

Introducción a la Geología de Minas

Exploración & Evaluación

ROBERTO OYARZUN



Ediciones GEMM - Aula2pontonet



2011

INTRODUCCION A LA GEOLOGÍA DE MINAS

ROBERTO OYARZUN

Departamento de Cristalografía y Mineralogía
Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense
Madrid — España

✉ oyarzun@geo.ucm.es

Control de Edición & Internet: Roberto Oyarzun & Paloma Cubas
GEMM - Aula2pontonet: www.aulados.net/GEMM/GEMM.html

*Bajo Licencia Creative
Commons (2011)
Reconocimiento No Comercial
(by-nc):*

*Se permite la generación de obras
derivadas siempre que no se haga
un uso comercial. En cualquier
explotación de la obra autorizada
por la licencia hará falta reconocer
la autoría.*

Imagen portada: Camión y perforadora en Mina Sur, Distrito Minero de Chuquicamata (Chile)

Roberto Oyarzun completó sus estudios de geología en la Universidad del Norte (Chile) el año 1975. Trabajó los primeros años en exploración de yacimientos minerales en el norte de Chile, en El Salvador para CODELCO (Prospecto Kilómetro 14) y luego en la Cordillera de Domeyko, para un Proyecto de SERPLAC. Posteriormente se trasladó a la ciudad de Concepción donde fue profesor en la universidad del mismo nombre. En 1980 se desplazó a Inglaterra, a la Universidad de Leeds (en el “corazón” de Yorkshire), donde obtuvo su PhD en 1982. En 1986 se radicó en Madrid (España), donde se vincularía con el pasar de los años de manera permanente a la Universidad Complutense, en el Departamento de Cristalografía y Mineralogía de la Facultad de CC Geológicas, donde es actualmente Profesor Titular. Aunque comenzó su carrera en el mundo de la exploración, paulatinamente se ha ido incorporando al tema ambiental. Mantiene no obstante fuertes intereses en los campos de la geología de minas, geología estructural, vulcanismo, y por supuesto, en la geología de campo, de la que es profesor. Junto con Paloma Cubas mantiene las páginas web de Aula2puntonet y el GEMM. Roberto Oyarzun es además colaborador externo del IGeA de la Universidad de Castilla – La Mancha.



Un viejo prospector de minerales.*

*: Imagen: Old-time prospector Billy Capp from Lightning Ridge, NSW; Fuente: Opal prospecting, www.dpi.nsw.gov.au/minerals/lightning-ridge/opal-prospecting

INDICE (con enlaces a los capítulos)

1. UNA RESEÑA HISTÓRICA DE LA MINERÍA

- 1.1 Introducción 1
- 1.2 La locura minera del oro 7
- 1.3 Guerras, minerales y metales: un sistema en retroalimentación perpetua 11

2. RECURSOS Y RESERVAS

- 2.1 ¿Son renovables los recursos no-renovables? 21
- 2.2 Reservas y recursos 25
- 2.3 Factores que controlan la disponibilidad de los recursos minerales 30
- 2.4 Una última condición en la minería moderna: la sostenibilidad 32

3. LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS MINERALES

- 3.1 Introducción 38
- 3.2 Sobre el cuándo, el qué y el dónde explorar 41
- 3.3 Sobre el cómo explorar 45
- 3.4 Modelos en exploración 49
- 3.5 Guías geológicas de exploración 53
- 3.6 Geoquímica y geofísica 69
- 3.7 La teledetección 81
- 3.8 Modelizando la exploración: los tiempos modernos o quizás no tanto 87

4. LA EVALUACIÓN

- 4.1 Palabras iniciales 93
- 4.2 Definición y evaluación preliminar de prospectos 95
- 4.3 El momento de cubicar (y modelizar) 106

5. EL GEÓLOGO EN LA EMPRESA MINERA

- 5.1 Como empezó todo 124
- 5.2 ¿Qué geólogos buscan actualmente las empresas mineras? 126
- 5.3 El mundo ambiental minero: entorno natural de un geólogo 142

EPÍLOGO: SOBRE EL PORQUÉ DE ESTA OBRA Y EL FUTURO DE LA PROFESIÓN

- 1. Sobre cómo (y sobre todo porqué) se gestó esta idea 152
- 2. Sobre la geología de minas y la exploración 153

ANEXO 1: MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN EN MINERÍA

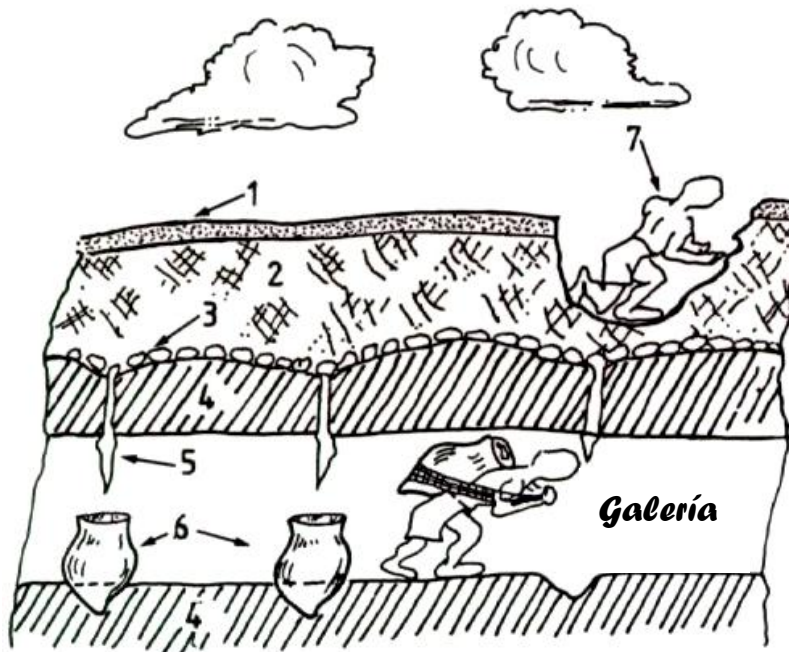
- 1. Una introducción a las explotaciones mineras 157
- 2. Principales métodos de explotación 162

ANEXO 2: MINERÍA A GRAN ESCALA, EL DISTRITO MINERO DE CHUQUICAMATA (CHILE)

- 1. Sobre el Distrito Minero de Chuquicamata 172
- 2. Algunas imágenes del distrito 175

1.1 Introducción

El hombre ha sido minero 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 (Paleolítico, Neolítico); luego continuó con los metales, extrayéndolos desde los minerales (Era del Cobre, Era del Bronce, Era del Hierro), refinándolos y combinándolos en aleaciones a medida que progresaba, de paso, inventando la metalurgia. Esta es una historia de búsqueda de recursos minerales, de su minería, y de las aplicaciones tecnológicas de los productos obtenidos.



Reconstrucción de una antigua operación de lixiviado en pila para la obtención de cobre, en Chipre hacia el siglo II D.C. 1: Cubierta impermeable; 2: pila de rocas mineralizadas fragmentadas; 3: capa de guijarros (capa permeable); 4: techo y base de la galería de material no mineralizado impermeable; 5: estalactitas de vitriolo (CuSO_4); 6: ánforas para recolectar las soluciones percolantes; 7: minero (Rossi, 1990).

La actividad minera, como la mayor parte de las actividades que el hombre realiza para su subsistencia, crea alteraciones en el medio natural, desde las más imperceptibles hasta las que representan claros impactos sobre el medio en que se desarrollan. Estas cuestiones, que hace algunos años no se percibían como un factor de riesgo para el futuro de la humanidad, hoy se contemplan con gran preocupación, que no siempre está justificada.

Pero ciertamente, los abusos anteriormente cometidos en este campo han hecho que crezca la conciencia de la necesidad de regular los impactos ambientales originados por la minería (Oyarzún y Oyarzun, 2011). De cualquier manera, también debe quedar claro que el hombre necesita los recursos mineros hoy, y los seguirá necesitando en el futuro. Otro punto a destacar es que la actividad minera es infinitamente menos impactante (por su escasa extensión) que otras actividades industriales, como el desarrollo de grandes obras civiles (impacto visual, modificación del medio original) y la agricultura (modificación del medio original, uso masivo de productos químicos: pesticidas, fertilizantes). Así, en el momento actual existen normativas muy estrictas sobre el impacto que puede producir una explotación minera, que incluyen una reglamentación de la composición de los vertidos líquidos, de las emisiones de polvo, de gases, de ruidos, de restitución del paisaje, etc., que ciertamente a menudo resultan muy problemáticos de cumplir por el alto costo económico que representan, pero que indudablemente han de ser asumidos para llevar a cabo la explotación.

No obstante, la humanidad necesita de los metales y minerales y no puede renunciar a su extracción salvo que todo el progreso que tan difícilmente se ha conseguido desaparezca. Pensemos por un momento que quedaría de un edificio si extrajéramos de este los materiales que han sido extraídos de una mina:

- Acero, que se produjo a partir del hierro.
- Carbonato de calcio y arcillas con lo que se fabricó el cemento.
- Vidrio, que se generó a partir de arenas silíceas y otros compuestos.
- El cobre de las conducciones eléctricas.

La lista es tan larga en nuestra vida cotidiana que solo mencionaremos un último pero notable ejemplo relacionado con una actividad tan normal y repetitiva hoy en día como es la telefonía móvil. La materia prima para la fabricación de los componentes de un móvil (celular) son todos extraídos de la minería o de un pozo de petróleo (plásticos). A destacar el famoso *coltán* (columbita-tantalita) del que se extrae el tántalo y el niobio para la fabricación de los modernos condensadores, dotados de gran

La Edad de Piedra desembocó en la Edad de los Metales tras la Revolución Neolítica. Esta revolución comportó cambios radicales en la tecnología agraria, que llevaron al desarrollo de la agricultura, la domesticación animal y los asentamientos permanentes. La combinación de estos factores posibilitó el desarrollo de la fundición de cobre y más tarde bronce. Esta corriente tecnológica empezó en el Creciente fértil, desde donde se difundió. Los descubrimientos no tenían, y todavía no tienen, carácter universal. El sistema de las tres edades no describe con precisión la historia de la tecnología de los grupos ajenos a Eurasia, y no puede aplicarse en algunas poblaciones aisladas como los Sentineleses, los Spinifex y ciertas tribus amazónicas, que todavía emplean la tecnología de la Edad de Piedra. **La Edad de Hierro** empezó tras el desarrollo de la tecnología necesaria para el trabajo del hierro, material que reemplazó al bronce y posibilitó la creación de herramientas más resistentes y baratas. En muchas culturas euroasiáticas la Edad de Hierro fue la última fase anterior al desarrollo de la escritura, aunque de nuevo no se puede decir que esto sea universal.

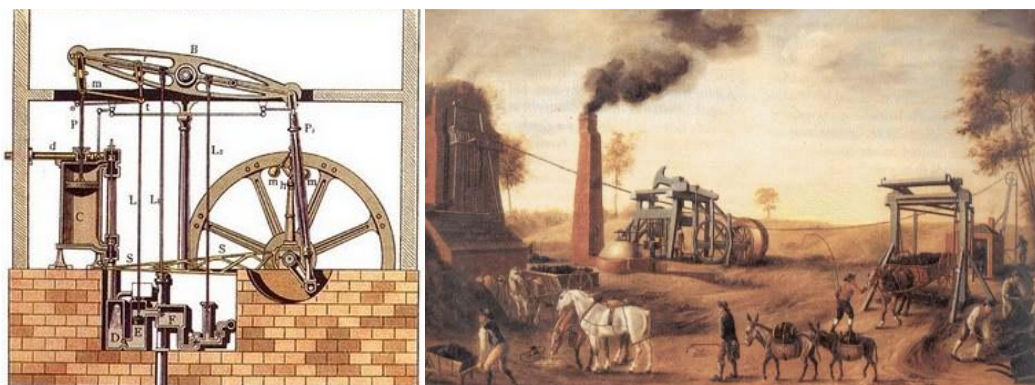
Wikipedia (2011a)

resistencia al calor, lo que permite dar mayor duración de la carga eléctrica de las baterías. Mucho se habla del *coltán*, y casi nada bueno, pero nadie que este autor conozca, ni los más militantes en temas ambientales, se desprenderían de su móvil por razones ético-sociales.

Pero regresando al tema histórico, si escribiéramos una pequeña lista con los principales hitos minero-metalúrgicos (y tecnológicos asociados) de la humanidad ésta incluiría la siguientes eras: Era de Piedra (Paleolítico, Mesolítico, Neolítico), Era del Cobre, Era del Bronce, Era del Hierro, Era del Carbón (a partir del 1600), Revolución Industrial (1750-1850), Era del Petróleo (a partir de 1850), Era Eléctrica (a partir de 1875), Era Atómica (a partir de 1945).



A la izquierda, mina de cobre de la Edad del Bronce en Gales; a la derecha, armas de la Edad del Bronce (imágenes^{1,2}).



Sinergias y Revolución Industrial; Máquinas de vapor que permitían bombear el agua de las minas, lo que a su vez permitía explotaciones más profundas de carbón, el cual servía para alimentar las máquinas de vapor (imágenes³).

Resulta importante llegados a este punto revisar las sinergias que pueden desarrollarse entre tecnologías y recursos minerales. Por ejemplo, sin carbón resulta impensable la revolución industrial, y sin esta, los carbones tampoco

habrían tenido mucha utilidad. A su vez, el carbón y otros minerales en el Siglo XVIII eran extraídos de minas que se inundaban en profundidad, por lo que a partir de una determinada cota, la explotación debía pararse. Pero ahí entra en juego la maquinaria desarrollada durante la revolución industrial, particularmente la llamada bomba de Newcomen, que iba a permitir extraer el agua de las minas, haciendo que estas pudieran ser más profundas y por lo tanto extender su vida útil como fuente de cobre o estaño en el caso de Cornwall (SE de Inglaterra).

Otra de estas maravillosas relaciones de interdependencia se desarrolló entre la minería del cobre y la electricidad. La electrificación de las ciudades creció vertiginosamente a partir de la década de los años 1880's – 1890's, lo que significó que se necesitaba más cobre para satisfacer la demanda. La revolución en la producción de cobre sucedería a comienzos del Siglo XX de la mano de Daniel C. Jackling, quien tuvo la idea de que las leyes bajas de cobre de un yacimiento se podían compensar con la extracción de mayores volúmenes de roca mineralizada. Así, la era de “los gigantes del cobre”, los pórfidos cupríferos surgía en Bingham Canyon (Utah) a comienzos del Siglo XX. Esto aseguraba una producción de cobre como nunca se había registrado en la historia.

La humanidad progresó vertiginosamente durante el Siglo XX, generando falsas ilusiones sobre lo que parecía un futuro muy alejado de sus balbuceantes comienzos industriales hacia fines del Siglo XVIII, comienzos del XIX. ¿Pero cuál es la realidad actual ya de pleno en el Siglo XXI? la sociedad sigue siendo absolutamente dependiente de los recursos minerales, con ejemplos tan clásicos como el hierro, cobre, zinc, y así un largo etc. El advenimiento de las nuevas tecnologías (p.ej., microelectrónica) es complementario, y no alternativo en la mayoría de los casos. Analice por un momento el ordenador (computadora) que tiene al frente: componentes de cobre, piezas de aluminio, un cable de cobre para enchufarlo al tendido eléctrico, un armazón de acero y/o aluminio (la torre), o el mismo chip procesador (*silicon chips*). Si lo ha pensado por un momento llegará

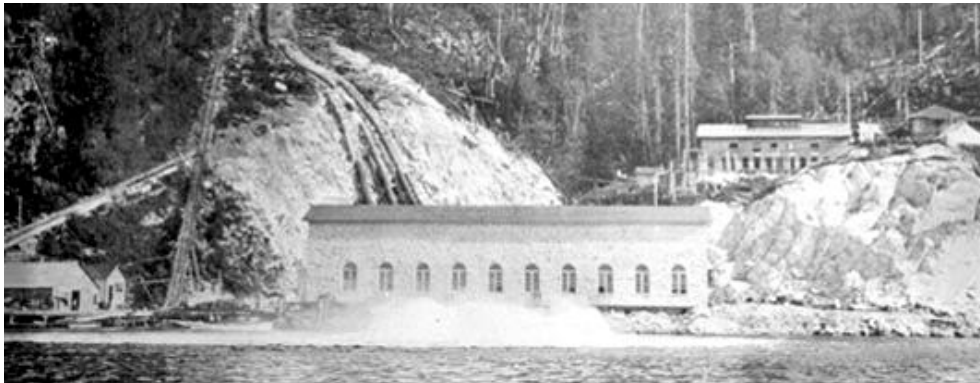
Daniel Cowan Jackling (August 14, 1869 – March 13, 1956), was an American mining and metallurgical engineer who pioneered the exploitation of low-grade porphyry copper ores at the Bingham Canyon Mine, Utah ... In 1898, Jackling and Robert C. Gemmell made a detailed examination of the Bingham Canyon copper property. They recommended open pit mining, using steam shovels to load railroad cars, a novel idea at the time. In 1903, Jackling organized the Utah Copper Company to put his plan into action. The mine proved to be profitable, and open-pit mining of low-grade copper deposits came to dominate the industry by mid-century ... He was honored with numerous professional awards, including the Washington Award from the Western Society of Engineers for "pioneering in large-scale mining and treatment of low-grade copper ores, releasing vast resources from formerly worthless deposits."

Wikipedia (2011b)



Daniel C. Jackling

a la conclusión que detrás de casi cada aspecto de la vida moderna está esa actividad oculta, a veces mal entendida, que es la minería. Hay una frase muy ilustrativa que aparece en una pegatina de la Nevada Mining Association: ***If it isn't grown it has to be mined*** (Si no se cultiva, entonces hay que extraerlo de una mina). O dicho en otras palabras, todo lo que no viene del campo viene de una mina. Por otra parte, la minería ha sido y seguirá siendo una actividad curiosa. A diferencia de otras aventuras del hombre, presenta riesgos económicos y humanos muy superiores a los de cualquiera otra actividad.



Cuando la electricidad empezaba a ser generada masivamente surgió la minería “a gran escala” de yacimientos de cobre de baja ley, como los pórfidos cupríferos, lo que permitió disponer de cobre en cantidades inmensas como para transmitir esa electricidad a todos los confines de un país. Arriba, la planta generadora Lake Buntzen (Canadá) en 1903; abajo, la mina de cobre de Bingham Canyon (el logro de Daniel C. Jackling) en sus comienzos (1909). Cobre a raudales para una industria eléctrica en crecimiento vertiginoso (imágenes^{4,5}).

La relación éxito/fracaso en una campaña de exploración minera suele ser baja, lo que requiere una combinación de una gran percepción geológica, intuición, y sobre todo, persistencia y dinero. Sin contar los gastos de exploración (que pueden sumar algunos millones de Euros), la puesta en marcha de una mina y su planta de

tratamiento (asumiendo que la exploración haya sido exitosa y el clima económico y político sea adecuado) puede ascender a más de mil millones de Euros (p.ej., un pórfido cuprífero).



La exploración minera ayer y hoy (imágenes^{6,7}).

Revisaremos brevemente en las siguientes páginas las razones por la que se exploran y explotan los recursos minerales. Algunas se acercan peligrosamente al absurdo, como en el caso del oro, un metal con escasas utilidades industriales pero sin embargo fuertemente enraizado en la memoria histórica del hombre. También veremos cómo las necesidades de recursos minerales pueden hacer que dos o más naciones entren en guerra por la posesión de los mismos.

Cualquiera sea la historia que contemos aquí o en los siguientes capítulos, metales, minerales y civilización presentan un vínculo, que a estas alturas de la historia, es francamente indisoluble, así que será mejor que aprendamos, y sobre todo entendamos, los muchos “cómos y porqués” de la industria extractiva de estas materias primas.

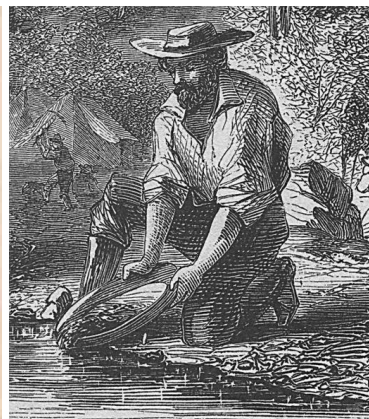
1.2 La locura minera del oro

There's a lady who's sure all that glitters is gold, and she's buying a stairway to heaven ... (Jimmy Page & Robert Plant)

¿Qué hace que las compañías mineras y sus profesionales asuman los grandes riesgos reseñados en la sección anterior? la respuesta es simple: la imperiosa necesidad de abastecimiento de recursos minerales. Hasta aquí la respuesta parece satisfactoria, pero ¿y por qué entonces buscar oro (uno de los “clásicos” de la exploración de metales)? El oro es una de las grandes “locuras” de la humanidad, con un valor que ha venido dado tradicionalmente por su escasez y poco más. Sin embargo ha desatado auténticas “estampidas humanas” allí donde se gritó de pronto: *oro, he encontrado oro*. Quizás si una de las más famosas a nivel mundial fue la llamada “Fiebre del Oro de California” (1848–1855). Alrededor de 200.000 potenciales “mineros” (la mayor parte no sabía nada de minería) se habían establecido en California hacia 1852. Estos “mineros” pasaron a llamarse *forty-niners*, debido a que fue en 1849 cuando el presidente de los Estados Unidos, James K. Polk, se pronunció sobre este tema.

The California Gold Rush (1848–1855) began slowly on January 24, 1848, when gold was found by James W. Marshall at Sutter's Mill, in Coloma, California. The first to hear confirmed information of the gold rush were the people in Oregon, Sandwich Islands (Hawaii), Mexico, Peru and Chile and they were the first to start flocking to the state in late 1848. By 1850 the U.S. California Census showed 92,600 people in California to which about 30,000 more people should be added because the Censuses of San Francisco (the largest city in California at about 20,000 then), Contra Costa county and Santa Clara County were lost and not included in the total. The population of California was over 110,000 in late 1850 not including the Californios or the California Indians (who were not counted). The women who came to California in the early years were a distinct minority of less than 10% of the population. The news of the discovery brought some 200,000 people to California by 1852 from the rest of the United States and abroad. Of the 200,000, approximately half arrived by sea and half came overland on the California Trail and the Gila River trail.

Wikipedia (2011c)



Rara vez fueron los mineros quienes se hicieron ricos con la fiebre del oro de California. Más bien fueron los que llevaban a los mineros a California en barco o por tierra, o los comerciantes que les vendían suministros. A la izquierda anuncio de una empresa que ofrece llevar mineros a California en clippers (los veleros más rápidos de la época); a través de la ruta del Cabo de Hornos; a la derecha, imagen de un minero bateando (challando) oro en un río (imágenes⁸).

Uno de los “no-mineros” que más se benefició con la fiebre del oro fue un inmigrante alemán llamado Levi Strauss, que fundaría en San Francisco la empresa Levi Strauss & Co. Esta empresa vendía ropa y otros artículos a los mineros. Más tarde el señor Strauss se haría famoso hasta los tiempos actuales por sus famosos vaqueros (*jeans*), que en origen, fueron publicitados como ropa de trabajo resistente.

Pero la auténtica locura por el oro aun estaba por venir. Sin entrar en una reseña histórica completa, analicemos brevemente algunos hitos en los últimos 110 o 120 años (St. John, 1988), acontecimientos que llevarían inexorablemente a la que podríamos llamar “la moderna fiebre del oro”, que llega hasta nuestros días:



A la izquierda, lingotes de oro; a la derecha, sondeos de exploración aurífera en el territorio de Yukón (Canadá) (imágenes^{9,10}).

1. Hacia finales del Siglo XIX Gran Bretaña adopta el patrón oro para sustentar su moneda.
2. Durante la primera guerra mundial (1914-1918) los países europeos gastan durante el conflicto el equivalente a unos 220.000 millones de Euros, mucho más dinero de lo que tenían en sus respectivos bancos centrales. Las economías europeas quedan arruinadas, especialmente la alemana.
3. De este conflicto sale particularmente victoriosa la economía norteamericana. Los bancos europeos pasan a tener unas reservas mixtas de oro más dólares americanos.
4. En 1929 ocurre el denominado *crash* de la bolsa de Nueva York, caos en la economía mundial.
5. En 1933 el presidente norteamericano Franklin D. Roosevelt inicia la recuperación de la economía doméstica (lo cual tendrá repercusiones favorables en el exterior), iniciando el programa *New Deal*. Además Roosevelt fija una convertibilidad directa entre el dólar americano (USD \$) y el oro: 1 onza de oro = US\$ 35. 1 onza (troy) = 31,1 g.

6. Se crea el mayor depósito de oro en lingotes del mundo: Fort Knox. Pero este metal no se puede comercializar directamente en el mercado Norteamericano.
7. Década de los años 60, los países europeos, ya están recuperados (o en franca recuperación) de los estragos de la segunda guerra mundial (1939-1945). Algunos países empiezan a exigir una convertibilidad directa entre sus reservas en dólares y el oro.
8. Estados Unidos carece del suficiente respaldo en oro como para asegurar dicha convertibilidad. En 1971 el presidente norteamericano Richard M. Nixon (partido Republicano) decide liberalizar el sistema. Hacia 1975 una onza de oro se cotiza a US\$ 200 en el mercado internacional.
9. Fines de la década de los años 1970's, un momento plagado de incertidumbres e inquietudes. Estalla el conflicto de Cambodia, en Irán triunfa la revolución islámica.
10. El oro se dispara a 1 onza = US\$ 800 en 1980. Esto tiene como resultado una nueva "fiebre del oro", más importante en términos económicos que la de 1849 en California.
11. Cambio de política en las compañías mineras, ahora hay que buscar oro. Yacimientos antes considerados sub-económicos ahora son rentables si el tonelaje es el adecuado, se pueden explotar leyes tan bajas de oro como de 1 g/t.
12. Esto tiene además implicaciones geológicas ya que un tipo de yacimiento mineral, prácticamente un desconocido/ignorado hasta la década de los años 1970's, se transforma en "la joya de la corona" de la exploración. Nos referimos a los epitermales de metales preciosos.

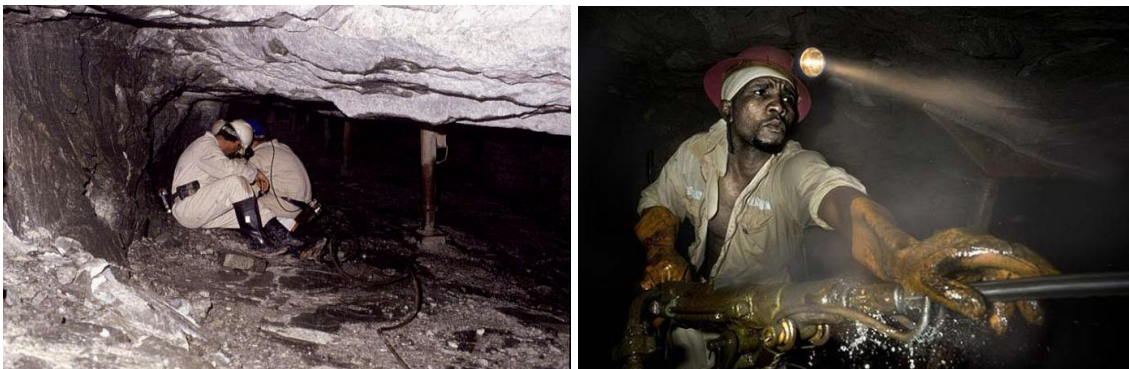
Of all the precious metals, gold is the most popular as an investment. Investors generally buy gold as a hedge or harbor against economic, political, or social fiat currency crises (including investment market declines, burgeoning national debt, currency failure, inflation, war and social unrest). The gold market is subject to speculation as are other markets, especially through the use of futures contracts and derivatives. The history of the gold standard, the role of gold reserves in central banking, gold's low correlation with other commodity prices, and its pricing in relation to fiat currencies during the financial crisis of 2007–2010, suggest that gold behaves more like a currency than a commodity.

Wikipedia (2011d)

En la actualidad la situación ha cambiado. Las estrategias económicas no son las de antes, ya no se asegura la convertibilidad de una moneda en términos de las reservas en oro, sino que su valor (respecto a otras) es asignado diariamente a través del Forex. Hoy en día el dinero digital fluye libremente por las autopistas del ciberespacio a través del llamado "Foreign Exchange Market" (Forex). ¿Pero qué es el Forex? Se trata de un mercado financiero descentralizado global de compra y venta de divisas, que funciona las 24 horas al día, de Lunes a Viernes. El mercado de divisas determina el valor relativo de las distintas monedas. Los participantes son los grandes bancos, los bancos centrales, los inversores institucionales, los

especuladores de divisas, las corporaciones, los gobiernos, otras instituciones financieras, y los inversores minoristas.

No obstante, el oro se niega a morir como valor de referencia y ante las crisis financieras sigue ocupando un lugar destacado. Por ejemplo, en Junio de 2011 el precio del oro subió ligeramente por encima de los US\$ 1500. No obstante, este valor tiene que ser analizado cuidadosamente ya que a primera vista comparado con los US\$ 800 de 1980 parece muy superior. Sin embargo, los 800 dólares de 1980 corresponderían a unos 2180 dólares actuales una vez hecha la corrección por inflación, con lo cual el precio del oro de 1980 sigue constituyendo un record histórico.



Oro, como sea donde sea. Explotaciones mineras en el Witwatersrand (Sudáfrica). A la izquierda la mina Saaiplaas; a la derecha, perforista en la mina South Deep, a más de 3000 m de profundidad, bajo condiciones ambientales extremas que pueden llegar a los 45°C y una humedad cercana al 100% (imágenes^{11,12}).

De cualquier manera, parece claro que la incertidumbre económica y política mundial sigue siendo el factor desencadenante de los altos precios de un metal tan inútil a efectos industriales, y tan importante a nivel psicológico y sociológico. Así que seguiremos yendo a cualquier lugar y bajo las condiciones que sean para obtener el preciado metal; además, como dice una frase de Joseph Addison (político y escritor inglés, 1672 – 1719) (Giga Quotes, 2011):

Gold is a wonderful clearer of the understanding; it dissipates every doubt and scruple in an instant (...)

1.3 Guerras, minerales y metales: un sistema en retroalimentación perpetua

Si queremos entender la naturaleza de un conflicto entonces debemos comprender antes las raíces del mismo (Cleary, 1993)

Existen tres ejemplos notables sobre cómo los metales y minerales pueden estar en el origen de muchos conflictos armados. La razón última para hechos de esta naturaleza radica en el denominado “valor localizado” de un recurso mineral. Es decir, el recurso tiene unas coordenadas geográficas específicas y debe ser extraído *in situ*. La actitud de las civilizaciones a lo largo de la historia con respecto a los recursos se ha movido a través de dos variantes principales:

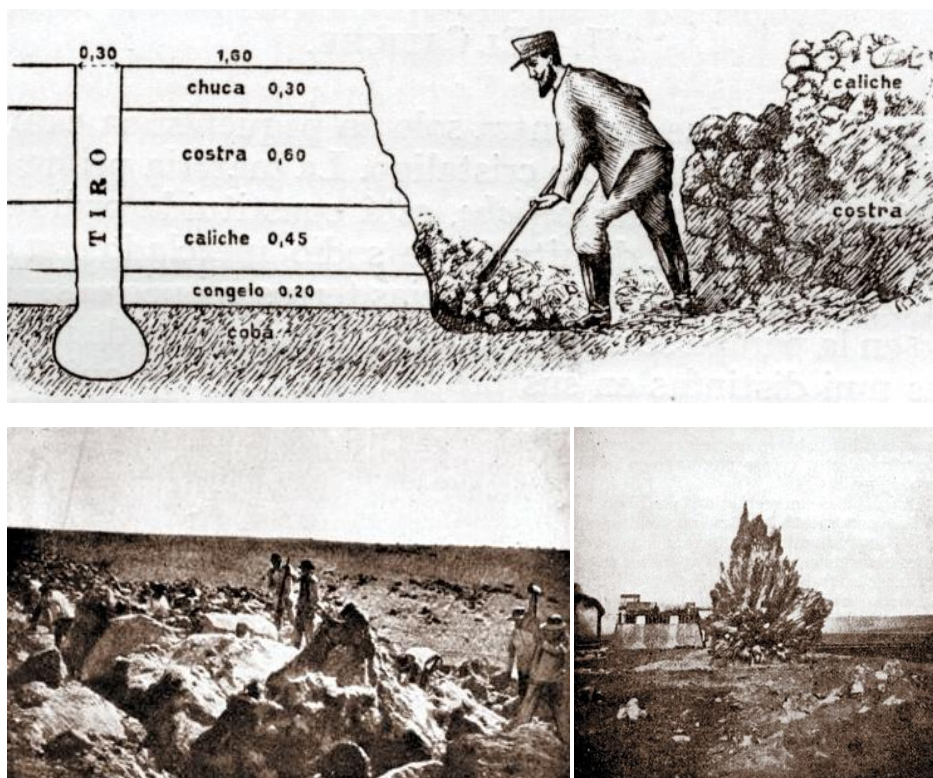
1. No se dispone del recurso → se negocia con quienes lo poseen → si esto falla, se va a la guerra para obtenerlo.
2. No se dispone del recurso → se va a la guerra para obtenerlo.

No nos llevemos a engaño, el fin último de toda especie biológica es su preservación. Esto se consigue primero a través de la reproducción. Si se es exitoso en esta materia los números poblacionales crecerán, y si estos lo hacen, también lo harán las necesidades de recursos del grupo. En su versión más primitiva el hombre combatía por elementos básicos para su subsistencia, tales como cobijo, acceso a los recursos de agua, territorios de caza, frutos comestibles, etc. En su versión más moderna, por el acceso a los recursos energéticos, minerales y metales que le permitan asegurar su éxito como nación. Uno de los aforismos más conocidos de Carl von Clausewitz (famoso teórico militar prusiano, 1780 –1831) es: *la guerra es la continuación de la política por otros medios*. Esta frase podrá gustar más o menos, pero eso no le resta ni una pizca de realismo.

Hablar o escribir sobre guerras siempre conlleva un cierto grado de subjetividad, y dependiendo de quien lo haga, el escrito puede despertar sospechas en una o varias de las partes afectadas. La razón es simple, la gente no va a matar o a morir por un puñado de minerales o unos cuantos barriles de petróleo, lo hace por determinados “principios” (la “legítima” defensa, el remediar una “injusticia”, el “bienestar” de una nación, etc.). Así, en la mitología popular, existen los “buenos” y los “malos”. La guerra y la humanidad van cogidas de la mano, así que más vale saber de que van los conflictos bélicos (sin horrorizarse ni ensalzarlos), porque seamos realistas, en la vida se puede (y debe) ser pacífico; sin embargo el ser pacifista entraña peligros indudables, ya que cuando impera la ley del más fuerte (“11” de cada 10 veces), el no estar preparado para la guerra puede tener funestas consecuencias. Durante la llamada “guerra fría” (NATO versus Pacto de Varsovia) quizás si lo único que salvó a la humanidad de un conflicto apocalíptico fueron precisamente las armas atómicas (hoy incluidas en el apartado que tanto gusta a los periodistas y políticos: el de la armas de “destrucción masiva”). La “destrucción

mutua asegurada” impidió un conflicto nuclear. ¿Una paradoja? Por supuesto que no.

Nuestra primera historia se inicia en el Mioceno, cuando masivas erupciones en el sector cordillerano del Desierto de Atacama empezaban a dar forma a una de las provincias volcánicas más grandes del planeta, el Plateau Volcánico del Altiplano-Puna, con más de 70.000 km² de extensión que acomodan a unos 10.000 km³ de ignimbritas (Allmendinger et. al., 1997; Babeyko et al., 2002). El calor desprendido por las erupciones en las cercanías del origen de las plumas volcánicas tenía la capacidad para disociar el enlace covalente que mantiene unidos a dos átomos del gas más común de la atmósfera: el nitrógeno. Una vez roto el enlace el nitrógeno se combina con el oxígeno formando compuestos del tipo NO_x (Mather et al., 2004). Estos compuestos pueden estar en la base de la generación de una de las provincias minerales más extrañas en el planeta, nos referimos a los gigantescos yacimientos de nitrato del Desierto de Atacama, únicos en su categoría en el mundo (Oyarzún y Oyarzun, 2007).

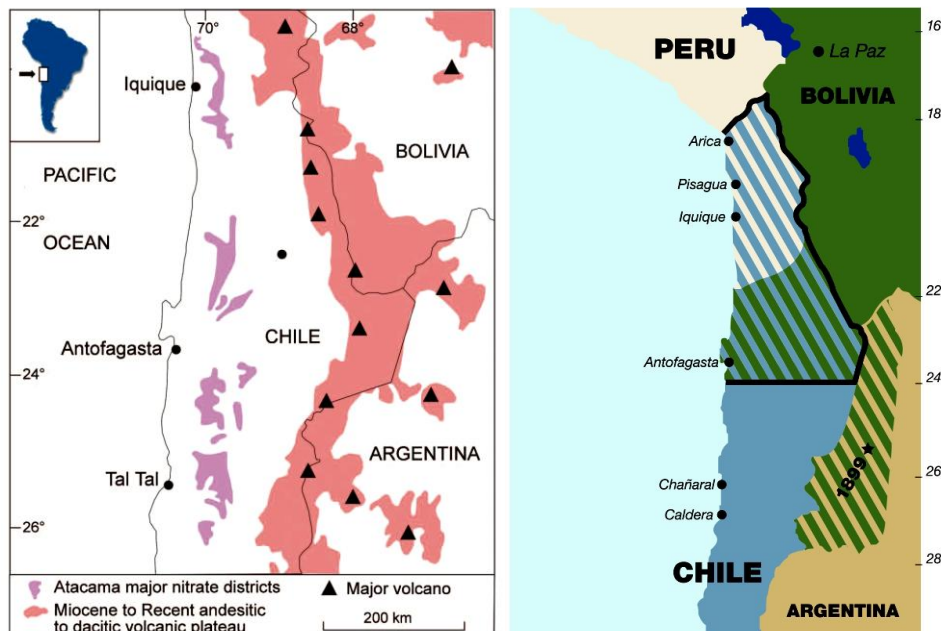


Los nitratos (= salitre) de Atacama. Arriba estructuración de las capas superficiales, donde lo que se explotaba era la capa denominada “caliche”; abajo izquierda depósito de nitrato; a la derecha, voladura para remover la costra. Imágenes¹³ del Museo Minero de la Universidad Arturo Prat de Iquique (Chile).

La empresa que operaba los depósitos de nitrato hacia 1879 estaba constituida por capitales chilenos y británicos (Compañía de Salitres y Ferrocarriles de Antofagasta), y lo hacía en territorio boliviano. La raíz del conflicto (que arrastraría también a Perú debido a un pacto entre este país y Bolivia) reside en una subida de impuestos unilateral decretada por Bolivia, que fue considerada abusiva por parte de Chile. La situación legal es compleja ya que por aquellos años se discutía un tratado relacionado precisamente con la explotación de los depósitos de nitrato. Cualquiera sea el caso, el 11 de Febrero de 1879 Chile adoptó la decisión de invadir, llevándose a cabo la ocupación de Antofagasta 14 de Febrero. Estos sucesos desencadenarían la llamada “Guerra del Pacífico”, que se extendió entre 1879 y 1883 y acabaría con la victoria de Chile, país que extendió su territorio hacia el norte unos 8° de latitud. La paradoja radica en que con posterioridad al conflicto, habría un cambio en las manos que detentaban el capital de las salitreras, pasando este a tener una composición mayoritariamente extranjera (UNAP, 2011). ¿Beneficiaron los ingresos del salitre a Chile “en su conjunto” después del conflicto? Poco y nada, y cuando a comienzos del Siglo XX llegó el final de esta era minera solo quedaron los recuerdos de una pasada grandeza (Oyarzún y Oyarzun, 2011).

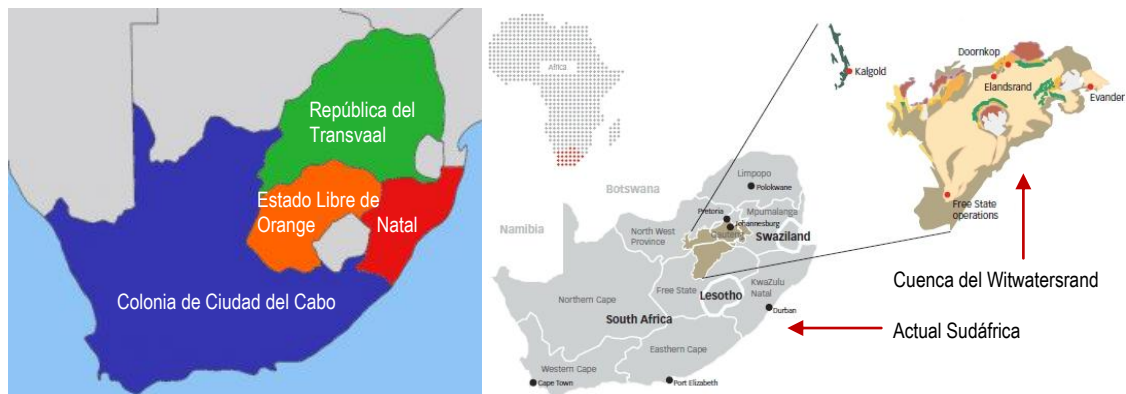
El salitre es una mezcla de nitrato de sodio (NaNO_3) y nitrato de potasio (KNO_3). Se encuentra naturalmente en grandes extensiones de Sudamérica, principalmente en la región norte de Chile, con espesores de hasta los 3,6 metros. Aparece asociado a depósitos de yeso, cloruro sódico (NaCl), otras sales y arena, y conforma un conjunto llamado caliche.

Wikipedia (2011e)



A la izquierda, principales elementos geológicos relacionados con los yacimientos de nitrato (Oyarzún y Oyarzun, 2007). Mapa de las fronteras entre Bolivia, Chile y Perú, actuales y anteriores a la Guerra del Pacífico de 1879 (Wikipedia, 2011e).

Para nuestra segunda historia tenemos que remontarnos al Precámbrico de Sudáfrica y a los procesos sedimentarios que llevaron a la formación de los yacimientos tipo placer más formidables del mundo, los del Witwatersrand (en Afrikaans: Cordillera de las Aguas Blancas). La Sudáfrica colonial del siglo XIX estaba dividida entre las posesiones británicas (Colonia de Ciudad del Cabo y Natal) y aquellas tierras en las que se asentaron los colonos holandeses (*boers*) que empezaron a llegar a Sudáfrica a comienzos del Siglo XVII. Estos fundarían más tarde dos estados independientes de los británicos, el Estado Libre de Orange y la República del Transvaal.



A la izquierda, situación de los territorios en Sudáfrica antes de la guerra entre boers y británicos; A la derecha, el mapa actual de Sudáfrica mostrando la cuenca aurífera del Witwatersrand. Como se puede observar, los yacimientos estaban en territorio Boer: Estado Libre de Orange y la República del Transvaal (imágenes^{14,15}).

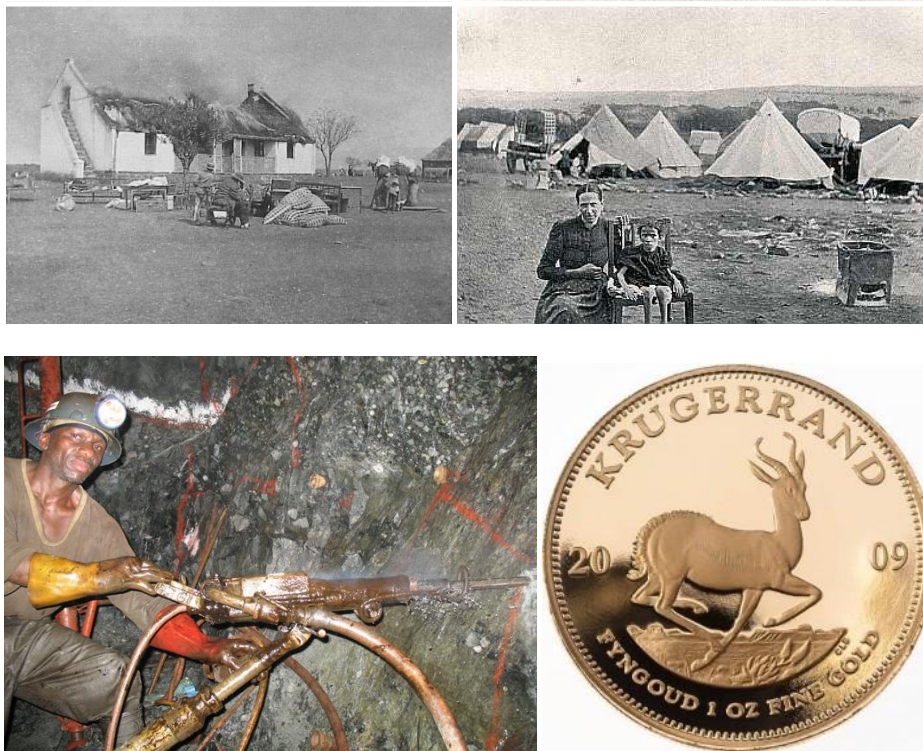
En 1886 un minero australiano llamado George Harrison descubre los primeros indicios de oro en la cuenca, y lo que vendría a continuación constituiría otra fiebre del oro que acabaría dando origen entre otras cosas a la fundación de la ciudad de Johannesburgo. Sin embargo, bajo un punto de vista histórico, en esta región empezó a surgir un fuerte sentimiento xenófobo con respecto a los mineros llegados al lugar. Los principales factores desencadenantes del conflicto de 1898-1902 entre *boers* y británicos fueron los siguientes:

- El desarrollo de una clase económicamente poderosa de empresarios mineros e industriales británicos, llamada los “Randlords” (los Señores del Rand).
- En paralelo surgía en la comunidad *boer* un fuerte sentimiento xenófobo.
- Por su parte los mineros extranjeros resintieron la no otorgación del derecho al voto y la imposición de fuertes impuestos.

Antes de que el conflicto principal se desarrollara, ya entre el 29 de Diciembre de 1895 y el 2 de Enero de 1896 se desarrolló un incidente denominado la Incursión de Jameson (“Jameson Raid”), una empresa fallida de carácter semiprivado, con el

fin de deponer al gobierno de la República del Transvaal. La guerra propiamente tal (1898-1902) implicó la presencia de tropas británicas venidas desde distintos lugares del imperio, y acabó con la victoria de estas no antes de sufrir costosas pérdidas por parte de un ejército *boer* que primero luchó convencionalmente y luego en guerrilla. De hecho la derrota *boer* se debió en gran medida a las medidas “especiales” adoptadas por los británicos para acabar con el apoyo a las guerrillas.

Estas medidas consistieron básicamente en la política de “tierra arrasada” (la quema de las granjas boers) y el desarrollo de campos de internamiento (no muy diferentes de los campos de concentración de la Segunda Guerra Mundial), donde morirían muchos de los niños y un importante número de adultos, debido a las pobres condiciones de habitabilidad, escasa higiene y poca comida. El resultado último (económico) de esta cruenta guerra fue la consolidación de las empresas mineras británicas en el Rand.



Arriba izquierda, la política de “tierra arrasada” de los británicos (granja boer en llamas); a la derecha, escena de un campo de internamiento (principalmente mujeres y niños boers); abajo izquierda, imagen moderna de una explotación aurífera en el Rand; a la derecha, un Krugerrand, famosa moneda oro acuñada por Sudáfrica (imágenes¹⁶⁻¹⁹).

