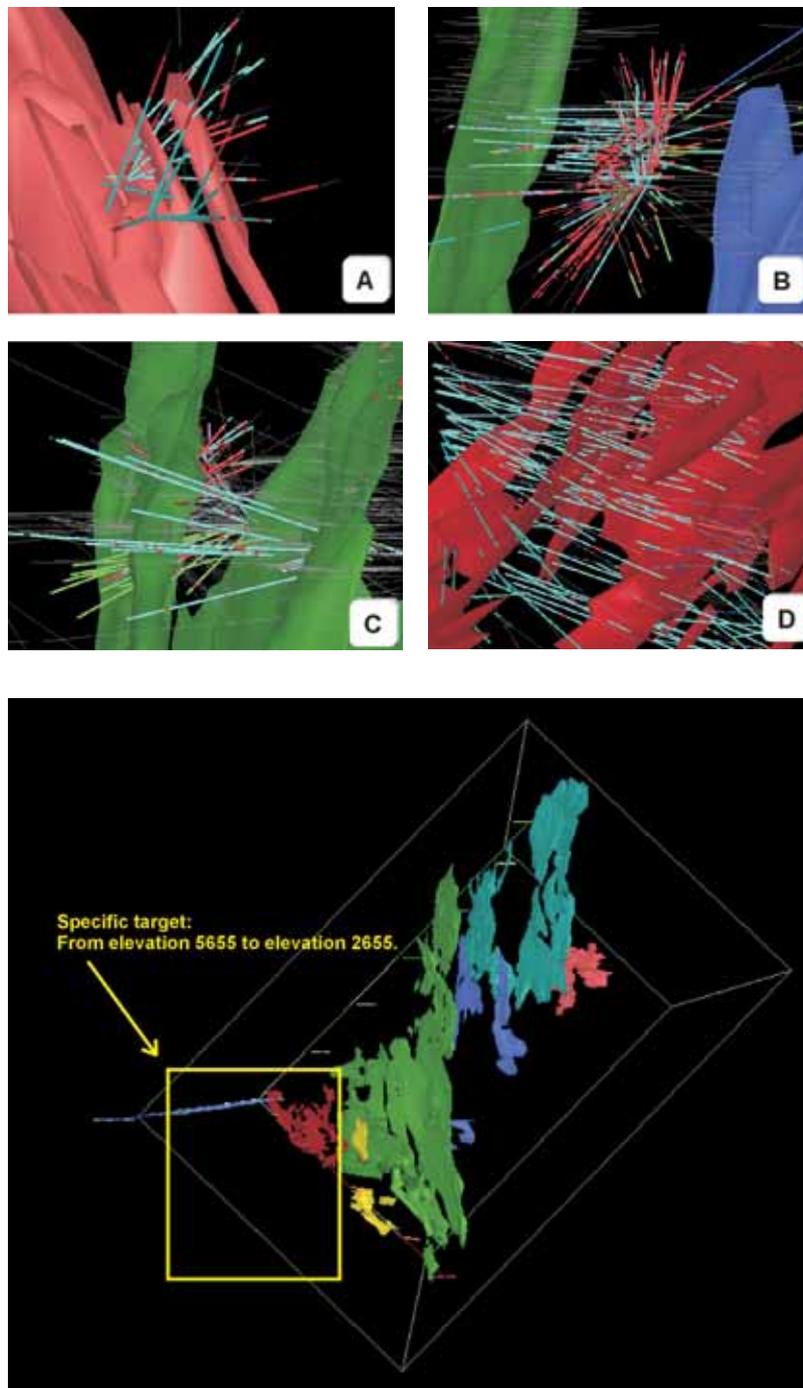


Figura 7. Modelización 3D geológica, mina Red Lake, Canadá. Arriba, cuerpos mineralizados y sondeos. Abajo, blanco profundo de exploración aurífera,

realizando mapas de gran detalle tanto superficiales como, en su caso, del interior de la propia mina, al mismo tiempo que se testifican y analizan los sondeos, ya a la escala minera, que se van realizando con el avance de la explotación (figura 8).



Figura 8. Izquierda: la moderna testificación de sondeos con ordenadores Tablet de campo (Mina Sur; Chuquicamata, Chile). A la derecha: geólogo estudiando un plano de falla en la mina Rosita (La Serena, Chile).