Nuestro tercer y último ejemplo se centra en lo que luego sería el anfiteatro del Océano Pacífico de la Segunda Guerra Mundial (1941-1945). El cine nos ha mostrado tradicionalmente una Segunda Guerra Mundial donde aparecen unos “malos”, en ocasiones, “terriblemente” malos japoneses, y oponiéndose a estos,

unos americanos que regalan chocolatinas o Coca-Cola a los pocos prisioneros japoneses que van cogiendo. No ha sido hasta la llegada de magníficas películas como *Cartas de Iwo Jima* (de Clint Eastwood) o la miniserie de la HBO *The Pacific*, que una imagen más realista ha empezado a emerger. Que los japoneses cometieron auténticas “atrocidades” allí donde entraron victoriosos no cabe ninguna duda histórica. Sin embargo, para tener un cuadro completo de la situación, hace falta informarse (como no) e intentar comprender que llevó al Imperio del Japón a entrar en conflicto con las fuerzas aliadas combinadas en el Pacífico, esto es, Estados Unidos, Gran Bretaña, Australia, y Holanda. Si alguien se pregunta qué pinta Holanda en esta escena, baste recordar que Indonesia, antes de llamarse así, eran “las Indias Holandesas”. Sobre Gran Bretaña que decir, poseía las colonias de la India, Malasia, Birmania (hoy Myanmar), la Ciudad Estado de Singapur, etc. Para algunos japoneses “bien informados”, como el gran Almirante Yamamoto (estratega del ataque a Pearl Harbor), se trataba de una guerra que Japón “no podía” ganar. Yamamoto había servido como agregado naval en la embajada de Japón en Washington y conocía bien los Estados Unidos y su inmenso potencial industrial. Las guerras no son solo batallas, y las principales se libran en el terreno doméstico, produciendo más y mejores armas de combate.

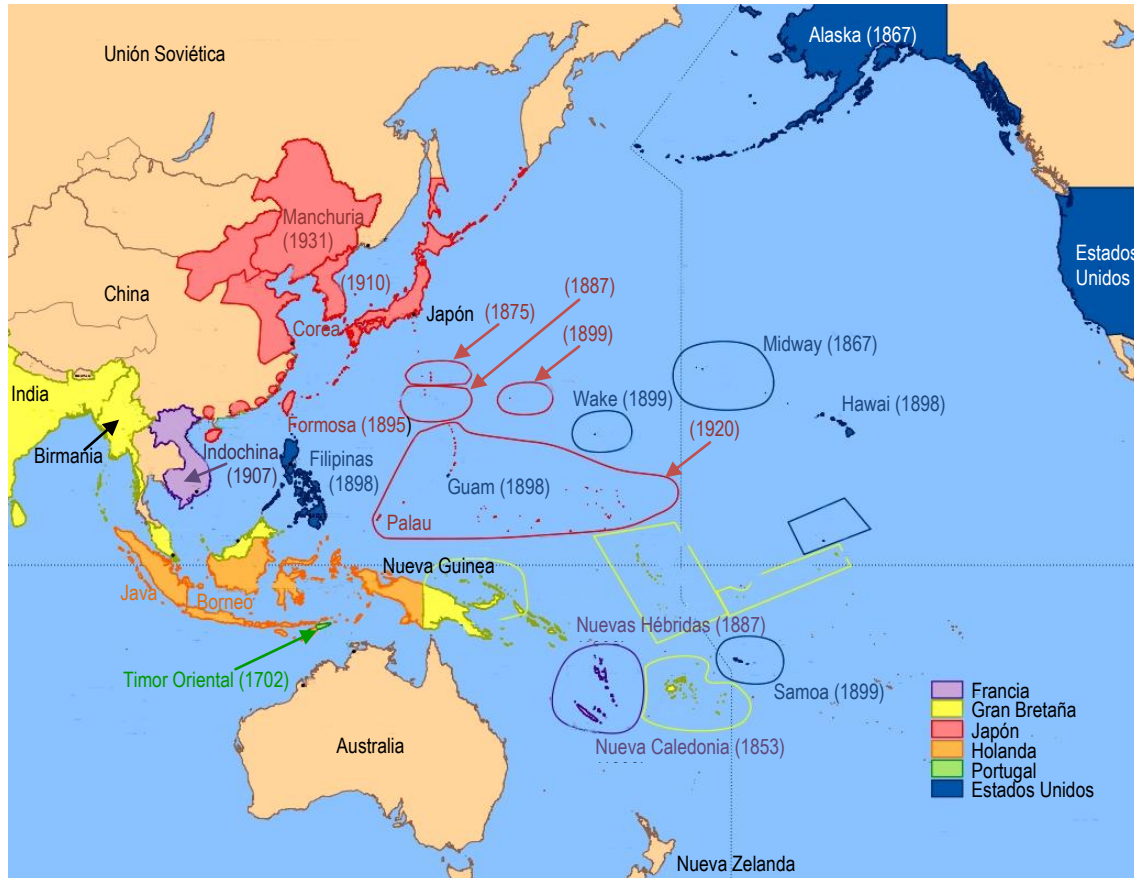
In an effort to discourage Japanese militarism, Western powers including Australia, the United States, Britain, and the Dutch government in exile, which controlled the petroleum-rich Dutch East Indies, stopped selling iron ore, steel and oil to Japan, denying it the raw materials needed to continue its activities in China and French Indochina. In Japan, the government and nationalists viewed these embargos as acts of aggression; imported oil made up about 80% of domestic consumption, without which Japan's economy, let alone its military, would grind to a halt. The Japanese media, influenced by military propagandists, began to refer to the embargoes as the "ABCD" ("American-British-Chinese-Dutch") encirclement" or "ABCD line".

Wikipedia (2011f)

Las raíces del conflicto hay que buscarlas en un Japón posterior a la Primera Guerra Mundial, con una casta militar dominante donde el gobierno civil retiene un escaso control sobre el país. De cualquier manera, los aires expansionistas de Japón venían incluso de antes, y se manifiestan en la anexiones de Formosa (Taiwan) en 1895 y de Corea, en 1910. Competían en la región la Rusia Imperial y Japón, lo que llevó a la primera guerra del Siglo XX (Guerra Ruso-Japonesa; 1904-1905), en la que los japoneses literalmente barrieron a los rusos. Desaparecida la amenaza rusa, Japón fue más lejos de Corea y entró en Manchuria (1931), parte del territorio del Imperio Chino, lo que iba a tener consecuencias notables en la forja del establecimiento de poderes en el Pacífico. La invasión de Manchuria no fue del agrado de las potencias occidentales (lideradas por los Estados Unidos), quienes decretaron un embargo de mineral de hierro (desde Australia) y petróleo (desde las Indias Holandesas) entre otros productos clave para Japón. Tenemos que entender las cosas en su contexto histórico, los Estados Unidos se habían expandido sistemáticamente hacia el Pacífico, teniendo allí posesiones territoriales en un sentido estricto (como Hawai) o como protectorados de facto, como las Islas

Filipinas (ambas desde 1898). Estados Unidos percibía a China como un país de indudable interés geopolítico y estratégico, y no iba a permitir sin más que Japón se interpusiera en el camino.

En condiciones normales un embargo de materias primas minerales y energéticas es un duro castigo para cualquier país, pero si ese país tiene además intenciones expansionistas, el resultado puede ser fatal para sus intereses.



Escenario geopolítico del Pacífico y países ribereños a 1 de Septiembre de 1939, esto es, en la antesala del comienzo (real) de las hostilidades en Europa de la Segunda Guerra Mundial (imagen²⁰). Los colores se corresponden a las potencias coloniales y las fechas en las cuales los territorios fueron incorporados a esos países. Note como ya desde fines del Siglo XIX las potencias movían “fichas” sobre un tablero insular.

Si se ahoga económica e industrialmente a un país este reaccionará, y no siempre ondeando la bandera blanca. El resultado de toda esta historia es de sobra conocido, los japoneses atacaron por sorpresa Pearl Harbor el 7 de Diciembre de 1941, desencadenando una cruenta guerra en la que la población civil de los países ocupados por Japón se llevó la peor parte. El 6 y 9 de Agosto de 1945 los estadounidenses dejaron caer bombas atómicas sobre Hiroshima y Nagasaki respectivamente, llevando a Japón a rendirse oficialmente el 15 de Agosto; mientras que la firma de la rendición incondicional se llevó a cabo en la bahía de

Tokio el 2 de Septiembre del mismo año a bordo del Acorazado USS Missouri. Quienes alegan sobre la barbarie del uso de dos bombas atómicas olvidan las infinitamente mayores pérdidas en vidas humanas durante los bombardeos “convencionales” sobre Tokio y otras ciudades japonesas. También estas personas pasan por alto el elevadísimo coste en vidas que habría significado una campaña de invasión de las islas japonesas principales: Hokkaido, Honshu, Kyushu y Shikoku.

¿Hemos aprendido alguna lección a lo largo de la historia sobre estas materias? En realidad y a juzgar por los hechos, poco y nada. Solo pensemos en los conflictos que se han desarrollado en la región del Golfo Pérsico en las últimas décadas. O los de África por el oro, diamantes, cobre, cobalto, columbita-tantalita, etc. En fin, que no porque la realidad nos desagrade tenemos que ignorarla, la guerra es parte de las realidades con que convivimos, y no tiene nada que ver con los escenarios “lúdicos”, uno podría decir, “ridículos” que se plantean en los videojuegos. Las guerras son devastadoras, incluso para los ganadores, pero ante la realidad histórica y recordando otro aforismo, *si quieres la paz, prepárate para la guerra*.

Bibliografía

Atención: Algunos links han sido divididos por estética, deberán ser restaurados antes de pegar en un browser.

- Allmendinger, R. W., Jordan, T.E., Kay, S.M. e Isacks., B.L., 1997. The evolution of the Altiplano-Puna plateau of the central Andes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25, 139-174.
- Babeyko, A.Y., Sobolev, S.V., Trumbull, R.B., Oncken, O. y Lavier, L.L., 2002. Numerical models of crustal scale convection and partial melting beneath the Altiplano-Puna Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 199, 373-388.
- Cleary, T., 1993. Sun Tzu, El Arte de la Guerra. Arca de Sabiduría, Madrid, 125 pp.
- Giga Quotes, 2011. Gold. http://www.giga-usa.com/quotes/topics/gold_t001.htm
- Mather, T.A., Allen, A.G., Davison, B.M., Pyle, D.M., Oppenheimer, C. y McGonigle, A.J.S., 2004. Nitric acid from volcanoes. *Earth and Planetary Science Letters*, 218, 17-30.
- Oyarzún, J. y Oyarzun, R., 2007. Massive volcanism in the Altiplano-Puna Volcanic Plateau and formation of the huge Atacama desert nitrate deposits: a case for thermal and electric fixation of atmospheric nitrogen. *International Geology Review*, 49, 962-968.
- Oyarzún, J. y Oyarzun, R., 2011. Minería Sostenible: Principios y Prácticas. Ediciones GEMM – Aula2pontonet, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html
- Rossi, G. 1990. Biohydrometallurgy. McGraw-Hill, NY, 609 pp.
- St. John, J., 1988. Los Metales Nobles. Editorial Planeta, Colección Planeta Tierra, 176 pp.
- UNAP, 2011. Salitre Antiguo. Universidad Arturo Prat, Museo Minero, http://www.unap.cl/museomin/basededatos/salitre_antiguo.htm
- Wikipedia, 2001a. Historia de la tecnología. http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_tecnolog%C3%ADa
- Wikipedia, 2011b. Daniel C. Jackling. http://en.wikipedia.org/wiki/Daniel_C._Jackling
- Wikipedia, 2011c. California Gold Rush. http://en.wikipedia.org/wiki/California_Gold_Rush
- Wikipedia, 2011d. Gold as an investment. http://en.wikipedia.org/wiki/Gold_as_an_investment
- Wikipedia, 2011e. Guerra del Pacífico. http://es.wikipedia.org/wiki/Guerra_del_Pac%C3%ADfico
- Wikipedia, 2011f. Pacific War. http://en.wikipedia.org/wiki/Pacific_War

Fuente de las imágenes (a Junio de 2011)

1. <https://greatacre.wordpress.com/tag/bronze-age/>
2. <http://fofoa.blogspot.com/2009/09/evolution.html>
3. <http://worldhistory1500.blogspot.com/2009/02/industrial-revolution.html>
4. http://www.powerpioneers.com/BC_Hydro_History/1860-1929/Stories/history1860-1929_11070301.aspx
5. <http://hickmansfamily.homestead.com/Bing1909.html>
6. <http://www.oroymas.com/2011/01/el-estado-la-fiebre-del-oro-y-los-%E2%80%98forty-niners%E2%80%99/>
7. http://www.srk.com/English/Our_Services/Geology,Resources_and_Exploration_Services/Mining_Exploration_Project_Management
8. http://en.wikipedia.org/wiki/California_Gold_Rush
9. <http://ethiopianunitydiasporaforum.com/news/egyptian-mining-company-hit-immense-gold-reserve/>
10. <http://www.wealthdaily.com/articles/how-to-buy-yukon-gold-stocks/3066>
11. http://web.uct.ac.za/depts/geosci/dlr/hons/hon_ofs.html
12. <http://www.telegraph.co.uk/travel/picturegalleries/3440146/Living-Africa-photography-by-Steve-Bloom.html?image=7>
13. http://www.unap.cl/museomin/basededatos/salitre_antiguo.htm
14. <http://linsinthept.wordpress.com/2009/10/13/hello-world/>
15. <http://www.harmony.co.za/im/files/reports/2009/sa.htm>
16. http://en.wikipedia.org/wiki/Boer_Wars
17. <http://www.eroluys.com/BoerWarChildsStory.htm>
18. <http://www.newscientist.com/blog/environment/2007/03/freds-footprint-cost-of-gold.html>
19. <http://www.goldkrugerrandcoins.org/krugerrand-price>
20. http://en.wikipedia.org/wiki/Pacific_War

2.1 ¿Son renovables los recursos no-renovables?

Los recursos minerales son considerados tradicionalmente como no-renovables. Tiene su lógica, después de todo, si una vez detectada una mineralización económica se determina que existen X toneladas de mineral a una determinada ley, y estas X toneladas son progresivamente extraídas a lo largo de Y años, al final no quedará nada del recurso inicial. Hasta aquí la lógica parece inexorable, sin embargo existen varios aspectos que deben ser matizados:

1. Las X toneladas determinadas por la estimación (cubicación) inicial pueden en realidad ser $X + n$ o $X - n$ toneladas. Todo proceso de cálculo puede incurrir en una subestimación o sobreestimación.
2. De la misma manera, la ley puede variar con respecto a la estimación original.
3. Los precios de mercado pueden variar (y lo harán) a lo largo de los años, haciendo que: a) el recurso ya no sea económicamente viable; o b) que sectores con leyes marginales (sub-económicas) ahora sean más que aceptables.
4. Durante la explotación del yacimiento, el conocimiento geológico del mismo varía, y puede ser que zonas mineralizadas no detectadas en los trabajos iniciales pasen a constituir un aporte nuevo al *stock* de metales de la empresa.
5. Durante la explotación la empresa además puede (y debe) enviar geólogos más allá de los límites del cuerpo mineralizado, siguiendo estructuras y/o contactos litológicos favorables, y durante el curso del trabajo exploratorio, dar con nuevos cuerpos mineralizados.

Reserves data are dynamic. They may be reduced as ore is mined and/or the extraction feasibility diminishes, or more commonly, they may continue to increase as additional deposits (known or recently discovered) are developed, or currently exploited deposits are more thoroughly explored and/or new technology or economic variables improve their economic feasibility. Reserves may be considered a working inventory of mining companies' supply of an economically extractable mineral commodity. As such, magnitude of that inventory is necessarily limited by many considerations, including cost of drilling, taxes, price of the mineral commodity being mined, and the demand for it. Reserves will be developed to the point of business needs and geologic limitations of economic ore grade and tonnage.

USGS (2011)

De esta manera, las llamadas “reservas iniciales” pueden bajar, subir, e incluso multiplicarse por mucho durante los años de la explotación. Así la pregunta es la siguiente: si durante el curso de la explotación de un yacimiento se descubren nuevas reservas mineral ¿son estas un “nuevo” aporte al *stock* de metales de la empresa? Si la respuesta es “sí”, entonces podríamos hablar de una “renovabilidad” del recurso vía exploración. Sin embargo, dado que esas nuevas reservas ya

estaban “ahí” ¿hasta qué punto son nuevas? Oyarzún y Oyarzun (2011) tratan este tema de la siguiente manera, a través de la comparación entre dos descubrimientos significativos de yacimientos minerales en Chile y Australia respectivamente:

- El descubrimiento de Escondida (Cu-Mo) se desarrolló en el marco de un proyecto de exploración regional liderado por el prestigioso geólogo David Lowell. El proyecto fue concebido y liderado por Lowell, con capitales de la Utah International Inc. y la Getty Oil Co. Se exploró una faja N-S (pórfidos cupríferos) de 450 x 50 km, entre Chuquicamata y El Salvador. Se solicitaron 114 grupos de pertenencias mineras (250.000 hectáreas como medida precautoria). Se tomaron 2070 muestras de suelo para geoquímica, a analizar por Cu, Mo, y Zn, que permitieron definir 30 anomalías geoquímicas, 10 de las cuales fueron consideradas significativas. Una de estas, especialmente atractiva, presentó valores de 90-580 ppm de Cu, 12-22 ppm de Mo, y 100-325 ppm de Zn. Los primeros sondeos en Escondida se realizaron en Septiembre del 1979.

- Por su parte, el caso de Olympic Dam (Cu, U, Au) (actualmente considerado como “el primer” IOCG: **Iron Oxide Copper Gold**) es algo más complejo. En los años 1950's se desarrolló una auténtica revolución del pensamiento geológico en Australia con respecto al origen de los yacimientos metalíferos

del Precámbrico. Cuando se descubrieron rasgos que apuntaban a que al menos algunas de estas mineralizaciones podían ser de origen sedimentario, los geólogos australianos hicieron un rápido ejercicio mental percatándose de que en principio, disponían de un marco geológico

The Escondida copper-gold-silver mine is located in the arid, northern Atacama Desert of Chile about 160 km southeast the port of Antofagasta, at an elevation of 3,050 m above sea level. The mine is a joint venture between BHP-Billiton (57.5%), Rio Tinto (30%), a Japanese consortium (10%) and the International Finance Corporation (2.5%). It came on-stream in late 1990 and its capacity has since been increased by phased expansions to the current level of 230,000 t/d ore throughput. The mine employs around 2,200 people. Production at the mine was cut back during the period 2003 on account of the weak world market conditions for copper. The partners in the project decided to mine lower-grade ores while maintaining the concentrator throughput, thus reducing the impact on per-ton-treated costs ... During the year ending June 2006, the mine handled 368.3Mt of ore and waste and processed 87.7 Mt of sulphide ore grading 1.61% copper. Total mill output was 1,207,100 tons. Payable copper production was 1.17 Mt of copper, electrowon copper cathode output was 116,300 tons, payable gold in concentrate was 139,00 oz and payable silver in concentrate was 5.9 M oz

Mining-technology.co (2011a)

The Olympic Dam copper-uranium mine and plant is situated in South Australia, 580 km north-west of Adelaide. Opened in 1988, Olympic Dam is wholly owned and operated by WMC Resources, which discovered the deposit in 1975. A A\$1,940 m expansion programme was completed in 1999, raising its capacity to 200,000 t/y of copper and 4,300 t/y of uranium, plus gold and silver. In mid-2005, BHP Billiton gained control of WMC Resources in an A\$9.2bn takeover. In 2007 BHP Billiton announced that it would undertake a A\$6bn–A\$7bn expansion of the Olympic Dam mine. The company says that annual ore production will increase up to 70 million tonnes, a seven-fold increase if the expansion proceeds. Copper production will increase from approximately 180, 000 t a year to approximately 730,000 t

Mining-technology.co (2011b)

parecido al de los yacimientos de Cu-Co del *Copperbelt* de Zambia-Katanga. Si esto era así, ¿por qué no podía haber yacimientos de cobre sedimentario tipo *Copperbelt* en Australia? Reforzando aún 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 ahora está Olympic Dam era el más prometedor. Este modelo de exploración (teórico en muchos aspectos) se veía reforzado por el hecho de que Mount Gunson estaba precisamente asociado a uno de esos lineamientos. Los sondeos comenzaron en 1975, cortando el primero 335 m de sedimentos horizontales del Cámbrico y el Proterozoico (facies del Stuart Shelf). Luego el sondeo pasó la discordancia (con el cratón Gawler) y cortó 40 m de mineralización de cobre de baja ley (~ 1% Cu), y no fue hasta el noveno sondeo que se encontraron leyes económicas. Hasta aquí todo bien, el problema estuvo cuando se dieron cuenta de que el yacimiento que habían encontrado no tenía “nada que ver” con los del *Copperbelt*, y en realidad, no tenía nada que ver con ningún yacimiento conocido a la fecha.

Aquí tenemos dos casos, en uno se busca en una geología favorable y se encuentra lo esperable en dicha geología (Escondida), en el otro se cometen “errores” conceptuales y acaba apareciendo un tipo “desconocido” de yacimiento (Olympic Dam). Digamos que en el caso de Escondida solo se puso en evidencia lo esperable, y a esto (lo esperable), le podemos llamar “un recurso ya existente” ya que de alguna manera u otra, “se contaba” con el mismo. Dicho en otras palabras, si no se hubiera contado con su probable existencia, no se habría realizado una exploración geológica a lo largo de esa faja de terreno. En cambio, en el caso de Olympic Dam se descubre (por error) lo absolutamente desconocido, un tipo de yacimiento mineral con el que nadie contaba (ni imaginaba) y que por lo tanto podemos considerar como una “adición neta” al *stock* de metales. Aunque claro está, puestos a rizar el rizo, siempre se podrá argumentar que tanto Escondida como Olympic Dam entraban de lleno en la categoría de recursos “no descubiertos” de la clasificación del USGS (2011), el primero en los “hipotéticos” y el segundo en los “especulativos”. Sin embargo, todo esto no pasa de ser una mera disquisición “filosófica” sobre el tema, porque en lo que respecta a las cuentas de una empresa, si uno adiciona, por ejemplo, 800 Mt de Cu al 1%, da igual si esas toneladas eran “esperables” o no, ya que cualquiera sea el enfoque, incrementan el *stock* de metales de la compañía minera.

Dicho en otras palabras, si una empresa ha explotado 100 millones de toneladas (de lo que sea) pero sus geólogos han encontrado durante una fase de exploración otros 100 millones de toneladas, podemos decir, de alguna manera, que esos 100

millones ya explotados se han “renovado”. Pero para que este concepto de renovabilidad funcione, necesitamos dos palabras clave: exploración y geólogos. Una empresa minera que elimina su departamento o sección de exploración está comprometiendo su futuro, y solo recuerda a la tristemente famosa señora del chiste *que iba a ahorrar dinero eliminando el perejil de su loro*.



Donde algunos solo ven desolación el geólogo de exploración ve riquezas. Pampa Toki, en el Distrito Minero de Chuquicamata, que alberga un cluster de pórfidos cupríferos cubiertos por potentes gravas.

Que la exploración es cara no hay ninguna duda, y que conlleva riesgos de capital, tampoco. Pero dejemos las cosas claras, el negocio minero no es para pusilánimes. La exploración tiene por otro lado ese componente de aventura que pocas profesiones más lo dan, y quien se dedique a esto, ya sea como empresario o geólogo contratado, tiene que asumir que la mayor parte de las veces no se dará en el blanco, manteniendo eso sí en mente que *quien no se arriesga no cruza el río*.

2.2 Reservas y recursos

Las “reservas” (*reserves*) (USGS, 2011) de una empresa son datos dinámicos, que se reducen en el tiempo a medida que el mineral va siendo extraído de la mina, o porque disminuye la viabilidad económica de la extracción. Por ejemplo, bajan los precios de un metal y la ley de corte (mínima ley explotable) hay que modificarla al alza para adaptarse a la nueva realidad económica. Al hacer esto, consecuentemente disminuirán las toneladas susceptibles de ser extraídas económicamente. Alternativamente, y como suele ser frecuente, las reservas pueden continuar aumentando a medida que yacimientos adicionales son añadidos al *stock* de metales de la empresa o porque una nueva tecnología permite explotar zonas antes consideradas solo marginalmente de interés.

Por su parte, “recurso” (*resource*) es un concepto más amplio que implica cualquier concentración natural de un sólido, líquido, o gas en la corteza terrestre, y cuya extracción es actual o potencialmente factible.

| Cumulative Production | IDENTIFIED RESOURCES | | | UNDISCOVERED RESOURCES | |
|-----------------------|--|-----------|----------|---|-----------------|
| | Demonstrated | | Inferred | Probability Range | |
| | Measured | Indicated | | Hypothetical | (?) Speculative |
| ECONOMIC | <div>← Reservas</div> | | | <div>Conocimiento geológico</div> <div>Geología “Creativa”</div> <div>Recursos</div> | |
| MARGINALLY ECONOMIC | | | | | |
| SUBECONOMIC | <div>Reserva Base</div> | | | | |
| Other Occurrences | Includes nonconventional and low-grade materials | | | | |

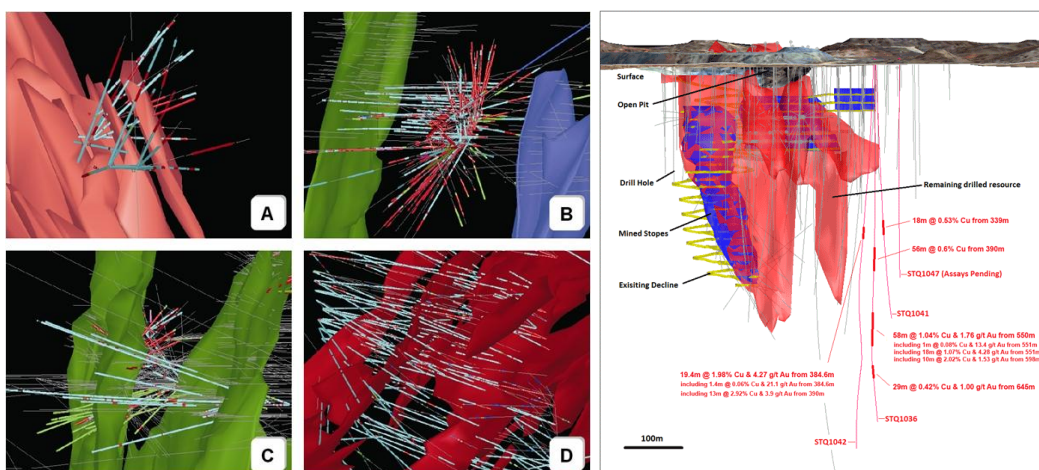
Clasificación de reservas y recursos según el USGS (2011), figura ligeramente modificada para poder acomodar la reserva base (base reserve). Se ha dibujado una línea de segmento en el cuadro superior para acomodar el hecho de que en alguna clasificación los recursos inferidos (posibles) pueden también ser considerados como reservas (s.s.).

Las reservas pueden ser consideradas por las empresas como un inventario del material que explotan económicamente. La magnitud de este inventario está a su vez limitada por diversos parámetros, que incluyen, por ejemplo, los costes de explotación, los *royalties* e impuestos especiales, el precio del material extraído, y su demanda. Las reservas son explotadas en función de las necesidades económicas de la empresa y obviamente del mercado, a lo que debemos añadir las limitaciones geológicas de leyes y tonelaje.

Si observamos la tabla superior de clasificación de las reservas y recursos veremos que a la izquierda (arriba) se encuentra la categoría de Recursos Identificados (*Identified Resources*), y bajo esta, los términos Demostrados e Inferidos. Es en este sector donde se localizan las reservas “propiedades tales” de un yacimiento, las que serán clasificadas a su vez como Medidas e Indicadas. Para hablar de reservas (s.s.) el grado de certidumbre geológica tiene que ser muy alto y aun así, serán divididas en dos o tres categorías según el enfoque del tema por parte de la empresa:

- **Reservas Medidas** (reservas “probadas”): hablaremos de mineral medido cuando dispongamos de una información directa tomada de un muestreo detallado de trincheras (calicatas), labores, sondeos. El tonelaje “real” no debería diferir en más de un 20 % con respecto al estimado; y en ocasiones el margen de error no debería superar el 5% (Thomas, 1985).
- **Reservas Indicadas** (reservas “probables”): también determinadas por un muestreo, pero esta vez, más disperso. Aquí se realizan más inferencias geológicas.
- **Reservas Inferidas** (reservas “posibles”): las reservas inferidas pueden ser consideradas como una parte integral de las reservas de un yacimiento (en algunas clasificaciones) o ser adscritas a la “Reserva Base” (Base Reserve) del mismo. En el concepto de reserva inferida prima el criterio geológico sobre las mediciones directas. Por ejemplo, este criterio puede estar basado en la repetición de rasgos geológicos en el yacimiento, o través de la comparación con otro yacimiento equivalente, etc.

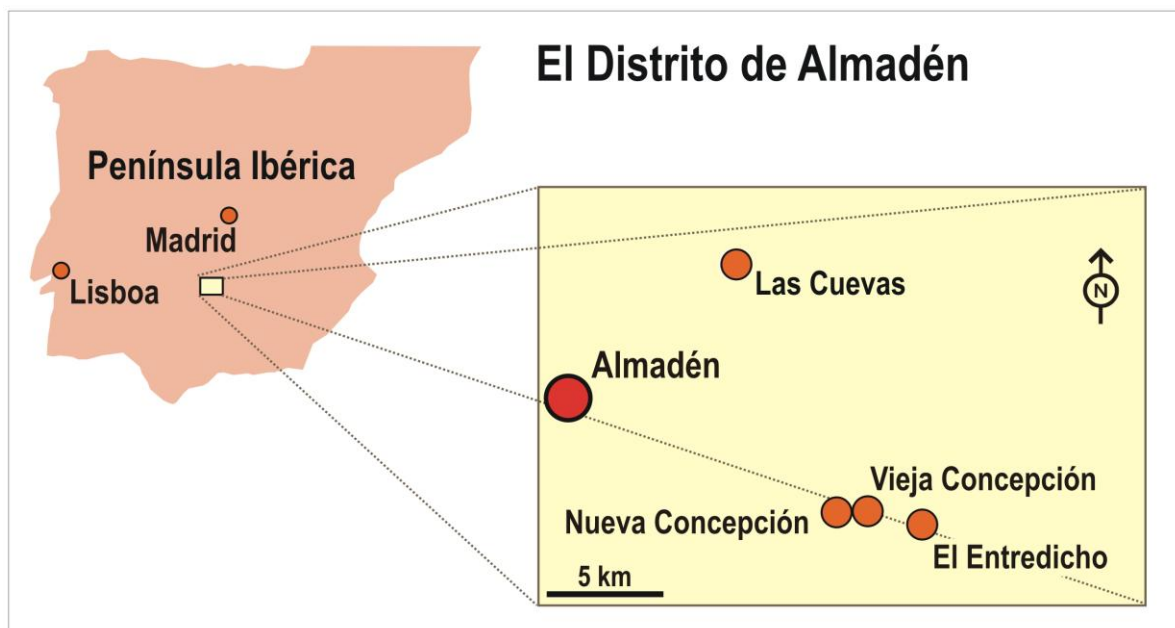
Por su parte, la **Reserva Base**, incluye los recursos que son actualmente económicos (reservas), marginalmente económicos, y sub-económicos.



Una densa malla de sondeos (A-D) es el requisito principal para poder determinar las reservas medidas (probadas) de un yacimiento. La imagen izquierda muestra sondeos cortando cuerpos filonianos auríferos (mina Red Lake, Canadá) (Oyarzun et al., 2004); a la derecha otra representación 3D de sondeos para la definición de cuerpos mineralizados y cubicación (imagen¹).

En lo que respecta a los Recursos No-Descubiertos, en esta categoría se incluirían las siguientes situaciones:

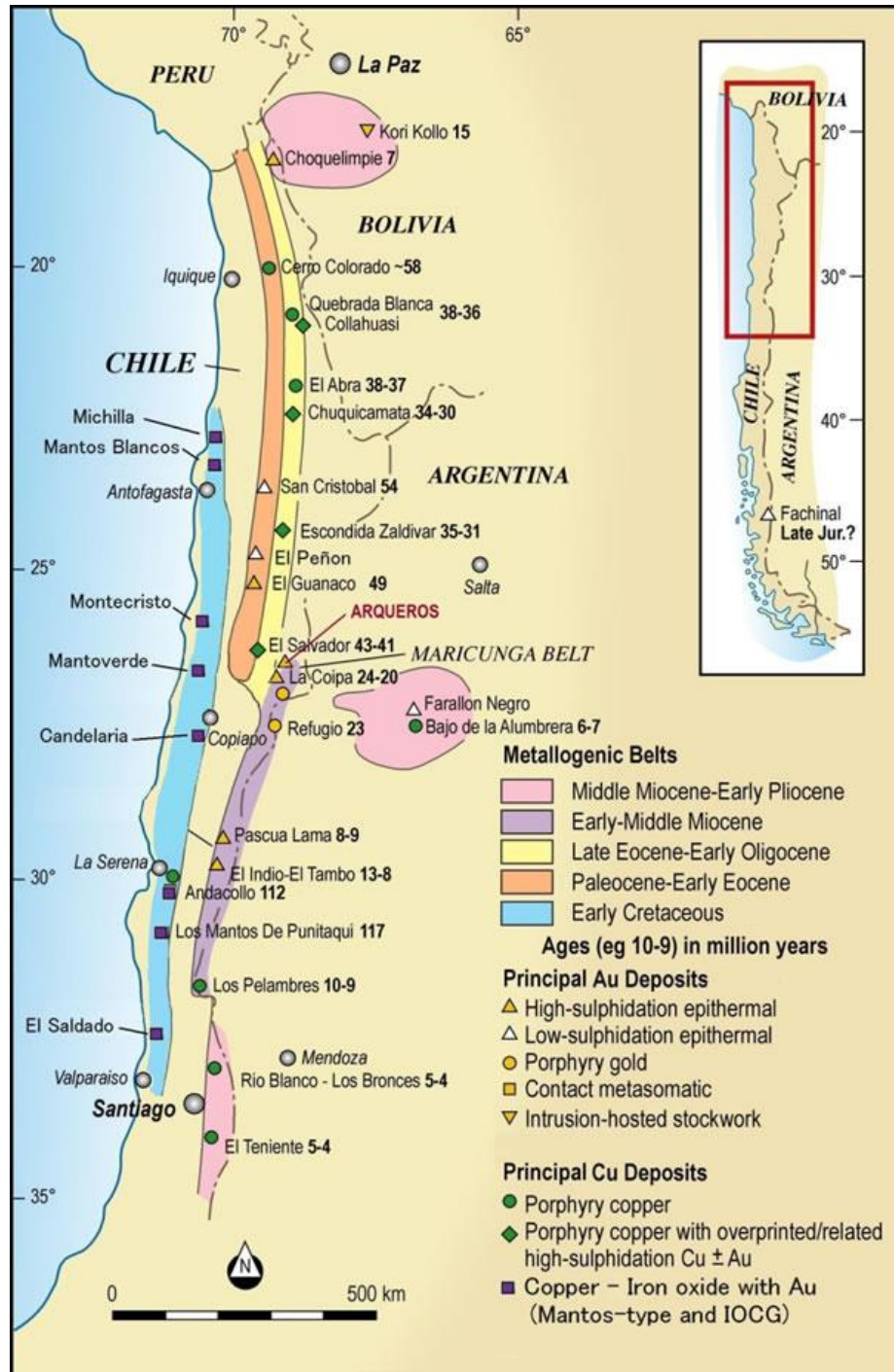
- **Recursos No-Descubiertos “Hipotéticos”**, que son aquellos que pueden esperarse en un distrito conocido, bajo condiciones geológicas conocidas. Por ejemplo, recursos de mercurio de un determinado tipo (p.ej., yacimientos estratoligados asociados a la Cuarcita Armoricana) en el distrito de Almadén.
- **Recursos No-Descubiertos “Especulativos”**: que son aquellos que pueden existir ya sea como: **1.** Tipos de depósitos conocidos en un marco geológico favorable. Por ejemplo, yacimientos del tipo pórfido cuprífero en una provincia metalogénica que agrupe yacimientos de ese tipo. **2.** Tipos de depósitos “desconocidos” que están por ser reconocidos como tales. Aunque este apartado parezca de “ciencia ficción” (o “geología ficción”), existen ejemplos: Olympic Dam en Australia (Cu-Au-U), un yacimiento mineral descubierto en los años 1970s. Antes de su descubrimiento, este tipo de yacimientos simplemente “no existía” (ver además Sección 2.1).



Distrito minero de Almadén. Recursos No-Descubiertos Hipotéticos: la idea es simple y surge del hecho de que donde hay un yacimiento puede haber más (Oyarzún y Oyarzun, 2011).

Si bien la categoría de “no descubiertos hipotéticos” resulta fácil de entender, las siguientes ya no lo son tanto. La categoría de recursos “no descubiertos especulativos del tipo 1” está basada fundamentalmente en la idea de las provincias metalogénicas. ¿Qué es una provincia metalogénica? Es una faja de terreno con características geológicas específicas, que alberga un determinado tipo de yacimientos. Así podemos tener una provincia con rocas plutónicas calcoalcalinas del Oligoceno que albergan yacimientos de un mismo tipo, por ejemplo,

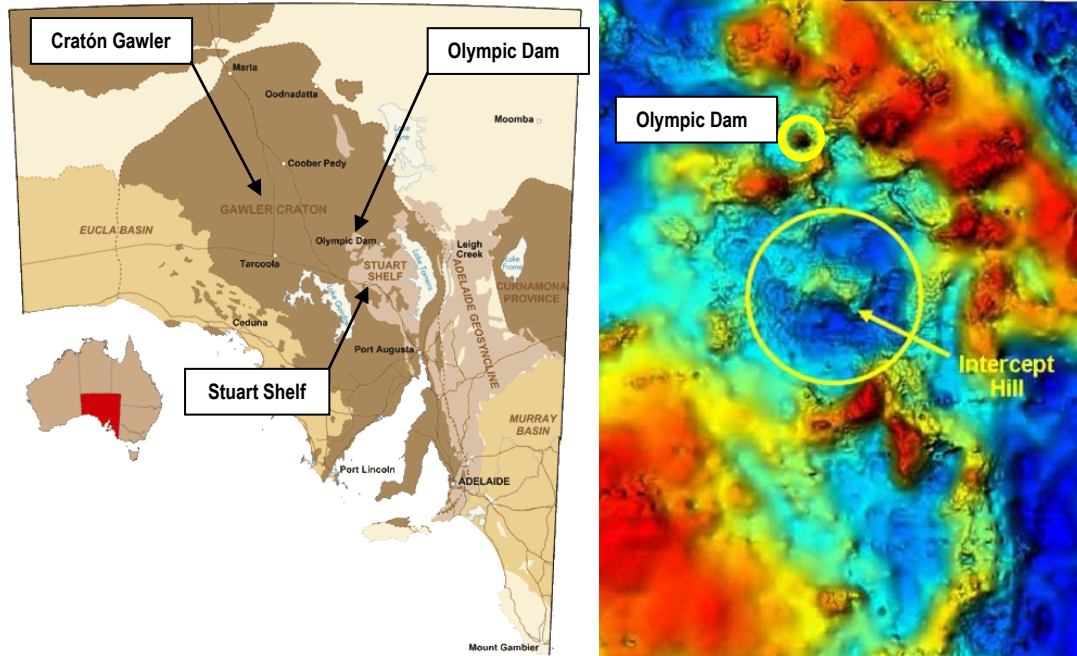
pórfidos cupríferos, u otra del Cretácico Inferior que alberga yacimientos de hierro del tipo Kiruna. Si estas provincias son elongadas, entonces existirá el potencial para encontrar nuevos recursos minerales entre yacimientos conocidos a lo largo de la provincia.



Diversas provincias metalogénicas a lo largo de Chile y países vecinos (imagen²). Marco geológico favorable para la presencia de recursos minerales no descubiertos de carácter hipotético.

Por último tenemos el caso de los recursos no descubiertos especulativos del tipo 2, categoría especial donde las haya. Dejemos esto claro, se trata de tipos

yacimientos “desconocidos”. A más de uno le puede parecer raro esto de desconocidos, después de todo y tantos años de investigación ¿queda algo por conocer? Digámoslo así, sería necio pensar que nuestro conocimiento es tan completo como para no dar con sorpresas, algunas tan satisfactorias como fue el caso de Olympic Dam.



El saber es poder. Ahora que se sabe el donde y el porqué de Olympic Dam, los recursos minerales de la región pueden subir de la categoría de no descubiertos especulativos del tipo 2 al tipo 1. A la izquierda, marco geológico regional; a la derecha, exploración regional aeromagnética (imágenes^{3,4}).

2.3 Factores que controlan la disponibilidad de los recursos minerales

Entre los profesionales ajenos al mundo minero existe de una manera más o menos extendida la errónea idea de que para poner una mina en funcionamiento todo lo que se necesita es un yacimiento mineral. La situación es bastante más compleja, y en ella intervienen factores geológicos, ingenieriles, ambientales, económicos, y políticos (Kesler, 1994). Revisaremos a continuación de manera rápida en qué consisten éstos.

1. **Factores geológicos.** Existen en inglés dos términos relacionados pero diferentes conceptualmente: *mineral deposit* y *ore deposit*. Toda acumulación mineral es un *mineral deposit*, pero solo aquellas que puedan ser extraídas con una ganancia económica (o político-económica) pueden ser adscritos a la categoría de *ore deposit*. A efectos de estos apuntes, y con todos los defectos que ellos pueda conllevar, llamaremos yacimiento mineral, a la suma de *mineral deposit* + *ore deposit*. Después todo, como veíamos anteriormente, el que un yacimiento sea o no económico es algo que puede variar en el tiempo. Los recursos pueden ser adscritos a cuatro categorías: **A)** Recursos esenciales: suelos, aguas. Recursos energéticos: petróleo, gas natural, carbón, pizarras bituminosas, uranio, energía geotérmica. **B)** Recursos metalíferos: normalmente metales de transición, por ejemplo, hierro, cobre, molibdeno, plomo, zinc, etc. **C)** Recursos de minerales industriales: que abarca más de 30 productos incluyendo las sales, asbestos, arcillas, arenas, etc. Estos recursos comparten el hecho de poseer un valor “localizado”, es decir, no somos nosotros sino los procesos geológicos quienes dictan “donde” se puede explotar un recurso. Nuestra es tan solo la decisión de hacerlo o no. Por ejemplo, si un yacimiento de cobre se encuentra en una remota provincia de Indonesia, tendremos que ir ahí si queremos explotarlo.

2. **Factores ingenieriles y económicos.** Los factores ingenieriles y económicos inciden de dos maneras, a través de las limitantes técnicas, y las limitantes económicas. **A)** Limitantes técnicas, son aquellas derivadas de la imposibilidad tecnológica de desarrollar actividades mineras bajo determinadas circunstancias; por ejemplo, una explotación a 7 km de profundidad. **B)** Limitantes económicas, son aquellas

Johannesburg, Gold Mines

The largest gold resources in the world were found in the area of the Witwatersrand and it is therefore not a surprise that South Africa is one of the world leaders in gold mining. Johannesburg's other name, "Egoli" means City of Gold. The gold-bearing stone is mined at considerable depth. The Western Deep Level Mine, with its shafts of depths to 3900 m, is one of the deepest in the world. Mining at such deep levels is usually highly problematic, because the temperature rises by 1 degree every 33 metres. However, the geo-thermal conditions in South Africa are favourable. Nevertheless, immense machinery and air-conditioning are still required to make the working conditions underground tolerable. The air is cooled down to 32 degrees, but the workers have to cope with almost 100 percent humidity.

Online Travel Guide (2011)

derivadas de los costes de explotación; por ejemplo, poniendo un ejemplo exagerado, podríamos construir el equipo necesario para desarrollar actividades mineras en Marte, pero, los costes serían tan elevados que cualquiera fuera el recurso extraíble, estos excederían los beneficios. Por otra parte, los factores económicos que controlan la producción minera son básicamente aquellos relacionados con la ley de oferta y demanda. A su vez, los factores que incidirán sobre esto serán los de coste ingenieril (incluyendo los gastos para ser “ambientalmente correctos”), los impuestos, los pagos por propiedades mineras, salarios, etc. Los costes de maquinaria minera son equivalentes en casi cualquier país del mundo, por ejemplo, el precio de una pala mecánica no varía substancialmente, da lo mismo si la compramos en Sudáfrica o en Chile, lo mismo se aplica los sondeos. Lo que difiere de un país a otro son las políticas impositivas (impuestos), los salarios, y la legislación ambiental. Por ejemplo, el salario de un minero en Zambia será mucho más bajo que el de un minero en Canadá.

3. **Factores políticos.** Otro factor relacionado con los anteriores es el de la “estabilidad política” de un país o una región. No es lo mismo explorar recursos minerales en una zona de alto riesgo (p.ej., República Democrática del Congo), que hacerlo en Norteamérica o Europa.
4. **Factores ambientales.** Los problemas ambientales relacionados con la minería se focalizan en tres aspectos principales: extracción del mineral de mina, procesamiento de minerales, y residuos. Podemos poner en funcionamiento sistemas de mitigación durante el procesamiento de minerales (p.ej., eliminación de parte del dióxido de azufre en la plantas de fundición de cobre), pero ¿qué se puede hacer con los residuos sólidos o líquidos? Existen medidas en la actualidad que tratan estos problemas, por ejemplo, se pueden restaurar las escombreras de estériles con diversas técnicas, o se puede remediar el problema del drenaje ácido (a partir de las mismas), mediante técnicas de neutralización química, aunque lo ideal como en otros aspectos de la vida, es mejor evitar el problema que tener que solucionarlo.

Expanding Mining Worldwide: Political Risks

The changing world brings a lot of changes in the way the natural resources business is conducted. It is now obvious that many companies are looking for new markets that promise new achievements in their quest for adding value – thus they go to the areas of the world that are not exactly encouraging for miners. Thus, the most imperative tasks today is to understand and correlated the risks and measure them across the favorable outcome. In this short post I would like to discuss some ideas in regards to one of the most important risks factors in mining – political.

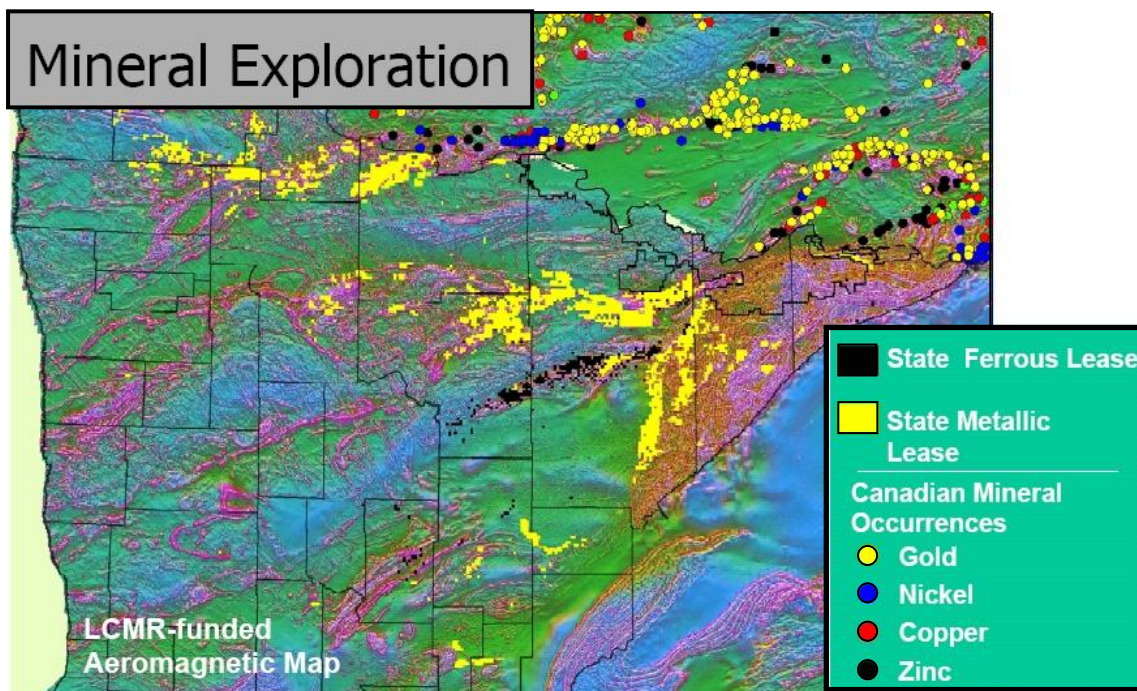
Ernst & Young in their annual report Business risks facing mining and metals just touch one of the aspects of the issue: “Resource nationalism. Mineral-rich countries are ensuring that they are extracting sufficient economic rate for the right of a mining company to exploit that resource. In some instances, governments are looking to replace other areas of lost revenue with further imposts on the mining and metals sector.”