¿Qué importancia tiene el trabajo del geólogo en las explotaciones mineras?

Como ya se ha dicho, la mayoría de los objetos que caracterizan el Estado del bienestar están hechos de minerales y, sin ellos, no sería posible la vida moderna, tal y como la conocemos ahora. También se han puesto ejemplos de casos en que la explotación minera sin la intervención del geólogo hubiera cerrado. Por lo tanto, debido a que en la minería moderna el geólogo primero descubre el yacimiento y, más tarde, aporta el conocimiento sobre sus características intrínsecas, su trabajo es fundamental en las explotaciones mineras (figura 9).



Figura 9. Geólogos en el Salar de Atacama, en las cercanías de las explotaciones de sales de litio.

II LA PROFESIÓN DE GEÓLOGO

¿Qué debe saber el geólogo que trabaja en minería?

Es evidente que un geólogo que trabaje en exploración minera debe tener un conocimiento adecuado en la geología de los yacimientos que busca. Pero, sobre todo, debe tener un sólido conocimiento de las técnicas cartográficas y la geología estructural. Además debe estar familiarizado con las características por las cuales un yacimiento puede ser reconocido como explotable. El profesional que trabaja en la geología económico-minera se ve abocado de manera casi rutinaria a realizar estimaciones sobre el potencial de cualquier tipo de yacimiento, lo que le obligará con frecuencia a clasificar en términos "económicos" las masas minerales.

J. D. Lowell, uno de los geólogos de exploración más exitosos del mundo resume las características que debe tener un geólogo de exploración minera en los siguientes términos:

- ▶ Debe ser una persona inteligente, con una buena experiencia y formación académica.
- ▶ Tiene que ser capaz de pensar de manera "crítica" y, si es necesario, rechazar lo que piensan otros colegas suyos.
- ▶ Debe ser, como señalábamos, una persona con sólidos conocimientos geológicos, pero al mismo tiempo, no ser un pedante atenazado por el miedo a equivocarse, ya que su negocio consistirá en "equivocarse la mayor parte del tiempo".

Cuando habla de sólidos conocimientos geológicos, Lowell quiere decir que un geólogo de exploración debe ser capaz de manejar diversas técnicas (por ejemplo):

- ▶ Deberá ser capaz de producir buenos mapas geológicos, a veces en condiciones rudimentarias de trabajo.
- ▶ Para ello deberá tener unos sólidos conocimientos de geología estructural, petrografía, etc. Esto no significa que tenga que ser un "especialista" en estas técnicas.
- ▶ Importante: deberá ser capaz de crear hipótesis de trabajo.
- ▶ Deberá tener conocimientos de economía, especialmente si trabaja en un nivel *senior*.
- ▶ Deberá ser capaz de entender de transacciones de propiedades, el estatus de los terrenos, negociar transacciones, etc.
- ▶ Deberá ser un poco "masoquista", con deseos de subir montañas y vivir en sitios desagradables (pocas veces la exploración toma lugar cerca de ciudades o de la "civilización").
- ▶ Deberá tener una familia que comprenda su trabajo.
- ▶ Pero, sobre todas las cosas, deberá tener un compromiso absoluto con la idea de descubrir nuevas mineralizaciones.

Con el tiempo y la práctica de asumir algún tipo de riesgo al manifestar opiniones, se acaba por poner a punto una sofisticada técnica de estimación, cuya teoría acaba asimismo dominándose a fuerza de abrir los ojos, los oídos y sobre todo la mente, a métodos de trabajo y lenguajes propios de equipos multidisciplinares.

A continuación se incluyen algunas de las tareas que desarrolla un geólogo especializado en minería:

- ▶ Cartografía geológica, testificación de sondeos, elaboración de bases de datos e interpretación geológica.
- ▶ Elaboración y supervisión de contratos de campañas de sondeos.

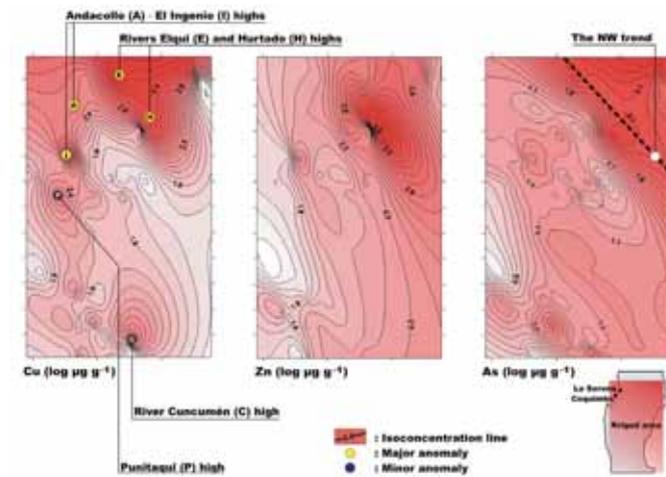
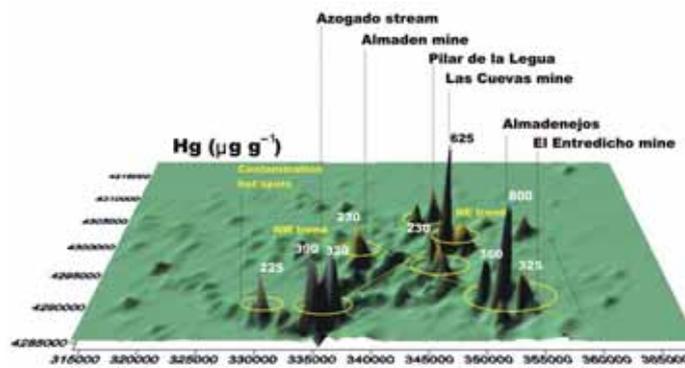


Figura 10. Dos ejemplos de modelización de la dispersión de metales pesados en sedimentos fluviales mediante *kriging*. Arriba, cuencas hidrográficas en el norte de Chile; abajo, el distrito de Almadén.

|| LA PROFESIÓN DE GEÓLOGO

- ▶ Gestión de programas de exploración.
- ▶ Estimación de reservas y recursos. Empleo de programas de ordenador.
- ▶ Auditoría de estimaciones de reservas y recursos.
- ▶ Evaluación y valoración de propiedades mineras.
- ▶ Geología estructural y exploración geológica.
- ▶ Estudios de evaluación del impacto ambiental.
- ▶ Proyectos de restauración del espacio afectado por las explotaciones mineras (figura 10).

¿Cuántos geólogos trabajan en el campo de la minería?

El empleo en minería metálica y de rocas y minerales industriales en España ha venido descendiendo paulatinamente en los últimos años según las cifras proporcionadas por el Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España. En el año 1992, trabajaban en este campo un 25,5 por ciento del colectivo colegiado en activo. Sin embargo, ya en el año 2002, trabajaban en minería un 17,9 por ciento y habían elegido especializarse en este campo en sus estudios universitarios un 3,41 por ciento. En el año 2008, trabajan en el campo de la minería metálica y de las rocas y minerales industriales sólo un 2 por ciento de los colegiados. Por lo que se refiere a la especialidad de licenciatura, se han especializado en este campo un 6,81 por ciento.

¿Qué puestos de trabajo desempeñan los geólogos en este campo?

Se puede decir que prácticamente todos, desde geólogos *junior* hasta directores de los departamentos de Geología e incluso directores de las empresas. Aquí hay una diferencia entre España y los países anglosajones e iberoamericanos, países estos últimos donde los geólogos están mucho más valorados y son corresponsables de las grandes decisiones empresariales.

¿Qué deficiencias de formación se detectan a la hora de enfrentarse al trabajo?

Fundamentalmente falta de adaptación de los planes de estudio al mercado de trabajo. Ya hemos comentado genéricamente antes qué conocimientos se necesitan para trabajar en este campo pues, sobre todo, las técnicas específicas generalmente no se conocen, con lo que en el postgrado, o más bien en la empresa, hay que aprenderlas, lo que supone un esfuerzo de formación adicional, coste económico para la empresa y de tiempo para los técnicos.