Global Mining Operations & Finance Issues (2011)

2.4 Una última condición en la minería moderna: la sostenibilidad

Oyarzún y Oyarzun (2011) han discutido extensamente el tema de la sostenibilidad en el mundo de la minería y plantean que para que una industria minera sea efectivamente “sostenible” se han de cumplir una serie de condiciones:

- La primera condición es la conservación de los recursos. Este tema ha sido objeto de una importante discusión en cuanto a la posibilidad de considerar sostenible una actividad cuyos recursos no se reponen a la escala humana salvo excepciones menores. Por otra parte como hemos analizado anteriormente, la renovabilidad del recurso minero puede encontrarse en el hallazgo de nuevos yacimientos que reponen e incluso incrementan el *stock* de metales de una empresa y por lo tanto de una región. En otras palabras renovamos explorando.



Renovando e incrementando el stock de metales vía exploración a gran escala (imagen⁵).

- La segunda condición se refiere a la protección de la demanda ya que sin esta no hay minería. Aparte de los vaivenes de la economía mundial, que afectan a la mayoría de los metales, están aquellos factores que pueden afectar a sectores particulares de la minería. Uno de ellos es la caída en la demanda de un metal debido a su reemplazo parcial por otro metal o material que se adapta mejor a las nuevas tecnologías, que resulta de menor coste, implica menos problemas ambientales, etc. También se puede agregar aquí el reciclaje, que disminuye la demanda de metal “de mina”. En este sentido, el cobre “puede” ser reemplazado por el aluminio en conductores eléctricos de alta potencia o por fibra óptica para el envío de

información digital, aunque la actual tecnología ADSL lo mantiene firme en esta misma función. En este sentido, algunas empresas, promocionan activamente los usos de los metales a través de sus páginas web, planteando nuevas ideas (p.ej., CODELCO, 2011).

- La tercera condición viene definida por la “seguridad operacional” de las labores mineras y la “salud ocupacional”. Esto es así porque los valores éticos del presente no hacen aceptable una minería que no respete la seguridad y la salud de sus trabajadores. Los accidentes mineros mayores concitan la atención mundial y cada vez es mayor el riesgo de querellas por enfermedades laborales, pese a que aún queda mucho camino por recorrer en esa materia.

ICA Approves Codelco Plan to Promote Copper Use - Chile

The International Copper Association (ICA) has approved the 2000-05 strategic copper promotion plan drawn up by Chile's state-owned Codelco, the company's chief executive Juan Villarzu told reporters.

"This involves doubling the amount invested [by ICA members] in promotion and marketing which in 2005 will reach nearly US\$60mn, while for next year the amount budgeted is US\$35mn and rising gradually from there on," he said in a press conference.

According to Villarzu, the plan will prioritize high market growth areas such as China, India, Russia and Brazil, and will focus on copper use in the electronics industry and residential construction.

"The idea is that copper consumption rises at a faster rate than expected economic growth," said Villarzu. "From the year 2005 we're expecting sales of 150,000tpy of copper over and above that currently planned [by ICA members]."

Business News America (2000)



Los accidentes en la minería (como en otras actividades industriales) suceden, y el punto está en minimizar el número de casos y la importancia de los mismos. A la izquierda, vehículo menor (ver flecha) aplastado por un camión minero de gran tonelaje; a la derecha, rescate de los mineros chilenos de la mina San José (imágenes^{6,7}).

- La cuarta condición se refiere a la rentabilidad. Con la excepción de aquellas minas donde se explotan mineralizaciones de alta ley y se dan otras condiciones favorables (políticas fiscales, cercanías a los puertos de embarque, etc.), la minería necesita resguardar su rentabilidad porque de

otro modo estará siempre expuesta a desaparecer durante las etapas negativas de los ciclos de precios de los metales. Esto requiere una buena gestión, centrada en la creación de valor y abierta a la innovación. Sin embargo, en la actualidad se espera que las empresas mineras sean además de rentables, “eco-eficientes” en el uso de los recursos, en particular del agua y la energía, lo cual implica costes adicionales.

- La quinta condición tiene que ver con los recursos humanos. La minería moderna requiere recursos humanos cualificados, que deben reunir especiales características. Entre ellas están el conocimiento técnico, habilidad, disposición para trabajar en turnos de varios días a una o dos semanas, bajo condiciones aisladas e inhóspitas, en altura, a bajas o elevadas temperaturas y en permanente riesgo. El trabajador especializado puede tener a su cargo equipos muy caros cuyo manejo no tolera errores, ya que el coste de los errores en vidas y dinero puede ser muy elevado. El problema radica en que el manejo de estos equipos genera estrés y monotonía para el operario, con lo cual el riesgo siempre está presente.
- La sexta condición implica la aceptabilidad de la minería por la opinión pública. La minería se enfrenta a una creciente oposición de la opinión pública y de las organizaciones ambientalistas. Parte de esa oposición responde al mecanismo NIMBY (*not in my backyard*), vale decir, no se cuestiona la minería en sí, pero sí su cercanía. Esto implica la idea de que se trata de una actividad impropia de países o regiones que han superado un cierto nivel de vida y ahora quieren disfrutarlo sin interferencias. La minería quedaría, en consecuencia, para los países en desarrollo o para aquellas regiones, al interior de los países desarrollados, que han quedado atrás en su progreso. Todo esto ocurre a pesar de ninguna persona medianamente informada ignora que la minería y la extracción de hidrocarburos son esenciales para la supervivencia de nuestra sociedad. Sin embargo, el rechazo a estas actividades se ha

NIMBY or Nimby is an acronym for the phrase *not in my back yard*. The term (or the derivative *Nimbyism*) is used pejoratively to describe opposition by residents to a proposal for a new development close to them. Opposing residents themselves are sometimes called *Nimbies*. The term was coined in 1980 by Emilie Travel Livezey, and was popularized by British politician Nicholas Ridley, who was Conservative Secretary of State for the Environment.

Projects likely to be opposed include but are not limited to tall buildings, chemical plants, industrial parks, wind turbines, desalination plants, landfills, incinerators, power plants, prisons, mobile telephone network masts, schools, nuclear waste dumps, landfill dump sites, youth hostels, wind farms, golf courses, housing developments and especially transportation improvement schemes (e.g. new roads, passenger and freight railways, highways, airports, seaports).

NIMBY is also used more generally to describe people who advocate some proposal (for example, austerity measures including budget cuts, tax increases, downsizing), but oppose implementing it in a way that would require sacrifice on their part

Wikipedia (2011)

convertido en una moda, como una demostración pública de “sensibilidad ambiental”.



Protestas contra la minería (imágenes^{8,9}), aunque luego todos se irán a casa en sus coches, en el metro o en autobús. Se pregunta uno ¿y con qué están fabricados esos medios de transporte? ¿Ignorancia rampante o eco-hipocresía?

Que nadie se tome esto último a broma, en muchos casos la llamada sensibilidad ambiental, por las razones que sean, se ha transformado en una cuasi religión (fundamentalista), y bajo esas circunstancias es difícil esgrimir argumentos racionales en una discusión. Quizás parte de la culpa esté en la educación básica y media, donde se les cuenta a los alumnos sobre la Roma Clásica, pero no de donde viene el cable de cobre que les permite, entre otras cosas, que estudien de noche y puedan conectar su ordenador (computadora), tanto a la red eléctrica como a internet vía ADSL. Hace años este autor leyó una pancarta en inglés (aquí “suavizada”) que decía algo así como: *Ban mining, let the people freeze in the dark: Prohibamos la minería, dejemos que la gente se congele en la oscuridad*. Suena dura esta irónica frase, pero no por esto deja ser menos cierta.

Bibliografía

Atención: Algunos links han sido divididos por estética, deberán ser restaurados antes de pegar en un browser.

- Business News America, 2000. ICA approves Codelco plan to promote copper use – Chile. http://www.bnamericas.com/news/mining/ICA_Approves_Codelco_Plan_to_Promote_Copper_Use
- Kesler, S.E. 1994. Mineral resources, economics, and the environment. MacMillan College Publishing Co., New York, 391 pp.
- Global Mining Operations & Finance Issues, 2011. Expanding mining worldwide: political risks. <http://buysellmines.blogspot.com/2011/04/expanding-mining-worldwide-political.html>
- Mining-technology.co, 2011a. Escondida copper mine, Chile. <http://www.mining-technology.com/projects/escondida/>
- Mining-technology.co, 2011b. Olympic Dam copper-uranium mine, Adelaide, Australia. <http://www.mining-technology.com/projects/olympic/>
- Online Travel Guide, 2011. Johannesburg Gold Mines. <http://www.southafrica-travel.net/north/a1johb04.htm>
- Oyarzún, J. y Oyarzun, R., 2011. Minería Sostenible: Principios y Prácticas. Ediciones GEMM – Aula2punto.net, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html
- Oyarzun, R., Castiñeiras, P., López, I., Blanco, I. y Herrera, R., 2004. The Challenge (Goldcorp Inc.): prospección aurífera vía Internet. Aplicación del modelo de zona de cizalla aurífera a la mina Red Lake (Ontario, Canadá). Boletín Geológico y Minero, 115, 699-710.
- Thomas, L.J., 1985. An Introduction to Mining. Methuen of Australia, 471 pp.
- USGS, 2011. APPENDIX C—Reserves and Resources. United States Geological Survey, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2011/mcsapp2011.pdf>
- Wikipedia, 2011. NIMBY. <http://en.wikipedia.org/wiki/NIMBY>

Fuente de las imágenes (a Junio de 2011)

1. <http://www.ivanhoeaustralia.com/s/StarraLine.asp>
2. <http://www.lagunaresources.com/RegionalGeologyAndMetallogeny.html>
3. http://www.pir.sa.gov.au/minerals/geology/geological_provinces
4. <http://www.fatprophets.com.au/>
5. <http://www.sosbluewaters.org/>
6. <http://www.preco.com/safety/Products/Safety-Alert-Systems/>
7. <http://www.pizcos.net/2010/10/rescate-de-los-mineros-en-chile-grandes.html>
8. <http://allan.lissner.net/event-global-day-of-action-against-mining/>
9. <http://www.life.com/image/98772819>

3.1 Introducción

3.1.1 Geología y renovabilidad de los recursos minerales

A lo largo de estas páginas hemos ido descubriendo la importancia de los recursos minerales, su trasfondo histórico, y las implicaciones políticas y económicas, y si algo nos debería quedar claro a estas alturas, es que los recursos minerales son de una importancia capital para la humanidad. Es por esta razón que las naciones harán lo que haga falta para contar con ellos. La importancia de estos recursos surge de la necesidad de mantener tasas sostenidas de crecimiento. Dado que los recursos minerales se agotan, la única alternativa que queda es encontrar más. Como explicábamos anteriormente, la “renovabilidad” de los recursos minerales se asegura encontrando nuevos cuerpos mineralizados, los cuales permiten mantener e incluso aumentar el *stock* de metales de las empresas y regiones. La exploración de yacimientos minerales es una labor ardua y compleja, que analizaremos desde su base, es decir, desde la perspectiva geológica.

Vivimos en tiempos en los que se piensa de alguna manera que todo puede ser resuelto por medios tecnológicos más o menos avanzados, incluyendo por supuesto el uso de software especializado. En el caso de la exploración la cosa no es tan fácil como correr un programa y apretar botones. Así, empezaremos por donde hay que comenzar, por el factor “humano”, el geólogo de exploración, pieza insustituible en la renovabilidad de los recursos minerales.



Geólogos de exploración en su entorno natural: la investigación de campo, donde todo comienza (Northern Associates Inc.) (imágenes¹).

3.1.2 El geólogo de exploración

J.D. Lowell, uno de los geólogos de exploración más exitosos del mundo, ha resumido las características que tiene que tener un geólogo de exploración de la siguiente manera (Lowell, 1987):

- Debe ser una persona inteligente, con una buena experiencia y conocimientos académicos.
- 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 debe ser un pedante atemorizado por el miedo a equivocarse, ya que su negocio consistirá en estar equivocado muchas veces.
- 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 esto deberá tener unos sólidos conocimientos de geología estructural, petrografía, etc. Esto no significa que tenga que ser un “especialista” en estos temas.
- Importante: deberá ser capaz de crear hipótesis de trabajo.
- Deberá poseer conocimientos de economía, especialmente si trabaja a un nivel *senior*.
- Deberá ser capaz de entender de transacciones de propiedades mineras,

Arizona's David Lowell had a stellar career finding porphyry copper deposits for major companies - including BHP and RTZ's La Escondida orebody. But now he's shooting for himself and getting what Canada's Globe and Mail calls "sizzling results" with his emerging star, Arequipa Resources Ltd. Lowell started his mining career at the tender age of seven, napping ore and throwing it into the back of his father's pick-up. In 1970 he wrote a paper on the anatomy of porphyry copper deposits with John Gilbert in a study of Arizona's Kalamazoo copper deposit. This study became the universal template for explorers around the globe in their search for porphyry copper deposits. In his typically laconic Arizonan style he none-the-less ranks himself as a "half-assed academic". In industry, no-one made greater use of the model than Lowell himself. Kalamazoo was also Lowell's first major discovery. He went on to make major contributions to major porphyry finds at Vekol Hills Arizona, Casa Grande West Arizona, the JA deposit in British Columbia, the Dizon orebody in the Philippines and finally "the hidden one" - La Escondida, and the nearby Zaldivar deposit in the high plains of Chile's Atacama Dessert. Just a few hilltops away, he also had a major hand in Niugini Mining's gold finds at San Cristobal and in identifying Australian junior Equatorial Mining's Leonor SX/EW copper target.

In the prickly game of awarding credits for discovery, Lowell is cautious and says, "Altogether I've collected six finder's fees in my career - one of those I didn't deserve - really - and the one that I did deserve came out about even. The one that had a significant effect was the Escondida discovery. That allowed me to comfortably retire for the rest of my life." With his finder's fees, Lowell even bought back from the banks his uncle's ranch where he was raised near the town of Nogales near the Mexican border, a place where he now lives and works. But more appealing than retirement were Lowell's long-building visions of the metal potential of Peru immediately along the Cordillera from Chile's copper boom belt. His sister was born there while his father ran a mine.

Malnic (2000)

- el *status* 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).
 - Deberá tener una familia que comprenda su trabajo.
 - Pero por sobre todas las cosas, deberá tener un compromiso absoluto con la idea de descubrir nuevas mineralizaciones.

3.2 Sobre el cuándo, el qué y el dónde explorar

3.2.1. La difícil decisión del cuándo

La minería es como un “navío a vela”, su velocidad y dirección de navegación dependen en gran medida de la fuerza y dirección del viento, y claro está, de las “habilidades” de su capitán. Sin viento no hay navegación, y con viento en contra solo se puede navegar dando grandes bandadas ciñendo al viento (y haciendo la navegación entre un punto A y uno B más lenta) (Oyarzún y Oyarzun, 2011). En esta metáfora los vientos corresponden a las fuerzas económicas del momento. A diferencia de otras industrias, la minería difícilmente puede crear demanda. Por ejemplo, Nokia puede “convencer” a la gente que compre “sus” teléfonos, pero una empresa minera no puede hacer lo mismo con sus metales. Estos están sujetos de manera estricta a la ley de la oferta y la demanda. Sobre esto hay que ser muy claros, una campaña de marketing bien estructurada puede convencer a la gente de que compre cualquier cosa, sin embargo los metales, estando al comienzo de la línea de producción, no pueden ser publicitados. Las empresas no comprarán más cobre porque esté “de moda”, sino porque lo necesitan para manufacturar sus productos. Así volvemos a nuestro barco a vela, se moverá mejor o peor (o no se moverá en absoluto) dependiendo de los vientos económicos del momento.

(Reuters) - New mining graduates are in high demand as the industry booms, and they can expect to walk straight into well paid jobs across the globe, an academic at Britain's only mining school said on Monday.

... It is no surprise, therefore, that new recruits are well remunerated.

In Australia, a starting salary for a graduate of around A\$105,000 (\$111,000) is not unusual, with a rise to A\$110,000 to 130,000 (\$116,000-\$137,000) within a year, according to Wetherelt. At major mining companies, graduates tend to embark on two-to-three-year training programs, with training in smaller companies more flexible. Wetherelt said graduates became experienced quickly.

"After five to 10 years, people are pretty well versed and find themselves coming up through the management structure."

Reuters (2011)

N del A: 1.00 US\$ = 0.95 A\$ (25.06.11)

A fecha actual las empresas mineras y los profesionales de la minería (geólogos, ingenieros de mina, metalurgistas, etc.) viven un momento dorado. ¿Pero que estimula dicho momento dorado? ¿Se trata de algo pasajero o por el contrario puede durar aún mucho tiempo? En la última década las grandes economías emergentes como Brasil, Rusia, India y China (países BRIC), con grandes tasas de crecimiento de su producto interior bruto, han generado una gran demanda de materias primas, lo cual ha tenido como consecuencia excelentes precios para productos como el cobre, el aluminio y otros metales. Por ejemplo, solo China es responsable en la actualidad de una demanda de mineral de hierro del orden del 56%, del 33% para el cobre, y el 42% del aluminio. Nada hace prever una caída en

la demanda a corto o mediano plazo, aunque por otra parte, nadie predijo tampoco la profunda crisis económica que se iba a centrar en Europa y los Estados Unidos a partir de 2008. Si la economía mundial no se paralizó del todo, fue gracias a la presencia y pujanza de las economías de los países BRIC.

En exploración está siempre la gran pregunta sobre el cuándo y el qué explorar. La respuesta “fácil” a esta interrogante se encuentra en los precios de mercado de los metales y minerales. Pero claro, lo que la gente ignora es la brecha temporal que existe entre la toma de decisiones sobre exploración, el hallazgo de un yacimiento mineral “rentable” y la transformación de este en un complejo minero-metalúrgico listo para vender sus productos. En algunos casos esta distancia temporal puede estar en el orden de 5 a 10 años (e incluso más). Una máxima dice que *hay que explorar cuando los precios de un metal son bajos*. ¿Absurda idea? En absoluto, ya que la práctica indica que cuando una empresa comienza a explorar con precios altos de un metal, para cuando puede por fin poner en marcha una mina, los precios de este metal pueden haber caído sensiblemente (debido a una cierta “ciclicidad” en la economía mundial: recesión-expansión) y hacer ruinoso la operación. Esto que parece tener sentido, rara vez se aplica y es debido a que la financiación que necesitan las empresas mineras para la exploración y desarrollo, rara vez llega en los momentos duros. Al respecto dos comentarios:

1. Si los precios de mercado son bajos es porque: A) el metal ha dejado de ser importante por un tema de índole tecnológico o ambiental; B) porque la economía mundial está en crisis.
2. Los bajos precios de mercado de un metal hacen difícil que los inversores se “motiven” lo necesario como para arriesgar dinero en exploración.

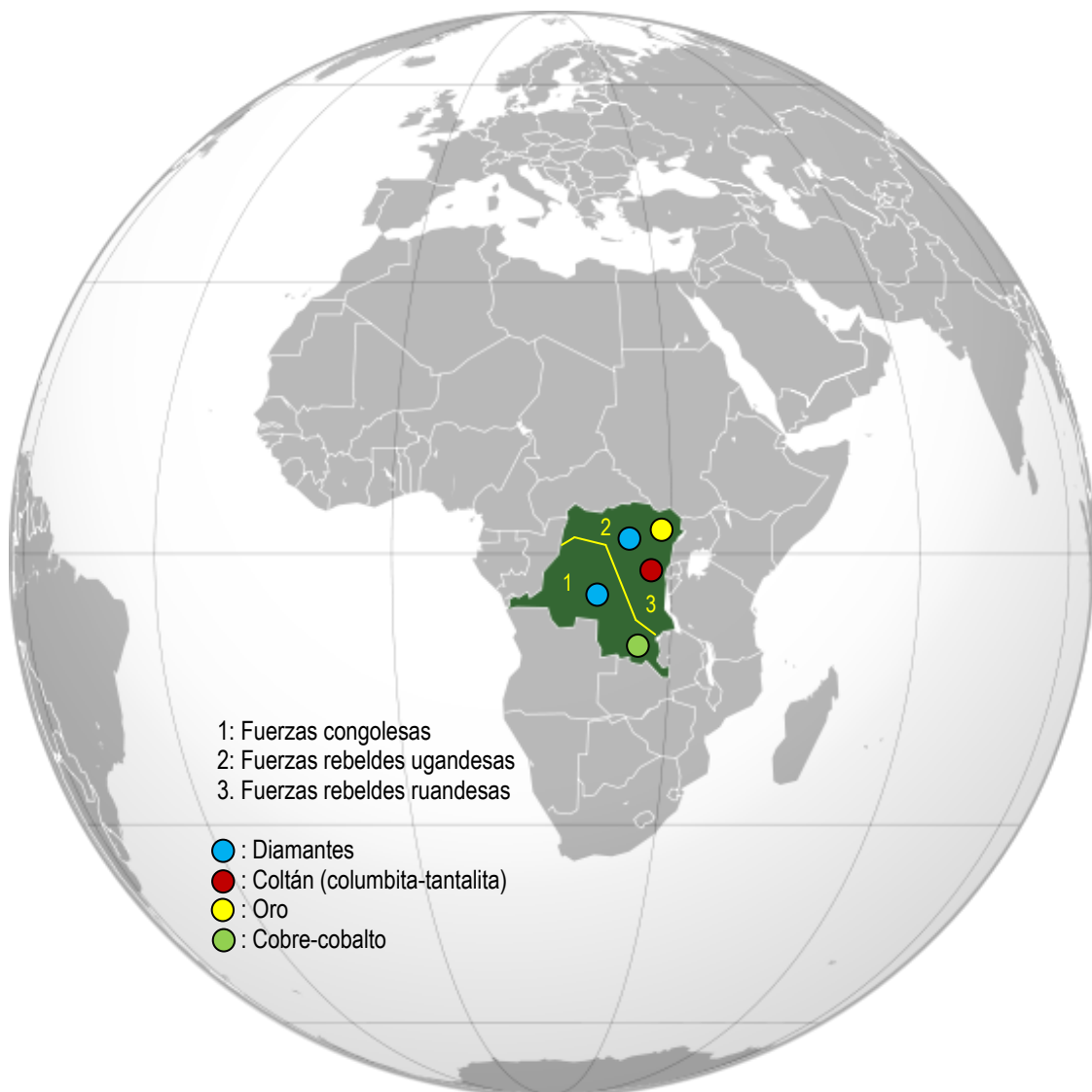
Ya sea una u otra razón, será difícil encontrar financiación, especialmente para las compañías de exploración pequeñas (*junior companies*), que generalmente recaban dinero a partir de pequeños inversores como en el caso de Canadá. Si es difícil convencer a los grandes inversionistas, imaginemos por un momento a los pequeños inversores (ciudadanos de a pie con pequeños capitales) que quieren obtener un rápido retorno (más ganancias) del capital invertido.

3.2.2. ¿Qué metal deberíamos explorar y sobre todo, dónde?

Otro factor a considerar es el metal a explorar. Existen valores “seguros” como el oro y otros más “convencionales” como el cobre. Ambos están sujetos a los vaivenes de la economía mundial, aunque en algunos casos, de manera inversa. Es cuando vienen tiempos convulsos, de incertidumbre económica, que más suben los precios del oro como “valor refugio”. Dado que en la actualidad se vive una

situación curiosa, con economías estancadas y otras creciendo vertiginosamente, ambos metales han alcanzado precios record. Por otra parte está el “dónde”. Como discutíamos en otra sección de este libro, existen regiones del mundo sujetas a fuertes riesgos políticos. Estos pueden ser de diversa índole, y pueden abarcar más de uno de los siguientes factores:

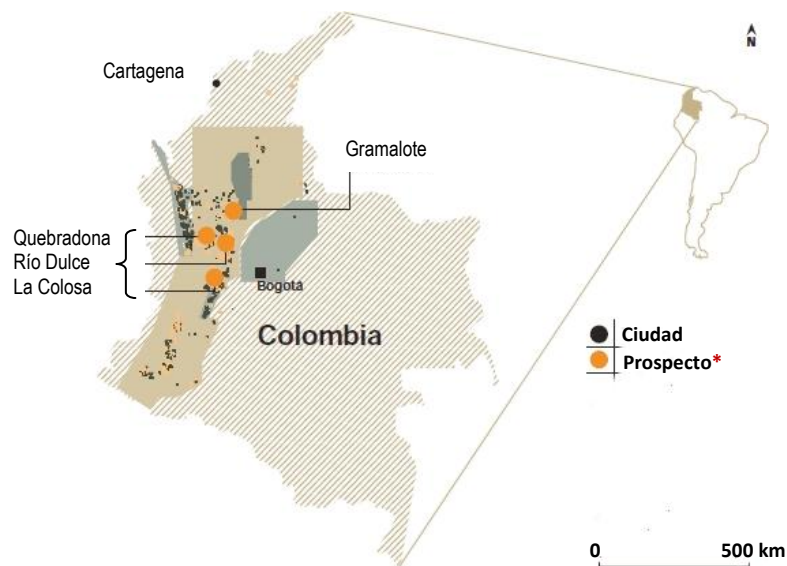
- Gobiernos corruptos que hacen difícil a las empresas trabajar sin estar sujetas al pago de sobornos continuos e inesperados para todo tipo de cosas.
- La hostilidad manifiesta hacia todo tipo de capital (privado) foráneo.
- La presencia de grupos paramilitares operando en las zonas de exploración.



La República Democrática del Congo (imagen²), una región del mundo de alta inseguridad y escasa gobernanza donde los ejércitos del gobierno ni siquiera controlan todo el territorio nacional. Todavía hoy en día el título de la famosa novela de Joseph Conrad sigue siendo válido: El Corazón de las Tinieblas (1902). Localización de los principales yacimientos y fuerzas rebeldes: The East African (2009).

Ya para terminar, debemos diferenciar entre los tipos de proyectos de exploración. Los hay de dos categorías, *Brownfield* y *Greenfield*. Ambos se relacionan con el conocimiento previo de una región, la existencia de actividades mineras previas, etc.:

1. Si la exploración se desarrolla cerca de yacimientos conocidos, conociéndose la geología y potencial de la zona, entonces hablaremos de *brownfield*.
2. Si por el contrario partimos de cero o casi cero en una nueva región, hablaremos de *greenfield*.



Proyectos de exploración del tipo greenfield llevados por la empresa minera Anglo-Gold Ashanti en Colombia, que han dado como resultado la definición de cuatro prospectos (Anglo-Gold Ashanti, 2009). *: Sector de unos cuantos kilómetros cuadrados con el potencial para transformarse en un yacimiento mineral si los datos de sondeos y calicatas lo indican así.*

3.3 Sobre el cómo explorar

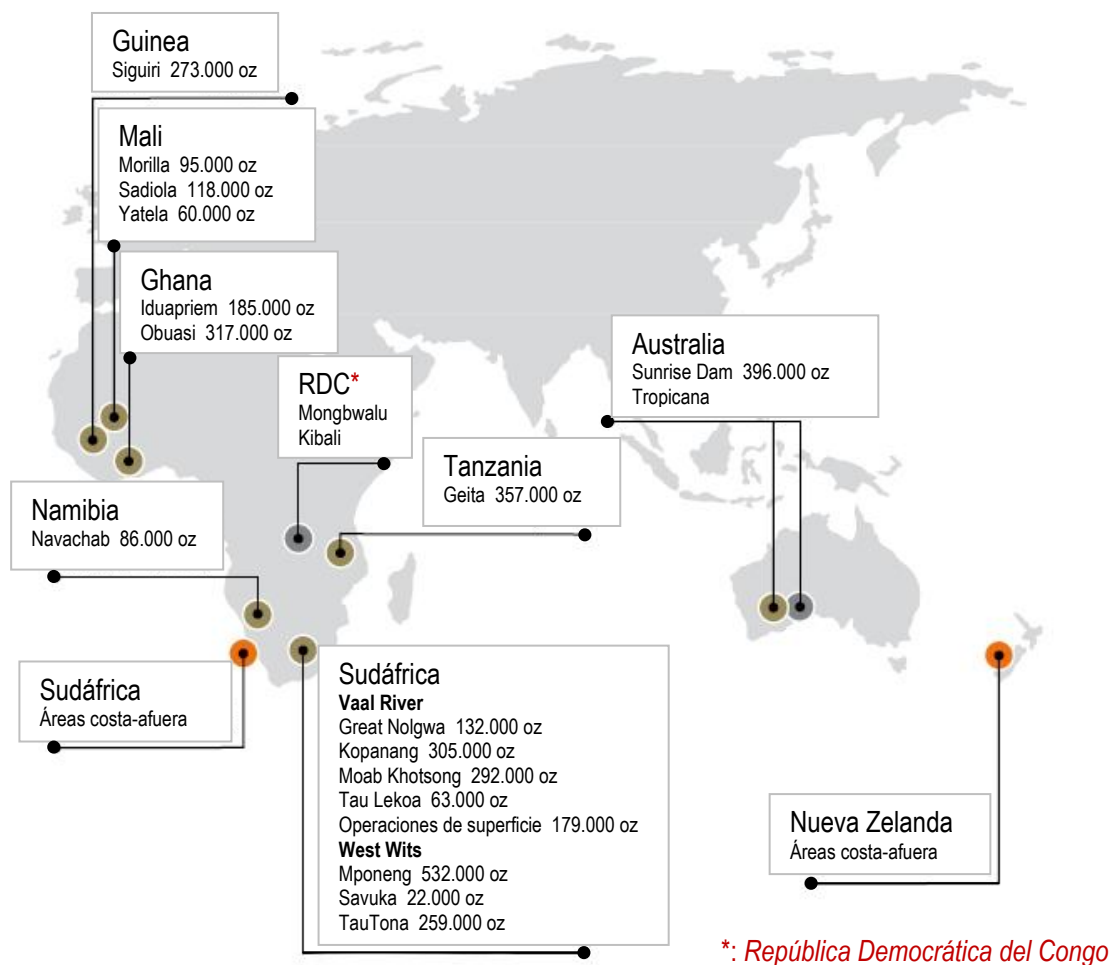
3.3.1 Unas palabras de introducción

Este es un tema que hace bueno el viejo dicho español de que *cada maestrillo tiene su librillo*. Para empezar la diversidad de metales y minerales que se pueden explorar es inmensa. Segundo, el que busquemos, por ejemplo, cobre no significa mucho *per se*, ya que habrá que definir antes el tipo de yacimiento que estamos buscando y donde lo buscaremos.

De ahí que en el campo de la exploración existan especialistas en determinados tipo de metales y yacimientos. Es más, hay compañías mineras que se dedican a un metal casi de manera exclusiva, mientras que hay otras que son más generalistas.



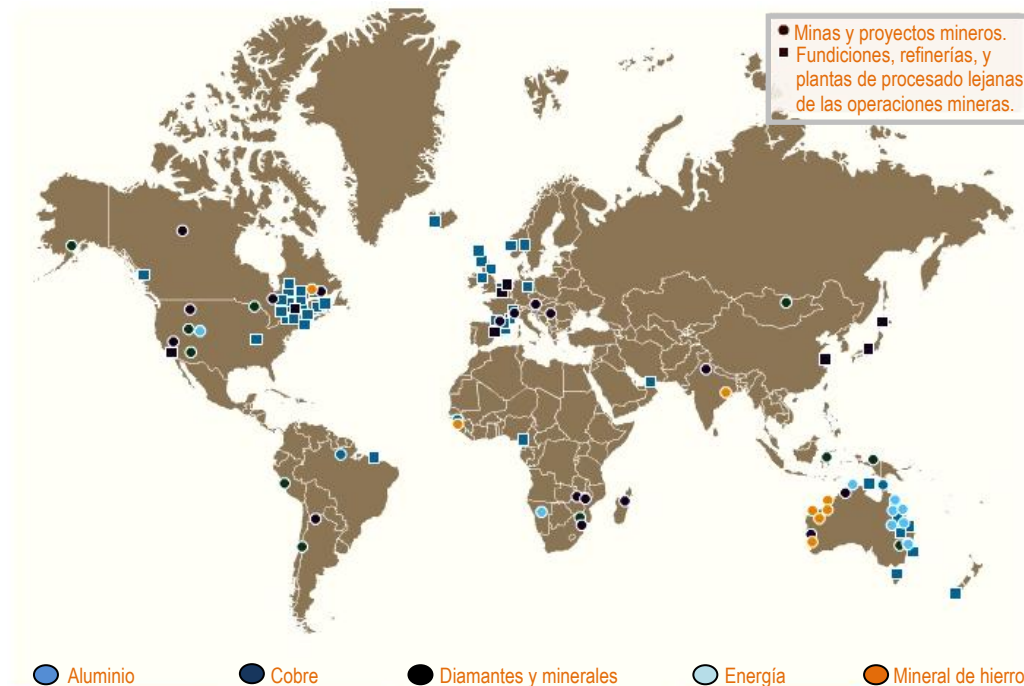
Operaciones mineras de la empresa minera Anglo-Gold Ashanti en las Américas (Anglo-Gold Ashanti, 2010). Se trata de una empresa especializada en oro con operaciones a nivel global. Cantidades de oro expresadas en onzas (oz).



Operaciones mineras de la empresa minera Anglo-Gold Ashanti África y Oceanía (Anglo-Gold Ashanti, 2010). Cantidades de oro expresadas en onzas (oz). Leyenda en página anterior.

Por ejemplo, Anglo-Gold Ashanti es una empresa basada en Sudáfrica cuya exploración se centra en el oro. Por su parte, CODELCO-Chile, se especializa en cobre y molibdeno, extrayendo estos metales desde sus minas en Chile central y norte a partir de pórfidos cupríferos y yacimientos asociados. Así tenemos dos empresas especializadas, pero una global y otra que opera básicamente a nivel nacional.

Por su parte, uno de los gigantes mundiales, Rio Tinto, tiene un carácter más generalista, llevando a cabo operaciones extractivas en todos los continentes, con una producción diversificada que incluye aluminio, cobre, mineral de hierro, diamantes y recursos energéticos. No hay que confundir Rio Tinto con Río Tinto Minera, empresa española que se constituyó en 1977 y dejó de existir en 1996. Esta última centró sus esfuerzos en el yacimiento de Cerro Colorado (Huelva).



Operaciones mineras y de procesamiento de minerales de Rio Tinto en diversas regiones del mundo (Rio Tinto, 2011).

Las empresas que hemos mencionado, son solo una fracción del total mundial, y entre los gigantes mundiales están las que se muestran en orden de importancia económica en la caja (box) adyacente.

Por su parte, tanto las empresas generalistas (p.ej., Rio Tinto) como las especializadas (p.ej., CODELCO), tienen equipos de geólogos, economistas, abogados, y analistas de riesgo que se encargan de todo lo concerniente a la exploración. Se trata de profesionales con gran experiencia que llevan toda una vida dedicada al difícil e impredecible (en cierta medida) negocio minero, profesionales que saben con certeza que el porvenir de sus empresas no se centra tanto en el “hoy” sino en el “mañana”; para esto solo hay una palabra clave: exploración geológica. Se podrá decir de las maneras que se quiera, pero el hecho final es que sin geólogos no hay futuro minero para ninguna empresa.

Below is a list of the top 10 mining firms in 2006, ranked according to their controlled share of the total value of global non-fuel minerals production, in percent. The list was compiled by industry analysts Raw Materials Group.

Company Country Share 2006

CVRD VALE.SA (RIO.N) Brazil 5.4
BHP Billiton (BLT.L) (BHP.AX) Australia 4.8
Anglo American (AAL.L) Britain 4.3
Rio Tinto (RIO.L) (RIO.AX) Britain 4.3
FreeportMcMoran (FCX.N) United States 3.3
Codelco Chile 3.2
Xstrata (XTA.L) Switzerland 3.0
Norilsk Nickel (GMKN.MM) Russia 2.7
Barrick (ABX.TO) United States 1.8
Grupo Mexico GBMEXICO.MX Mexico 1.6

Reuters (2008)

3.3.2. Construyendo la casa desde la base (y no desde el tejado)

Existen innumerables técnicas de exploración en la actualidad, pero todas pasan por la ineludible realidad de que si no hay conocimiento geológico de una región en el fondo no hay nada. En tiempos de guerra ya se podrán controlar los cielos y los mares, que mientras la infantería no controle el terreno, en el fondo, no se controla nada. En exploración es lo mismo, los sensores remotos son una excelente herramienta, la geoquímica y la geofísica también lo son, pero sin trabajo de campo de un “geólogo”, estas técnicas se quedan en lo que son: herramientas de apoyo y poco más.



A la izquierda, geólogo de exploración en Collahuasi (Chile); a la derecha, estudiando testigos de sondeo (imágenes^{3,4}).

Un vez dicho esto, ¿cuál es el papel del geólogo de exploración y que técnicas utilizará? Lo primero a definir es el llamado modelo de exploración, el cual describe los atributos esenciales de un tipo de yacimiento, relacionándolos o no de manera genética. Un modelo consiste en una especie de “retrato robot” del tipo de yacimiento que se busca. En otras palabras, hablamos de una sistematización de la información geológica para un determinado tipo de yacimiento.

An initial requirement in exploration is to have a mental image of the target—the deposit being sought. Throughout history, prospectors have used a knowledge of known deposits as guidelines in their search for new deposits; in modern exploration, this is identified as the building of an exploration model. The exploration model applies to a favorable geological environment and a target with an expected response to the methods and techniques of exploration. The model will necessarily be revised and redirected during exploration. An exploration objective that allows for a discovery among several kinds of deposits will make use of several models.

Peters (1992)

Una vez definida la idea de “modelo” en la siguiente sección pasaremos a las llamadas “guías de exploración”, que ya sentó en su momento (largo tiempo atrás) Hugh Exton McKinstry en su libro *Mining Geology*, publicado inicialmente por Prentice-Hall en 1948. Estas guías son las siguientes (McKinstry, 1970): 1) Guías Morfológicas; 2) Guías Litológicas; Guías Estructurales; y 4) Guías Mineralógicas.

3.4 Modelos en exploración

3.4.1 Definiendo algunas ideas principales

Durante la década de los años 1980's se impuso definitivamente un nuevo término en geología económica, con grandes repercusiones en lo que se referiría a la exploración de cuerpos mineralizados: "el modelo". Un modelo es un conjunto de información que describe los atributos esenciales de un tipo (clase) de yacimiento mineral. En los modelos podemos distinguir dos tipos:

1. **Modelo empírico (descriptivo).**
2. **Modelo teórico (genético).**

Un modelo empírico (descriptivo) es aquel que describe los atributos esenciales de un tipo de yacimiento aunque las relaciones entre estos se desconozcan. Por ejemplo, en un modelo empírico no se entra a discutir porqué la zona de alteración potásica y las leyes primarias más altas en un yacimiento tipo pórfido cuprífero coinciden en el espacio, nos contentaremos con saber que es así. O interesará saber que existe una distribución zonal de la alteración en torno a un yacimiento de este tipo, y que las rocas típicas que lo albergan en un margen activo son granodioritas o tonalitas, mientras que en un arco isla típico, son más bien de tipo diorítico.

Por su parte el modelo teórico (genético) es aquel en que los atributos esenciales se encuentran interrelacionados a través de conceptos fundamentales. Por ejemplo, magmas más evolucionados, generados en zonas de potente corteza continental dan lugar a rocas calco-alcalinas típicamente granodioríticas, mientras que en los arcos de isla, con cortezas más delgadas, el tipo es menos evolucionado,

Province scale - area selection

Area selection is a crucial step in professional mineral exploration. Selection of the best, most prospective, area in a mineral field, geological region or terrain will assist in making it not only possible to find ore deposits, but to find them easily, cheaply and quickly.

Area selection is based on applying the theories behind ore genesis, the knowledge of known ore occurrences and the method of their formation, to known geological regions via the study of geological maps, to determine potential areas where the particular class of ore deposit being sought may exist. Oftentimes new styles of deposits may be found which reveal opportunities to find look-alike deposit styles in rocks and terrains previously thought barren, which may result in a process of pegging of leases in similar geological settings based on this new model or methodology. This behaviour is particularly well exemplified by exploration for Olympic Dam style deposits, particularly in South Australia and worldwide based on models of IOCG formation, which results in all coincident gravity and magnetic anomalies in appropriate settings being pegged for exploration.

This process applies the disciplines of basin modeling, structural geology, geochronology, petrology and a host of geophysical and geochemical disciplines to make predictions and draw parallels between the known ore deposits and their physical form and the unknown potential of finding a 'lookalike' within the area selected.

Area selection is also influenced by the commodity being sought; exploring for gold occurs in a different manner and within different rocks and areas to exploration for oil or natural gas or iron ore. Areas which are prospective for gold may not be prospective for other metals and commodities.

Wikipedia (2011)

generándose rocas dioríticas de la misma serie. En un modelo teórico también tendremos que entender cómo se relacionan fisicoquímica y espacialmente las fases silicatadas y sulfuradas en un pórfido cuprífero, y además comprender adecuadamente la secuencia temporal de éstas.

Esta percepción dual de los yacimientos lleva a una absurda polémica entre teóricos y empíricos, ambos con su propia escuela de pensamiento. Dada la importancia del tema, intentaremos comprender el enfoque de unos y otros (Gammon, 1988).

3.4.2 Escuelas de pensamiento ¿una mejor que la otra?

La escuela teórica se basa en la ciencia de la geología económica. Profesores universitarios y alumnos graduados emplean gran parte de su tiempo y esfuerzos en estudiar yacimientos que ya han sido descubiertos. Estos son cuidadosamente analizados, medidos y descritos con resultados que son publicados en tesis y revistas científicas. El interés se centra normalmente en explicar porqué una concentración anómala de minerales valiosos se ha localizado en un punto concreto de la corteza terrestre. El enfoque consiste en estudiar una gran variedad de yacimientos del mismo tipo. De ahí puede deducirse que todos esos yacimientos están asociados con un tipo específico de roca, y restringidos a esa particular litología por estructuras específicas u otros factores. El siguiente paso es obvio y fácil, ir al campo y buscar ese tipo específico de rocas. Después de identificar un área probable hay que buscar el marco estructural adecuado, y si todo va bien, tendremos un nuevo yacimiento. De hecho este enfoque funciona y éste es un ejemplo muy simple de como se aplica el método. En otras palabras, alguien estudia un grupo de hechos (p.ej., la roca y la asociación estructural), crea una hipótesis (este tipo de yacimiento se ha formado debido a la acción de tal o cual proceso), y prueba la hipótesis (explorando). Cuando la prueba confirma la hipótesis (a través del hallazgo de un nuevo yacimiento), ésta es elevada al estatus de teoría. Las teorías creadas a través de este enfoque han sido usadas con éxito en una variedad de ambientes a nivel mundial.

Por otra parte, los seguidores de la otra gran escuela de pensamiento, esto es, los empíricos, piensan que todo esto es una monumental pérdida de tiempo y dinero. Su filosofía puede ser resumida en una frase: “los yacimientos están donde se encuentran”. Su argumento principal es: ¿y qué pasa si el enfoque teórico está equivocado, o en el mejor de los casos es incompleto? Se corre el peligro de pasar por alto un gran yacimiento sólo porque no encuadraba en el modelo teórico que se estaba empleando. Los empíricos prefieren estudiar una región y utilizar indicaciones indirectas obtenidas por métodos científicos de prospección, por

ejemplo, geoquímica, geofísica, teledetección, etc., sin partir de una idea preestablecida sobre donde se encontrará el yacimiento. Si existe un yacimiento en el área estudiada y se encuentra lo suficientemente cerca de la superficie, será detectado por esos métodos. Cuanto más grande el yacimiento, más fácil será encontrarlo. O al menos esto dicen los empíricos (...).

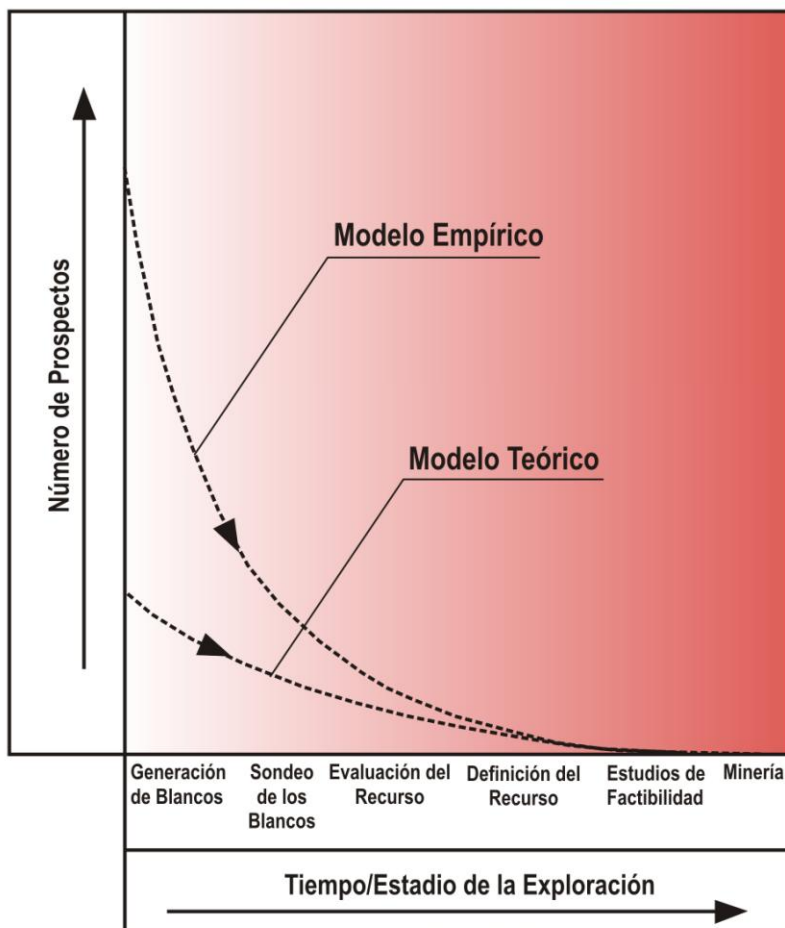


Viñeta que ilustra la distinta percepción de los hechos de los teóricos y los empíricos, en este caso representados por dos cazadores. A la izquierda, el teórico dice, "si puedo determinar de dónde vienen las huellas puede que encuentre una fuente inagotable (de caza)"; el empírico le responde, "y a quien le importa de dónde vienen, yo voy a cazar éste y me lo como" (Gammons, 1988).

La eficacia de este enfoque puede ser ejemplificada por la historia del descubrimiento del gran depósito de Kidd Creek (Ontario, Canadá). En este sitio se había detectado una gran anomalía geofísica de conductividad, rasgo que podía indicar la presencia de minerales metálicos, cerca de la pista de aterrizaje de Timmins. Todo el mundo conocía este hecho, pero debido a que no encajaba en la teoría predominante no se consideró un dato relevante. La compañía minera Texas Gulf Sulfur, con un enfoque empírico, perforó en el área de la anomalía y el resto es conocido por todos los geólogos económicos: se encontró uno de los yacimientos de cobre-zinc más ricos del mundo.

Hasta aquí todo bien, sin embargo como Oyarzún y Oyarzun (2011) señalan, en realidad es difícil creer que se pueda explorar sin algún tipo de modelo conceptual en la mente. Sería parecido al caso de un médico que no cree en las

enfermedades y sólo registra síntomas. Por otra parte, como muestra Marjoribanks (1997), al final las campañas de exploración llevadas a cabo utilizando modelos teóricos o empíricos tienen desenlaces equivalentes.



La exploración de yacimientos en función de la utilización de modelos empíricos y teóricos (adaptada y modificada de Marjoribanks, 1997). A medida que transcurren las distintas etapas de del proceso, el número de prospectos definidos inicialmente cae rápidamente, siendo esto más notable en la curva correspondiente al modelo empírico. Esto es debido a que el enfoque empírico es menos “restrictivo”, por lo cual su aplicación “estricta” puede resultar en que una campaña acabe costando más dinero (más prospectos que estudiar). Ambas curvas convergen hacia la fase “minería” porque se trata tan solo de un ejemplo tipo “caso ideal”. En la práctica lo más probable es que los prospectos no pasen de la “evaluación” o “definición del recurso”.

A fin de cuentas, lo conveniente es no aferrarse a “reglas fijas” del juego, y utilizar el sentido común, ya que como decía el filósofo y matemático francés René Descartes (1596–1650), *el sentido común debe ser el más común de los sentidos, ya que todo el mundo dice poseerlo*. Bromas aparte, digamos que la exploración es el más difícil de los oficios geológicos, para el que hace falta tener una buena preparación en las ciencias geológicas y una gran determinación. Agreguemos a esto algo de suerte. Es como jugar de portero en un gran equipo de fútbol, no solo hay que ser “muy bueno”, ya que la suerte también ayuda a veces.

3.5 Guías geológicas de exploración

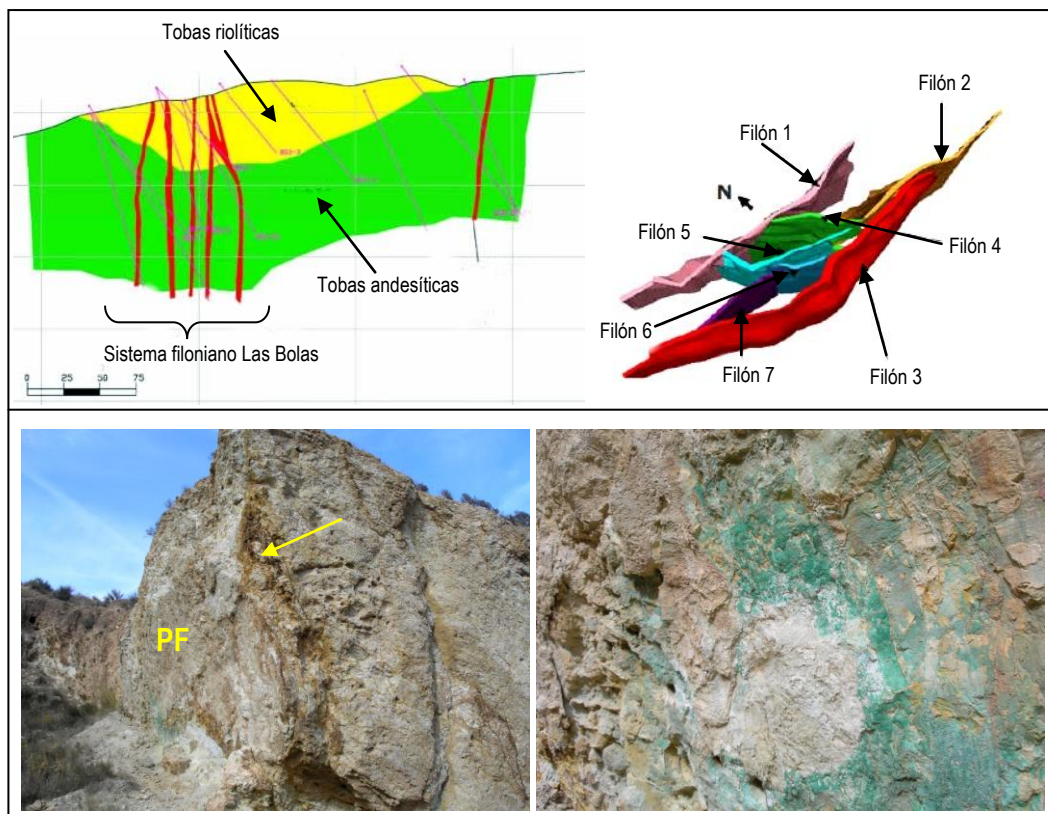
3.5.1 Guías morfológicas

Las guías morfológicas se relacionan con la forma, esto es, con la geometría de los cuerpos mineralizados que se buscan. Antes de buscar un determinado tipo de yacimiento primero deberíamos saber qué forma tiene, como punto de partida.

Los cuerpos mineralizados se pueden dividir en dos categorías: “discordantes” y “concordantes”. Los cuerpos discordantes pueden a su vez ser divididos en:

- Regulares
- Irregulares

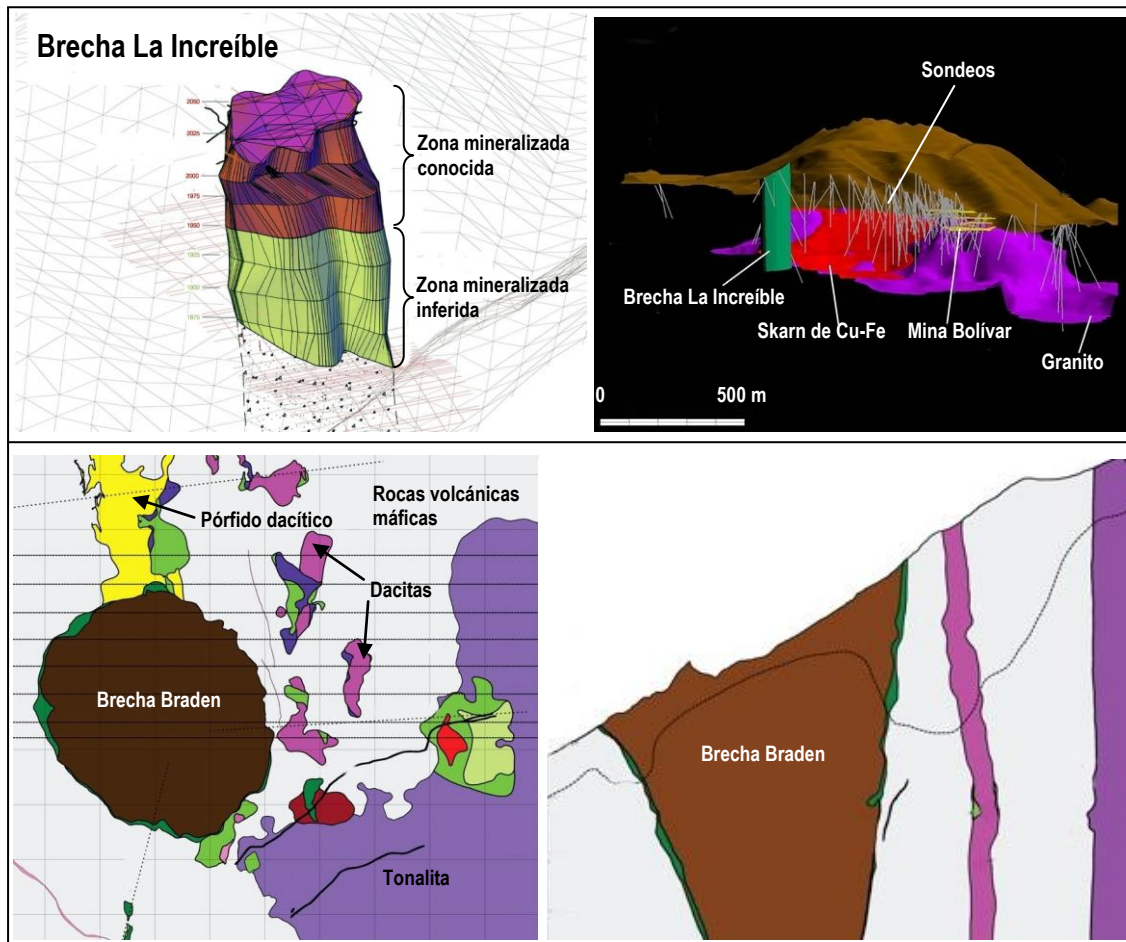
Los cuerpos discordantes “regulares” pueden tener dos morfologías posibles: A) Tabulares y B) Tubulares. Los tabulares reciben su nombre del latín (*tabularis*), esto es, que tienen forma de “tabla”. A esta categoría podemos adscribir los cuerpos mineralizados filonianos (vetiformes).



Arriba, el sistema de filones epitermales de oro-plata de Las Bolas (Sierra Madre, México). A la izquierda, el sistema en sección (2D); a la derecha, representación 3D del sistema, observe la morfología tabular de los cuerpos. Golden Goliath Resources (2009). Abajo, filón de cobre en Pedreras Viejas (Mazarrón; España). A la izquierda vista general del filón (flecha) que corre a lo largo de un plano de falla (PF); a la derecha, mineralización oxidada de cobre (verde) en el filón.

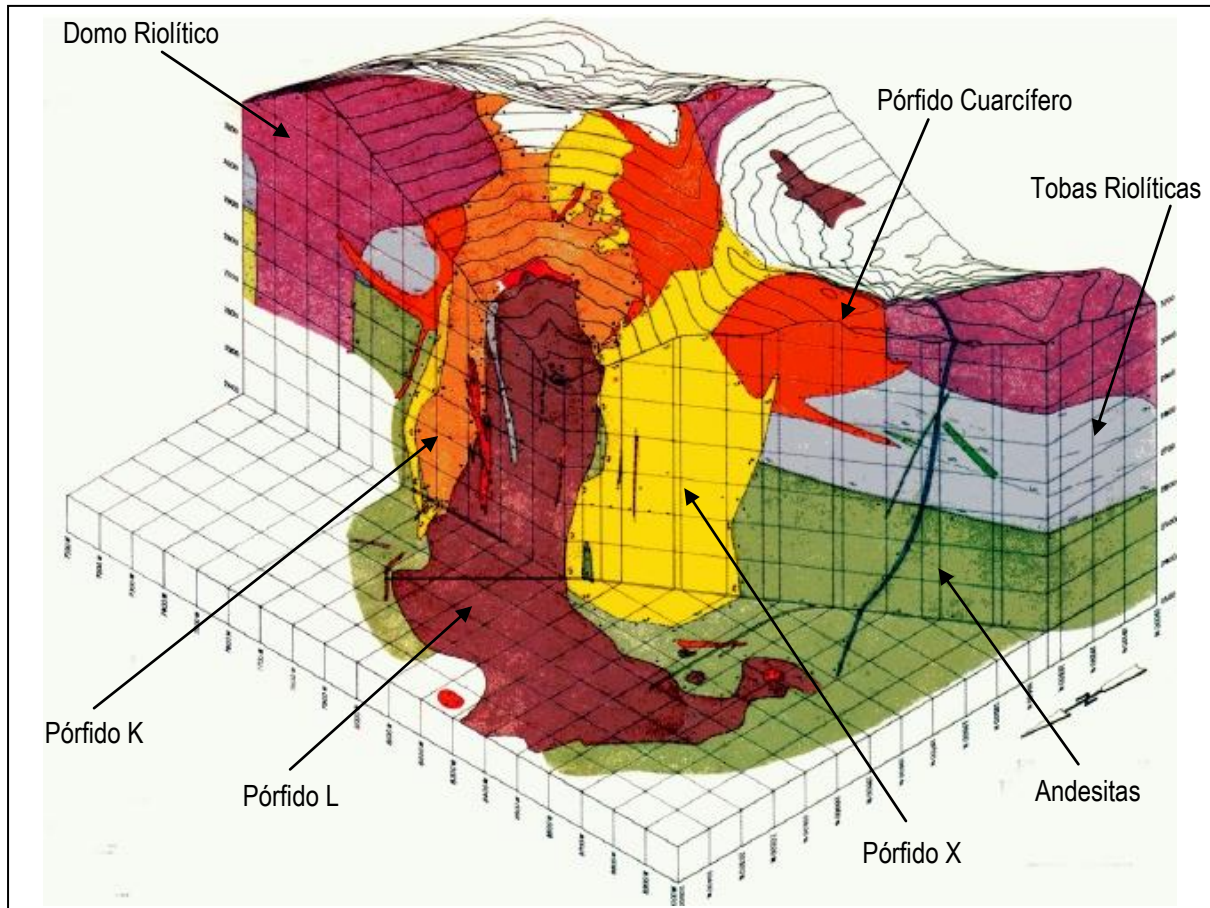
Que los filones presenten formas regulares tabulares no es de extrañar, puesto que la mineralización en estos casos se aloja a lo largo de las cavidades que generan los planos de fallas, y comparten con éstas todas las regularidades e irregularidades que estos planos puedan presentar. Volveremos sobre este tema cuando llegemos a las guías estructurales.

Los cuerpos discordantes regulares tubulares también reciben su nombre del latín (*tubulus*), y como su nombre indica, presentan forma de tubo. A este grupo se asocian las diatremas, como las kimberlíticas, y los cuerpos de brechas de turmalina, asociados (o no) a pórfidos cupríferos. El termino más común en inglés para designar estos cuerpos es el de *breccia pipe*. En ocasiones el cuerpo de brechas puede alejarse de la forma tubular y asemejar a un cono truncado invertido, como se observa en El Teniente (Chile).



Arriba, cuerpo de brecha (*breccia pipe*) La Increíble (México). A la izquierda morfología general de cuerpo de brechas mostrando las zonas conocidas e inferidas de mineralización; a la derecha, situación (3D) en el contexto del distrito minero Bolívar (Dia Bras Exploration, 2010). Abajo, el cuerpo de brecha de El Teniente, Chile. A la izquierda mapa en planta de la Brecha Braden (*breccia pipe*); a la derecha sección E-W mostrando el carácter de cono truncado invertido. Simplificada de Vry et al. (2010).

En lo que respecta a los cuerpos discordantes irregulares, como su nombre lo sugiere, presentan morfologías que no se asemejan a cuerpos geométricos regulares. En esta categoría pueden entrar algunos cuerpos de hierro o cobre tipo skarn y por supuesto los pórfidos cupríferos.



El Complejo Intrusivo Central de El Salvador (pórfidos K, X y L) (Chile). Ligeramente retocada a partir del trabajo ya "clásico" de Gustafson y Hunt (1975). Note la ausencia de morfología definida (cuerpos "irregulares") y los pórfidos claramente cortan (son "discordantes") las formaciones volcánicas y piroclásticas. Sin embargo, la mineralización de enriquecimiento secundario sí puede tener una cierta geometría controlada por el paleo nivel freático.

En cuanto a los cuerpos mineralizados concordantes, aquí entran todos aquellos yacimientos comúnmente llamados estratiformes (mantiformes). Dado que la mineralización se acomoda concordantemente a la capa sedimentaria, piroclástica o colada volcánica, poco hay que añadir al respecto. Yacimientos típicos son aquellos del tipo mantos de carbón en rocas sedimentarias, plomo-zinc en calizas dolomitizadas, y por supuesto, los yacimientos de hierro del tipo Formación Bandeada de Hierro (BIF), que por su importancia económica y amplia distribución mundial (escudos canadiense, australiano y brasileño) son de los más notables en esta categoría.



Yacimientos tipo Formación Bandeada de Hierro (BIF) del escudo canadiense (imágenes^{5,6}).

3.5.2 Guías litológicas

Los yacimientos minerales se asocian a determinados tipos litológicos y series magmáticas, por ejemplo, es bien conocida la asociación entre pórfidos cupríferos y rocas de composición tonalítica de la serie calco-alcalina, o la de algunos yacimientos de plomo-zinc con las rocas carbonatadas. Otra clásica asociación es la de las rocas ultramáficas, como las peridotitas, con yacimientos de cromo y platinoides. En otras palabras, el marco litológico y petrológico predetermina los tipos de yacimientos esperables en una región.

Así podemos definir una serie de asociaciones clásicas de gran utilidad llegado el momento de planificar una campaña de exploración. Algunas de las más típicas son:

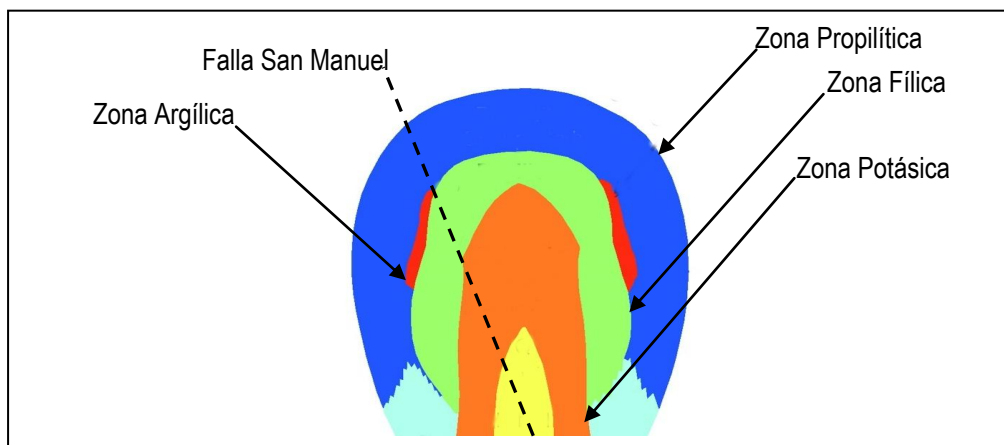
- Rocas magmáticas ultramáficas, relacionadas o no con procesos de acreción oceánica: yacimientos de cromo y platinoides.
- Rocas magmáticas de composición félsica a máfica de la serie calco-alcalina en márgenes de placa activos: yacimientos de sulfuros masivos tipo *kuroko* asociados a rocas volcánicas y subvolcánicas félsicas como riolitas; mantos de cobre en rocas o sulfuros masivos en rocas de composición basáltica a andesítica; pórfidos cupríferos en stocks de composición granodiorítica-tonalítica.
- Granitos peraluminicos del tipo hercínico europeo: yacimientos de estaño y wolframio (tungsteno), elementos de tierras raras, fósforo, uranio, columbita-tantalita.
- Rocas sedimentarias marinas carbonatadas, generalmente dolomitizadas: yacimientos de plomo-zinc, estratiformes o estratoligados.

- Rocas sedimentarias silíceas del Precámbrico: formaciones bandeadas de hierro del tipo Lago Superior. Si hay además rocas volcánicas asociadas pueden desarrollarse mineralizaciones bandeadas de hierro del tipo Algoma.

3.5.3 Guías estructurales: fallas y yacimientos minerales

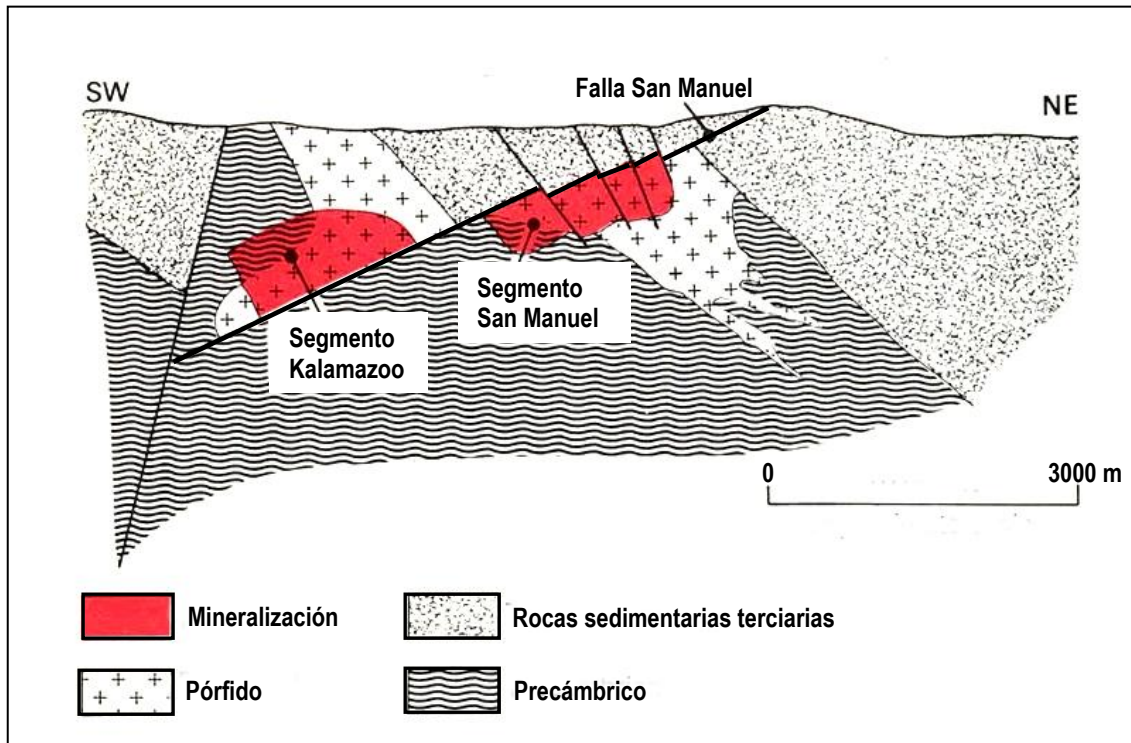
Quizás pocos ejemplos ilustren mejor la importancia de los estudios estructurales como el descubrimiento del yacimiento tipo pórfido cuprífero de Kalamazoo en la década de los años 1960's, en el cual participó de manera decisiva el geólogo americano J.D. Lowell (Oyarzun y Doblas, 2007). Dicho descubrimiento está rodeado de varios aspectos notables entre los que habría que destacar sobre todo, el estudio "integral" del problema.

Los años 1970's estuvieron marcados en el campo de la geología económica por la publicación de una serie de brillantes trabajos sobre alteración hidrotermal - pórfidos cupríferos en la revista americana *Economic Geology*. Quizás el más significativo de estos trabajos 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, USA). 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.



Modelo de la zonación de las alteraciones hidrotermales en un yacimiento tipo pórfido cuprífero, basado en el estudio del yacimiento San Manuel - Kalamazoo (Lowell y Guilbert, 1970).

San Manuel - Kalamazoo no es económica ni geoméricamente un yacimiento único, por el contrario, se trata de dos cuerpos mineralizados basculados: San Manuel y Kalamazoo, separados por una falla normal de bajo ángulo (falla San Manuel; WNW/25-30°S). 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 (*foot-wall*) de la falla y Kalamazoo 1,6 km hacia el oeste (a una profundidad de 800-1220 m) a techo (*hanging-wall*).



Esquema estructural de la segmentación por falla del pórfido San Manuel – Kalamazoo según fue resuelta la estructura por Lowell (1968).

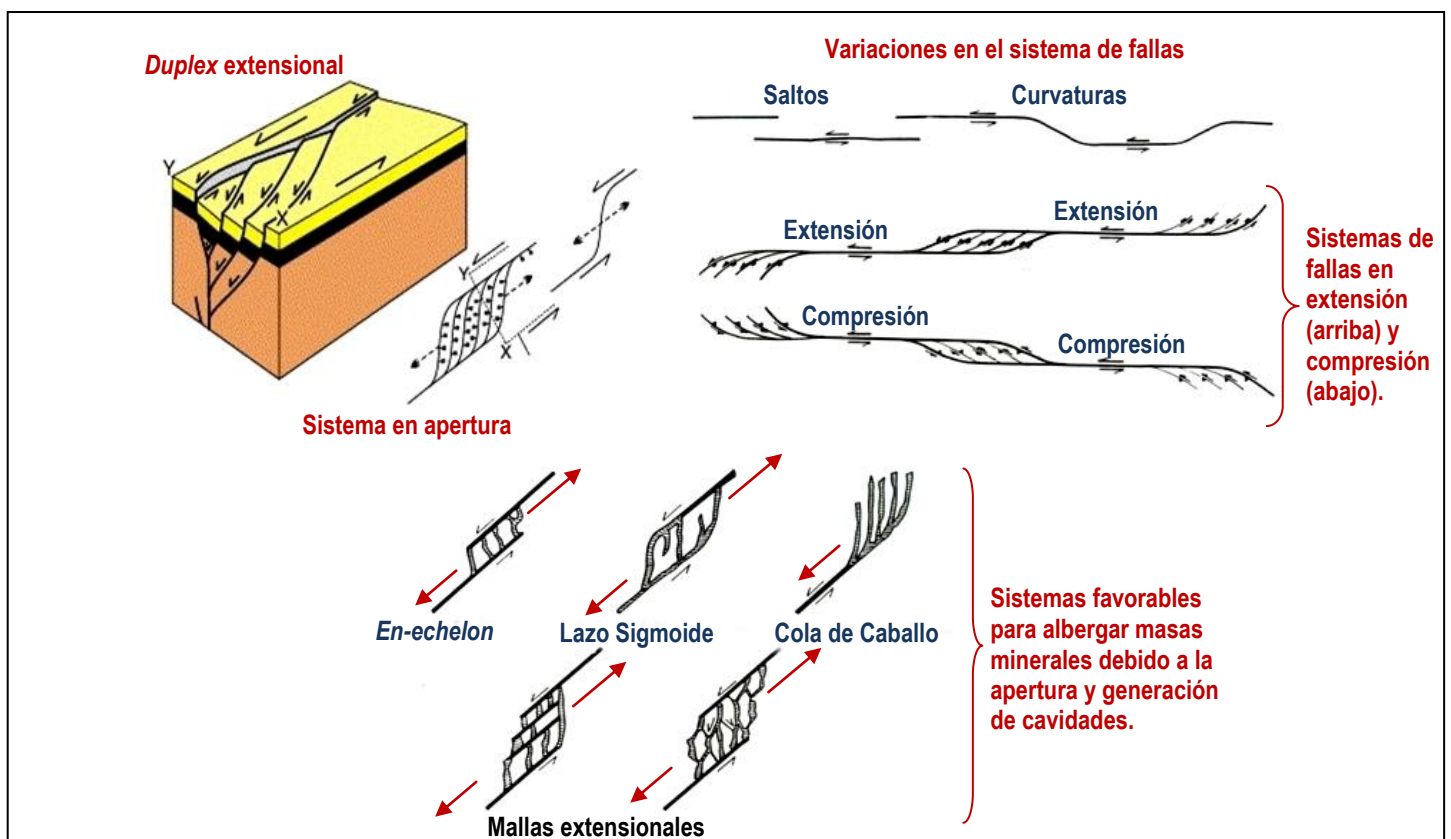
Si bien San Manuel era conocido, el descubrimiento de Kalamazoo (“Lower K”) fue la consecuencia de un trabajo geológico integrador, que relacionó las facies de alteración y la mineralización con la estructura. El razonamiento básico de exploración fue el siguiente (Lowell, 1968):

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

Resultado: efectivamente, más abajo, hacia el oeste yacía un cuerpo mineralizado, que luego sería bautizado como Kalamazoo. Conclusión: como ilustra este ejemplo el estudio de las fallas es un aspecto crucial en la exploración de recursos minerales.

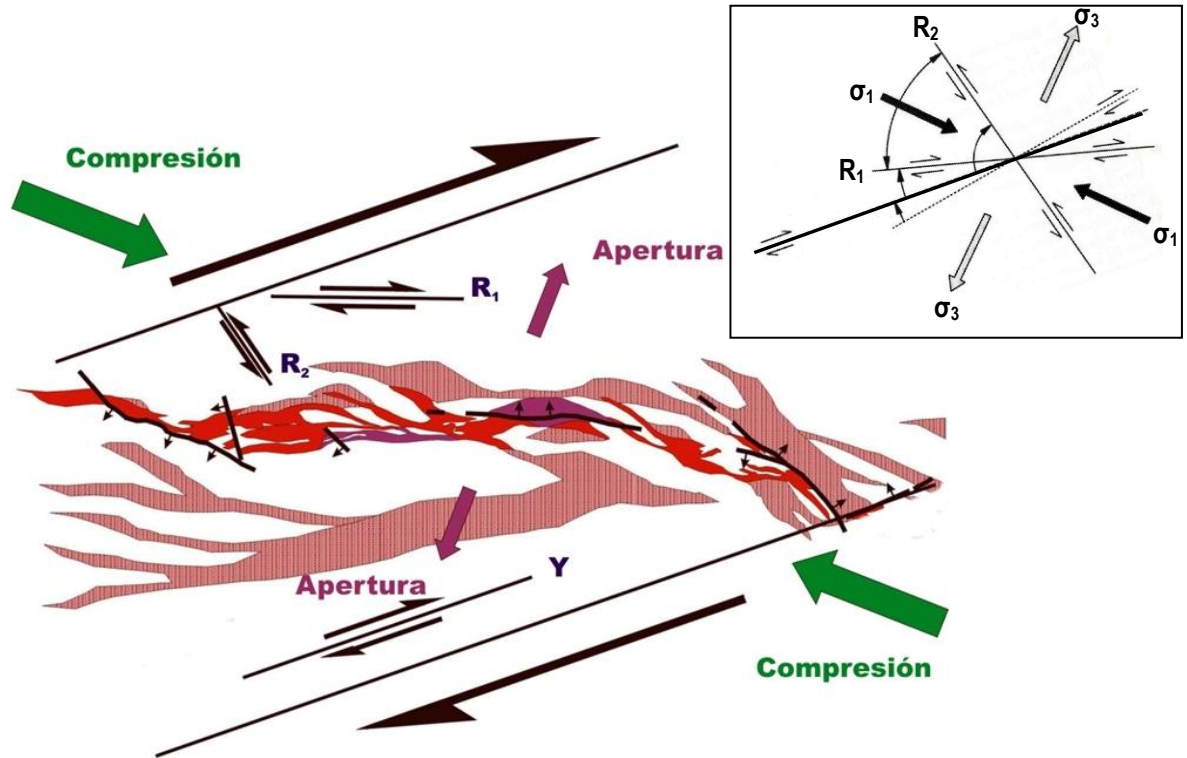
Otro aspecto a considerar es que, contrariamente a lo que de manera simple aparece en los libros básicos de geología estructural, las fallas se curvan, y esta curvatura tiene importantes implicaciones en lo que se refiere a la dinámica de extensión o compresión del sistema. Bajo el punto de vista de las mineralizaciones hidrotermales, las fallas y zonas de falla con sectores en extensión presentan el máximo interés. La razón radica en que aquellas zonas se encuentran “en apertura” lo cual tiene dos consecuencias principales:

- 1) Permiten una circulación más fácil de los fluidos hidrotermales.
- 2) Si la precipitación de la carga mineral sucede en esos sectores, la masa mineral será mayor dado el carácter en expansión que presentan.

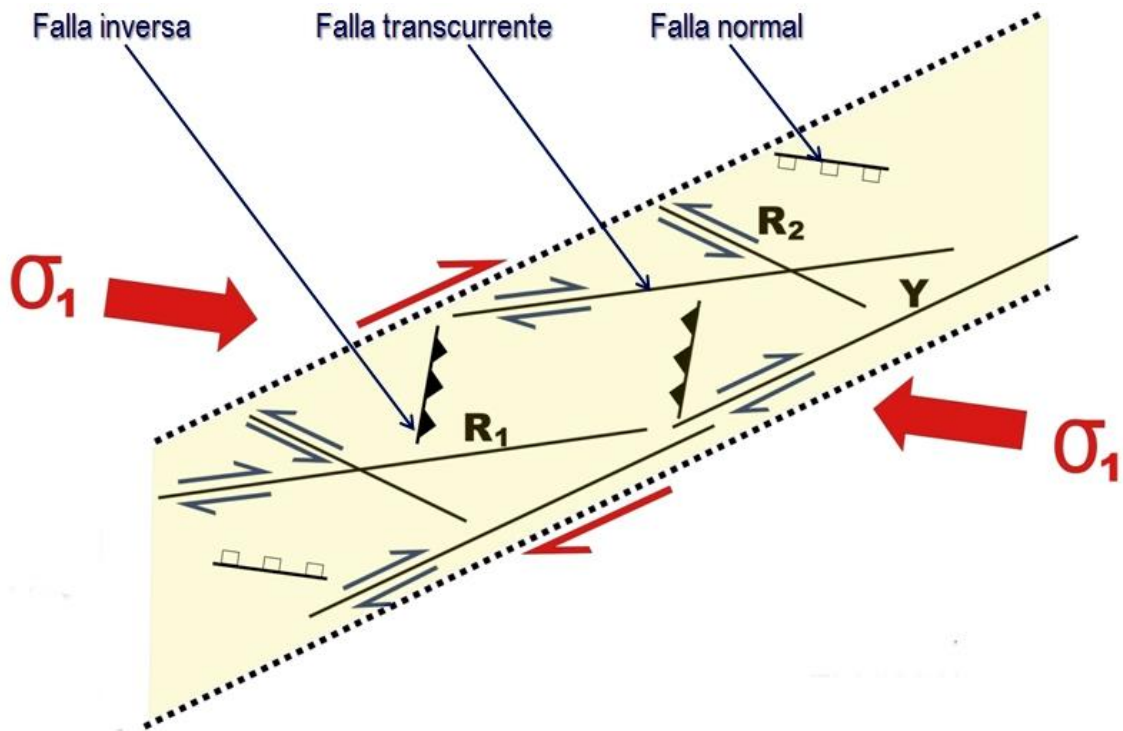


Vistas isométricas y en planta de sistemas de fallas en apertura y cierre. Importante, las zonas en apertura, por una dinámica extensional en el sistema de fallas, serán las más favorables para albergar cuerpos mineralizados (Sibson, 1990; Davis y Reynolds, 1996).

Por otra parte, el poder determinar el sentido de movimiento en una zona de falla (caso más común general ya que las fallas rara vez ocurren como entidades aisladas) tiene importantes implicaciones para la exploración que analizaremos a continuación en las siguientes figuras, eso sí, recordando (de la asignatura de Geología Estructural) el desarrollo y geometría de las fracturas de Riedel.



Formación de fracturas de Riedel (R_1 y R_2) en un caso de cizallamiento dextral como se ilustra en la figura. Observar cómo las fracturas R_1 y R_2 son generadas por el esfuerzo principal σ_1 , el que a su vez induce el carácter sinistral de la zona de falla (adaptada de Davis y Reynolds, 1996). Los cuerpos mineralizados se emplazarán preferencialmente como aquellos pintados en rojo en el ejemplo, esto es, donde hay apertura.

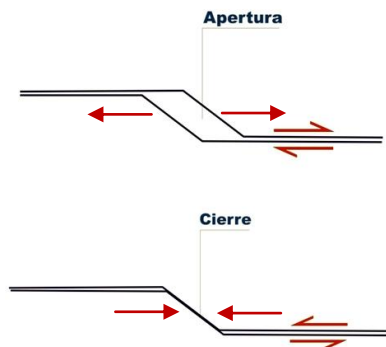


Formación de diferentes tipos de falla dentro de una zona de falla; así mismo se muestra la formación de fracturas de Riedel (R_1 y R_2) e Y. Las zonas más favorables para albergar cuerpos mineralizados serán las zonas en extensión (apertura).

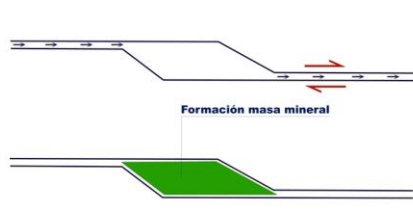
Las relaciones empíricas entre zonas en apertura y masas minerales de mayor entidad es conocida hace mucho tiempo (McKinstry, 1970), sin embargo no fue hasta los años 1980-1990's que esta relación comenzó a entenderse en términos de la dinámica de fluidos en sistemas de fallas (Sibson, 1990).

Aspectos relevantes a tener en cuenta son:

- Las zonas extensionales son las más favorables para el desarrollo de mineralizaciones. La extensión genera espacios, la compresión los sella.

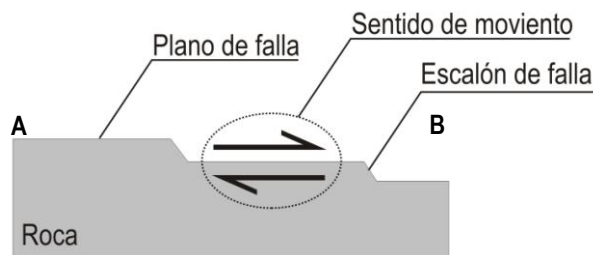
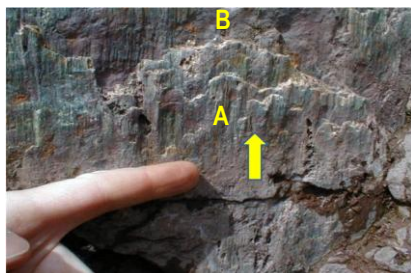


- Las fallas y estructuras asociadas cumplen dos roles principales en la formación de yacimientos: actúan como canales de migración de los fluidos hidrotermales y albergan a las mineralizaciones.



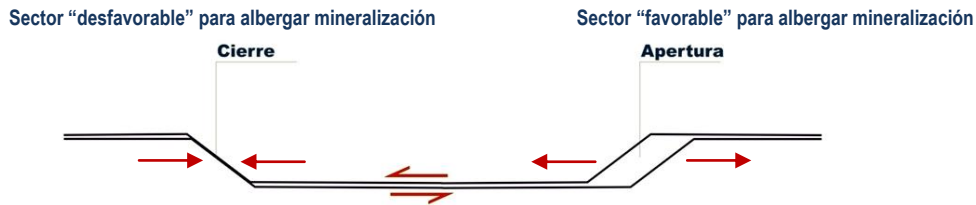
Movimiento de fluidos a lo largo de la falla hacia las zonas en apertura durante un episodio de ruptura en régimen sísmico: “bombeo” de fluidos. Relleno de las cavidades con fluidos mineralizadores. En estos sectores puede generarse brechificación por “implosión” ya que $\text{Presión Hidrostática} < \text{Presión Litostática}$, en otras palabras, ceden las paredes del hueco y entra en la cavidad roca fracturada cuya matriz final será mena + ganga.

- La determinación del sentido de movimiento de una falla individual o zona de falla es crucial para entender su potencial para albergar cuerpos mineralizados. Para esto son fundamentales los indicadores cinemáticos.



Indicadores cinemáticos, en este caso, escalones de falla, a partir de los cuales podemos determinar el sentido de movimiento (flecha amarilla) (imagen⁷).

Independientemente de la escala, las fallas pueden presentar localmente zonas en extensión y en compresión. Esas zonas están relacionadas directamente con las curvaturas (inflexiones) o saltos de las fallas.



- No existen fallas o zonas de fallas “buenas” o “malas”, en general todas presentan sectores más favorables y menos favorables para el desarrollo importante de masas minerales (ver arriba).
- Si la evidencia de campo contradice los planteamientos teóricos iniciales, sustituya la teoría, lo opuesto garantiza el desastre.

3.5.4 Guías mineralógicas

Las guías mineralógicas de exploración son de dos tipos principales, las relacionadas con los procesos de alteración hidrotermal, y las derivadas de la formación de *gossans*. La mineralogía de alteración (hidrotermal o supergénica) es una de las herramientas más útiles de exploración. Los yacimientos hidrotermales presentan una aureola de alteración, que suele disponerse simétricamente en torno al cuerpo mineralizado.

Por razones que resulta difícil a veces entender, los alumnos de geología suelen “pensar” que la alteración hidrotermal es un fenómeno que tiene que ver (exclusivamente) con los yacimientos tipo pórfido cuprífero o epitermales de metales preciosos. Muy por el contrario, la alteración hidrotermal acompaña a “todos” los yacimientos minerales hidrotermales, y su presencia (sea de un tipo u otro) depende de las condiciones físico-químicas del sistema y del tipo de roca. ¿Por qué? Porque la alteración no es más que el resultado del re-equilibrio de la fase mineral ante nuevas condiciones físico-químicas. Las soluciones hidrotermales aportan nuevas condiciones al sistema, lo que suele dar origen a la formación de nuevos minerales a partir de los iniciales que estaban en desequilibrio con esas soluciones hidrotermales.

Así, será más fácil alterar los minerales de una roca volcánica tipo andesita que los de una lutita. La razón es simple, en la andesita encontraremos silicatos primarios que son susceptibles de ser modificados químicamente, por ejemplo, una reacción de hidrólisis suave de una plagioclasa dará origen a la formación de sericita

(muscovita finamente diseminada) más cuarzo (alteración fílica), o la alteración (en condiciones de cuasi neutralidad) de un anfíbol que dará origen a clorita. Por su parte la lutita está compuesta de minerales “ya degradados” (arcillas), por lo que será difícil profundizar aun más en el proceso (no se puede alterar notablemente lo ya previamente alterado). Sin embargo, en presencia de ácido sulfúrico, se podría formar alunita. Así, las alteraciones más comunes en yacimientos hidrotermales son:

- Alteración potásica: feldespato K secundario + biotita secundaria.
- Alteración fílica: cuarzo + sericita.
- Alteración argílica: montmorillonita (argílica intermedia), caolinita + alunita (argílica avanzada).
- Alteración propilítica: clorita + epidota \pm calcita.
- Silicificación: grado extremo de alteración en la que solo queda un residuo silíceo. No confundir con el “relleno” de fracturas o huecos por cuarzo o sílice microcristalina. No se puede “alterar” un espacio “vacío”.

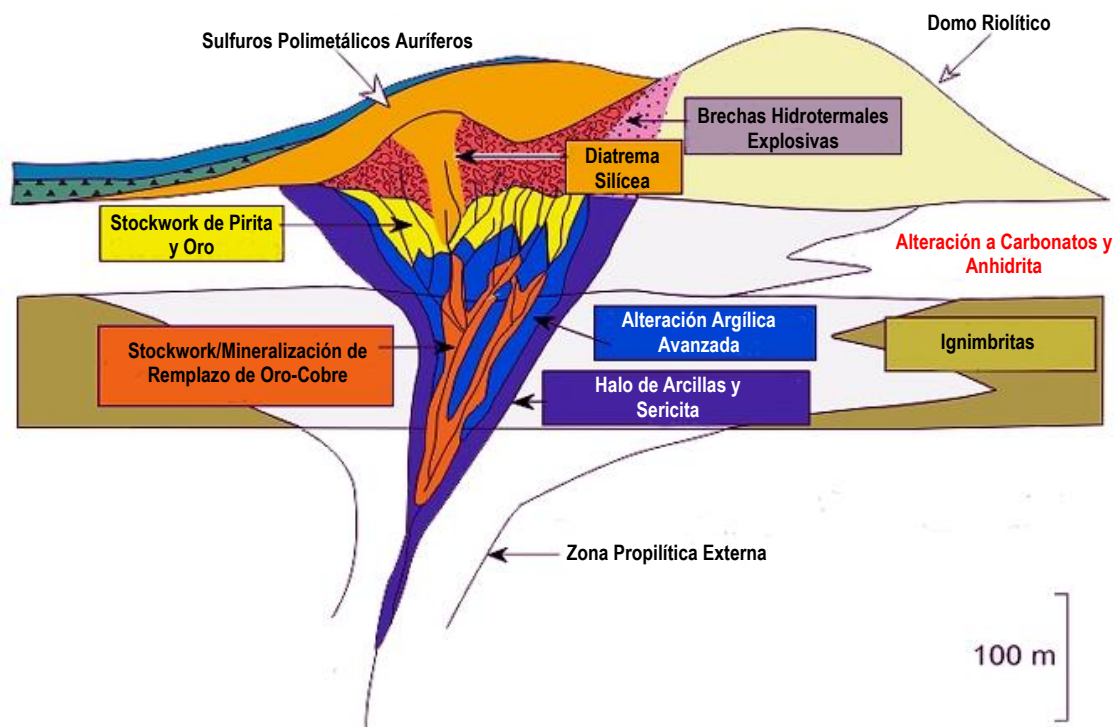


Diagrama esquemático de las zonas de mineralización y alteración hidrotermal en un yacimiento hidrotermal de sulfuros masivos de origen volcanogénico. Adaptado de Dubé et al. (2009).

Así por ejemplo los pórfidos cupríferos presentan un núcleo de alteración potásica (feldespato K, biotita), que grada hacia afuera a una alteración fílica (= cuarzo-sericítica). Más periféricamente encontraremos facies argílicas (intermedia o avanzada) y propilítica (con clorita, epidota, calcita).

Lo importante del modelo para la exploración radica en dos aspectos:

1. Presenta una zonación espacial que puede ser particularmente útil en los trabajos de campo.
2. Las zonas de mineral se corresponden a zonas de color. Por ejemplo, la alteración propilítica genera colores verdes, la argílica blancos, etc.