En ese sentido un geólogo especialista en minería debería tener la siguiente formación:

Bachillerato

Durante el bachillerato, el futuro estudiante de Geología, además de estudiar las asignaturas de ciencias, matemáticas e informática debe disponer de habilidades en relaciones humanas y oratoria y, si es posible, incluir en su formación algo de ciencias ambientales y microeconomía. Los futuros geocientíficos deben desarrollar unas especiales habilidades de observación y tener mucha curiosidad ya que su futuro trabajo geológico o en el laboratorio requerirá desarrollar especialmente esas facetas.

Otro aspecto del bachillerato que no debe descuidarse es el de los idiomas. El ámbito de la minería mundial es infinitamente más grande y diverso que el nacional, y las oportunidades de empleo se multiplican en gran medida si se sabe inglés y francés. En especial, las multinacionales del sector que trabajan en todo el mundo fundamentan su proceso de selección en la titulación académica y la experiencia profesional pero, sobre todo, en el conocimiento de idiomas. Además, la mayor parte de la bibliografía científico-técnica geológica y minera está en inglés. Hay que terminar el bachillerato hablando al menos otro idioma (tal y como se supone está previsto) pero muy especialmente el inglés.

Universidad

En España existen actualmente seis universidades que imparten la carrera de Geología (Granada, Salamanca, Madrid, Barcelona (2) y Oviedo). La mayor parte de los planes de estudio incluyen alguna especialidad en recursos minerales. Para un especialista en este campo, la carrera más adecuada debería incluir durante los dos primeros años asignaturas básicas como física, química, cálculo estadístico, informática, trigonometría, geometría en 3D y macroeconomía, además de las asignaturas geológicas de los dos primeros cursos.

En nuestra opinión, los conocimientos que deberían adquirir los estudiantes para poder ejercer como geólogo especialista en minería son:

- ▶ Sólidos conocimientos de geología general que incluyan cursos de mineralogía, petrografía sedimentaria, ígnea y metamórfica, geología estructural y geoquímica.
- ▶ También es fundamental la realización de trabajos de campo (cartografía básica y aplicada) en diferentes tipos de terrenos geológicos y, sobre todo, prácticas en empresas durante el verano.
- ▶ Cursos de introducción a la geofísica, geoestadística, hidrogeología, sedimentología y estratigrafía.
- ▶ Cursos de introducción a los yacimientos minerales, la minería, metalurgia, geopolítica, economía y geología ambiental.

II LA PROFESIÓN DE GEÓLOGO

Aunque no sea una asignatura de la carrera, para un geólogo que va a dedicarse a la industria minera, conviene mantenerse en buena forma física, por lo que hacer algún tipo de deporte es también recomendable para prepararse para un futuro empleo viajero y de campo.

Cada vez más las empresas (a escala mundial) piden que los geólogos a contratar tengan además de la licenciatura (grado según el plan actual), un máster o un doctorado. Si el aspirante se decide a realizar un máster, se debe escoger uno impartido por una facultad que, de algún modo, este especializada y tenga una amplia experiencia de trabajo en colaboración con las empresas mineras (investigación, desarrollo y consultoría). Actualmente, hay ya en marcha varios másteres en España en el campo de los recursos minerales. La Universidad de Oviedo propone el Máster Oficial en Recursos Geológicos y Geotecnia, un curso de 18 meses con cinco módulos obligatorios de 38 créditos (Materiales Geológicos, Dinámica de la Litosfera, Cuencas y Ambientes Sedimentarios, Métodos en Geología y Geología Aplicada a la Obra Civil), siete módulos optativos de 22 créditos (Variscan Massif Transect in the NW Iberian Peninsula, Aguas y Medio Ambiente, Caracterización y Prospección de Yacimientos, Combustibles Fósiles, Estructura y Geofísica del Subsuelo y Riesgos Geológicos y Dinámica del Relieve) y una tesis de máster de 30 créditos.

En el caso de pretender especializarse en geología de minas, la facultad o escuela debe disponer de cursos de minería, metalurgia extractiva, geoestadística y cálculo de reservas, ingeniería ambiental, diseño y cálculo de voladuras, etc. En todo caso los mejores geólogos de exploración que han descubierto nuevos yacimientos son aquellos que han trabajado en una mina o cantera, al menos, un par de años.