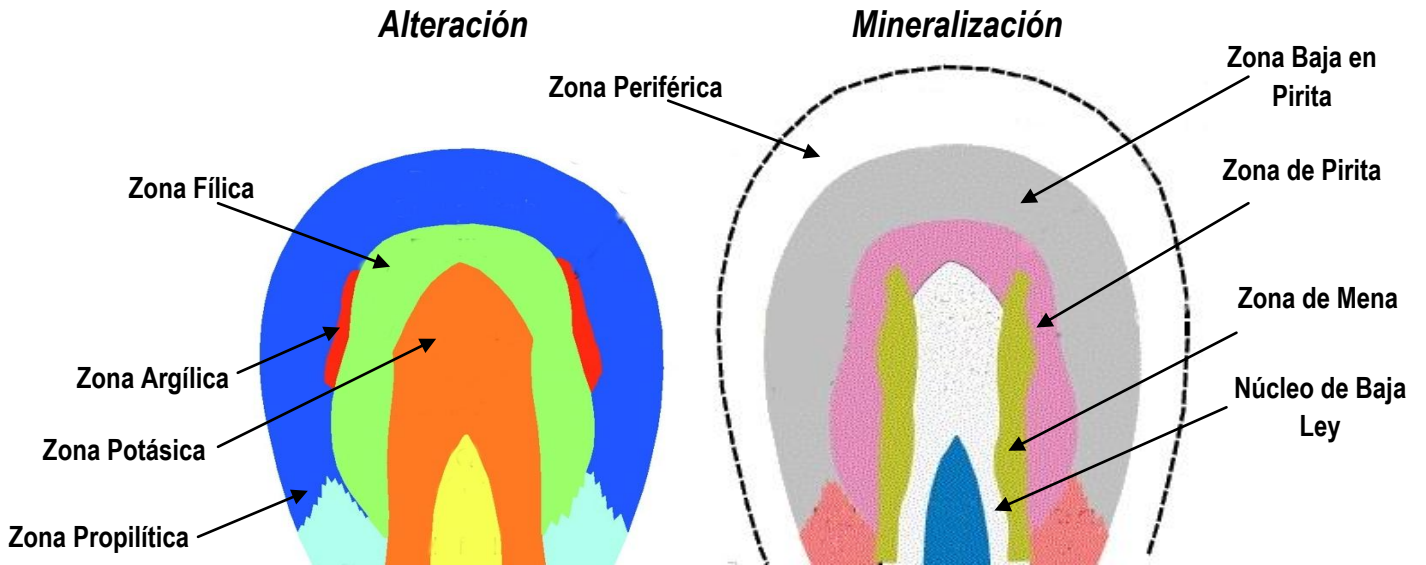
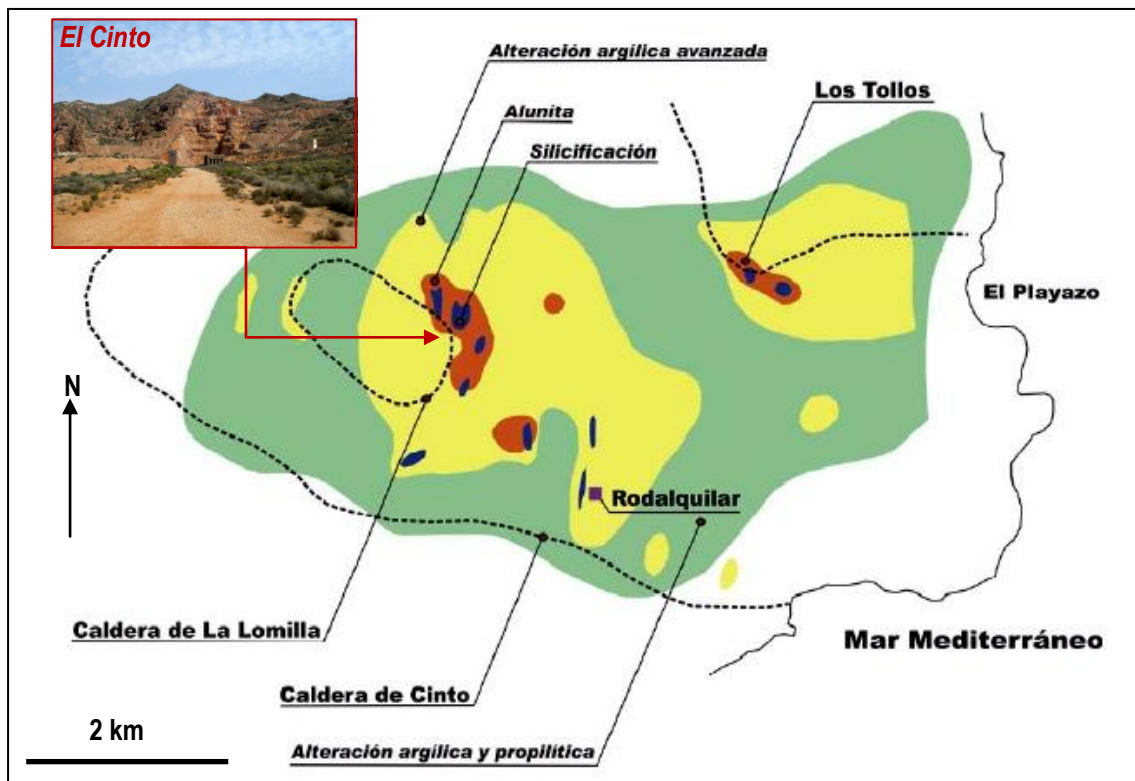
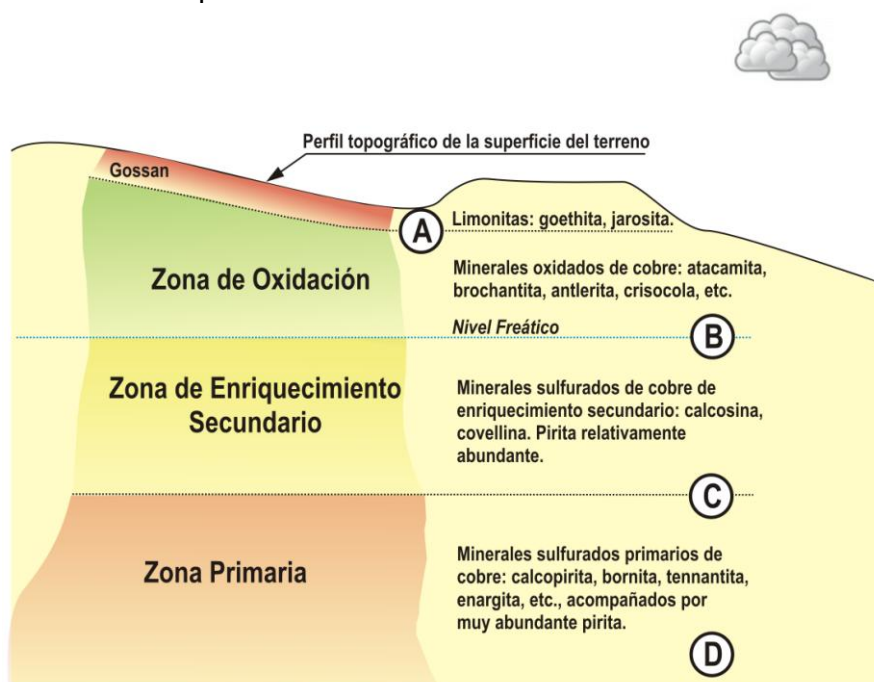


Diagrama simplificado de alteración hidrotermal – alteración en un sistema tipo pórfido cuprífero (de acuerdo al modelo de Lowell y Guilbert, 1970). Recordemos además que la alteración silicatada (izquierda) y la mineralización sulfurada (derecha) no son más que las dos caras de una misma moneda. Hablamos del mismo proceso hidrotermal que genera una y otra.

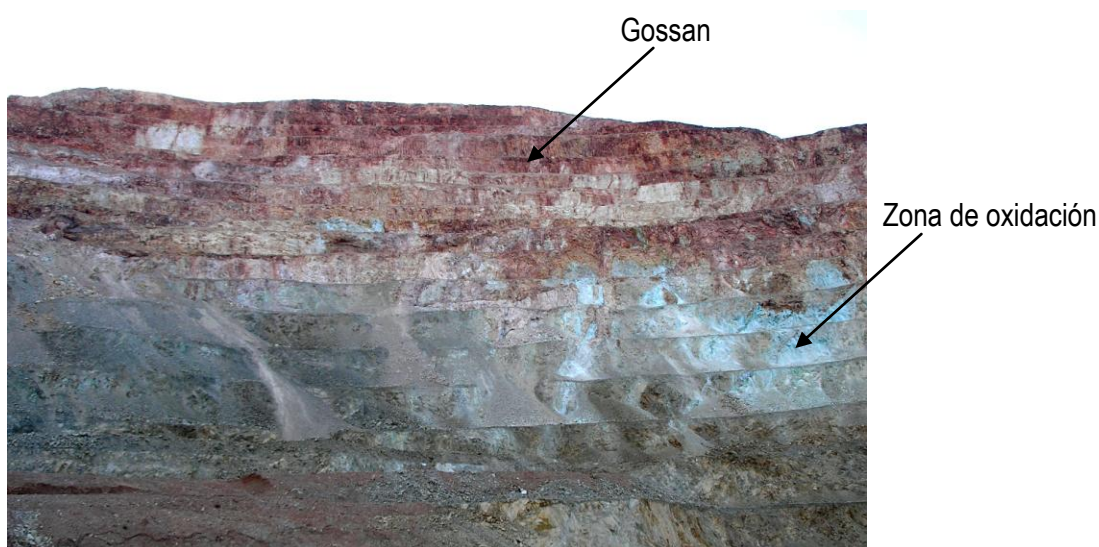


Pero la alteración puede también presentar una zonación a escala distrital, como en el caso del Distrito Aurífero (epitermal) de Rodalquilar (Almería, España). Adaptada de Arribas (1992).

En lo que respecta a la alteración supergénica, las guías mineralógicas son aun más evidentes. Esto se debe a que los procesos de oxidación de los yacimientos hidrotermales suele dar coloraciones que van desde los rojos intensos a los amarillos, representando todo el espectro de limonitas desde la goethita a la jarosita. En estos casos se generan anomalías de color que son fácilmente identificables en el campo.



Perfil esquemático de la zonación de un yacimiento hidrotermal de sulfuros de cobre en profundidad (Oyarzún y Oyarzun, 2011). A. Límite inferior del gossan. B. Límite inferior de la zona de oxidación, que coincide con el nivel freático. C. Límite inferior de la zona de enriquecimiento secundario, que se extiende hasta donde hay movimiento de las aguas meteóricas. D. La zona primaria, de extensión variable.



Gossan de Andacollo (Chile), note el contraste entre los colores pardo-rojizos superiores (gossan) y verdoso-azulados de abajo (oxidados de cobre). Yacimiento tipo pórfido cuprífero.

Es fácil separar en un texto las alteraciones hidrotermales de las supergénicas, sin embargo ¿cómo hacemos esto en el campo? Esta es la pregunta *del millón de dólares*, ya que en los sectores superiores de un yacimiento hidrotermal, una vez que se empiezan a generar los procesos supergénicos, habrá ácido sulfúrico en cantidades importantes. Ese ácido puede reaccionar con el feldespato residual y/o la sericita (de origen hidrotermal) dando origen a caolines y alunitas. Entonces, en un estudio de superficie podemos encontrar caolinita ± alunita y deducir (a lo mejor equivocadamente) que la alteración “hidrotermal” es del tipo argílica avanzada. ¿Cuándo debemos preocuparnos? Cuando junto a esa caolinita ± alunita aparecen además limonitas. Se supone que algunos estudios isotópicos (isótopos de hidrógeno y oxígeno) podrían diferenciar entre alunitas hidrotermales y supergénicas, dando pistas sobre las aguas que dieron origen a estas (hidrotermales profundas versus meteóricas). ¿Pero qué pasa en lo que corresponde a los niveles superiores de un sistema tipo pórfido cuprífero de emplazamiento somero o peor aún, en un yacimiento epitermal? Porque en esos casos también han participado, y de manera decisiva las aguas meteóricas. Solo un estudio geológico integral podrá dar algunas respuestas, y esto con el pasar del tiempo. ¿Recomendaciones? Ante la imposibilidad (real) de saber “qué es qué”, lo razonable es denominar a las alteraciones de tipo argílica avanzada por su nombre y ya está, sin entrar en disquisiciones “filosóficas” (que tanto gustan a algunos) sobre el origen último de las aguas que le dieron origen.



Sector El Cinto de Rodalquilar, yacimiento epitermal de oro del Mioceno en el SE de España. Los colores rojos corresponden a limonitas, los blancos a caolinitas y sobre todo alunitas. Coexistencia de fenómenos hidrotermales y supergénicos.

Decíamos al comienzo que hay más “mundo de alteraciones” que el de los yacimientos de tipo epitermal o pórfido cuprífero. Entre estas habría que destacar:

- La serpentinización de los cuerpos ultramáficos, con minerales del grupo de la serpentina que remplazan a los olivinos y/o piroxenos de la roca.



Rocas ultramáficas serpentinizadas y fuertemente oxidadas. Paleozoico del Sur de Chile.

- La llamada alteración “regional”, típica de las secuencias andesíticas del Cretácico Inferior de Chile. Los minerales típicos se desarrollan tanto en las vesículas como en la matriz volcánica de la roca y consisten en zeolitas, prehnita-pumpellita, clorita, albita, epidota y calcita. A estas suele superponerse en los yacimientos y cercanías lo que podemos llamar la alteración “local”, con una mineralogía muy parecida excepto por la ausencia de zeolitas y prehnita-pumpellita (Oyarzun et al., 1998). Las rocas adquieren un marcado color verde (ver imagen inferior).



Andesita de la Formación Quebrada Marquesa (Cretácico Inferior) en el Distrito Minero de Talcuna (Región de Coquimbo, Chile), la roca está fuertemente cloritizada y las vesículas contienen calcita y clorita. La matriz está fuertemente alterada a clorita.

- Otra alteración importante es aquella relacionada con los yacimientos de tipo hierro (tipo Romeral) y cobre-hierro (tipo Candelaria) del Norte de Chile, que consiste en la formación de actinolita. En los yacimientos de hierro la actinolita puede ir acompañada por escapolita.



El yacimiento de hierro de Cerro Negro (Región de Atacama, Chile).

- Por último deberíamos mencionar la carbonatación (con calcita, ankerita) típica de los basaltos de cinturones de rocas verdes del Precámbrico, portadores de mineralizaciones auríferas asociadas a zona de cizalla, como por ejemplo en Canadá.



Basalto alterado a carbonatos con abundante mineralización aurífera. Mina Red Lake (Canadá) (imagen®).

3.6 Geoquímica y geofísica

3.6.1 Palabras iniciales

Hemos dejado hacia el final de este capítulo los temas de la geoquímica, geofísica, teledetección y la moderna modelización. ¿Por qué? Porque se diga lo que se diga, los yacimientos minerales se exploran antes que nada con pensamiento “geológico”. Entonces, debemos diferenciar entre lo que constituye el criterio principal que hay detrás de una campaña de exploración de lo que serán las que podemos aquí denominar “técnicas de apoyo”. Tampoco nos extenderemos en demasía en estas, ya que cada una por su cuenta requería de un tratado específico, lo que queda fuera de las posibilidades de este trabajo.

No obstante, no quisiéramos que el párrafo anterior se entendiese como una especie de discurso peyorativo sobre estas técnicas de apoyo. Muy por el contrario, la geoquímica (especialmente) ha constituido a lo largo del Siglo XX una de las herramientas más eficaces en la exploración de recursos minerales metálicos, todo esto en gran medida gracias al inmenso empuje que dieron a esta disciplina los geólogos canadienses y rusos. En épocas más tardías también los geólogos británicos contribuyeron decisivamente a la geoquímica de exploración.



Prospección geoquímica en Canadá: geoquímica de aguas en arroyos (imagen⁹). Nota: que no lleve a engaño (©), no siempre se contará con el lujo de llegar a los sitios de muestreo en helicóptero.

Pasaremos a continuación a comentar de una manera breve las principales técnicas geoquímicas, seguiremos con la geofísica y la teledetección, para acabar con las técnicas de modelización más utilizadas en la actualidad.

3.6.2. Exploración geoquímica: suelos, sedimentos fluviales, aguas, plantas

Aunque en geoquímica podemos hablar de los viejos y nuevos tiempos (léase exploración geoquímica o geoquímica ambiental) al fin de cuentas, la geoquímica, se diga cómo se diga, consiste básicamente en el hallazgo de anomalías.

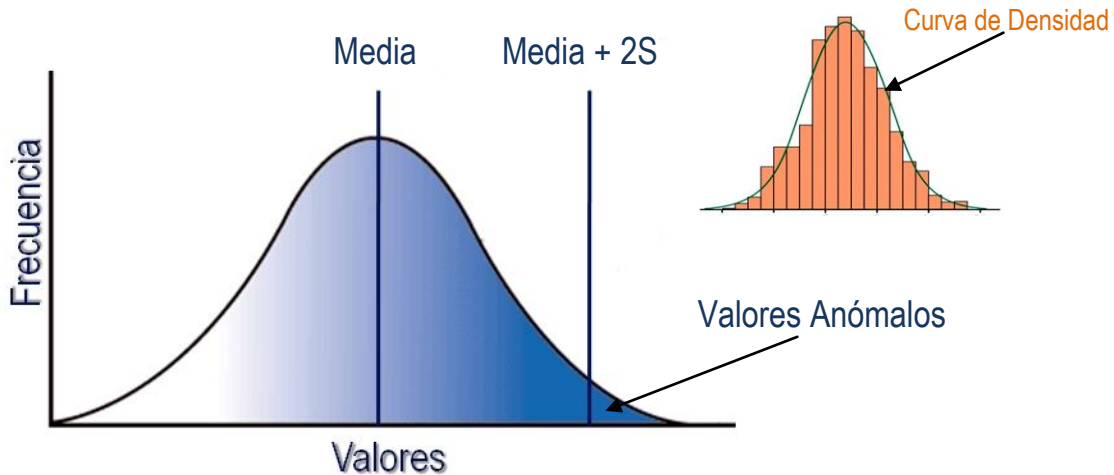
También llegados a este punto deberíamos comentar que bajo el punto de vista del enfoque metodológico, no existe “ninguna diferencia” relevante entre la geoquímica de exploración y la ambiental. De hecho podríamos decir que una y otra son solo el camino de ida y vuelta (respectivamente) desde un yacimiento que en origen se detectó por geoquímica, se explotó y del que ahora se estudia su huella geoquímica ambiental, expresada como una “contaminación”. *Nihil novum sub sole*: nada nuevo bajo el sol.

De regreso a la idea de “anomalía” debemos plantearnos como punto de partida “a qué” llamaremos “anomalía geoquímica”. Sobre el tema hay “n” tratados de estadística, geoestadística, geoquímica estadística, etc. La mayor parte de las veces, cuando uno se adentra en libros o publicaciones sobre esta temática, acaba reconociendo que a menudo, la utilización de complejas herramientas estadísticas (plasmadas en un software especializado), equivale tan solo a la vieja expresión de *matar moscas a cañonazos*. Las anomalías existen o no existen. Si existen, cualquier alumno aventajado de geología debería ser capaz de verlas en una tabla de análisis químicos.

¿De dónde vienen entonces los problemas? De un uso “robotizado” de las herramientas estadísticas. Hoy en día prácticamente cualquier persona puede realizar complejas operaciones estadísticas. Existen “n” programas que realizan todo tipo de cálculos. Pero el problema está ahí. Cualquiera puede apretar teclas y botones, pero pocos sabrán (de verdad) “qué” están haciendo. Parte también del problema se origina en una docencia particularmente ineficaz en el tema. Tres cuartas partes de lo mismo puede decirse también sobre la enseñanza de la química, con lo cual tenemos alumnos de geología que “entienden” poco y nada de química y estadística. Mala combinación, particularmente cuando pensamos que algún día a lo mejor estarán haciendo justamente eso, campañas de exploración geoquímica, y lo más preocupante, “estudiando” los datos.

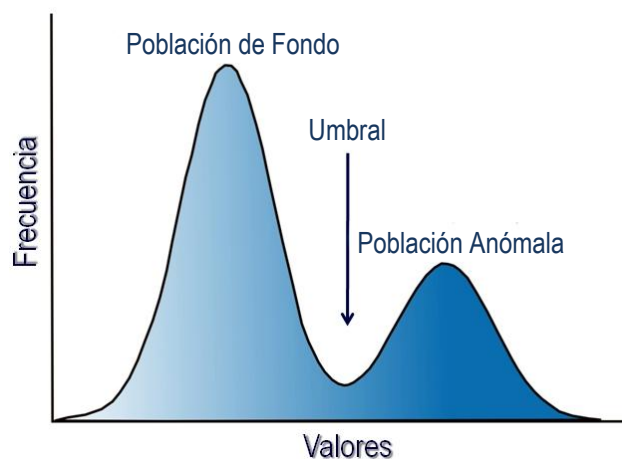
Pero regresemos al punto esencial, la definición de anomalía. Según el Diccionario de la Real Academia Española, anomalía es una *discrepancia de una regla o de un uso*. Empecemos por lo de regla, y digamos que por regla general las concentraciones de metales en los suelos, sedimentos, aguas y plantas se ajustan a valores más bien bajos, esto es, lo que llamaríamos “valores normales”. Esto tiene sentido, ya que los yacimientos minerales son “rarezas” de la naturaleza y por

lo tanto, solo donde existe uno, podrán haber anomalías geoquímicas en su entorno. Una primera definición de anomalía, bajo la perspectiva estadística, nos dice que podemos llamar “anómalos” aquellos valores que sean mayores a la media más dos desviaciones estándar:



Definición clásica de anomalía (positiva): aquellos valores que estén por encima de la media poblacional más dos desviaciones estándar (S). También, y bajo otro enfoque metodológico que pretenda afinar más, podría ser la media poblacional más 3S. En la figura podemos apreciar el histograma de una distribución normal y la curva de densidad.

Por otra parte, la figura superior nos muestra una clásica población “normal”, la famosa campana de Gauss. Es decir, nos referimos a una distribución continua de frecuencia definida por una función denominada curva de densidad que se aproxima al histograma (observaciones reales). El área bajo la curva es = 1, esto es, bajo esta se encuentra el 100% de los datos observados. ¿Pero buscamos distribuciones normales? Aquí está el *quid* de la cuestión, porque lo que de verdad nos interesa no son las poblaciones “normales” sino que los casos “raros”, a ser posible, “poblaciones raras”. En este sentido, puede ser infinitamente más interesante que los datos se agrupen en “dos” poblaciones (población “bimodal”):

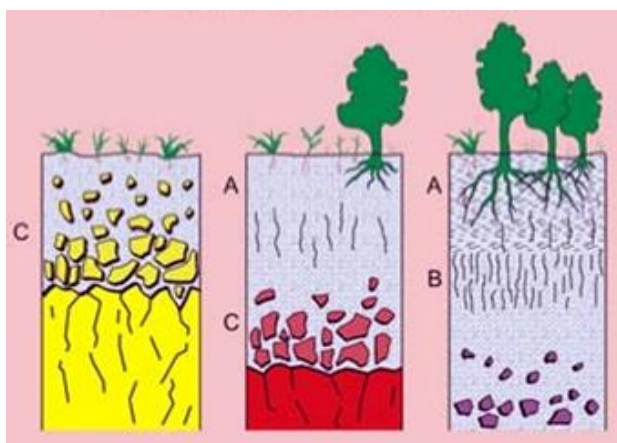


Distribución bimodal (dos modas) de los datos. La segunda población (derecha) tiene todas las probabilidades de ser auténticamente anómala.

Otro aspecto importante a considerar es el potencial carácter log-normal de la(s) población(es). Como regla general los elementos traza, entre los que se encuentran una gran mayoría de los metales de interés económico, como el cobre, plomo, zinc, etc., presentan una distribución log-normal, es decir, no son los valores sino que los logaritmos de los valores los que se distribuyen normalmente. Un test rápido de “log-normalidad” consiste en dividir la desviación estándar por la media. Si el valor es superior a 0,2 entonces “puede” que la población sea log-normal. No obstante, lo verdaderamente recomendable es hacer una conversión rápida de los datos a logaritmos (por ejemplo con Excel) y proyectarlos como histograma. Ver a continuación si la distribución es (se asemeja más o menos a una distribución gaussiana, ya sea con una o dos modas.

Todo lo dicho anteriormente sobre las anomalías y distribuciones de datos vale para cualquier tipo de geoquímica que estemos realizando, suelos, sedimentos, aguas o plantas. Revisaremos a continuación los principales medios que se pueden muestrear:

- **Suelos.** Excelentes para una prospección “táctica” (detalle a semidetalle). Bajo el punto de vista de la geoquímica, el horizonte B (de acumulación) presenta un gran interés, ya que es ahí donde suelen concentrarse de preferencia los elementos químicos. Pero todo sea dicho, en la práctica no hay recetas mágicas → realizar ensayos previos para ver en el terreno que horizonte concentra más. En algunos casos, como en regiones áridas, el único horizonte presente será el C.

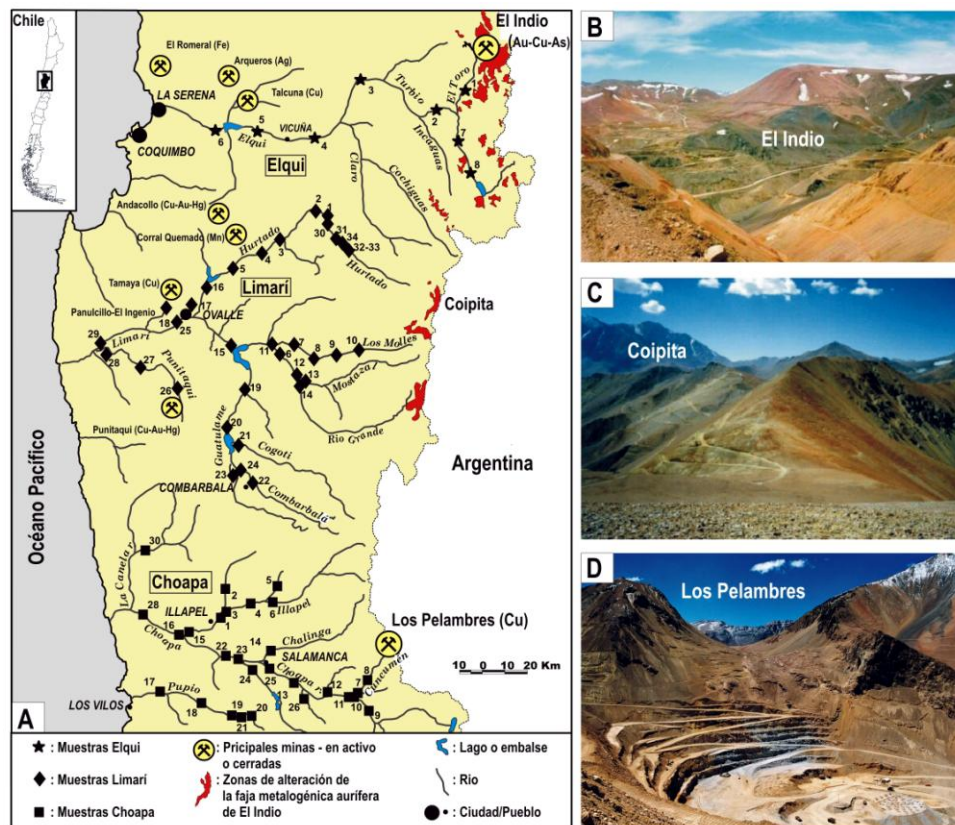


Horizontes de suelos (Higuera y Oyarzun, 2004).

Con respecto a las muestras y método de recolección, esto puede variar mucho en función de la escala y dimensiones de la zona de trabajo; lo mismo se puede decir de la geometría del muestreo, ya que sobre esta mandará la orografía del terreno. Pero digamos lo siguiente, uno a dos kilos de muestra serán más que suficiente; eviten coger trozos de roca y

vegetación si la hubiera. Avanzar por el filo de las colinas, así se evitará el coger suelos transportados. Si se trabaja a una escala tipo 1: 10.000 una toma de muestras cada 200 a 400 m (dependiendo de los objetivos) a lo largo de las líneas de muestreo será suficiente.

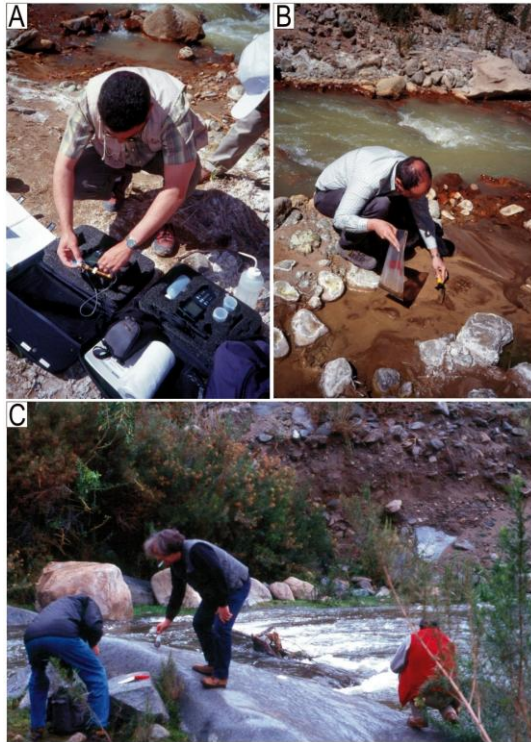
- **Sedimentos fluviales.** Recomendados para una prospección estratégica (escala regional). Son un método “Triple B”, esto es, bueno, bonito y barato. Los sedimentos clásticos están compuestos principalmente por los productos menos solubles de la meteorización. Los metales y metaloides son adsorbidos en los sedimentos minerales de arcillas y oxihidróxidos de Fe o Mn. Es un método de muestreo muy simple, pero eso sí, hace falta entender la geología y el carácter general de cuenca hidrográfica.



Muestreo de sedimentos fluviales en las cuencas del Elqui, Limari y Choapa. Observe la densidad de muestreo en función de la escala del mapa y como las principales fuentes de metales y metaloides está siendo consideradas para el estudio (Oyarzun et al., 2010a).

Conviene insistir aquí en el conocimiento geológico previo que debe haber sobre la cuenca. Muestrear sedimentos fluviales es fácil, sólo hace falta una “palita”, bolsas plásticas, un mapa y un GPS. Pero esta no es la clave del tema, los puntos de muestreo tienen que tener sentido, y el análisis posterior tiene que ser exhaustivo. De esta manera, tenemos que entender los procesos de lixiviación y dispersión de metales y metaloides en el medio

como un proceso complejo en el cual intervienen variables climáticas, fisiográficas y geológicas.

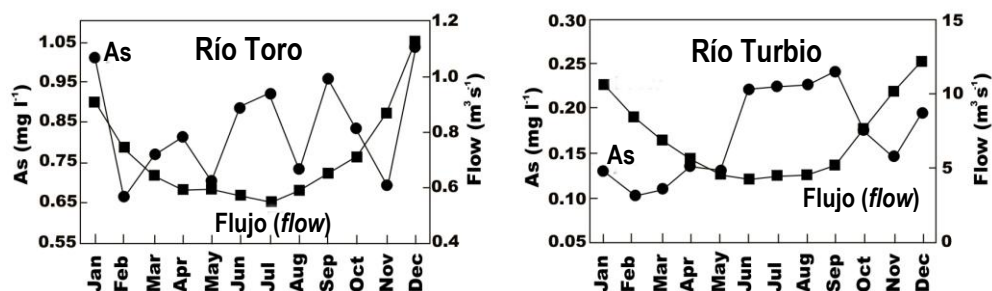


Diversos aspectos de una campaña de sedimentos fluviales. A: Midiendo concentración de oxígeno y pH en las aguas; B y C: Toma de muestra de sedimentos activos en las cuencas del Elqui y Limarí (campañas descritas en Oyarzun et al., 2010a).

- **Aguas.** Las aguas son otro de los medios muestreables y en ocasiones pueden ser de extraordinaria utilidad. En este sentido solo hay que tener en cuenta lo siguiente, los ríos “cambian”, existen variaciones notables de carácter estacional de caudal y precipitación de minerales en función del Eh-pH del medio fluvial. Así, no será lo mismo muestrear un río durante la estación de lluvias que hacerlo durante el período seco, ya que obviamente variarán las concentraciones de los metales. La situación puede ser aun más compleja, ya que durante la estación seca pueden aumentar las concentraciones, sin embargo algunos minerales como la goethita pueden empezar a precipitar y a secuestrar importantes cantidades de metaloides como el arsénico de la solución (Oyarzun et al., 2006).



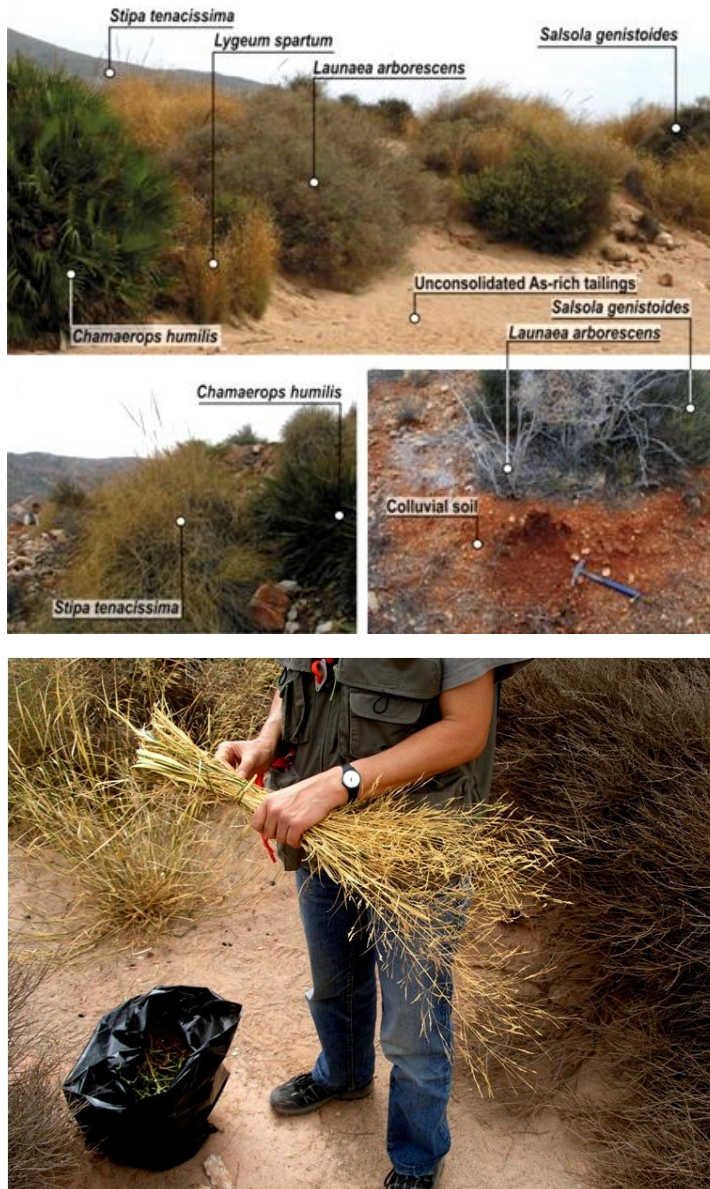
Muestreando aguas de un arroyo en Australia (imagen¹⁰).



Variaciones de caudal (flujo) y concentraciones de As a lo largo de los meses en los ríos Toro y Turbio en la Cuenca del Elqui (Chile). Adaptada de Oyarzun et al. (2006).

Conviene por tanto realizar “al menos” dos muestreos en los ríos, uno durante la estación lluviosa y otra durante la estación seca. Con respecto a la toma de muestra, un litro puede estar bien. El agua deberá ser envasada en botellas de plástico (teflón a ser posible) y la muestra acidulada con unas pocas gotas de ácido. Esto es importante para evitar la precipitación de metales en el recipiente.

- Plantas.** Las plantas también pueden entregar una valiosa información cuantitativa sobre las características químicas del substrato (Oyarzun et al., 2010b). El uso de la vegetación como método de prospección se basa en la respuesta de las plantas al substrato químico que las soporta. Esta metodología consiste en el análisis químico de las plantas como medio para obtener evidencias acerca de las posibles anomalías geoquímicas que se ocultan en profundidad. La biogeoquímica se adapta muy bien a aquellas regiones que presentan una vegetación muy densa y donde la cartografía geológica es difícil realizar (ausencia de afloramientos). Aunque esta técnica ha probado ser de indudable ayuda, también presenta sus limitaciones, ejemplificadas en el denominado efecto barrera. Con pocas excepciones las plantas pueden acumular un determinado elemento solamente hasta cierto nivel. En este sentido la plantas pueden ser clasificadas en cuatro categorías (Kovalevsky, 1987): 1) sin efecto de barrera, las que concentran linealmente el elemento químico investigado; 2) con semi-barrera, que concentran entre 30 y 300 veces el valor de fondo del elemento en la planta; 3) con barrera, contenidos de hasta 3-30 veces el valor de fondo; y 4) con barrera de fondo, que no superan las concentraciones normales del elemento en una determinada planta. En otro esquema de clasificación (p.ej., Chaney et al., 1995), se habla de plantas hiperacumuladoras para aquellas especies que toleran 10-100 veces los valores normales de un determinado elemento.



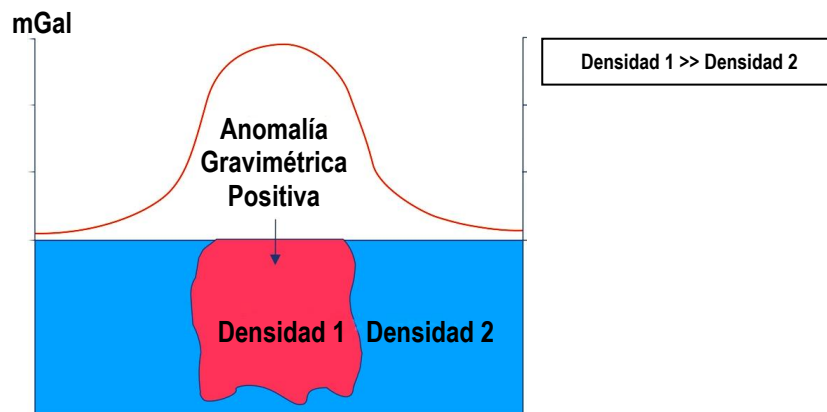
Arriba, identificando comunidades de plantas en el SE de España (Almería) y determinación de relaciones con los suelos (naturales o antrópicos). Abajo, toma de muestra para geoquímica (*Lygeum spartum*) (Oyarzun et al. 2009).

Al respecto, tres ideas principales a tener en mente durante una campaña de exploración geoquímica en la que se vayan a utilizar plantas: 1) determinar que especies concentran el metal de interés; 2) determinar que partes de la planta presentan las mayores concentraciones y en este sentido, intentar muestrear solo los órganos de interés que pueden ser el tallo, las hojas, las flores, o las semillas; 3) y por último, muy importante, que la planta tenga “amplia” distribución en la zona de trabajo.

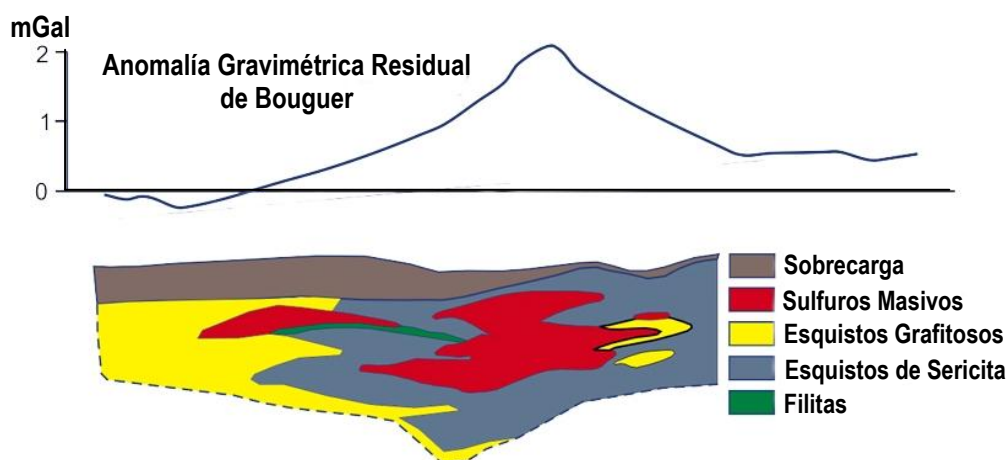
3.6.3. Exploración geofísica: gravimetría, magnetometría, resistividad, polarización inducida

La exploración geofísica constituye en cualquiera de sus especialidades una de las herramientas más útiles para detectar cuerpos mineralizados y se puede utilizar tanto a la escala regional como de detalle. Nuevamente, aquí se trata de definir anomalías con respecto al marco geológico general. Hay técnicas geofísicas que han probado ser particularmente útiles. Estas son:

- **Gravimetría.** La gravimetría consiste (esencialmente) en determinar la diferencia que existe entre el campo de gravedad regional y el valor local. Si existe un cuerpo mineralizado de alta densidad oculto esto se reflejará en una anomalía gravimétrica positiva (expresada en mGal). Esta metodología es especialmente útil para la detección de yacimientos de sulfuros masivos debido al alto peso específico de estos, lo que genera un fuerte contraste gravimétrico con las rocas encajantes. La gravimetría se puede realizar mediante vuelos o en el campo.

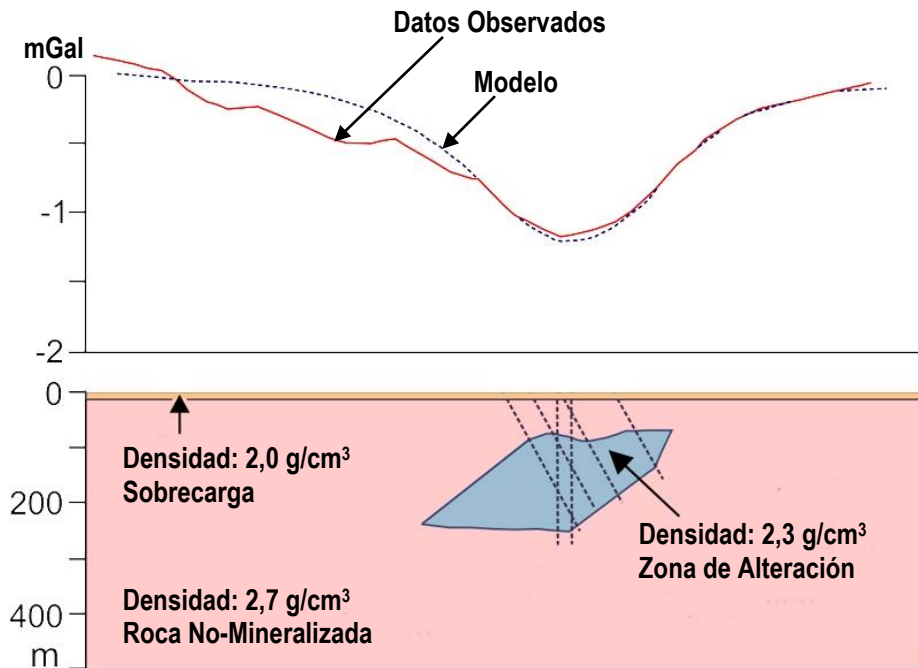


Formación de una anomalía gravimétrica (medida en mGals) por fuerte contraste de densidades (Ford et al., 2008).



Anomalía gravimétrica de Bouguer en el yacimiento de sulfuros masivos de Vangorda (Yukón, Canadá) (Ford et al., 2008).

Pero la gravimetría no solo se puede utilizar para detectar cuerpos mineralizados de alta densidad sino también para aquellos de densidad “disminuida”, por ejemplo debido a procesos de alteración hidrotermal:

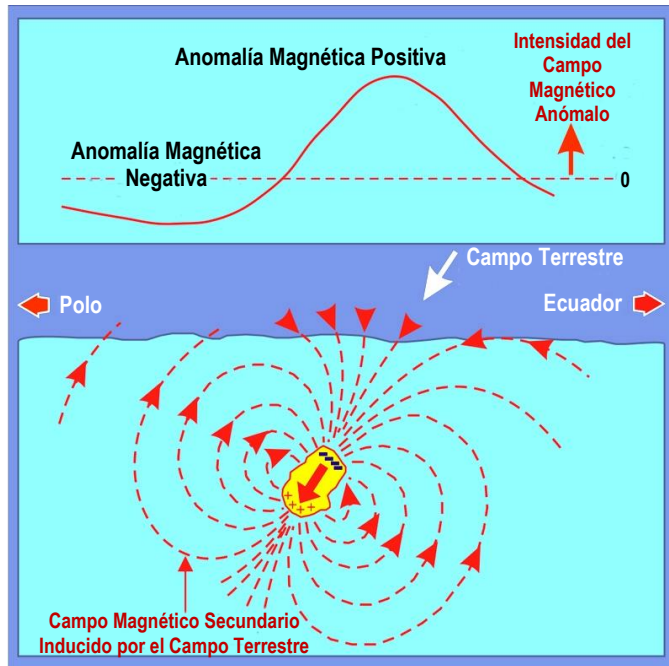


Anomalía gravimétrica de Bouguer negativa por efecto de un descenso en la densidad de roca inducida por procesos de alteración hidrotermal. Compare las densidades. Yacimiento de Uranio de Kiggavik (Thelon, Canadá) (Ford et al., 2008).

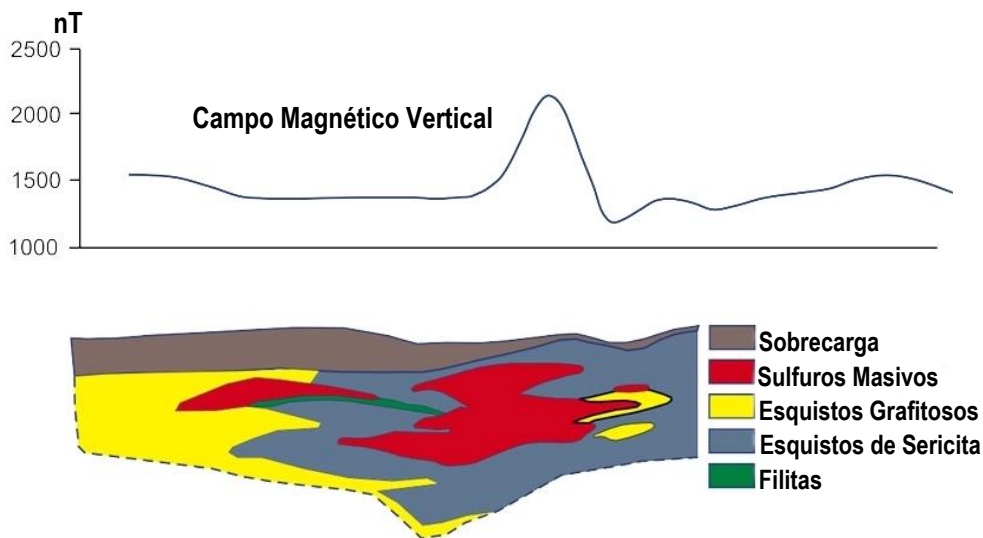
- **Magnetometría.** Esta técnica se basa en la detección de la presencia significativa de minerales magnéticos, tales como magnetita o pirrotina en cuerpos mineralizados. Se mide la intensidad del campo magnético total, esto es la suma de los inducidos por el núcleo de la Tierra y la corteza. La técnica más común es sustraer el campo magnético generado por el núcleo al de la corteza, con lo cual se obtiene lo que se denomina campo magnético residual (expresado en mT). El campo magnético terrestre induce un campo secundario en cuerpos geológicos magnéticos. La magnetometría se puede realizar en tierra o aerotransportada, lo que permite cubrir grandes extensiones de terreno.



Magnetómetros aerotransportados (Imágenes¹¹).



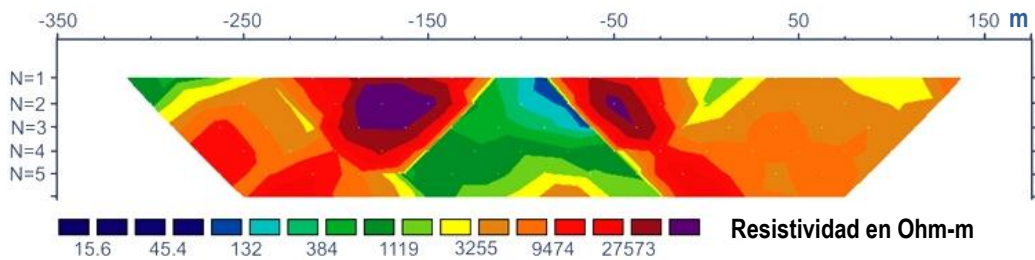
La magnetización inducida en un cuerpo geológico produce localmente una anomalía magnética positiva y una anomalía magnética negativa subsidiaria (Ford et al., 2008).



Anomalía magnética en el yacimiento de sulfuros masivos de Vangorda (Yukón, Canadá) (Ford et al., 2008).

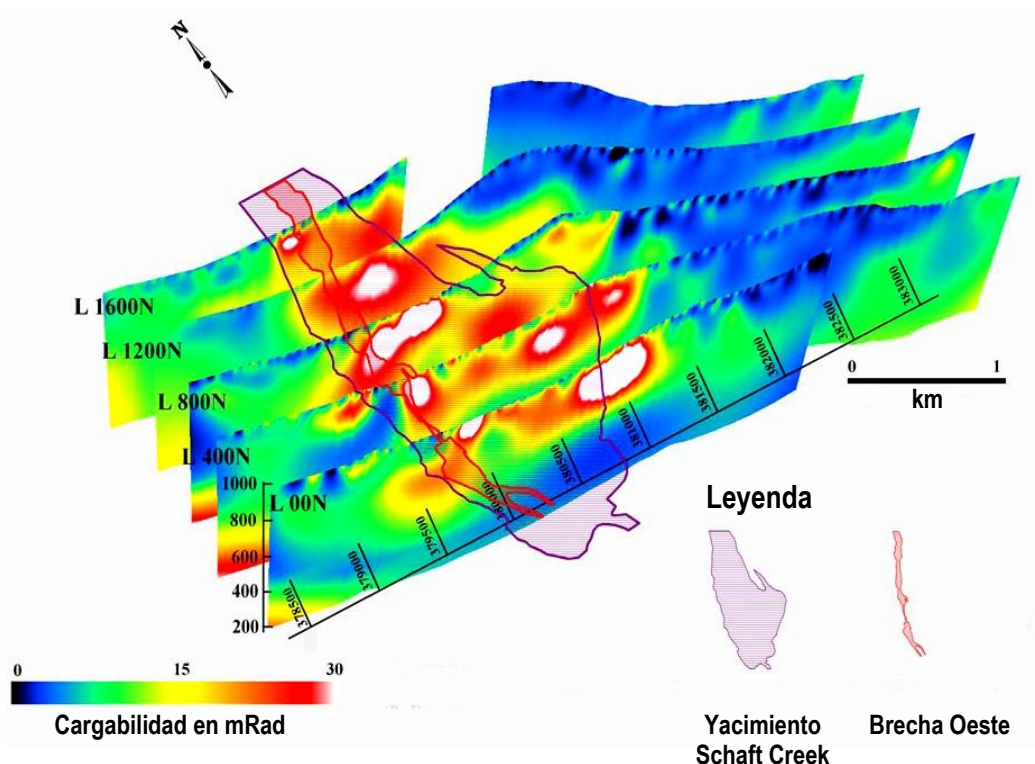
- **Resistividad.** Este método se basa en la resistencia que ofrece el terreno al paso de la corriente eléctrica. Esta corriente puede ser continua o alterna de baja frecuencia. Se mide en Ohm-m. La resistividad está controlada principalmente por el agua en poros en la roca y las especies iónicas presentes en éste agua. Muchos cuerpos mineralizados con sulfuros son discontinuos (p.ej., disseminación de sulfuros en un pórfido) y así no muestran una buena respuesta al paso de la corriente. Sin embargo la

resistividad marca bien las zonas permeables (p.ej., roca fallada) y los halos de alteración argílica por la presencia de arcillas.



Ejemplo de perfil de resistividad (Ford et al., 2008).

- Polarización Inducida (IP).** Si se aplica un voltaje entre dos electrodos y este se interrumpe abruptamente, el monitor muestra una rápida caída seguida de una lenta. Si se da paso a la electricidad de nuevo, esta muestra un súbito ascenso seguido de uno lento. A este fenómeno se le llama polarización inducida. Todo está basado en el principio de “cargabilidad” del terreno, es decir, “que tan bien” mantienen la carga eléctrica los materiales estudiados. Esta técnica es particularmente útil para yacimientos sulfurados diseminados.



Secciones IP a lo largo del yacimiento de Cu-Au-Mo-Ag Schaft Creek (Columbia Británica, Canadá) (Copper Fox Metals Inc., 2010). Note el excelente perfilado del yacimiento mediante polarización inducida.

3.7 La teledetección

3.7.1 Donde estamos en este momento

La teledetección ha dejado de ser una incipiente promesa para transformarse en una importante técnica de exploración y evaluación. En esta sección nos referiremos a dos grandes avances: por un lado el mundo AVIRIS del Jet Propulsion Laboratory (JPL) de NASA y por otra, los derivados tecnológicos del mundo ASTER (también JPL-NASA). El equivalente europeo de AVIRIS es HyMap (Fleming y Marsh, 2005).

Una de las aplicaciones más importantes de la teledetección en el campo de la geología es el análisis de las regiones del espectro correspondientes al infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared: SWIR) y el infrarrojo térmico (Thermal Infrared: TIR). Esta información permite cartografiar zonas de alteración hidrotermal. Además está el espectro visible (infrarrojo cercano) = Very Near Infrared (VNIR). Con la aparición de ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) la utilización de los sensores de la serie LANDSAT en estudios de caracterización litológica quedó relegada a un segundo plano. La razón es que tanto el Thematic Mapper (TM) como el Enhanced Thematic Mapper (ETM) no cuentan con la necesaria resolución espectral como para poder distinguir compuestos mineralógicos importantes.

3.7.2 El mundo AVIRIS

AVIRIS es un instrumento, que corresponde a la sigla de Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer, y está operativo desde 1987. Puede ser montado en aviones lo que permite desentenderse de los satélites y realizar trabajos con mayor independencia de las órbitas, tiempos y otras restricciones.

AVIRIS (Short, 2011) consta de cuatro espectrómetros con un total de 224 detectores individuales CCD (canales), cada uno con una resolución espectral de 10 nanómetros y una resolución espacial de 20 metros. La dispersión del espectro en esta matriz de detectores se logra con una rejilla de difracción. El intervalo total alcanza los

AVIRIS is a proven instrument in the realm of Earth Remote Sensing. It is a unique optical sensor that delivers calibrated images of the upwelling spectral radiance in 224 contiguous spectral channels (bands) with wavelengths from 400 to 2500 nanometers. AVIRIS has been flown on four aircraft platforms: NASA's ER-2 jet, Twin Otter International's turboprop, Scaled Composites' Proteus, and NASA's WB-57. The ER-2 flies at approximately 20 km above sea level, at about 730 km/hr. The Twin Otter aircraft flies at 4km above ground level at 130km/hr. AVIRIS has flown North America, Europe, portions of South America, and most recently, Argentina.

The main objective of the AVIRIS project is to identify, measure, and monitor constituents of the Earth's surface and atmosphere based on molecular absorption and particle scattering signatures. Research with AVIRIS data is predominantly focused on understanding processes related to the global environment and climate change.

AVIRIS (2011)

380 a 2500 nanómetros. De los datos obtenidos, se puede calcular una curva espectral de un píxel específico o de un grupo de píxeles que puede corresponder a una característica de la zona bajo estudio.



El avión ER-2 de la NASA con un instrumento AVIRIS avanzado del JPL (imagen¹²).

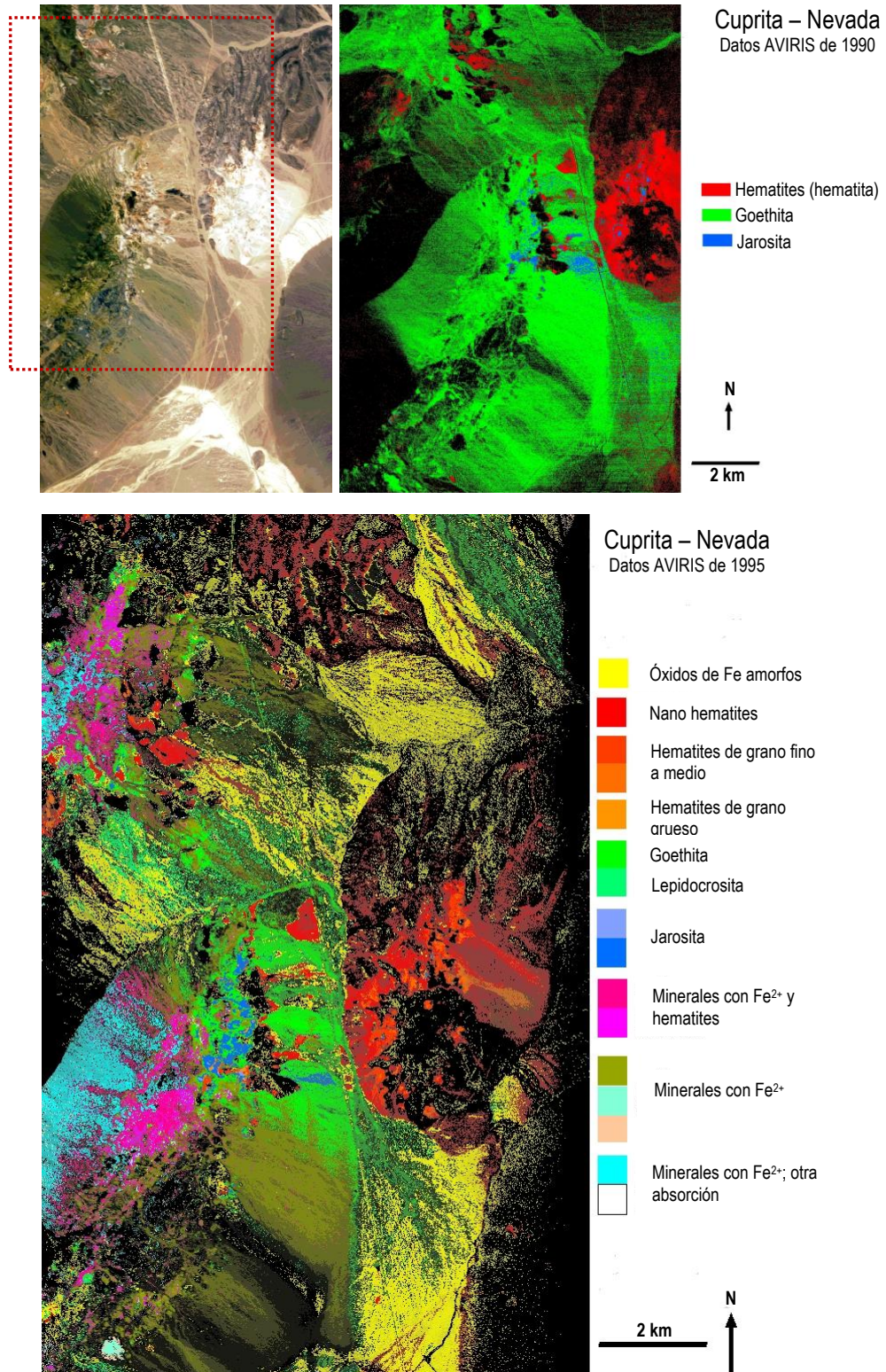
Se han volado cientos de misiones diseñadas para probar los espectrómetros, obteniéndose imágenes impresionantes (Short, 2011). Una de las misiones más exitosas e instructivas fueron los vuelos sobre el Distrito Minero de Cuprita (Nevada). Estas misiones estuvieron a cargo del equipo del JPL AVIRIS y el Grupo de Espectroscopia en el Servicio Geológico de los Estados Unidos en Denver. El Distrito Minero de Cuprita se encuentra cerca de Tonopah (Nevada), en la parte suroeste del estado. Oro y cobre se han extraído de ahí por más de un siglo. Esta zona es un sitio valioso para evaluar las potencialidades de la teledetección, en particular de los conjuntos de datos hiperespectrales para la exploración minera. Esto se debe a la amplia variedad de alteraciones y procesos de mineralización existentes en el terreno.

El Distrito Minero Cuprita cuenta con dos centros de alteración hidrotermal en rocas volcánicas del Terciario. Se observa una fuerte alteración hidrotermal con rocas que han sido blanqueadas, silicificadas y opalizadas. Existe además una zona marginal con recubrimiento de limonitas y argilizada (Rowan et al., 2003).

The Cuprite district is in the extreme southwestern part of the Great Basin approximately 15 km south of Goldfield, Nevada. Copper, silver, gold and lead occurrences have been reported in Cambrian limestone, and sulfur occurs in Tertiary tuffaceous sedimentary rocks and welded ash-flow tuffs. The area is readily accessible, as it is bisected by U.S. Highway 95, and relief is low to moderate (approx 1,424 to 1,700 m asl).

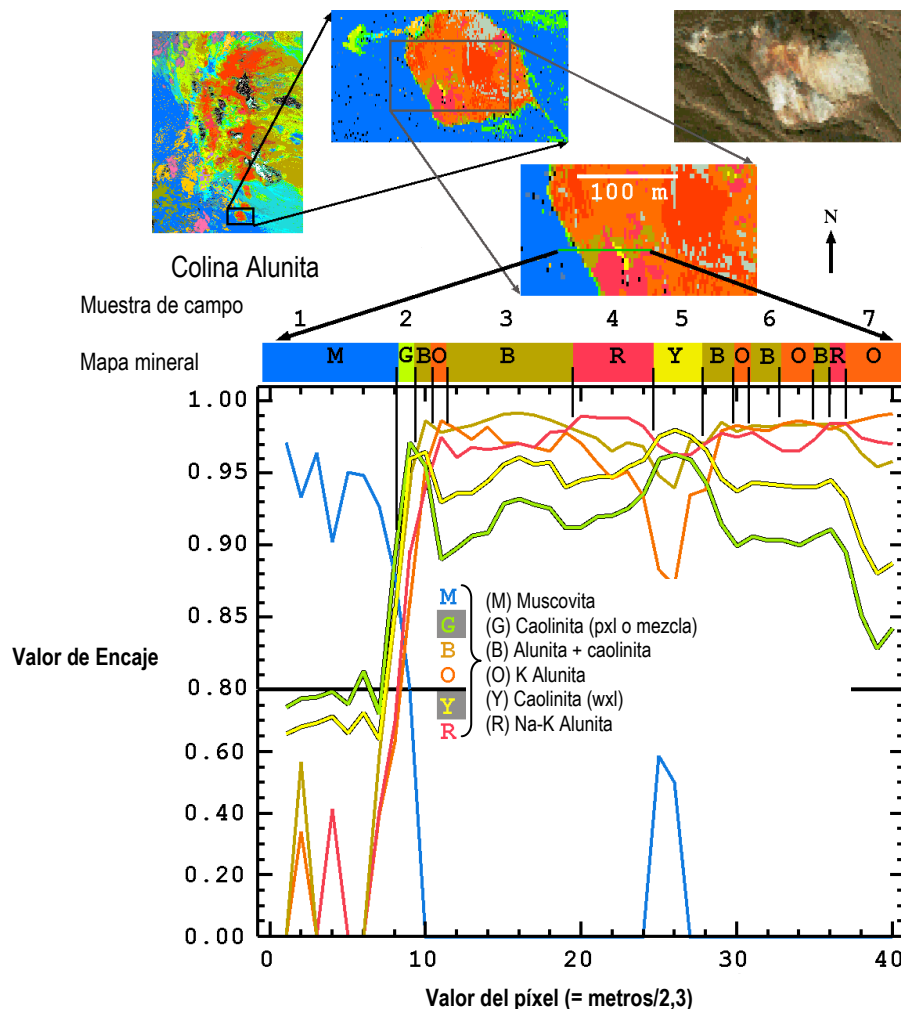
The oldest rocks in the district are Cambrian sedimentary rocks, which are well exposed in the western part. These include the Harkless Fm., the Mule Spring Limestone, and the Emigrant Fm. The Harkless Fm. consists mainly of greenish phyllitic siltstone, which is composed of muscovite, chlorite, biotite, and quartz. Sandy limestone is exposed locally. The Mule Spring Limestone overlies the Harkless Formation and consists of gray, finely crystalline, thin-bedded limestone. Brown, limey siltstone is present in the lower parts of the section. The Emigrant Formation consists of thinly bedded limestone and chert, and exposures are limited to a few small areas in the northwestern and southwestern parts of the district.

Rowan et al. (2003)



El Distrito Minero Cuprita: estudio espectral AVIRIS (Clark et al., 1993). Arriba a la izquierda imagen del infrarrojo cercano, resolución: 20 m; a la derecha, imagen espectral para la detección y cartografía de limonitas. El recuadro rojo muestra la posición de la segunda imagen con respecto a la primera. Abajo, misma zona pero con datos AVIRIS de 1995 y procesado de imagen mejorado (adaptada de Clark y Swayze, 1996).

Este es solo un ejemplo de las inmensas potencialidades del sistema AVIRIS del JPL. Eso sí, esto no funciona tan fácilmente como uno quisiera pensar. Para empezar hace falta contar con una biblioteca de espectros de minerales, para poder comparar los datos obtenidos por el sensor con los contenidos en dicha biblioteca (el USGS tiene una y muy buena). Pero ahí no acaban los problemas, ya que en condiciones ideales, hace falta primero ir al campo con un instrumento llamado radiómetro, medir *in-situ* los espectros y luego comparar con los datos del sensor aerotransportado. Por supuesto, no hace falta cubrir toda la región bajo estudio, pero sí realizar este trabajo en sitios de interés. ¿Por qué? Porque como sabe todo el mundo que ha trabajado alguna vez en cartografía (mapeo) de alteraciones o de recubrimientos de limonitas, las zonas de alteración son raramente mono-minerales, es decir, son mezclas más o menos complejas de minerales de alteración y limonitas. Esto es particularmente complejo en las mineralizaciones epitermales, donde los efectos de las alteraciones hidrotermales y supergénicas se superponen.



Comparación de espectros con datos de campo en la Colina Alunita (Distrito Cuprita). Las muestras (1-7) fueron analizadas por Difracción de Rayos X y se localizan a lo largo del perfil que se muestra en la imagen con escala gráfica (adaptada de Clark et al., 2003).

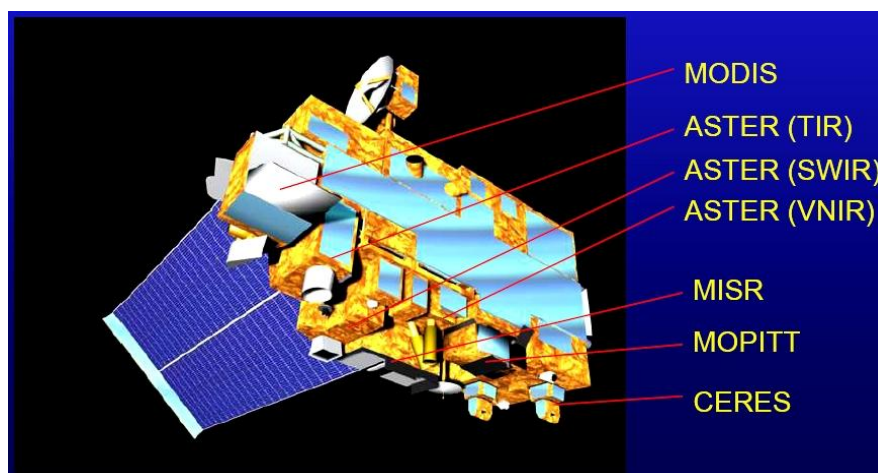
Resulta curioso observar cómo tanto en la estrategia militar como la geológica se sigue soñando con que las cosas se pueden hacer desde los cielos. Sin infantería no se conquista ningún terreno y sin geólogos en el campo todo lo que tendremos son bonitas especulaciones. Las tecnologías tienen eso, son bonitas (y muchas veces útiles) técnicas de apoyo, pero la tecnología básica en exploración sigue siendo la misma que hace 50 años atrás y se caracteriza por el uso de botas y chaleco de campo, martillo, lupa y cuaderno de campo. Este último puede ser substituido por algún medio digital de registro de datos, pero recordar que cualquier aparato digital puede fallar (¿alguien no ha perdido valiosos datos alguna vez en la vida por un fallo de hardware o software?), mientras que el papel, pues eso, falla poco y nada.

Verification of the classification was based on comparisons with field spectra, rather than mineral spectra from a commercially available spectral library. XRD analyses were carried out to determine the composition of the tailings at the site. Initially the minerals identified in XRD analysis were viewed spectrally, based on spectra re-sampled to HyMap wavelengths, from the USGS spectral library. The USGS spectra were then compared with image spectra of the tailings. Very few perfect matches were found using spectra of pure minerals from the USGS spectral library, although similar spectral features were found in some cases.

Fleming y Marsh (2005)

3.7.3 Un mundo Landsat que se va y un mundo ASTER que se hace importante

ASTER es la sigla de Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, un instrumento montado a bordo del satélite Terra. Se trata de una misión conjunta japonesa-americana y los datos se procesan en ambos países. Terra es el barco insignia de la ESE: Earth Science Enterprise de la NASA y ASTER el “zoom” de Terra (Perry et al., 2005). Desde el año 2000 las imágenes multiespectrales ASTER han ofrecido una calidad superior en detalles a las ya clásicas de la serie Landsat.



El satélite Terra y sus instrumentos (imagen¹³).

ASTER (Perry et al., 2005) ha demostrado una gran eficacia en la cartografía geológica de la superficie terrestre hasta la escala 1:50.000. En conjunto, los datos del Landsat y ASTER comprenden la mayor parte de las imágenes de satélite utilizadas por geólogos de diversas especialidades y los geólogos de exploración. Las imágenes del Thematic Mapper (TM) de Landsat se pueden mejorar para cartografiar los óxidos de hierro y arcillas, pero existen dificultades para caracterizar los carbonatos y silicatos; además existen problemas para diferenciar ciertas arcillas, micas, y sulfatos. Por su parte las bandas de onda corta del infrarojo (SWIR) de ASTER son excelentes para la cartografía de sedimentos clásticos y carbonatos, así como para las rocas volcánicas. Por otra parte estas imágenes han resultado ser muy eficaces en la identificación de grupos de minerales específicos tales como caolinita, alunita, illita, muscovita, montmorillonita, clorita, calcita, dolomita, serpentina, y otros. Desafortunadamente ASTER tiene una utilidad limitada en la cartografía y caracterización de óxidos de hierro.

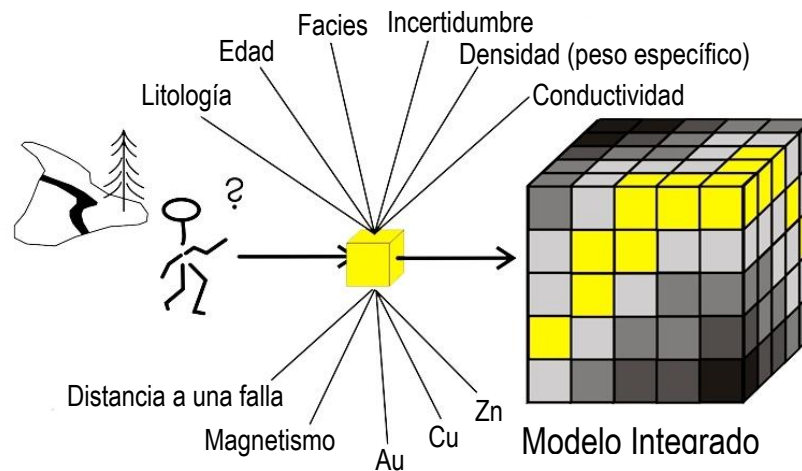


Imágenes ASTER de la mina de cobre La Escondida (Chile). Las imágenes cubren 30 x 37 km en el desierto de Atacama y tiene fecha 23 de Abril de 2000. La mina está a una altitud de 3050 m y entró en funcionamiento en 1990. Izquierda, imagen VNIR; a la derecha, imagen SWIR. Note los importantes contrastes de colores que se pueden apreciar en la imagen SWIR, con potenciales aplicaciones geológicas y minero-ambientales. NASA Visible Earth (2008).

3.8 Modelizando la exploración: los tiempos modernos o quizás no tanto

Los geólogos y geofísicos que trabajan en petróleo y gas han utilizado por décadas el concepto de “bloques de exploración”. En años recientes este sistema de tratamiento de la información ha sido “tomado prestado” por el mundo de la exploración minera.

En esencia hablamos de una técnica que permite asignar a bloques (3D) todas las piezas de información relevante que son necesarias para definir un blanco 3D en el espacio (de Kemp, 2007). Hablamos además de un modelo espacial multi-paramétrico que permite validar un blanco a través a través de diferentes aproximaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas.



Análisis y definición de un bloque de exploración en función de un análisis multi-paramétrico, el que luego se verá reflejado en el gran Modelo Integrado 3D donde se agregan aquellos bloques con similares características (en este caso en amarillo) y por lo tanto, con equivalentes probabilidades de contener mineralización. Adaptada de: de Kemp (2007).

Como todas las técnicas en geociencias, esta es solo una más para el geólogo de exploración, y tiene que ser utilizada de una manera adecuada (inteligente) y dentro de un contexto razonable de aplicabilidad (de Kemp, 2007).

Al final de cuentas, aquí hablamos de sentido común, y de una manera u otra los buenos geólogos de exploración han utilizado desde épocas remotas estas ideas, solo que sin formularlas de una

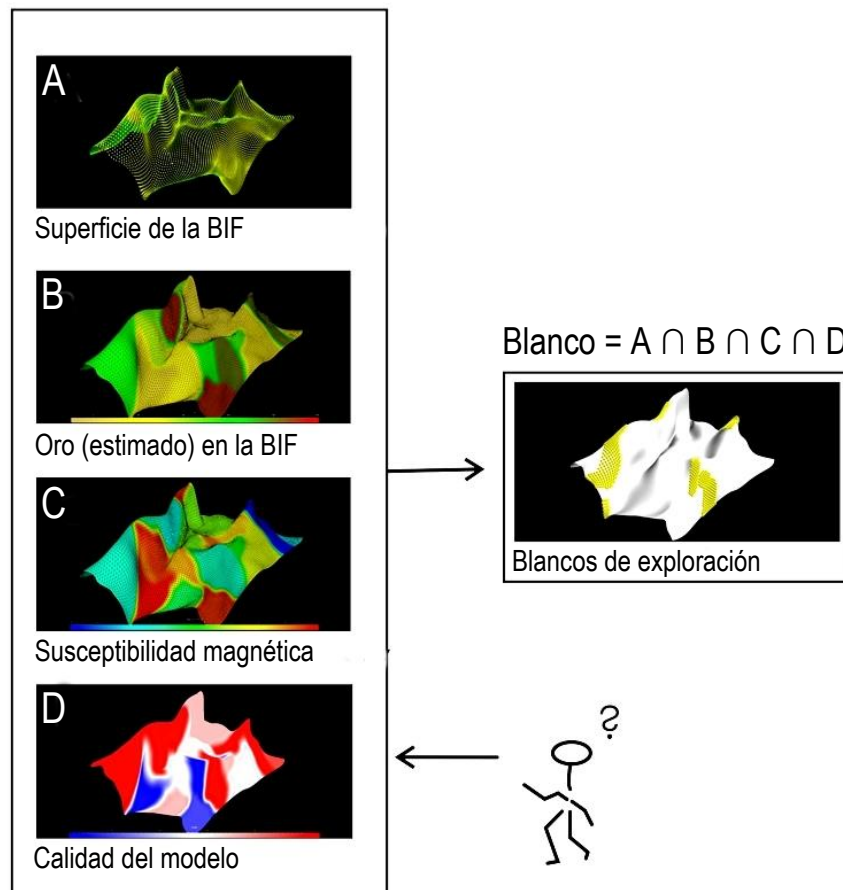
Mineral exploration is evolving into a more rigorous quantitative science. 3-D GIS provides support for this activity through an environment in which a rich and diverse set of exploration-related observations can be analyzed and interpreted. The core tools for developing and exploiting mine-, camp-, and regional-scale 3-D common earth models for the purpose of targeting new ore or specific geologic relationships are now here. It is now incumbent on the industry, with its wealth of knowledge of specific ore forming processes, its rich archive of 3-D data sets, and with a definite need to find the difficult and deeper ore, to capitalize on this new technology.

de Kemp (2007)

manera conceptual y/o matemáticamente estricta. En el fondo se trata de volver a la secundaria (o primaria) y recordar nuestras clases sobre conjuntos, en especial, aquellas sobre el conjunto intersección (\cap). Podemos intuir que para encontrar una mineralización filoniana (por lo tanto controlada por fallas) hidrotermal (por lo tanto con alteración hidrotermal) asociada a rocas volcánicas y/o subvolcánicas (por lo tanto con una edad y tipo de roca específica), lo que en el fondo será necesario es localizar aquellos sectores en nuestra región de exploración que contengan todos (o casi todos) estos elementos en juego. En otras palabras, hablamos de un “conjunto intersección” donde el conjunto de las fallas (F), las alteraciones (A) y las litologías (y edades) favorables (LE) se interceptan en el espacio. Así tendremos:

$$\text{Blanco de Exploración (2D)} = F \cap A \cap LE$$

Esto vale para el mundo 2D, pero si agregamos sondeos al juego, entonces ya podemos empezar a hablar de bloques modelo (3D). Lo cual también podemos expresarlo de una manera más elegante como en la siguiente figura.



Ejemplo de la utilización de modelos integrados 3D a una BIF (Formación Bandeada de Hierro), formaciones que en Canadá suelen ser portadoras de leyes económicas de oro. Adaptada de: de Kemp (2007).

¿Funciona esta técnica? Al menos en el papel sí lo hace, y como ejemplo, los alumnos de Exploración y Evaluación de Recursos de la UCM (Universidad Complutense de Madrid), que año tras año vuelven a encontrar una famosa mineralización de oro-cobre en los Andes de Chile. ¿Con qué elementos trabajan en este ejercicio que se resuelve en unas dos horas? Con un buen mapa regional y con segmentos de un informe geológico (solo disponen de la estratigrafía y algunos datos sobre alteraciones) sobre la región bajo estudio. Los estudiantes se quedan gratamente sorprendidos cuando se les informa sobre lo que han logrado (y su profesor también). Aunque esta historia pueda despertar “suspicias” (tan “típicas” del “razonar” latino), no hay truco ni trampa, solo geología en estado puro.

Este profesor ha podido comprobar que la mayor parte de las veces los alumnos poseen un potencial que ni ellos mismos conocen. Solo hace falta mostrarles sus posibilidades y que aprendan a “confiar” en sus habilidades. El profesor tiene que ser “un puente”, no “un camión” que acarrea alumnos de A → B. Los alumnos son el futuro de la geología, solo hace falta que ellos y sus profesores sean “realmente” conscientes de este hecho.

Bibliografía

Atención: Algunos links han sido divididos por estética, deberán ser restaurados antes de pegar en un browser.

- Anglo-Gold Ashanti, 2009. Annual Financial Statements. <http://www.anglogold.co.za/subwebs/informationforinvestors/reports09/AnnualReport09/exploration.htm>
- Anglo-Gold Ashanti, 2010. Mineral resource and ore reserve Report 2010. <http://www.anglogold.co.za/subwebs/InformationForInvestors/Reports10/financials/files/AGA-resource-reserves-2010.pdf>
- Arribas, A. 1992. Los yacimientos de oro del sureste peninsular. En: J. García Guinea y J. Martínez Frías, J. (Coord.) Recursos Minerales de España, CSIC, Madrid, 876-890.
- AVIRIS, 2011. Welcome. Jet Propulsion Laboratory, NASA, <http://aviris.jpl.nasa.gov/>
- Chaney, R., Brown, S., Li, Y.M., Scott Angle, J., Holmer, F. y Green C., 1995. Potential use of metal hyperaccumulators. *Mining Environmental Management*, 3, 9-11.
- Clark, R.N., Swayze, G.A. y Gallagher, A. 1993. Mapping minerals with imaging spectroscopy, U.S. Geological Survey, Office of Mineral Resources Bulletin 2039, 141-150; http://speclab.cr.usgs.gov/PAPERS/cuprite.clark.93/mineral_map.html
- Clark, R.N. y Swayze, G.A., 1996. Evolution in imaging spectroscopy analysis and sensor signal-to-noise: an examination of how far we have come. Summaries of the 6th Annual JPL Airborne Earth Science Workshop March 4-8, 1996; <http://speclab.cr.usgs.gov/PAPERS/imspec.evol/aviris.evolution.html>
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Kokaly, R.F., Sutley, S.J., Dalton, J.B., McDougal, R.R. y Gent, C.A., 2003. Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems, *Journal of Geophysical Research*, 108, doi:10.1029/2002JE001847, <http://speclab.cr.usgs.gov/PAPERS/tetracorder>
- Copper Fox Metals Inc., 2010. IP survey significantly expands potential of Schaft Creek deposit. News Releases, http://www.copperfoxmetals.com/s/NewsReleases.asp?ReportID=414483&_Type=News-Releases&_Title=IP-Survey-Significantly-Expands-Potential-of-Schaft-Creek-Deposit
- Davis, G.H. y Reynolds, S.J., 1996. *Structural Geology of Rocks and Regions*. John Wiley & Sons, New York, 776 pp.
- De Kemp, E.A., 2007. 3-D geological modelling supporting mineral exploration. En: W.D. Goodfellow, W.D. (Ed.) *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5, 1051-1061.
- Dia Bras Exploration, 2010. Bolivar Project Exploration. <http://www.diabras.com/categories.pl?idc=36&ids=54>
- Dubé, B., Gosselin, P., Hannington, M. y Galley, A., 2009. Gold-rich volcanogenic massive sulphide deposits. *Mineral Deposits of Canada*, Geological Survey of Canada, http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/gold/vms/index_e.php#fig3
- Fleming, C. y Marsh, S., 2005. The role of remote sensing in geo-environmental management. EARSel and Warsaw University, Warsaw 2005. Proceedings of 4th EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy. New quality in environmental studies; http://www.earsel.org/workshops/IS_Warsaw_2005/papers/Minning_Environment/40_Fleming_381_388.pdf
- Ford, K., Keating, P. y Thomas, M.D. 2008. Méthodes d'exploration géochimiques et géophysiques: vue générale des signatures géophysiques associées aux gîtes minéralisés canadiens. *Gîtes minéraux du Canada*. Commission géologique du Canada, http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/method/geophysics/index_f.php
- Gammon, J.B. 1988. *Gold !!! and other metals: how they are found and mined*. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 83 pp.
- Gustafson, L.B. y Hunt, J.P., 1975. The Porphyry copper deposit at El Salvador Chile. *Economic Geology*, 70, 857-912.
- Higueras, P. y Oyarzun, R., 2004. Curso de Mineralogía y Geoquímica Ambiental. UCLM-UCM. Manual *on-line*: http://www.uclm.es/users/higueras/MGA/Port_MGA.htm
- Kovalevsky, A.L., 1987. *Biogeochemical Exploration for Mineral Deposits*. VSP International Science Publishers, Leiden, 224 pp.
- Lowell, J.D., 1987. Exploración geológico-minera: aspectos prácticos. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.
- Malnic, J., 2000. The David Lowell story. SMEDG, reproduced from a March 1996 column in Australia's Mining Monthly, <http://www.smedg.org.au/lowell1.html>
- Marjoribanks, R. 1997. *Geological methods in mineral exploration*. Chapman & Hall, London, 115 pp.
- McKinstry, H.E. 1970. *Geología de minas*. Omega S.A., Barcelona, 671 pp.
- NASA Visible Earth, 2008. ASTER: Escondida Mine, Chile. NASA, http://visibleearth.nasa.gov/view_detail.php?id=1524

- Oyarzun, R., Guevara, S., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H. e Higuera, P., 2006. The As-contaminated Elqui river basin: a long lasting perspective (1975–1995) covering the initiation and development of Au–Cu–As mining in the high Andes of northern Chile. *Environmental Geochemistry and Health*, 28, 431–443.
- Oyarzun, R., Ortega, L., Sierra, J., Lunar, R. y Oyarzún, J., 1998. Cu, Mn, and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa Quadrangle, Chile: the Talcuna and Arqueros districts. *Mineralium Deposita*, 33, 547–559.
- Oyarzun, R. y Doblas, M., 2007. Fallas y zonas de cizalla (Parte 1): aspectos generales. Aula2punto.net, http://www.aulados.net/Geologia_yacimientos/Zonas%20de%20Cizalla/Fallas_Primer_Parte.htm
- Oyarzun, R., Cubas, P., Higuera, P., Lillo, J. y Llanos, W., 2009. Environmental assessment of the arsenic-rich, Rodalquilar gold–(copper–lead–zinc) mining district, SE Spain: data from soils and vegetation. *Environmental Geology*, 58, 761–777.
- Oyarzun, R., Higuera, P., Lillo, J., Oyarzún, J. y Maturana, H., 2010a. Investigando temas minero-ambientales en el norte de Chile: más allá de los megaproyectos, la investigación formateada y la retórica ambientalista. *Tierra y Tecnología*, 37, 81–90.
- Oyarzun, R., Higuera, P. y Cubas, P., 2010b. Geoquímica ambiental e indicadores geobotánicos. Grupo Minero San Quintín (Ciudad Real), sitio docente de entrenamiento activo para evaluaciones ambientales, http://www.aulados.net/GEMM/Documentos/San_Quintín_Innova/Geoquímica_ambiental.pdf
- Oyarzún, J. y Oyarzun, R., 2011. Minería Sostenible: Principios y Prácticas. Ediciones GEMM – Aula2punto.net, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html
- Perry, S.L. y Kruse, F.A., 2005. Geologic mapping with ASTER, EO-1, AVIRIS, and Landsat imagery. ASTER Science Project, ASTM Information, http://www.science.aster.ersdac.or.jp/en/science_info/ASTM/pdf/ASTWS/2005/06Perry.pdf
- Peters, W.C., 1992. Geologic prospecting and exploration. En: Hartman, H.L. (Ed.), *Mining Engineering Handbook*, Vol. 1., 2nd Edition. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 221–232.
- Reuters, 2008. FACTBOX - The world's biggest mining companies. Reuters, <http://uk.reuters.com/article/2008/02/01/uk-rio-ranking-idUKL0132041220080201>
- Reuters, 2011. Miners snap up graduates as industry booms. Reuters, <http://www.reuters.com/article/2011/06/14/us-mining-metals-jobs-idUSTRE75D3SX20110614>
- Rio Tinto, 2011. Our products. http://www.riotinto.com/index_ourproducts.asp
- Rowan, L.C., Hook, S.J., Abrams, M.J. y Mars, J.C., 2003. Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system. *Economic Geology*, 98, 1019–1027.
- Short, N.M., 2011. Other remote sensing systems - hyperspectral imaging. RST, http://www.fas.org/irp/imint/docs/rst/Intro/Part2_24.html
- Sibson, R.H., 1990. Faulting and fluid flow. En: B.E. Nesbitt (Ed.) *Short course on fluids in tectonically active regimes of the continental crust*: Mineralogical Association of Canada, 93–132.
- The East African, 2009. US Senate wants Obama to crush LRA for good. *Crossed Crocodiles*, <http://crossedcrocodiles.wordpress.com/2009/06/17/if-uganda-it-has-oil-it-must-need-the-pentagons-democracy/>
- Vry, V.H., Wilkinson, J.J., Seguel, J. y Millán, J., 2010. Multistage intrusion, brecciation, and veining at El Teniente, Chile: evolution of a nested porphyry system. *Economic Geology*, 105, 119–153.
- Wikipedia, 2011. Mineral exploration. http://en.wikipedia.org/wiki/Mineral_exploration

Fuente de las imágenes (a Junio-Julio de 2011)

1. <http://www.alaskaexploration.com/aboutus.html>
2. http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Democratic_Republic_of_the_Congo_%28orthographic_projection%29.svg
3. <http://www.angloamerican.com/aal/careers/programme/>
4. <http://library.kiwix.org:4201/A/Geologist.html>
5. <http://www.cosmosmagazine.com/news/2675/did-nickel-kick-start-evolution>
6. <http://ecosystems.wcp.muohio.edu/studentresearch/climatechange02/snowball/articles/Background.htm>
7. http://faculty.kutztown.edu/frieauf/classphotos/structural_photos.html
8. <http://www1.newark.ohio-state.edu/Professional/OSU/Faculty/jstjohn/Gold-Ores/Red-Lake-Gold-Ore.htm>
9. <http://www.empr.gov.bc.ca/Mining/Geoscience/Geochemistry/Pages/default.aspx>
10. <http://www.nrm.gov.au/projects/sa/kang/2006-04photos.html>
11. http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/method/geophysics/index_f.php
12. <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.cfm?release=2010-158>
13. <http://aces.nmsu.edu/wls/documents/schmugge-part-a.pdf>

4.1 Palabras iniciales

Vamos a situarnos en el siguiente escenario ficticio: nuestra campaña de exploración regional y local (de semi-detalle) ha tenido éxito, hasta el punto de haber definido unos prospectos con cierto potencial para convertirse en yacimientos minerales económicos. Hemos llegado aquí después de dos años de trabajos de campo, un adecuado análisis geológico regional y local siguiendo las guías de exploración geológicas descritas en el capítulo anterior; además hemos realizado una campaña de geoquímica regional (1: 100.000) seguida de campañas de semi-detalle (1: 10.000) que han permitido definir, junto con las guías geológicas, interesantes blancos de exploración; finalmente hemos realizado geofísica en los sectores más prometedores con excelentes resultados. ¿Tenemos algo? No, aún tenemos nada, nada en absoluto.

En los viejos tiempos (igual se seguirá haciendo en algunos lugares) cuando se compraba una sandía, el frutero la calaba para demostrar lo roja y buena que estaba. Hoy es difícil que en un supermercado le dejen a uno hacer tal cosa, ni tampoco el encargado lo haría. De la misma manera, sin sondeos (sondajes) un prospecto es como una sandía de supermercado esto es, una promesa y poco más. Aquí hay dos visiones del mundo de la exploración, la de los ingenieros de mina, que lo resuelven todo con sondeos y la de los geólogos que esperan que la geología solucione los problemas. Unos y otros se equivocan, aunque ambos poseen parte de la verdad. Una cosa es ser cauto con una técnica que cuesta bastante dinero (hablamos de unos US\$ 100 por metro de sondeo con recuperación de testigo), y otra *marear la perdiz* hasta el infinito ordenando más y más estudios. Esto también recuerda a muchos médicos, que en vez de ofrecer un diagnóstico rápido, ordenan más y más pruebas y análisis clínicos, lo cual puede ser comprensible en la serie de televisión “House” (de la Fox), pero no en el mundo cotidiano donde las cosas no suelen ser tan complejas. Al igual que en medicina general, en minería el tiempo (y los estudios extra) cuestan dinero, y a veces, mucho dinero.

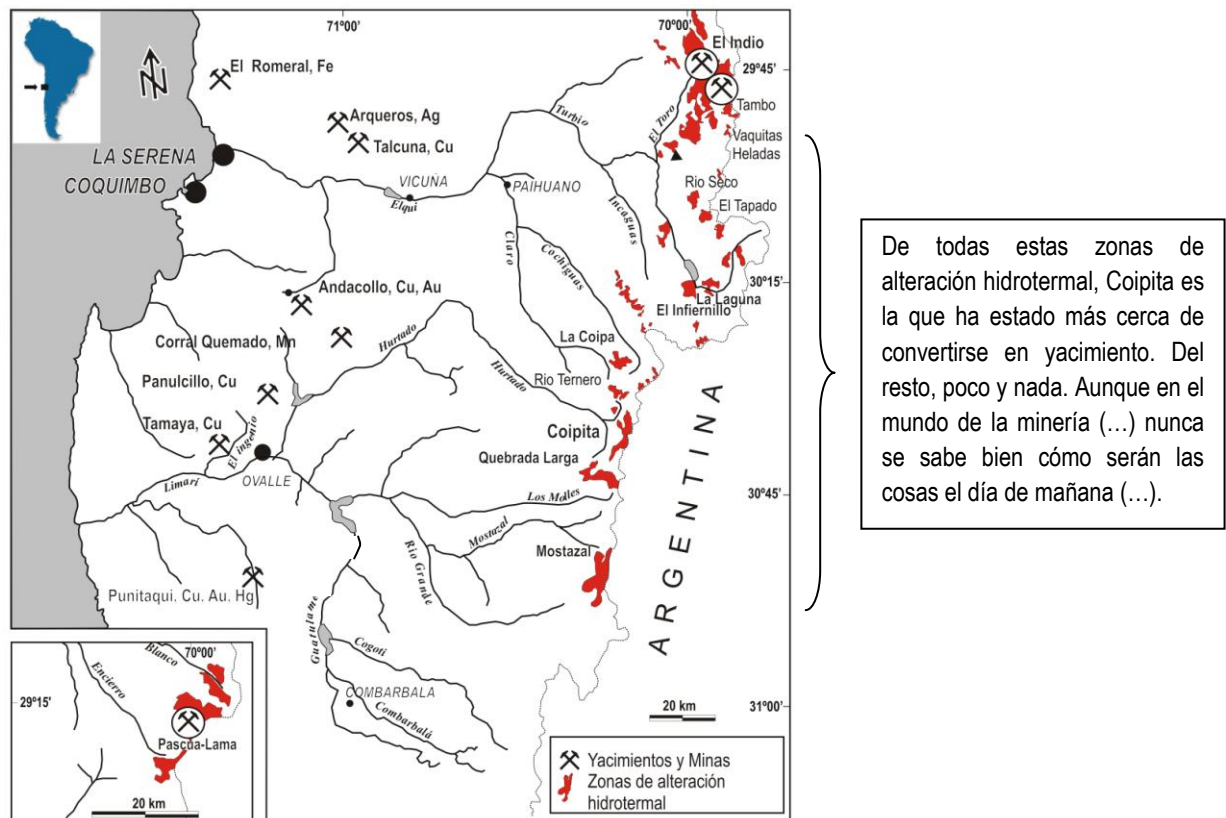
¿Pánico “escénico” a que el prospecto no sea más que una promesa vacía de todo contenido? Esto explica en parte el problema y nos retrotrae a dos de los principios fundamentales de Lowell (1987) sobre el geólogo de exploración:

- Debe ser, una persona con sólidos conocimientos geológicos, pero al mismo tiempo, no debe ser un pedante atenazado por el miedo a

equivocarse, ya que su negocio consistirá en estar equivocado muchas veces.

- Pero por sobre todas las cosas, deberá tener un compromiso absoluto con la idea de descubrir nuevas mineralizaciones.

Por otra parte la empresa, sobre todo si es una *junior company* (pequeña empresa de exploraciones) puede estar jugando *al gato y al ratón* con potenciales compradores; después de todo, estas empresas raramente disponen del capital necesario como para desarrollar un yacimiento. Así, en el momento que empiecen los sondeos la empresa puede darse de bruces con una triste realidad, la de que el prospecto no está a las alturas de lo esperado. Después de todo, lo más común es que las cosas vayan por ese lado, si no, recordemos por un momento “cuantas” zonas de alteración que alcanzaron la categoría de prospecto en la Faja Aurífera de El Indio (norte de Chile) llegaron a ser definidas como yacimiento económico (ver siguiente figura).



Yacimientos, prospectos y zonas de alteración hidrotermal en la Región de Coquimbo (Chile). Adaptada de Oyarzun et al. (2007).

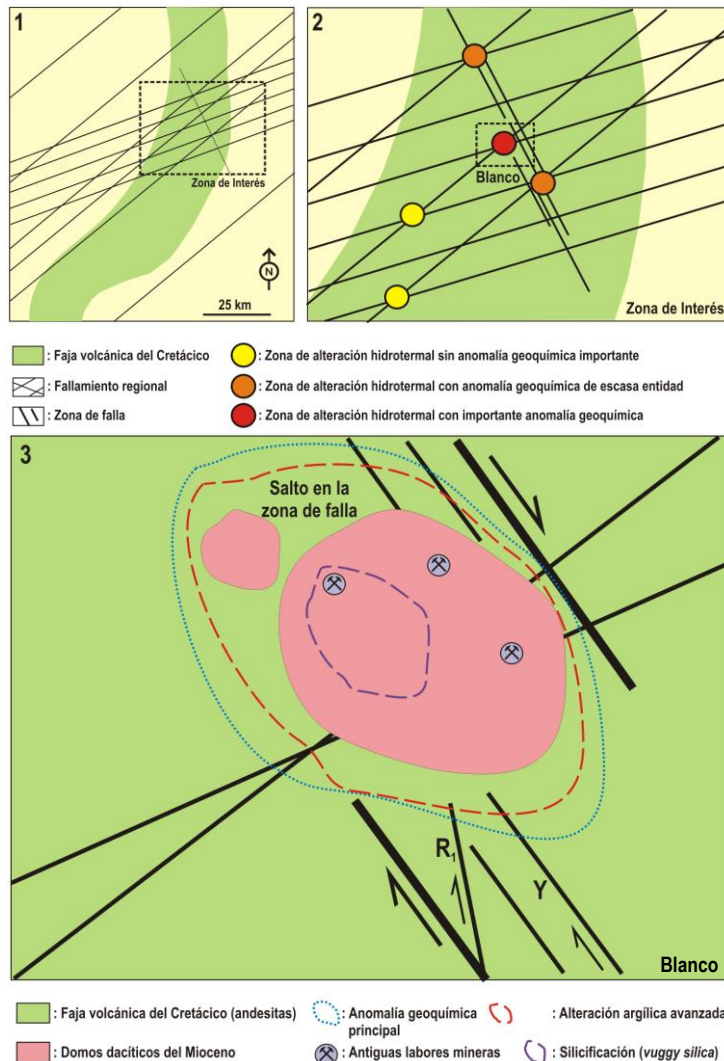
La palabra clave aquí es “sondeos”, ya que sin estos, simplemente no podemos saber (realmente) lo que hay bajo la superficie del terreno; da igual lo bien que pinten las cosas en superficie. No obstante, antes de explicar el tema de los sondeos, realizaremos un rápido repaso sobre el cómo hemos llegado a la situación en la que hay que tomar una decisión sobre si sondear o no.