En la Universidad Complutense de Madrid, los estudios oficiales de postgrado incluyen un Máster en Geología Ambiental y Recursos Geológicos también con 60 créditos, dentro del cual hay una especialidad de Recursos Minerales y Medio Ambiente.

La Universidad de Zaragoza ofrece un Máster de Iniciación a la Investigación en Geología que consta de un mínimo de 60 créditos, de los cuales 15 corresponden al trabajo de fin de Máster y 45 a las asignaturas programadas del Máster.

Además a nivel mundial son muy recomendables:

- Master of Mineral Resources (MMinRes). Universidad de Queensland, Australia.
- Masters of Business Administration (MBA) in Mineral Resources Management. Universidad de Dundee, Reino Unido.

Oportunidades de empleo

La industria minera mundial se encuentra hoy en un proceso de expansión. Sin embargo, cada vez hay menos geólogos especialistas en este campo, debido al rechazo social que la minería sufre. Por ello, las oportunidades de empleo son cada vez mayores a nivel mundial. En España, la minería sigue creciendo a pesar de las dificultades y cada vez son más empresas (en particular las multinacionales en el campo de la minería metálica y muy particularmente en el de los minerales industriales) que comprenden las ventajas de disponer de geólogos o departamentos de geología en sus canteras y minas.

El aumento de los precios de los metales hace que hoy la exploración de recursos minerales esté creciendo exponencialmente de manera global. Los profesionales que dominen idiomas tienen una gran ventaja en este apartado.

La satisfacción de haber encontrado un yacimiento y de llegar a ponerlo en explotación, o como en algunos casos, hacerse rico gracias a participar en la empresa (ahora son muy frecuentes las *junior exploration companies*, que cotizan en bolsa) es una parte considerable del orgullo de pertenecer a esta profesión de vocación multinacional. En muchas ocasiones, los geólogos mineros o de exploración que han tenido éxito en sus empresas como empleados pasan al negocio de la consultoría privada para asesorar a propietarios de fincas, empresas mineras e instituciones gubernamentales.

Otro campo de empleo emergente es el de investigadores científicos relacionados con los recursos minerales. En España, el Instituto Geológico y Minero de España o el CIE-MAT convocan regularmente plazas de investigadores (para doctores) y técnicos especialistas (para licenciados) en estos campos. También las universidades y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas convocan plazas de profesores o investigadores (sólo para doctores) dentro de los departamentos cuyas áreas de conocimiento se relacionan con los recursos minerales. Muchas empresas mineras ofrecen puestos de trabajo para este tipo de investigadores, bien en plantilla o en colaboraciones puntuales.

Otro aspecto importante para un profesional de la geología de minas es participar en organizaciones científicas y profesionales de su sector. En España, el ejercicio de la profesión está regulado y para ejercerla es preciso colegiarse en el Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (www.icog.es) o, si existe, en el colegio autonómico correspondiente.

A nivel europeo, los colegios o asociaciones profesionales nacionales están agrupados en la Federación Europea de Geólogos (www.eurogeologist.eu), que coordina los esfuerzos internacionales en, por ejemplo, los Códigos Internacionales de Declaración de Reservas y Recursos a efectos de la valoración de empresas mineras en la bolsa.

Páginas web complementarias

Crismine-UCM. Máster en Geología Ambiental y Recursos Geológicos: especialidad de Recursos Minerales y Medio Ambiente.

http://www.ucm.es/info/crismine/Master/Master_RRMM_MA.pdf

GEMM. Grupo de Estudios en Minería y Medio Ambiente.

http://www.uclm.es/users/higueras/portal_gemm/Portal.htm

Higueras, P. y Oyarzun, R. Curso de Minería y Medio Ambiente.

<http://www.uclm.es/users/higueras/mam/>

InfoMine. Mining Intelligence & Technology. <http://www.infomine.com/>

Oyarzun, R. Apuntes de Geología de Minas: Exploración y Evaluación.

http://www.ucm.es/info/crismine/Geologia_Minas/Geologia_Minas_portada.htm

Regueiro, M. y Marchán, C. La industria española de las rocas y minerales industriales.

http://www.ucm.es/info/crismine/Rocas_Minerales_Ind_Regueiro.pdf

Minería Chilena. Revista. <http://www.mch.cl/central.php>