4.2 Definición y evaluación preliminar de prospectos

4.2.1 Las fases preliminares

Prospecto es un término tomado “prestado” del inglés (*prospect*) y de uso común en Iberoamérica. La quinta definición del término en el diccionario Webster (*online*) nos dice que se trata de: *a place showing signs of containing a mineral deposit* → *un lugar que muestra indicios de contener un yacimiento mineral*. Como señalábamos en la sección anterior, se llega a definir un prospecto después de un largo trabajo de exploración durante una campaña de exploración. Es decir, hemos pasado por una fase regional en la que al final se han podido definir uno o más prospectos, los que también podríamos denominar “blancos de exploración”.

Analizaremos de manera sinóptica los pasos que se han seguido para definir los blancos de exploración en función de la siguiente figura.



Exploración minera: desde la escala regional (arriba) a la definición y caracterización preliminar de un blanco (prospecto) (abajo).

En nuestro ejemplo estamos realizando una exploración del tipo *greenfield* (ver capítulo anterior), es decir, trabajamos en una región sin actividad minera previa (conocida) y donde se desconoce hasta cierto punto la geología. Esto no significa que se parta de cero, ya que eso sería ir a ciegas y no es el caso.

1. En el primer cuadro tenemos una faja de rocas volcánicas andesíticas del Cretácico cortadas por un fallamiento regional. Esto *per se* ya puede ser interesante. Los geólogos trabajarán en esta zona durante algunos meses, revisando la geología regional a una escala de mayor detalle y llevando a cabo campañas de prospección geoquímica multi-elementos. Otra herramienta de apoyo durante este período ha sido el trabajo con imágenes satelitales para el estudio de fallas y zonas con potenciales zonas de alteración.
2. Estos trabajos han permitido definir lo que llamaremos “una zona de interés” que consta de los siguientes elementos: Por una parte se ha detectado la presencia de una zona de falla NNW que solo era parcialmente visible en las imágenes ASTER. Notablemente, a lo largo de esta zona se ha observado la presencia de zonas de alteración hidrotermal donde la geoquímica regional parece indicar que existen de fuertes a ligeras anomalías geoquímicas.
3. Un estudio geológico ya de detalle en la zona más prometedora nos muestra que existen domos dacíticos del Mioceno. El análisis estructural de la zona de falla ha permitido inferir un movimiento transcurrente de tipo dextral, con saltos que coinciden con el emplazamiento de los domos. No es sorprendente, ya que estudiando el movimiento de esta zona de falla vemos que los domos se localizan en zonas de transtensión, es decir, se emplazaron bajo condiciones locales de extensión. Durante esta etapa de los trabajos también se ha realizado una cartografía de la alteración observándose silicificaciones con *vuggy-silica* y zonas de alteración argílica avanzada con caolinita-alunita centradas en el domo principal. Este domo también es central a la anomalía geoquímica principal definida a efectos de este ejemplo por valores > 350 ppm de Cu y 120 ppm de As. Este último elemento es un excelente trazador (*pathfinder*) para oro. Por último, aunque no por esto menos importante, en los afloramientos del domo se han observado pequeñas labores mineras artesanales de edad indeterminada, y sobre las que no se tenía constancia. En otras palabras, tenemos un prospecto con “buena pinta”.

4.2.2 Trabajos específicos en el prospecto: calicatas (trincheras) y sondeos

Las calicatas (trincheras) constituyen una de las formas más simples y directas de obtener una visión más completa de lo que es un prospecto. Son especialmente

útiles cuando hay suelos con cobertura vegetal o el regolito es potente. Todo lo que se necesita para cavarlas es una retroexcavadora.



Calicatas. A la izquierda, excavación de una calicata; a la derecha, muestreo discontinuo (*chip-sampling*) de una calicata (imágenes^{1,2}).

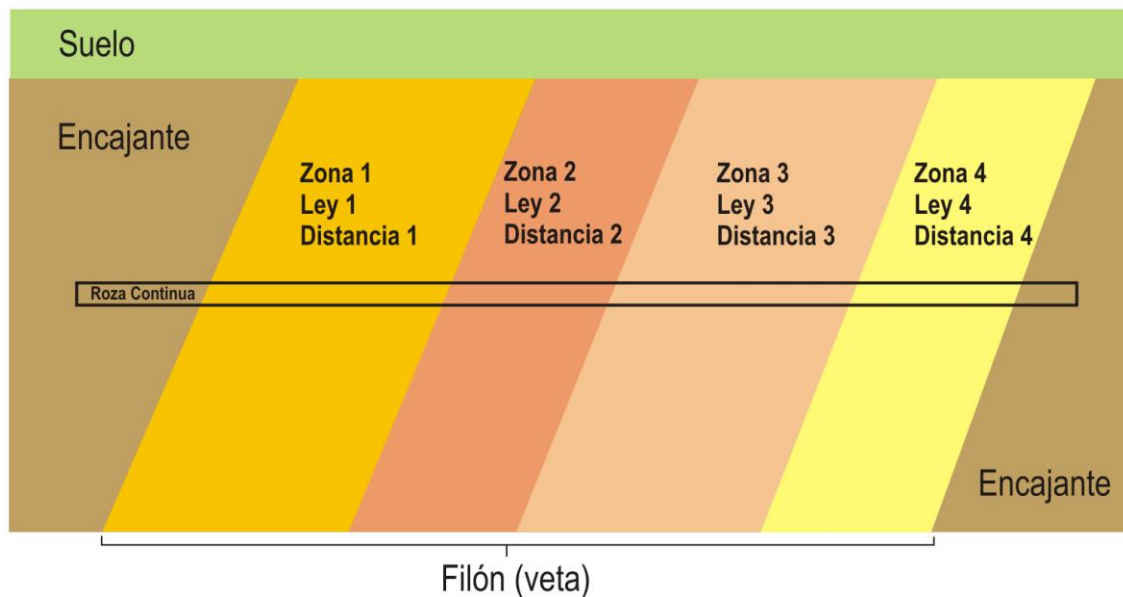
En la calicata el muestreo se puede realizar por roza continua (*channel sampling*) o por toma de muestras discontinuas (*chip sampling*). En el primer caso lo que obtendremos es un “todo-uno” por cuarteo que nos dará una visión geoquímica de la calicata completa o de sectores diferenciados de esta. El tipo de herramienta necesaria para llevar a cabo una roza continua depende de lo difícil que sea excavar el terreno. Si es duro, se puede usar un martillo neumático o una sierra de cortar roca.



Toma de muestras en roza continua (*channel sampling*). A la izquierda con martillo neumático (Marjoribanks, 1997); a la derecha, uso de una sierra de cortar roca (imagen³).

El muestreo y el “peso” que se les da a las muestras es muy importante. Por ejemplo, en el caso de una roza continua donde existen diferentes materiales (esto se podrá apreciar a primera vista), habrá que obtener muestras diferenciadas, que representen proporcionalmente las longitudes cortadas por la excavación, por

ejemplo, analicemos el caso del filón que se muestra abajo en sección perpendicular a la dirección del mismo, el cual puede ser diferenciado en cuatro zonas:



Roza continua en una calicata para obtener la ley “del tramo”. Si esta operación se realizara para cubicación, entonces deberíamos trabajar con la potencia real del filón, es decir, habría que cortar perpendicularmente al buzamiento del filón. Para efectos del ejemplo: Ley = L, Distancia = D, entonces, y la ley media será: $(\sum L_i \times D_i) / \sum D_i$.

Los sondeos son ya palabras mayores y existen tres tipos principales:

1. Percusión-rotación (DTH): son realizados con un martillo accionado neumáticamente, al que se le imprime un movimiento vertical y rotacional. La herramienta (martillo) suele ser carburo de tungsteno, permite diámetros de hasta 20 cm, y pueden penetrar hasta unos 200 m. Dependiendo del tipo de roca, se pueden perforar hasta unos 100-150 m en unas 8 horas. Si bien su coste es bajo (comparado con el de recuperación de testigo), la información geológica que entrega es pobre, ya que consiste tan solo en la gravilla (*cuttings*) que sube por las paredes de la perforación a medida que se inyecta aire a presión por las varillas (*rods*). Su principal uso es para la determinación de leyes. Otro problema que presentan es la contaminación: los materiales que ascienden se pueden contaminar con otros, de tramos superiores, que han caído por efectos del movimiento de la varillas:
2. Recuperación de testigo (diamantina) (DDH): son más caros pero proporcionan gran información geológica. Los precios son de alrededor de US\$ 100 por metro perforado. La herramienta de corte es un tubo hueco con una corona de diamantes en la cabeza, siendo los diámetros más comunes: 2,17 – 6,35 cm. Se pueden perforar hasta 10 m por hora. La herramienta gira y corta un testigo de roca (testigo) a medida que profundiza. Dicho cilindro de roca queda contenido dentro del tubo

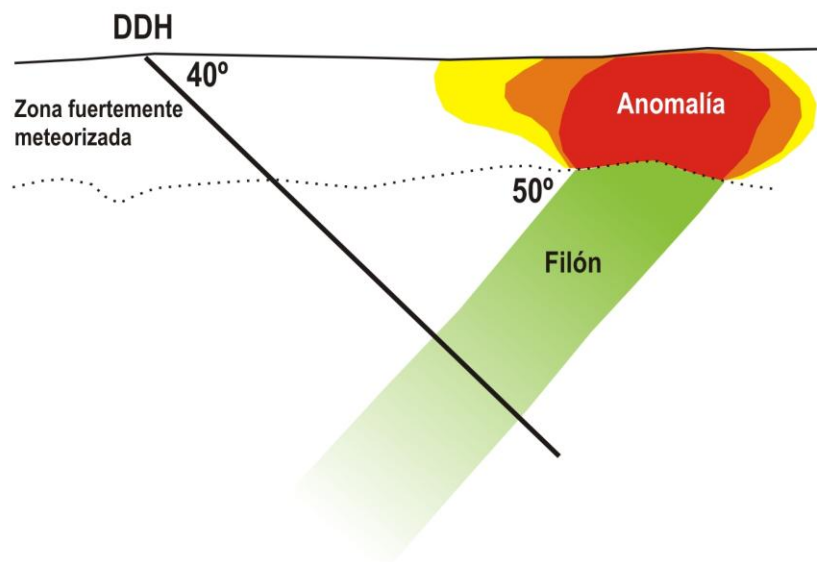
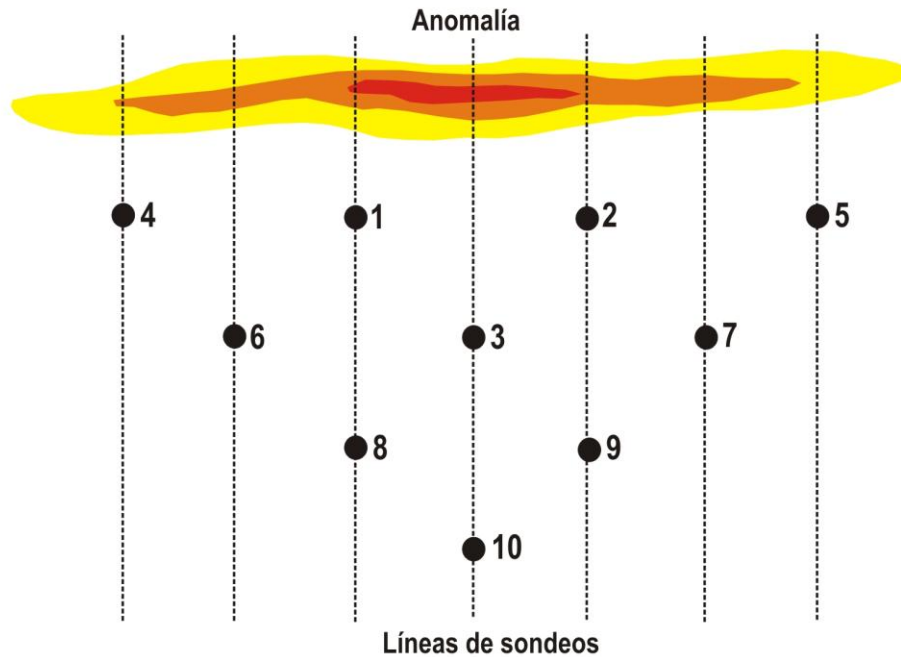
portatestigo. A medida que se profundiza, se van agregando varillas al sistema. El problema es que cuando el portatestigo está lleno (3 m), hay que retirar el varillaje que se ha ido agregando progresivamente. Cuando se han perforado muchos metros, por ejemplo, más de 100, toma tiempo recuperar el tubo portatestigo, y recordemos, el tiempo es dinero. Para remediar esto se puede utilizar un tubo portatestigo conectado con un cable a superficie (*wireline core barrel*), pero en ese caso, el diámetro del testigo será inferior.

3. Aire reverso (RC): son muy “populares” y están en uso desde los años 1970's. El sistema permite la recuperación de *cuttings* por inyección de aire o agua a través de un sistema de pared doble, que evita los problemas de contaminación que se producen en el sistema percusión-rotación. Son de gran velocidad y en algunos casos pueden ser implementados como sistemas duales RC/DDH.



Arriba, herramientas de corte y varillas. Abajo, perforación profunda para exploración mediante aire reverso (imágenes⁴).

Esto es lo que se puede contar en lo que respecta a los aspectos técnicos más simples de los sondeos. Pero para el geólogo el desafío proviene de dos frentes, elegir el tipo de sondeo a realizar (balanceando las posibilidades técnicas, información geológica obtenible, y costes) y sobre todo, decidir donde posicionar los sondeos y a que ángulo respecto a la vertical. Analizaremos un ejemplo muy simple, sondeos para evaluar un cuerpo filoniano buzando unos 50°:

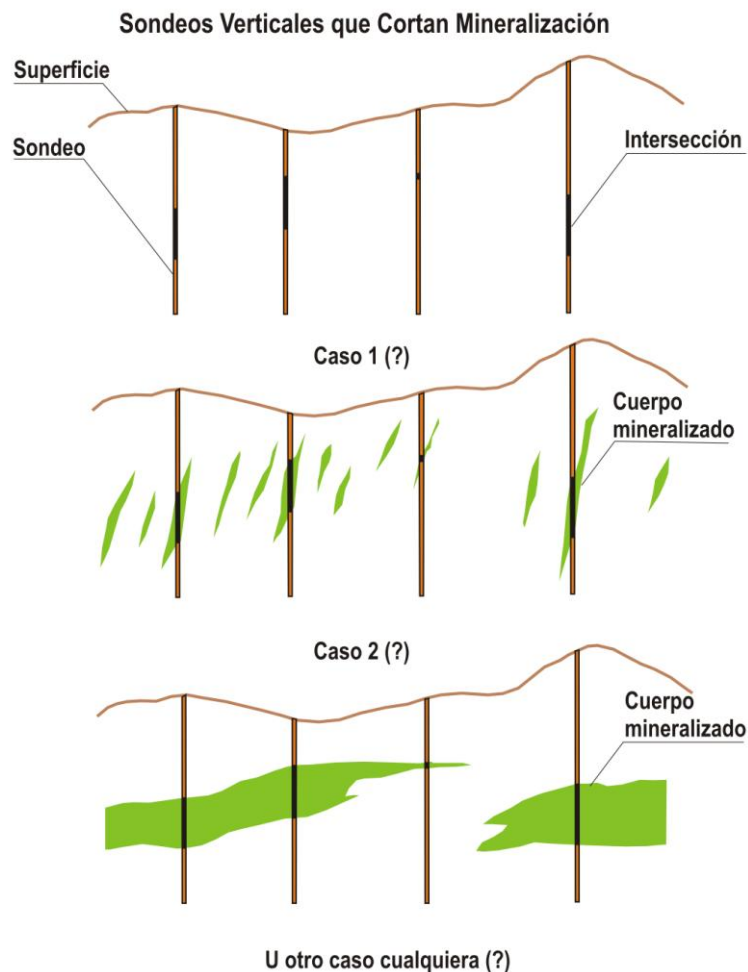


Caso ficticio de la disposición de sondeos para evaluar un cuerpo mineralizado filoniano que genera una anomalía geoquímica en superficie. La numeración 1-10 indica el orden de los sondeos. Si el 1 y el 2 cortan mineralización, entonces se sigue con 3 y así sucesivamente. Adaptada de Annels (1991).

En este ejemplo se muestra una estrategia secuencial para evaluar una masa filoniana que fue inicialmente detectada mediante geoquímica. Lo primero será disponer los sondeos de tal manera que corten en profundidad, lo más perpendicularmente posible el filón. Se trata de ir paso a paso, de esta manera iremos inspeccionando el cuerpo mineral de manera secuencial sin malgastar recursos económicos. Así primero se harán los sondeos 1 y 2. Si estos cortan mineralización económica seguiremos con el sondeo 3. Este último nos dará una

visión más profunda que los dos primeros. Si el 3 va bien, entonces podemos ahora chequear la distribución horizontal somera, con los sondeos 4 y 5 (paralelos a 1 y 2). Si todo va bien con estos, pasamos a las posiciones 6 y 7, y que nos darán una visión de equivalente profundidad al 3 pero más extendidos en la horizontal. Con este sistema se proseguirá hasta conocer el cuerpo completamente.

Dicho así hasta parece fácil, pero el tema de los sondeos es cualquier cosa menos fácil. Sólo para ilustrar de una manera muy simple las múltiples incertidumbres que pueden surgir durante una campaña de sondeos, analicemos el caso de abajo.



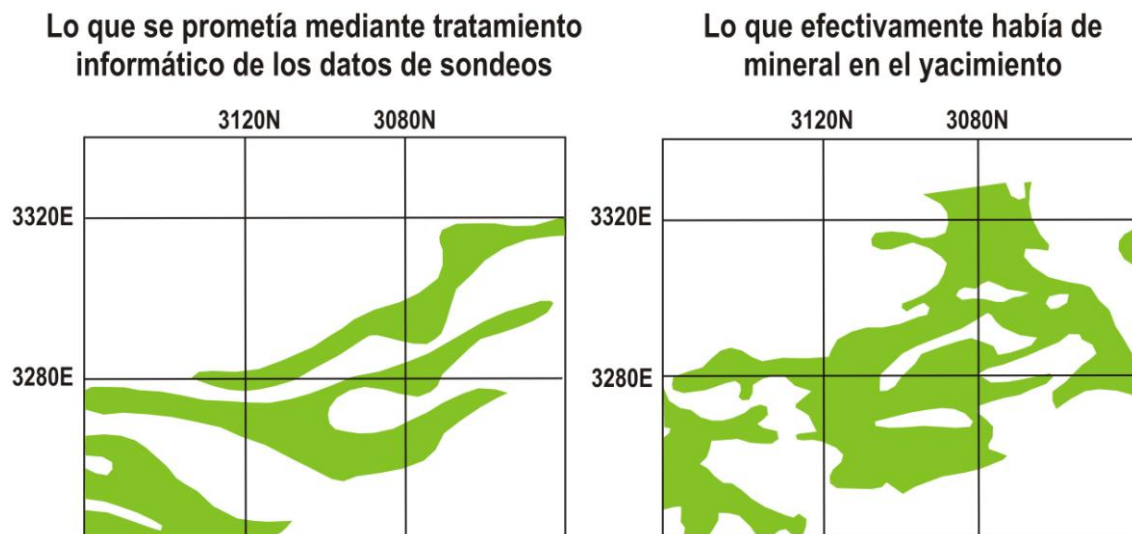
Problemas de interpretación de los sondeos que pueden surgir durante una campaña. Los casos 1 y 2 tienen idénticas intersecciones con la masa mineral, ¿pero qué interpretación es la correcta? (adaptada de Stone y Dunn, 1993).

Disponer de datos de sondeos es, qué duda cabe, una gran ayuda, pero sin una geología de apoyo, pueden entregar datos carentes de contenido. Y esto es lo que puede en ocasiones ser preocupante, ya que si el geólogo encargado de interpretar datos de sondeos no tiene un conocimiento acabado de la geología del sector la interpretación puede ser errónea. El problema no radica tanto en que los

cuerpos mineralizados (y sus leyes) sean de un tipo u otro, sino que esto puede resultar en:

1. Que un prospecto sea abandonado por “subestimación” del recurso.
2. O bien sea aprobado para la realización del estudio de factibilidad económica final debido a una “sobrestimación” del recurso.

Al respecto, Stone y Dunn (1993) nos muestran un ejemplo (ver abajo) sobre cómo la confianza absoluta en los medios informáticos (computacionales) puede llevarnos a errores de bulto durante los estudios de factibilidad de un yacimiento, en este caso, de subestimación del recurso.



Interesante caso mostrado por Stone y Dunn (1993) para mostrar como el uso inadecuado de herramientas informáticas puede llevar a graves errores de estimación de reservas.

No es de extrañar, este autor ha sido testigo de cómo en ocasiones se utilizan herramientas de software sin que el “operador” sepa (y sobre todo “entienda”) qué es exactamente lo que está haciendo. Al respecto dos comentarios:

1. Las asignaturas de matemáticas en las carreras de geología son más percibidas por los alumnos como “obstáculos” a salvar que como herramientas que luego pueden serles útiles. Aquí, en todo caso, debemos repartir las culpas entre profesores y alumnos, los primeros por enseñar unas matemáticas (y estadística) desprovistas (muchas veces) de contenido “aplicado”; los segundos, por la falta de interés.
2. Las asignaturas de campo empiezan a jugar un papel parecido al de las de las matemáticas. Esto es grave, un geólogo con deficiencias cartográficas difícilmente tendrá algo que aportar a una empresa minera. En lo posible un geólogo de minas debería ser más un “todoterreno” (4WD) que un especialista a ultranza, ya que este último saliendo de su campo específico tiene poco que aportar a la empresa.

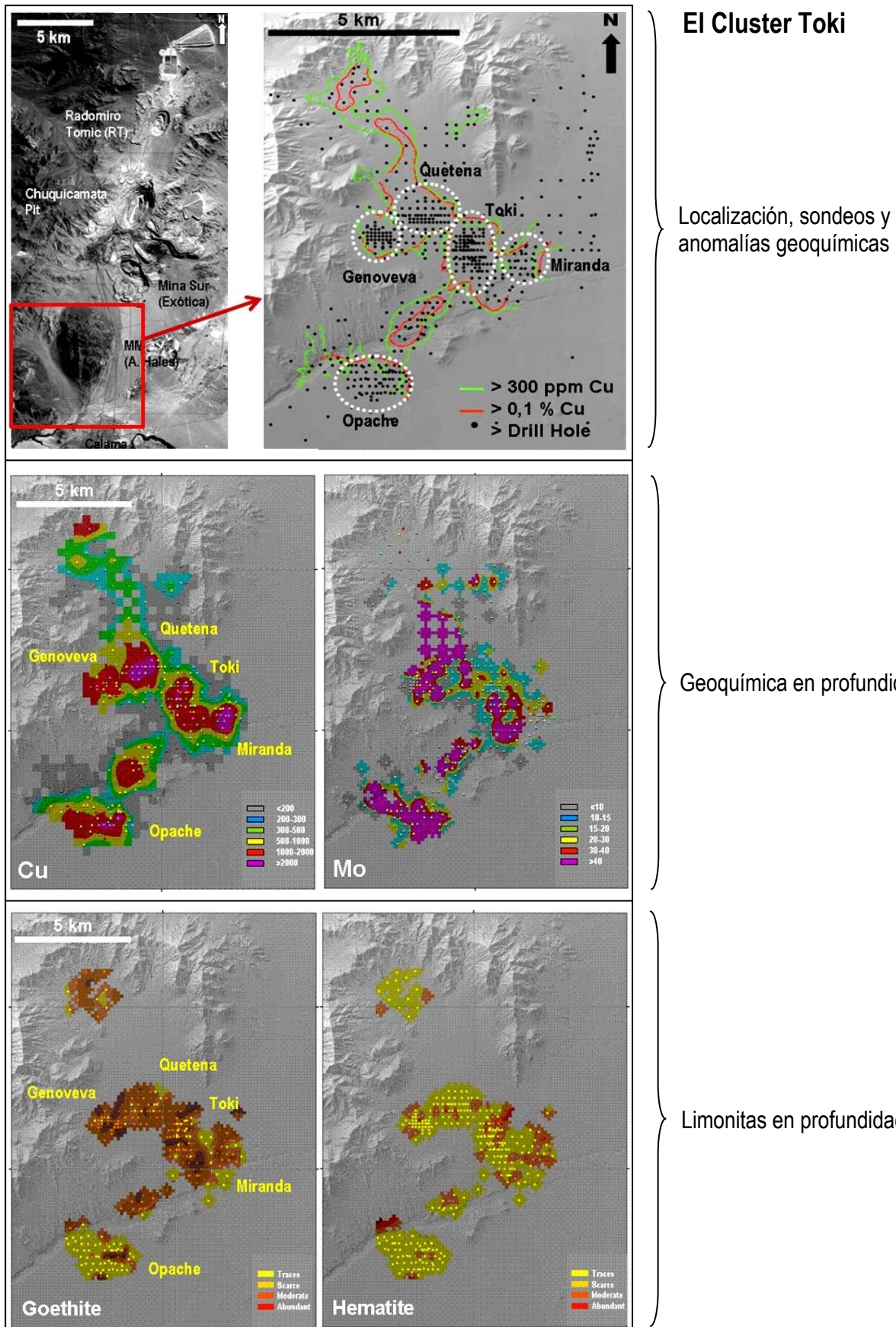
Antes de entrar en otras materias, revisaremos uno de los descubrimientos más interesantes en el Distrito Minero de Chuquicamata (Chile), llevado a cabo gracias al pensamiento geológico “crítico” del que habla Lowell (1987). Se trata del descubrimiento del llamado Cluster Toki en la pampa del mismo nombre, en un valle localizado inmediatamente al oeste de Chuquicamata. Los trabajos fueron dirigidos por el actual gerente de Exploraciones Mineras (filial de exploraciones de CODELCO-Chile) Sergio Rivera, y lo bonito de esta historia proviene de lo siguiente (Rivera et al., 2009). Cualquier geólogo chileno, preguntado sobre Chuquicamata y otros yacimientos a lo largo de la faja metalogénica de pórfidos del Eoceno Superior – Oligoceno Inferior, dirá que existe un control estructural ejercido por la llamada Falla Oeste. La Falla Oeste es en realidad una larga zona de falla N-S que efectivamente, se relaciona “espacialmente” con algunos yacimientos de esta faja metalogénica. Pero una relación “espacial” no tiene porqué (necesariamente) conllevar una relación

“genética”. Desafiando ese pensamiento geológico ortodoxo (que cuanto peligro puede llevar a veces) se revisaron unos sondeos antiguos en Pampa Toki localizados al norte del yacimiento de Opache, esto es, fuera de la influencia de la Falla Oeste. Los resultados probaron ser interesantes y se tomó la decisión de estudiar la zona. Problema, como todas las llamadas “pampas” en el norte de Chile, esta está cubierta por una gruesa capa de gravas con una potencia variable de entre 40 y 200 m. ¿Cómo se cartografía un entorno así? Con “inteligencia”, primero se realizaron sondeos *scout* (preliminares), en una malla de 1000 x 1000 m atravesando las gravas y entrando solo unos pocos metros en las rocas inferiores. Esto permitió obtener información de primera línea y a bajo coste. Así se pudo tener una primera visión geológica del sector, recabar datos geoquímicos y mineralógicos (limonitas, sulfuros relictos). Con este trabajo completado con exitosamente, se pasó a realizar una malla de sondeos de mayor detalle de 500 x 500 m, esta vez, atravesando decisivamente las rocas inferiores. Finalmente se determinó la presencia de varios yacimientos tipo pórfido (Genoveva, Miranda, Opache, Quetena y Toki), con un tonelaje total de 20 millones de toneladas de cobre metal incluyendo 6 millones de toneladas de oxidados, mixtos (oxidados-sulfuros) y sulfuros de enriquecimiento secundario. Por cierto, este es un buen sitio para rendir tributo además al excelente grupo de geólogos de Exploraciones Mineras basado en Calama, cuyo trabajo debe ser calificado como excelente.

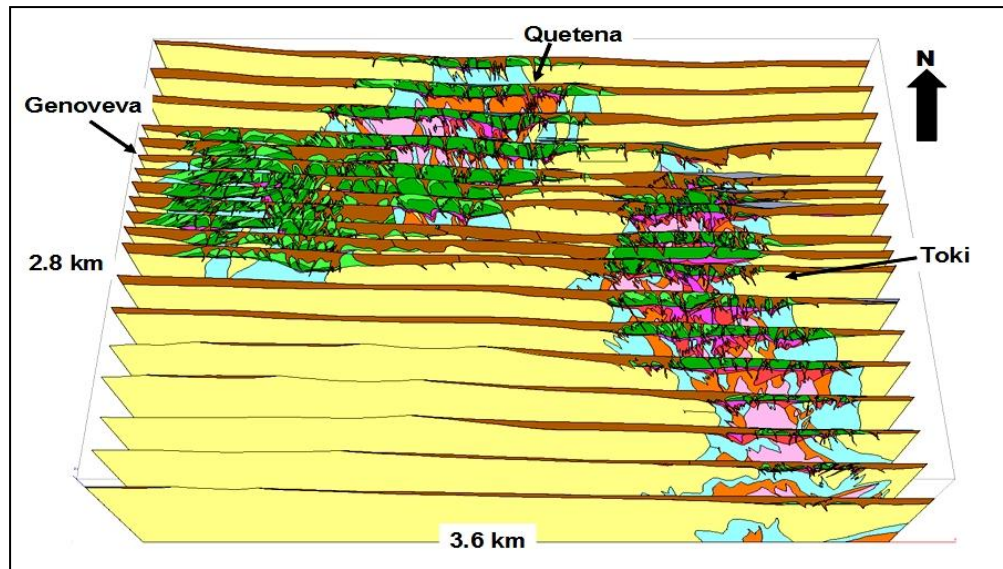
Cluster Toki

At least five altered and mineralized porphyry centers related to the cooling of a polyphase Eocene intrusion occur within a 25-km² “pampa”-type area in the southwestern sector of the Chuquicamata district in northern Chile. These deposits take place 1 to 2 km apart as discrete porphyry “columns” covered by postmineral, poorly consolidated Miocene sedimentary rocks. Such copper oxide and sulfide deposits were discovered and evaluated by drilling done by Codelco from 1996 through 2007 during a brownfield exploration program, driven by the necessity to replace and increase leachable ore consumed by the Chuquicamata and Radomiro Tomic operations. During this program a resource of more than 20 million metric tons (Mt) Cu was discovered, including 6 Mt Cu of oxide, mixed and secondary sulfide ore, representing one of the largest supergene copper resources discovered worldwide during the last 10 years.

Rivera et al. (2009)



El Cluster Toki (1) (Rivera et al., 2009).



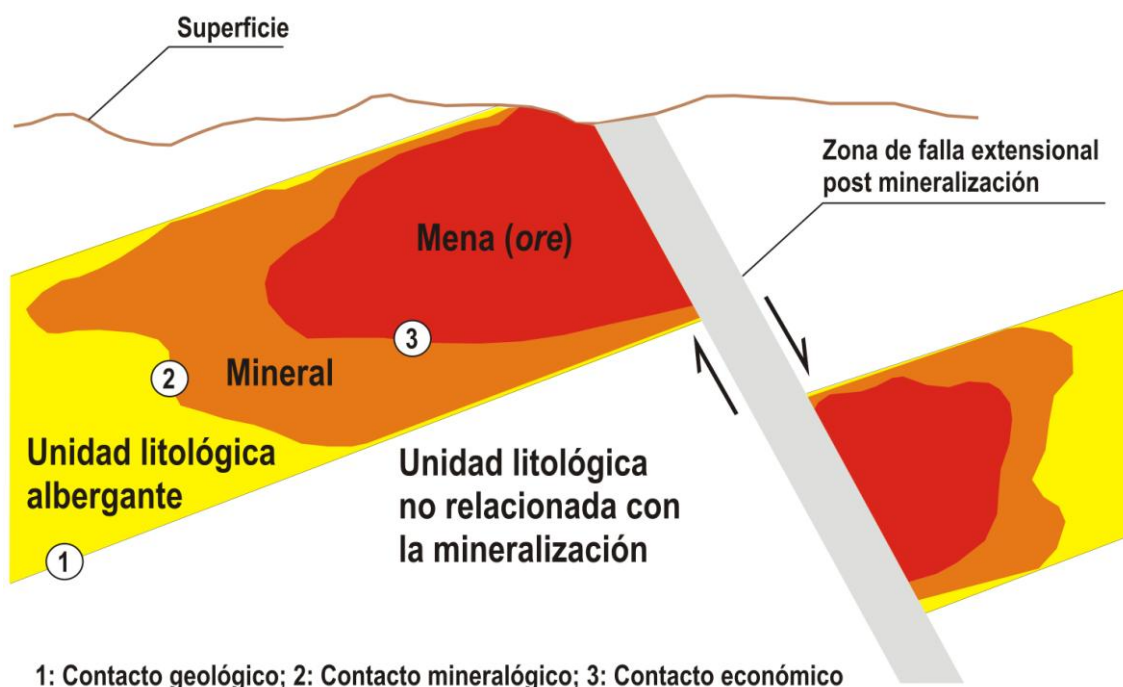
El Cluster Toki (2): Perfiles seriados (visión 3D) la mineralización asociada a los pórfidos Genoveva, Quetena y Toki (Rivera et al., 2009). Azul claro: calcopirita-pirita; Marrón: zona lixiviada; Naranja: calcopirita; Rosa: calcopirita-bornita; Verde: oxidados de cobre.

4.3 El momento de cubicar (y modelizar)

4.3.1 Cómo hemos llegado hasta aquí y algunos conceptos importantes

Vamos a suponer que tenemos un prospecto en el que se ha realizado una evaluación preliminar (incluyendo sondeos) o estudio de pre-factibilidad que ha resultado ser positivo. Es el momento de pasar a la fase decisiva del proceso, pero antes necesitamos definir algunos términos útiles relacionados con la estimación de reservas. Se trata de la definición de los contactos de tipo geológico, mineralógico, y económico. Para evaluar un recurso tenemos que pensar en términos de estos tres conceptos:

- **Contacto geológico:** los límites litológicos y/o estructurales de una determinada unidad.
- **Contacto mineralógico:** definido por la extensión de la masa mineral (recurso “geológico”); puede o no coincidir con los contactos geológico (puede ir más allá de una determinada litología) y económico (a partir de un punto las leyes pueden ser sub-económicas).
- **Contacto económico:** los límites del material a partir del cual se pueden obtener ganancias; queda definido por la ley de corte (*cut off grade*), a partir de la cual los materiales son económicos en un determinado momento económico y tecnológico.



Sección mostrando diferentes tipos de contacto en torno a una mineralización económica. Adaptada y ligeramente modificada de Stone y Dunn (1993).

4.3.2 Estimando reservas por métodos volumétricos convencionales

La estimación de reservas es mucho más que una mera proyección espacial (3D) de las leyes (por ejemplo, % Cu, g/t Au, etc.). Para determinar el verdadero valor de un yacimiento necesitaremos además determinar y proyectar los siguientes parámetros:

- Peso específico de la roca mineralizada.
- Potencia de la roca mineralizada.
- Tipo de mena (mineralogía).
- Estimación del grado de recuperación metalúrgica.
- Contenido en humedad.
- Competencia de la roca – RQD.

A partir de este punto, nos concentraremos en los aspectos estadísticos básicos de la proyección de datos de leyes. Por otra parte, en esencia, una estimación de reservas consiste en definir un volumen, al cual se le aplica una ley y una densidad (peso específico):

$$T = A \times P \times PE$$

Donde: **T**: es el tonelaje del sector del depósito bajo evaluación; **A**: el área; visualización 2D del sector del depósito bajo evaluación, normalmente una sección vertical en cuerpos mineralizados irregulares; **P**: la potencia; distancia horizontal aplicada a dicha sección; y **PE**: el peso específico de la roca mineralizada.

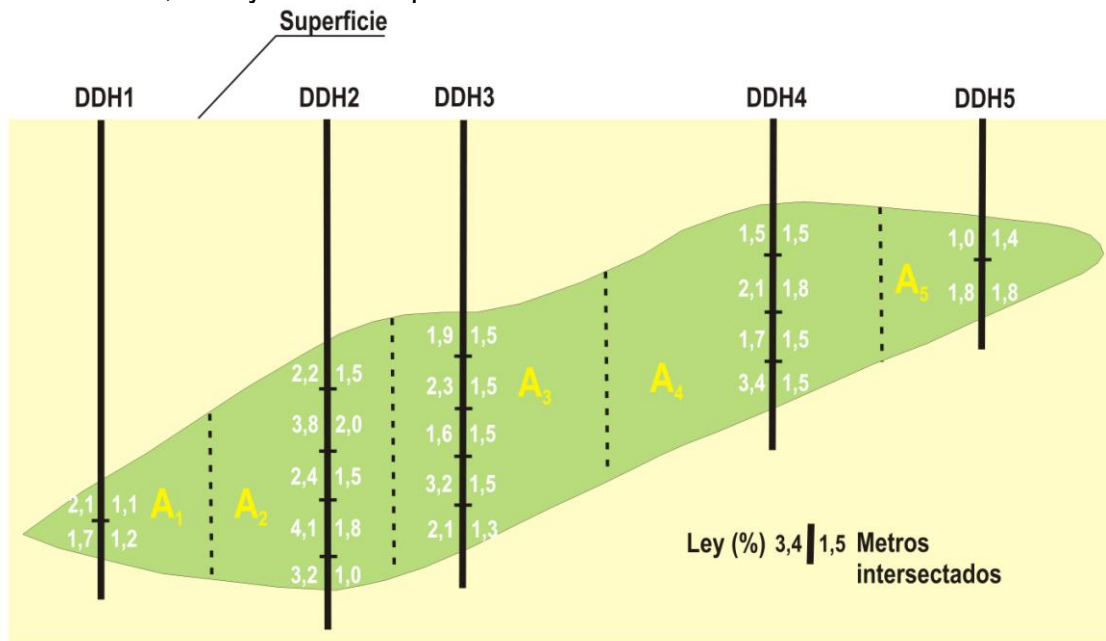
Si al resultado le aplicamos una ley concreta (p.ej., 2,3% Cu), entonces tendremos toneladas con una ley específica (p.ej., 250.000 toneladas al 2,3% Cu). Pero primero debemos aprender a calcular la ley media de un sondeo, que al ser variable en tramos, implica obtener una ley media “ponderada”:



Si tenemos diferentes distancias (D_i) con diferentes leyes (L_i) cada una, la ley media ponderada (L_{mp}) será:

$$L_{mp} = (\sum L_i \times D_i) / \sum D_i$$

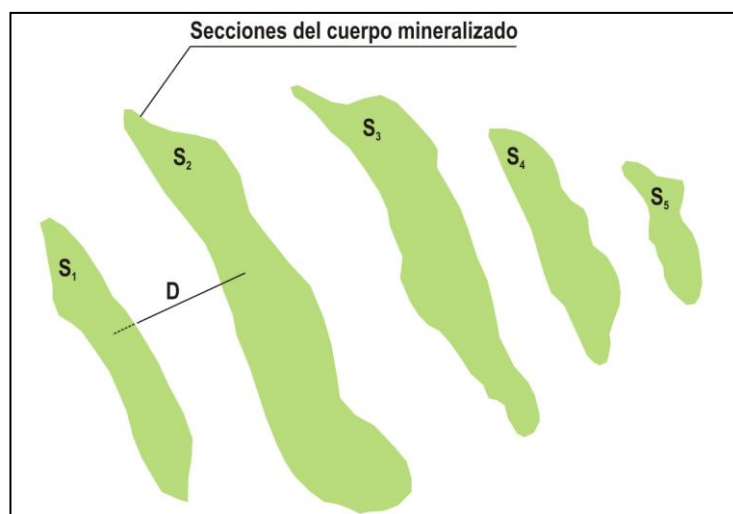
Ahora podemos determinar las leyes medias de secciones (paneles), a través, nuevamente, de leyes medias ponderadas.



Cálculo de la ley media de la sección de un cuerpo mineralizado. A1, A2, etc., son las áreas de influencia de los sondeos DDH1, DDH2, etc. Sus bordes se trazan a través del punto medio entre dos sondeos adyacentes, siendo sus límites paralelos a estos. Adaptada y ligeramente modificada de Annels (1991). En este caso la ley media es 2,32%.

Primero debemos obtener las leyes medias de cada sondeo tal como se hizo en el punto anterior. A continuación se calculan las áreas (A_i) mediante planimetría u otro procedimiento, y una vez que tengamos estos datos podremos proceder de la siguiente manera, donde DDH_i es la ley media de cada sondeo:

$$\text{Ley}_{\text{sección}} = \sum DDH_i \times A_i / \sum A_i$$



Secciones en 3D de un cuerpo mineralizado. D = distancia entre secciones. Adaptada y ligeramente modificada de Annels (1991).

La determinación de volúmenes se hace con el siguiente procedimiento: se calcula el volumen que definen las secciones S_1 y S_2 con la siguiente fórmula:

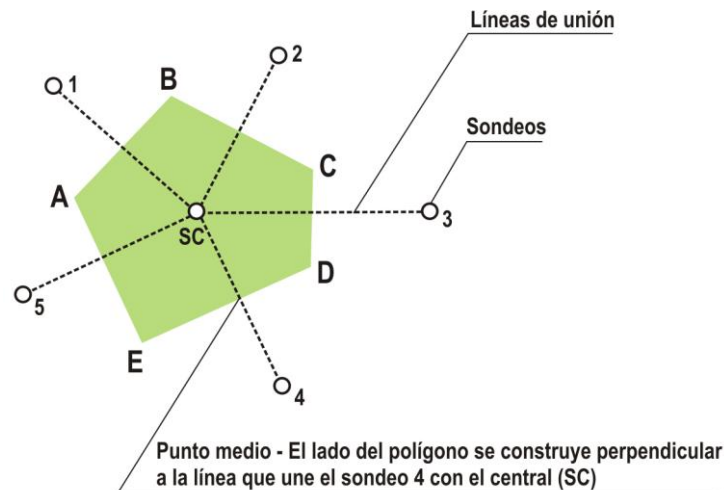
$$\text{Volumen}_{S1-S2} = (\text{Area de } S_1 + \text{Area de } S_2) \times D/2$$

Y así sucesivamente completando el cuerpo mineralizado considerando todas sus secciones. Al volumen final se le aplica una densidad (peso específico de la roca mineralizada) y una ley media global → toneladas a una ley específica.

Otro sistema es el denominado método de los polígonos. Este método ha sido utilizado por la industria minera durante décadas. Es un método simple, las matemáticas son fáciles, y las estimaciones pueden ser realizadas de manera rápida. Se emplea principalmente en cuerpos tabulares (p.ej., filones). Los sondeos se dirigen normalmente a 90° con respecto a la masa tabular bajo evaluación. Para la construcción de los polígonos se pueden emplear dos procedimientos:

- Bisectores perpendiculares.
- Bisectores angulares.

En el primer caso, el polígono se construye trazando perpendiculares a las líneas de segmento (bisectores perpendiculares) que unen los sondeos periféricos con el sondeo central. Dicha perpendicular pasa por el punto medio de las líneas de unión. A cada polígono se le asigna una potencia (espesor de la masa mineralizada económica: P) y una ley (L).

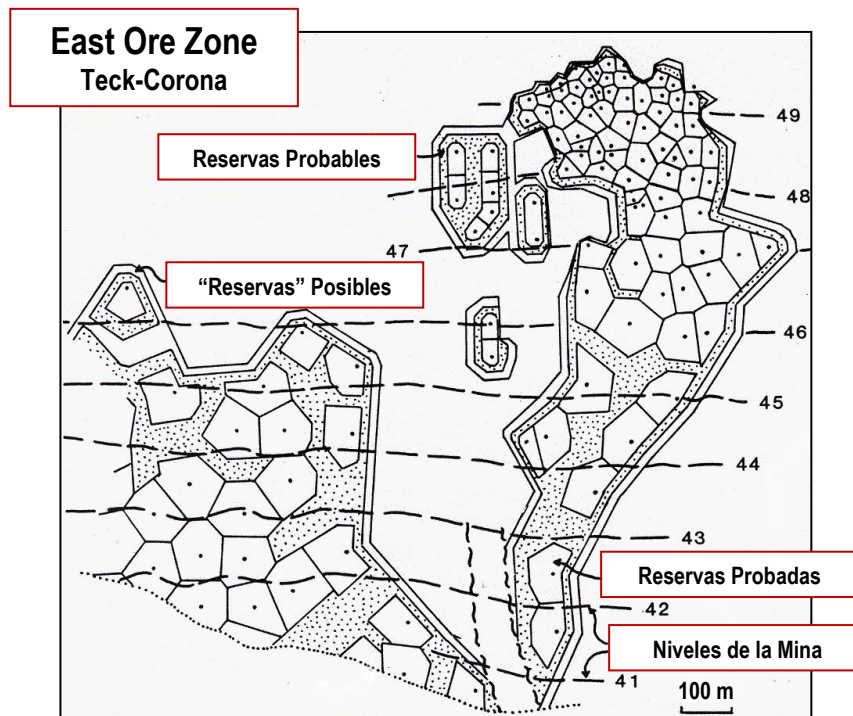


Método de los bisectores perpendiculares. Adaptada y ligeramente modificada de Annels (1991).

La ley (L) se determinará de la siguiente manera:

$$L_{ABCDE} = (L_{SC} \times 0,5) + (L_1 \times 0,1) + (L_2 \times 0,1) + (L_3 \times 0,1) + (L_4 \times 0,1) + (L_5 \times 0,1)$$

Por supuesto la mayor ponderación (50%) se la asigna al sondeo central.



Ejemplo real de aplicación del método de los polígonos (cuerpo mineralizado estratoligado aurífero de Hemlo, Canadá). El depósito tiene una orientación E-W, buzando 65°N. El cuerpo ha sido proyectado en una sección vertical. Observe los polígonos con un punto (= sondeo) al centro, indicándose las reservas probadas, probables y posibles. Adaptada de Annels (1991).

4.3.3 Los problemas que se pueden presentar (y que se presentarán)

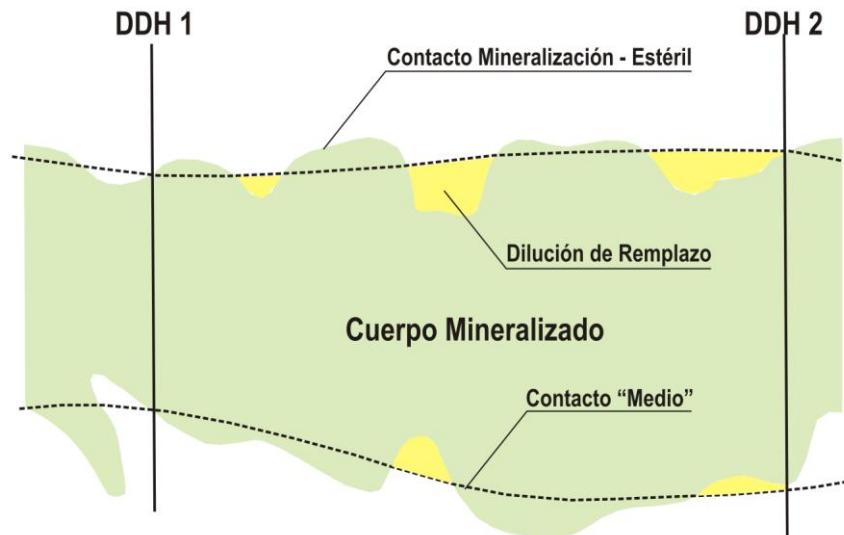
Hasta aquí los aspectos más básicos de la estimación de reservas. Para continuar necesitamos incorporar tres conceptos claves para entender la estimación de reservas en su perspectiva económica real:

- La dilución de leyes.
- El coeficiente de extracción.
- La recuperación de metal.

Resulta prácticamente imposible extraer solamente el material económico en una mina, de tal manera que durante el proceso de la voladura de roca quedará siempre incluido material estéril (lo cual conlleva la dilución de leyes). Las causas son las siguientes:

- Sobrevoladura: material que está fuera de los límites económicos del cuerpo mineralizado queda incluido en el material extraído.
- Dilución interna: material sub-económico que se encuentra incluido dentro del cuerpo económico y que no puede ser segregado.

- Dilución de reemplazo o contacto: si el contacto estéril/mineral es muy irregular (y esto suele bastante normal), el resultado será que un volumen equivalente de material estéril substituirá al material económico. Aunque la voladura de roca es un arte que en ocasiones roza la perfección, tampoco se le pueden pedir milagros.



Ejemplo de dilución de reemplazo. En verde el cuerpo mineralizado, mientras que la línea de segmento marca lo que se puede "cortar" mediante voladura (contacto medio). Observe como en el material que se va a arrancar, entran zonas de roca estéril, y como a su vez, zonas de mineral económico quedan fuera. Adaptada y ligeramente modificada de Annels (1991).

Las minas operan con valores establecidos de dilución, que deben ser aplicados a las determinaciones de tonelaje realizadas por los geólogos. A esto hay que sumarle el concepto de "mineral extraíble". Es prácticamente imposible extraer el 100% del material económico de una mina. En el caso de una mina subterránea es fácil de entender esta situación, pero tengamos en cuenta, que en cierta medida lo mismo se aplica a las minas a cielo abierto. Si queremos que la mina no colapse, obviamente no se podrá extraer de ella todo el material que queremos.

Por ejemplo, es posible que solo el 80% del material será susceptible de ser extraído si se desea mantener límites adecuados de seguridad. Así, y siguiendo este ejemplo, para una reserva "geológica" de 10.000 toneladas métricas (TM) de mineral al 2,3% Cu, con un factor de extracción del 80%, y una dilución del 10% tendremos:

$$10.000 \times 0,8 = 8000 \text{ TM al } 2.3\% \text{ Cu}$$

Si aplicamos a esta cifra una dilución del 10% tendremos:

$$8000 \times 1,1 = 8800 \text{ TM}$$

y la ley diluida será de:

$$\text{Ley}_{\text{diluida}} = (8000 \times 2,3\%) / 8800 = 2,09\% \text{ Cu}$$

Hagamos notar que de nuestra ley y de las toneladas geológicas del recurso inicial (10.000 toneladas al 2,3% Cu) nos hemos quedado en 8800 toneladas al 2,09% Cu. Hasta aquí la parte “minera” del problema, pero a esto tenemos que agregarle la problemática de la recuperación metalúrgica del metal en cuestión. Sigamos con el mismo ejemplo. Una tonelada de material de mina al 2,09% Cu contiene 20,9 kilos de cobre. Si este material da unos 65 kilos de concentrado al 30% Cu, entonces tendremos:

$$65 \text{ kg} \times 0,30 = 19,5 \text{ kg}$$

La recuperación metalúrgica será entonces de:

$$19,5 / 20,9 = 0,93 \text{ (93\%)}$$

Hasta aquí con la problemática clásica de la estimación de reservas y los subsecuentes problemas minero-metalúrgicos. A continuación revisaremos de una manera sinóptica los métodos geoestadísticos, pieza clave en la estimación de reservas en cualquier gran empresa minera.

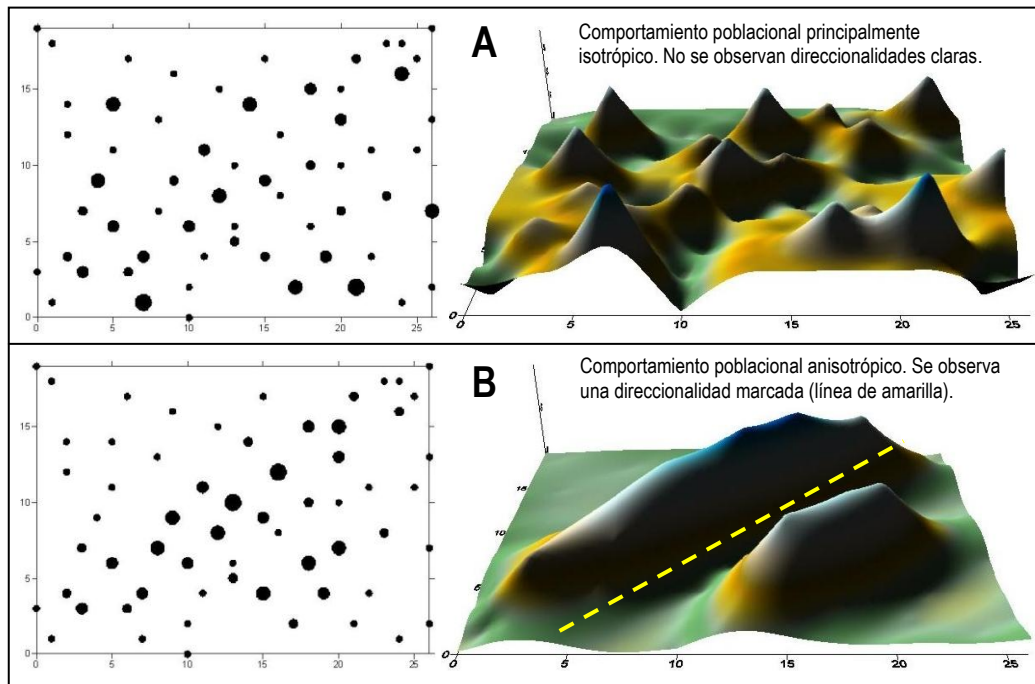
4.3.3 La geoestadística: introducción al variograma (variografía)

Si dijéramos que hay dos mundos en la estimación de reservas, y que el nuevo se debe a Georges Matheron no exageraríamos en absoluto. Georges François Paul Marie Matheron (1930-2000) (Wikipedia, 2011) fue un matemático y geólogo francés, conocido como el fundador de la geoestadística. Matheron se graduó en la Ecole Polytechnique y luego en la Ecole des Mines de París, donde estudió matemáticas, física y teoría de la probabilidad. De 1954 a 1963, trabajó en el Servicio Geológico de Francia (BRGM) en Argelia y Francia, donde conoció los trabajos de Krige, Sichel, y de Wijs, de la escuela de matemáticas aplicada sudafricana. En 1968 (fecha clave) se creó el Centro de Geoestadística y Morfología Matemática en la Escuela de Minas de París (Fontainebleau).

A Matheron le debemos dos grandes ideas, la primera circula en torno al concepto del variograma, la segunda, en la aplicación del variograma a la técnica de *kriging* (término que él acuñó). Los libros sobre geoestadística destacan por su incapacidad para explicar “qué es el variograma” y segundo, “para que sirve”, aunque para ser justos, hay que reconocer que Isobel Clark en sus dos obras

conocidas por el autor (Clark, 1979; Clark y Harper, 2001) consigue explicar la geoestadística en términos sencillos a través de ejemplos claros y directos.

Antes de entrar en materia vamos a remontarnos al mundo “pre Matheron”, un mundo con una estadística desprovista de toda noción espacial. Aquí está la clave, porque los datos geológicos muchas veces tienen “direccionalidad”. Pensemos en el siguiente ejemplo no relacionado con la geología, sino que con la distribución de ingresos en una gran ciudad como Madrid o Santiago de Chile. Las estadísticas del Estado nos dirán cuales son los ingresos medios de la población (sin ni siquiera molestarse en ofrecer un dato tan relevante como la desviación estándar). Pero luego ¿qué? Todos sabemos que ambas ciudades existen sectores de mayores y menores ingresos. En Madrid estos suben hacia el Norte y en Santiago hacia el Este. ¿De qué hablamos entonces? De “direccionalidad” de los datos, en otras palabras, de un comportamiento anisotrópico de los mismos. Veamos ahora el siguiente ejemplo “geológico”:



Tanto en A como en B la disposición de las muestras en el plano X-Y es la misma, lo que varía es el valor de estas (círculos de mayor o menos tamaño). A la derecha se ha realizado una representación 3D por kriging después de modelizar el variograma de los datos.

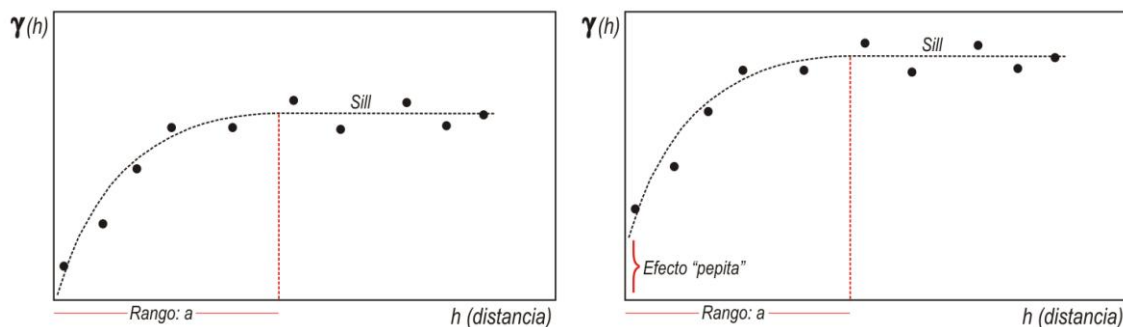
La figura superior perfectamente podría representar la distribución en un espacio X-Y de muestras de geoquímica de una zona. Con los datos poblacionales utilizados en este ejemplo, tanto la media como la desviación estándar en A y B son las mismas: 0,93 y 1,20 respectivamente. Si nos ofrecen esta información sin más explicaciones, podríamos decir que ambas poblaciones son “idénticas”, lo cual salta a la vista que no es así.

La siguiente pregunta que debemos hacernos es cómo determinar la direccionalidad de los datos, y tan importante como esta, cuál es la distancia máxima a la que dos muestras en el espacio se relacionan entre sí. La última pregunta no es baladí, ya que enfrentados a ubicar un cuerpo mineral, primero deberemos asegurarnos que la densidad espacial de datos es la suficiente como para no cometer errores interpretativos.

Podemos definir un variograma como una función matemática que nos permite estudiar las diferencias entre muestras y la direccionalidad (anisotropía) de los valores. Realicemos la siguiente abstracción mental, si la distancia h entre dos muestras es igual a 0, la diferencia entre los valores de estas será nula (y la varianza = 0). Si ambas muestras están muy cerca, existirá una diferencia, pero esta, expresada como varianza, será muy pequeña. Sin embargo, a medida que las muestras estén más alejadas, llegará un momento en el cual deje de haber una “relación” entre estas. ¿Cómo podemos determinar esto? mediante la construcción matemática de un variograma experimental y su ulterior modelización. En términos muy simples podemos definir el variograma (Clark, 1979) como:

$$\gamma(h) = 1/2n \sum [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

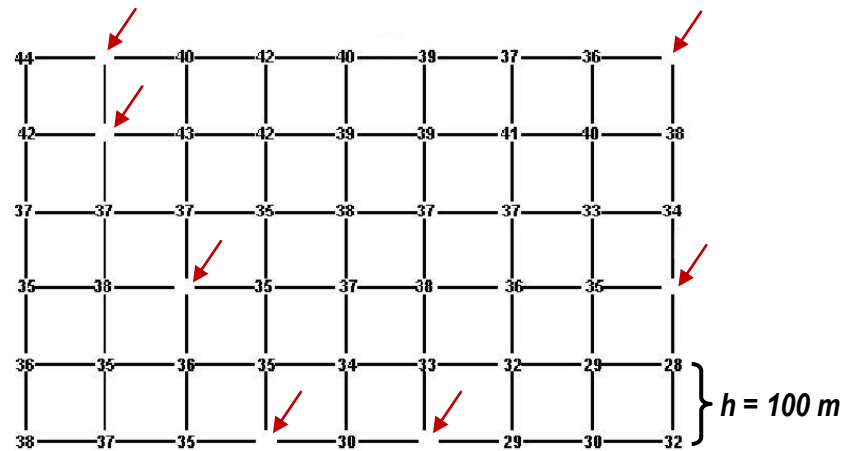
Donde h es la distancia entre los pares; n es el número de pares; y $Z(x_i)$ es el valor de la muestra en unas coordenadas X-Y específicas.



A la izquierda, ejemplo clásico de un variograma experimental ajustado al llamado “modelo esférico”. La varianza crece sistemáticamente hasta “a” (rango o alcance) distancia a partir de la cual las muestras empiezan a ser independientes unas de otras. El “sill” muestra la zona de la curva donde los valores ya no se relacionan. A la derecha, y a diferencia del caso anterior donde la curva empieza en el origen del sistema XY (varianza 0), aquí observamos el denominado efecto pepita (Nugget Effect), que se debe a fluctuaciones aleatorias de la variable o a errores en el muestreo.

¿Pero cómo se construye un variograma experimental? ¿De donde salen los puntos en un gráfico de esta naturaleza? Isobel Clark en su obra ya clásica

Practical Geostatistics (1979) nos propone el siguiente ejemplo. Imaginemos una malla cuadrada donde se han tomado una serie de muestras con determinados valores, y digamos que la distancia entre muestras es de 100 m.



Ejemplo de una malla de 100 x 100 m con valores que pueden corresponder a leyes, por ejemplo, de hierro (en %). Note los puntos en blanco marcados por las flechas rojas. Ahí no se pudo muestrear por las razones que sean. Adaptada y ligeramente modificada de Clark (1979).

El primer punto de nuestra función $\gamma(h)$ vendrá dado por $\gamma(100)$, esto es, la media de los cuadrados de las diferencias entre todos los pares de muestras separados por una distancia de 100 m:

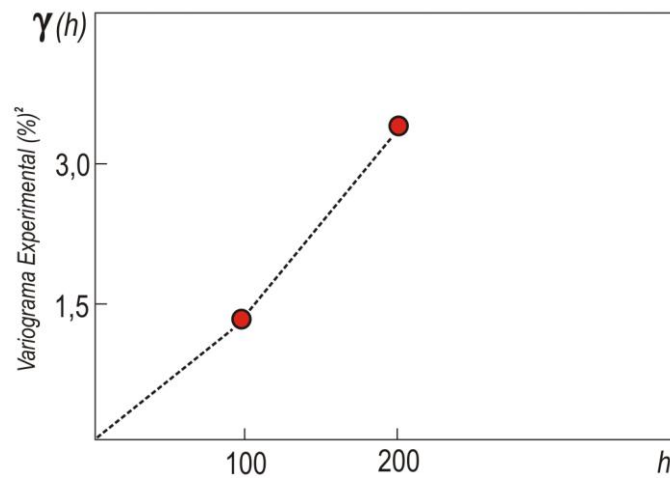
| | |
|--|---|
| | $\gamma^*(100) = \begin{aligned} &[(40-42)^2 + (42-40)^2 + (40-39)^2 + (39-37)^2 \\ &+ (37-36)^2 + (43-42)^2 + (42-39)^2 + (39-39)^2 \\ &+ (39-41)^2 + (41-40)^2 + (40-38)^2 + (37-37)^2 \\ &+ (37-37)^2 + (37-35)^2 + (35-38)^2 + (38-37)^2 \\ &+ (37-37)^2 + (37-33)^2 + (33-34)^2 + (35-38)^2 \\ &+ (35-37)^2 + (37-36)^2 + (36-36)^2 + (36-35)^2 \\ &+ (36-35)^2 + (35-36)^2 + (36-35)^2 + (35-34)^2 \\ &+ (34-33)^2 + (33-32)^2 + (32-29)^2 + (29-28)^2 \\ &+ (38-37)^2 + (37-35)^2 + (29-30)^2 \\ &+ (30-32)^2] \div (2 \times 36) \end{aligned}$ |
| | $\gamma^*(100) = 1.46(\%)^2$ |

Datos: los de la malla de la figura anterior. Note que el avance se verifica horizontalmente (E-W) de izquierda a derecha y por filas descendentes. Cuando hay espacios vacíos (sin muestra) solo se considera el par de datos adyacentes siguiente. A la derecha se pueden apreciar los cálculos realizados (Clark, 1979).

| | |
|--|---|
| | $\gamma^*(200) = \begin{aligned} &[(44-40)^2 + (40-40)^2 + (42-39)^2 + (40-37)^2 \\ &+ (39-36)^2 + (42-43)^2 + (43-39)^2 + (42-39)^2 \\ &+ (39-41)^2 + (39-40)^2 + (41-38)^2 + (37-37)^2 \\ &+ (37-35)^2 + (37-38)^2 + (35-37)^2 + (38-37)^2 \\ &+ (37-33)^2 + (37-34)^2 + (38-35)^2 + (35-36)^2 \\ &+ (37-36)^2 + (36-35)^2 + (36-36)^2 + (35-35)^2 \\ &+ (36-34)^2 + (35-33)^2 + (34-32)^2 + (33-29)^2 \\ &+ (32-28)^2 + (38-35)^2 + (35-30)^2 + (30-29)^2 \\ &+ (29-32)^2] \div (2 \times 33) \end{aligned}$ |
| | $\gamma^*(200) = 3.30(\%)^2$ |

Realizamos a continuación un procedimiento similar al anterior, pero esta vez considerando pares de muestra espaciados a 200 m, y así obtendremos $\gamma(200) = 3,30 (\%)^2$ (Clark, 1979).

Estos puntos aparecerán en el variograma experimental de la siguiente manera:



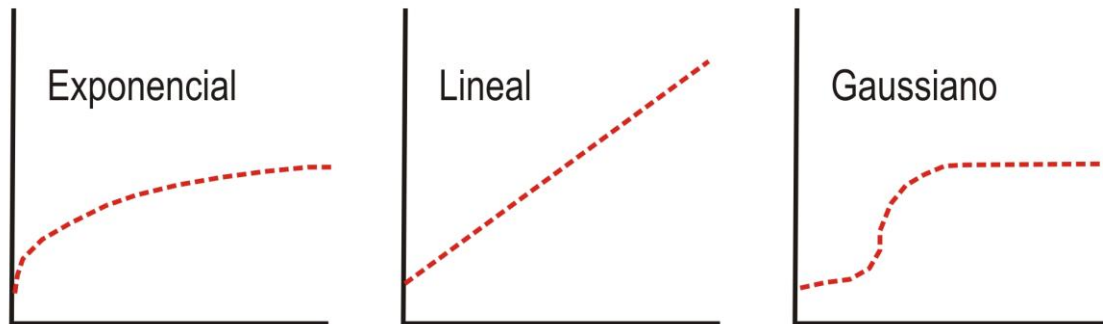
Variograma experimental para el ejercicio de la página anterior: $\gamma(100)$ y $\gamma(200)$.

Y así continuaríamos con $\gamma(300)$, $\gamma(400)$, $\gamma(500)$, etc. Podríamos continuar de esta manera hasta 800 m, la máxima distancia muestreada, pero en general, se suele ir (particularmente si los cálculos son “a mano”), hasta la mitad de la distancia, esto es, 400 m. En este caso estamos realizando un variograma experimental E-W, pero como ya hemos discutido previamente, la distribución de los valores en el espacio puede variar según la dirección en que nos movamos (anisotropía). De ahí que sea importante realizar estas operaciones en al menos tres direcciones en un plano XY: N-S, E-W, y NW-SE, para comprobar el grado de anisotropía del sistema.

El uso de paquetes informáticos modernos permite realizar estas operaciones con mucha facilidad en ordenadores tipo PC (entorno Windows), y un número de estos, entrega por *default* el denominado “variograma omnidireccional”, esto es, un “promedio” de los distintos posibles variogramas que se pueden realizar para diferentes direcciones. Aunque algunos programas como Surfer8® (para trabajos en dos dimensiones) determinan además el grado y dirección de la anisotropía, conviene no obstante cerciorarse geológicamente de la validez del variograma omnidireccional, esto es, determinar si la anisotropía (o ausencia de esta) detectada tiene o no sentido. En otras palabras, un programa será tan bueno o tan malo como quien lo utilice. Cabe destacar no obstante, que programas como Surfer8® permiten además realizar variogramas experimentales en direcciones concretas fijadas por el operador.

De cualquier manera, todo esto es “algo más” que pasar los datos (XYZ) a un archivo Excel y pedirle al programa que nos proyecte los datos de la función $\gamma(h)$. Una vez que aparezcan los datos en el gráfico (variograma experimental), deberemos seleccionar el modelo que mejor se ajuste a nuestros datos.

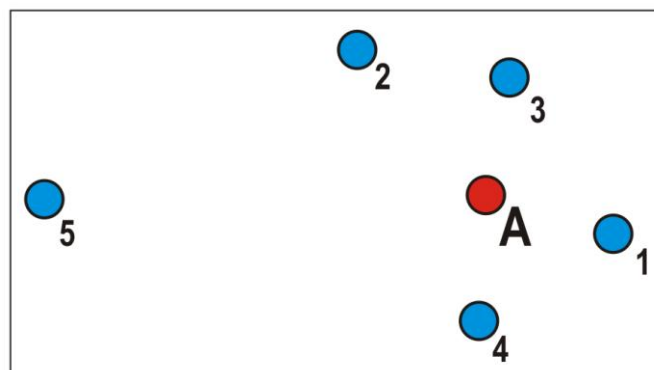
Ya hemos visto al comienzo la representación del denominado modelo esférico (con o sin efecto pepita: *nugget*). Aunque este suele ajustarse bastante bien a muchos casos en minería o geoquímica, conviene que conozcamos otros modelos.



Distintos modelos de variograma.

Esta fase del trabajo es muy importante, ya que el trabajo de *kriging* depende totalmente: 1) del modelo a utilizar; y 2) del grado y direccionalidad de la anisotropía. En otras palabras, el *kriging* será tan bueno o tan malo como el ajuste previo que hayamos realizado en el variograma. Pero ¿qué es *kriging* exactamente? A varios efectos podemos definirlo como un método de interpolación, aunque como veremos, el *kriging* aplicado a la estimación de leyes y reservas (o a tendencias geoquímicas en trabajos de prospección), es mucho más que esto.

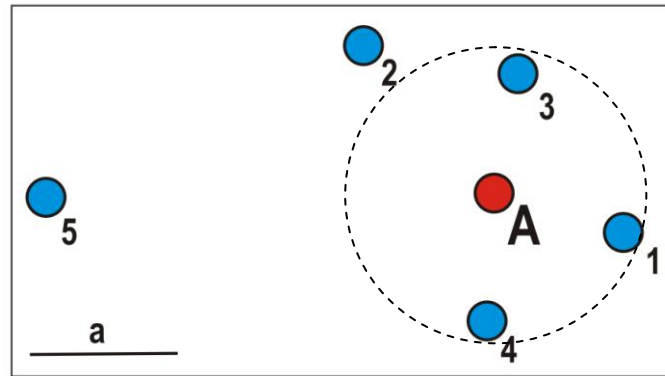
Consideremos el siguiente problema, tenemos varios puntos de muestreo, con sus respectivos valores, y deseamos estimar el valor (Z) del punto A:



Tenemos cinco muestras en las cercanías de A y queremos realizar una estimación de Z (el valor, por ejemplo la ley, en ese punto). Salta a la vista que la muestra 5 está demasiado lejos como para intervenir en la estimación, pero las otras ¿valen o no?

Se nos ofrecen múltiples posibilidades, empezando por decidir que el punto 4 tendrá “más influencia” que digamos el punto 5. Sin embargo ¿cuánta más influencia debería tener? Aquí entramos en el problema de la ponderación y los métodos matemáticos clásicos de interpolación (p.ej., inversos de la distancia, inversos de los cuadrados de la distancia, etc.). Ahora es cuando todo empieza a

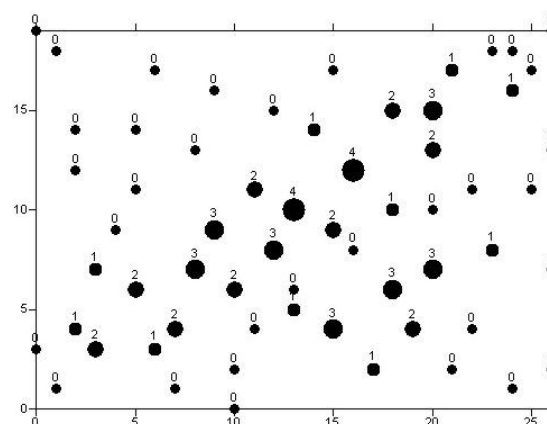
tener más sentido: necesitamos el variograma para determinar “qué” muestras pueden tener una influencia “real” en la estimación de la ley (o cualquier otra variable que estemos considerando), ya que el “alcance” (rango **a**) nos da una idea de hasta que distancia existe una “relación” entre las muestras. Por ejemplo, si el alcance determinado por la modelización del variograma fuera de “a” metros, las muestras 2 y 5 tendrían que ser descartadas para una estimación del valor en A.



Las muestras 2 y 5 están a mayor distancia del punto de estimación (A) que la del rango “a” determinado por el variograma, y por lo tanto no deben ser consideradas para realizar una estimación de Z (valor) en A.

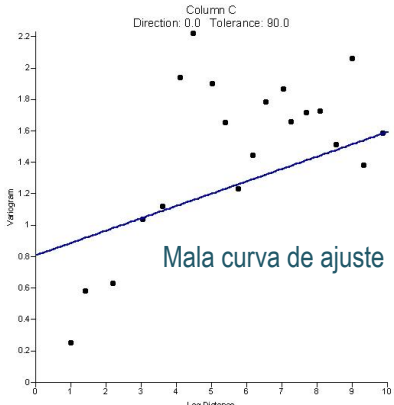
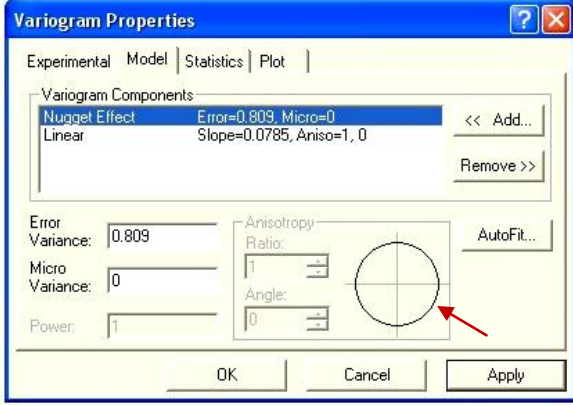
A efectos prácticos, todos los cálculos son realizados hoy en día por programas especializados, algunos de los cuales pueden ser muy caros (miles a decenas de euros). Opciones relativamente económicas son programas como Surfer8® o EcoSSe®, que como contrapartida no permiten el diseño y estudio de bloques (donde realizar *block kriging* en el sentido “minero” del término), aunque se puede realizar una buena modelización de variogramas experimentales y desarrollar *kriging* puntual. De esta manera se pueden obtener mapas donde la interpolación de valores en el espacio XY está controlada por la función $\gamma(h)$.

Volvamos a uno de los ejemplos del principio (ejemplo B) trabajando con Surfer8®:

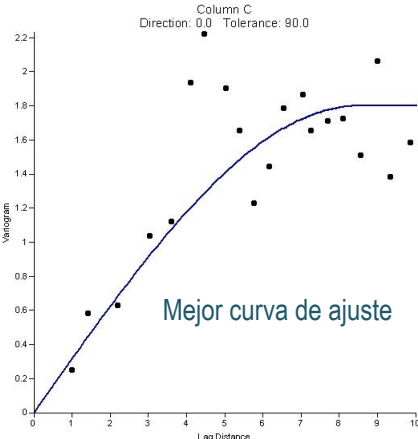
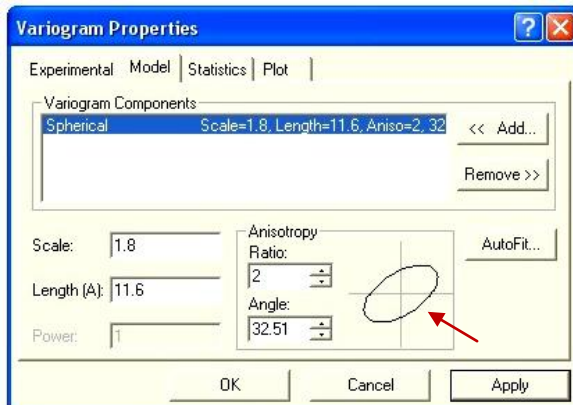


La única diferencia con el ejemplo B del comienzo (datos fuertemente anisotrópicos), es que los valores de los datos (Z) aparecen ahora sobre los círculos, y son el punto de partida para la modelización que sigue.

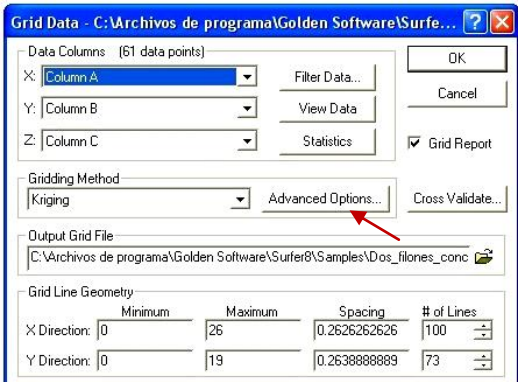
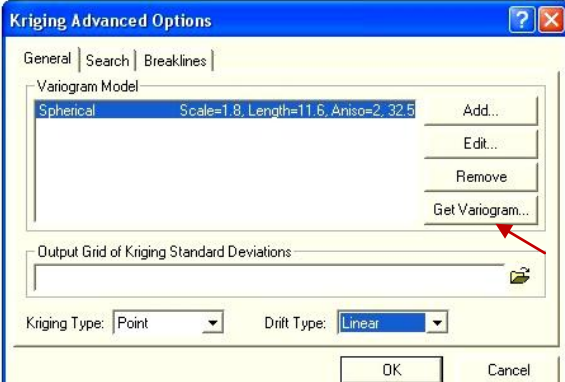
Con los datos de la figura de arriba y sus respectivas posiciones en el espacio XY desarrollamos el variograma experimental, y a partir de este, buscaremos el modelo que mejor se ajuste a la distribución (ver siguiente cuadro).

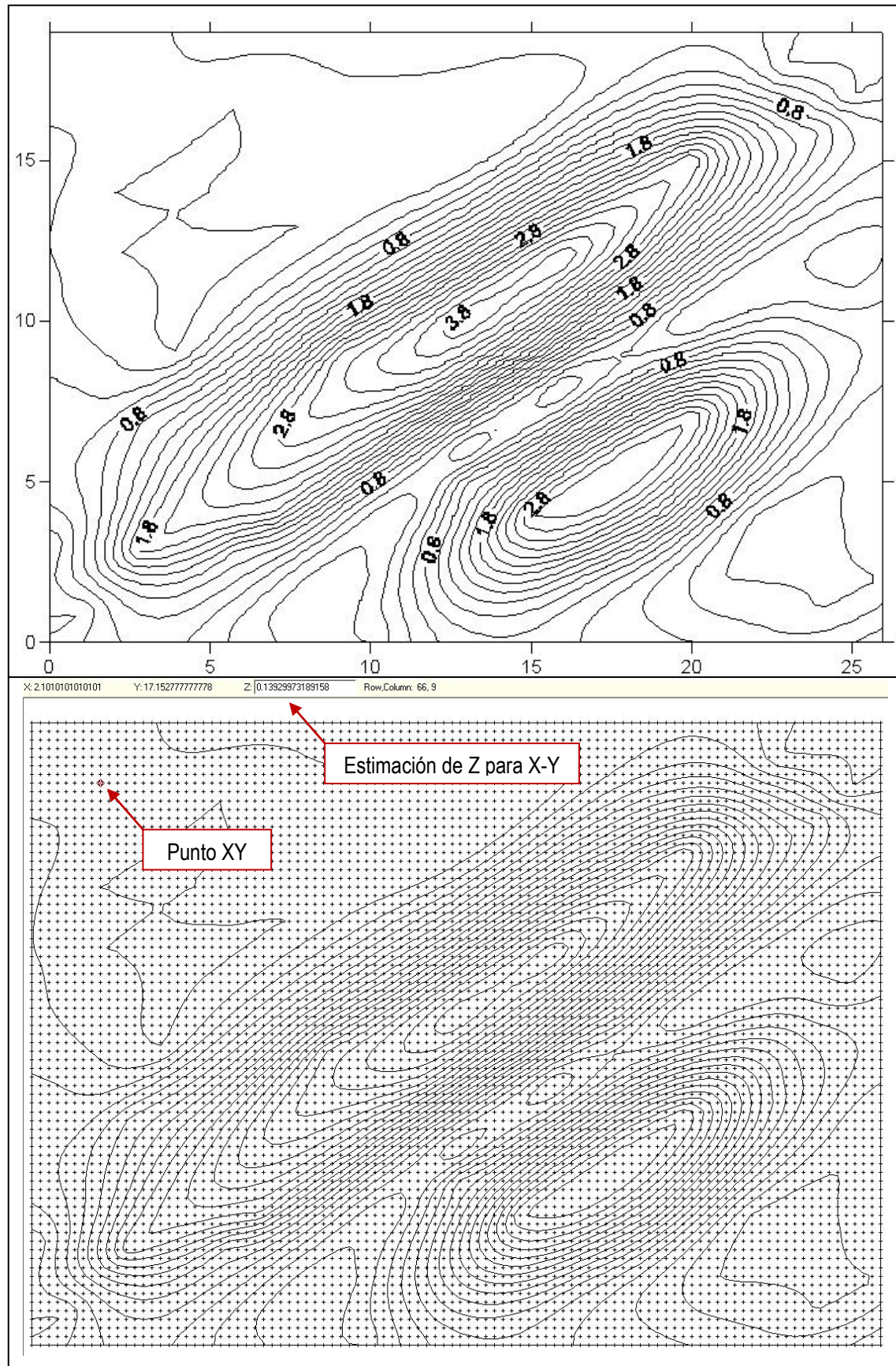
1. Sin modelizar no tenemos ningún efecto de anisotropía (ver círculo perfecto a la derecha (flecha). La primera función que decide el programa en este caso es una de tipo lineal, la que no se ajusta adecuadamente a la distribución de puntos.

2. Pero dado que observamos que existe una tendencia de los puntos hacia el origen del sistema, con un cierto desarrollo de sill hacia la derecha, modelizamos a un variograma esférico (el ejemplo no es “perfecto”, pero se aproxima), y ahí empezamos detectar la fuerte anisotropía del sistema (ver elipse y su orientación: direccionalidad de los datos; flecha). La orientación de la elipse es NE lo cual coincide perfectamente con la distribución de los datos.

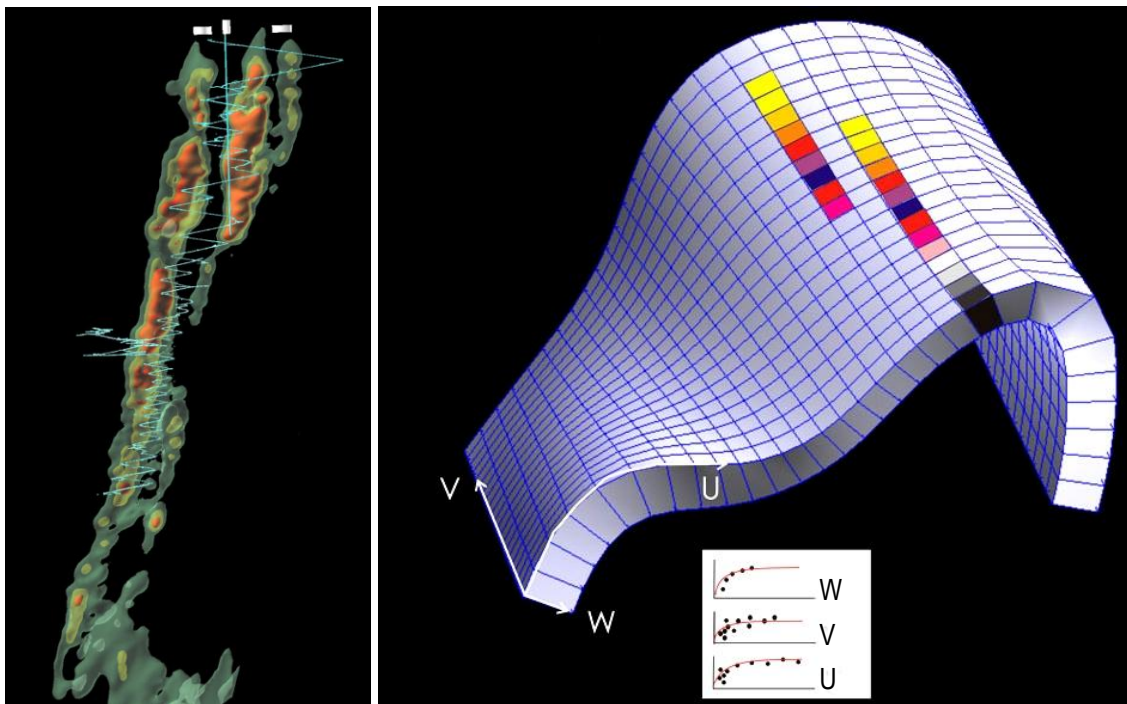
3. En la ventana de kriging, seleccionamos opciones avanzadas (izquierda, flecha), y una vez en estas, seleccionamos desde pantalla el variograma que hemos modelizado. Este paso es crítico para poder realizar un kriging ajustado a la anisotropía específica de los datos.



Arriba, resultado del kriging realizado a partir del punto 3 de la página anterior. Abajo, Archivo GRD donde podemos estimar el valor de Z en cualquiera de los nodos generados por el programa. Por ejemplo, el punto rojo arriba a la izquierda tiene un valor estimado de 0,139.

Las potencialidades de esta técnica en los tiempos actuales son virtualmente infinitas, y van desde la modelización de bloques de explotación en minas, pasando por la exploración, hasta la geología ambiental. Hoy casi no se concibe la gran minería sin la ayuda de medios geoestadísticos. Tan solo resulta preocupante que las empresas estén más obsesionadas en contratar geólogos que sepan operar un determinado software de estimación de reservas a que estos controlen “auténticamente” los conceptos estadísticos y geológicos que hay detrás del mismo.

Volviendo a la minería, a la escala de trabajo de una mina la generación de blancos de exploración es ahora un ejercicio predictivo totalmente digital en 3D, aunque previamente necesitamos hacernos las siguientes preguntas (de Kemp, 2007): ¿Por qué necesitamos realizar una modelización integrada 3D? ¿En qué consiste el blanco de exploración y como está caracterizado? ¿Qué piezas de información se requieren? Y finalmente ¿Cómo decidiremos que el ejercicio ha tenido éxito?



A la izquierda, simulación geoestadística de la distribución de cobre que muestra los resultados para 1% Cu (verde oscuro), 2% Cu (verde claro) y 3% Cu (rojo) en el Yacimiento de Kid Creek (Canadá); a la derecha, modelización mediante variografía para kriging en bloques, observe que los variogramas para V y U (tipo esférico) presentan efecto pepita. Adaptada de: de Kemp (2007).

Bibliografía

Atención: Algunos links han sido divididos por estética, deberán ser restaurados antes de pegar en un browser.

- Annels, A.E., 1991. Mineral Deposit Evaluation: a Practical Approach. Chapman & Hall, London, 435 pp.
- Clark, I. 1979. Practical Geostatistics. Applied Science Publishers LTD, Essex, 129 pp.
- Clark, I. y Harper, W.V., 2001. Practical geostatistics 2000. Ecosse North America Llc., Columbus, 342 pp.
- De Kemp, E.A., 2007. 3-D geological modelling supporting mineral exploration. En: W.D. Goodfellow, W.D. (Ed.) Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5, 1051-1061.
- Lowell, J.D., 1987. Exploración geológico-minera: aspectos prácticos. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.
- Marjoribanks, R. 1997. Geological Methods in Mineral Exploration. Chapman & Hall, London, 115 pp.
- Rivera, S.L., Alcota, H., Fontecilla, C. y Kovacic, P., 2009. Supergene modification of porphyry columns and the application to exploration with special reference to the southern part of the Chuquicamata District, Chile. Society of Economic Geologists, Special Publication no. 14, 1-14.
- Stone, J.G. y Dunn, P.G., 1993. Ore reserve Estimates in the Real World. Society of Economic Geologists, Special Publication no. 3, 150 pp.
- Wikipedia, 2011. Georges Matheron. http://en.wikipedia.org/wiki/Georges_Matheron

Fuente de las imágenes (a Julio de 2011)

1. <http://www.aurumexploration.com/exploration-services.html>
2. http://spanish.orosur.ca/media/download_library/index.php?content_id=24&page_number=1&mode=print
3. http://www.marianaresources.com/gallery/argentina_las_calandrias.php
4. <http://www.atlascopcoexploration.com/EN/home/index.php>

5.1 Como empezó todo

El papel del geólogo de 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. Cuenta St. John (1988) que en la década de los años 1920's, el contenido en oro del yacimiento de Homestake (Dakota del Sur, Estados Unidos) decrecía y parecía que se iba a agotar el rico filón. Dos ingenieros de la plantilla (*staff*) 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.

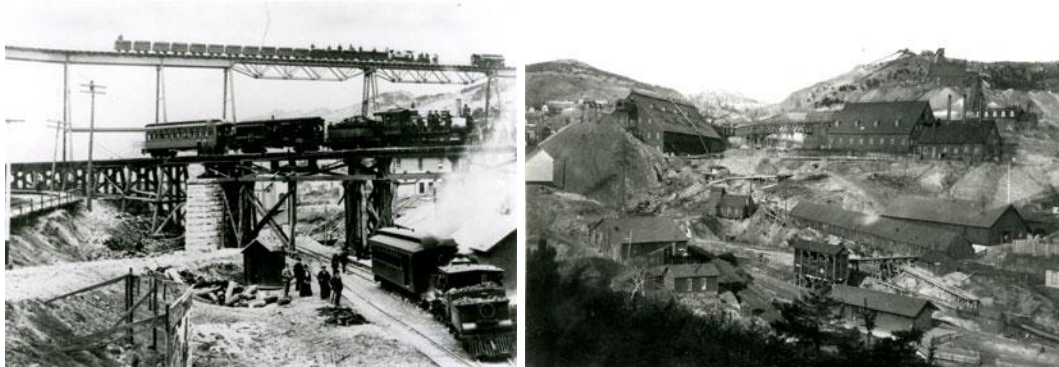
El presidente de la compañía, Edward Clark, no daba crédito a los informes pesimistas, aunque era evidente que la producción estaba disminuyendo. Contrariamente a las costumbres de la época se tomó la decisión de pedir un segundo informe a otro experto, un geólogo de minas perteneciente a una institución 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 de Perú. McLaughlin pasó el verano de 1926

Donald Hamilton McLaughlin

Donald Hamilton McLaughlin was born in San Francisco on 15 December 1891, the son of William Henry and Katherine Hamilton McLaughlin. His father, a doctor, died when he was seven years old. His mother was employed as personal assistant to Phoebe Apperson Hearst, in whose home he spent much of his early years. Throughout her life Mrs. Hearst showed a lively interest in his life and career, urging him to pursue graduate work. McLaughlin received a B.S. in mining engineering from the University of California, Berkeley in 1914. He received an A.M. (1915) and a Ph.D. (1917) in geology from Harvard, with a dissertation on the ores of the Homestake Mine, a San Francisco gold mining company whose primary operation was in South Dakota. He was described by a colleague as having been "born a geologist." McLaughlin served as a lieutenant in the Army's 63d Infantry until the end of World War I. His first job after the war was as a geologist with the Hearst owned Cerro de Pasco Corporation in Peru. Six years later he was chief geologist, when he accepted an offer of a full professorship at Harvard, then (in 1925), the youngest professor ever appointed. He remained on the Harvard faculty sixteen years. Two of his students were later to follow him as Homestake president: John K. Gustafson and Paul C. Henshaw. In 1941 Robert Gordon Sproul lured McLaughlin to the University of California, Berkeley, by asking him to be Dean of Engineering and to consolidate the College of Mining with the College of Engineering. That same year he was named to the Board of Directors of the Homestake Mining Company, where he had been a consulting geologist since 1926. In 1945 he resigned from the Berkeley faculty to become president of Homestake, serving until 1961, when he became chairman of the board.

SNAC (2011)

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.



Antiguas fotografías de Homestake (imágenes¹)

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.

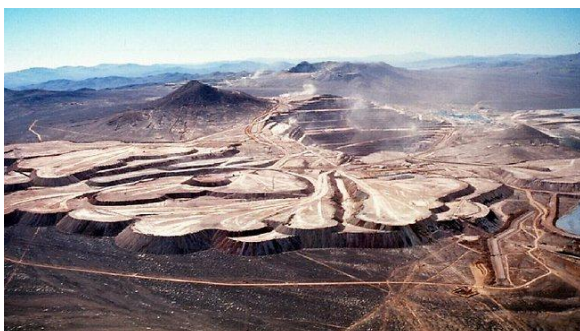
Pero hacer mapas geológicos es solo parte de las múltiples tareas que desempeñan hoy en día los geólogos en una empresa minera importante, las cuales van desde cargos de producción a gerenciales. Sobre estos temas nos referiremos a continuación.

5.2 ¿Qué geólogos buscan actualmente las empresas mineras?

5.2.1 Lo que nos muestran los anuncios de empleos

Haciendo una rápida búsqueda en Google aparecen dos ofertas de empleo recientes para operaciones mineras en Chile. No son las “únicas”, las hay a montones, y no solo para Chile sino que para Perú y otros países de Iberoamérica y el mundo. Estas dos ofertas seleccionadas explican con cierto detalle lo que “se espera” de los candidatos. Mostraremos a continuación el contenido de estas ofertas de empleo, agregando entre paréntesis el equivalente en castellano de España si los términos en uso en un país u otro difieren. La primera oferta es variada, para Minera Escondida y aparece en una página de UtilitiesJobs.com (2011):

Minera Escondida Ltda. - Antofagasta - Chile



Mina Escondida (imagen²)

Geólogo de Modelamiento (Modelización) y Estimación de Recursos, Geólogo Mina, Geólogo Exploraciones, Hidrogeólogo.

A) Geólogo de Modelamiento (Modelización) y Estimación de Recursos: Planificar, coordinar y ejecutar actividades de modelamiento (modelización) geológico(a) requeridas en los procesos de estimación de recursos geológicos para las operaciones de Minera Escondida y áreas de exploración y desarrollo.

- 1. Dirigir, controlar y ejecutar el proceso de modelamiento (modelización) geológico(a) y la estimación de los recursos geológicos de largo y mediano plazo de las operaciones de Minera Escondida; además de apoyar en modelamiento (modelización) geológico(a) para el área de desarrollo y exploraciones.*
- 2. Controlar que la interpretación y modelamiento (modelización) geológico(a) y la estimación de recursos geológicos cumpla con los estándares requeridos por BHP Billiton, a fin de garantizar la calidad de los modelos geológicos y de recursos, en lo que se refiere a calidad e integridad de los datos (QA/QC), validación, límites del modelo, relación de contacto, tamaño, forma y calidad de la interpretación geológica.*
- 3. Velar por el uso y administración responsable y óptima de los recursos geológicos de la compañía.*

4. *Aplicar un liderazgo efectivo que fomente una alta motivación y productividad del equipo de trabajo, garantizando el cumplimiento de la visión, misión, valores y objetivos de BHP Billiton en la gestión del área.*
5. *Asegurar que en el desarrollo de sus actividades y aquellas del personal a su cargo, ya sea propio o contratistas, se dé cumplimiento a lo indicado en sistema de gestión integrado HSEC, Política de Desarrollo Sostenible, Normas Básicas, Protocolos de control de riesgos de fatalidades y normativa legal vigente nacional, como aquella emanada por la corporación.*

Se requiere experiencia y conocimiento probado en pórfidos cupríferos, en técnicas de modelamiento (modelización) geológico(a) y estimación de recursos. Uso de bases de datos AcQuire, construcción y reconciliación de Modelos Geológicos. Habilidad para interpretar datos e identificar conclusiones válidas y conocimientos en Geoestadística Avanzada. Manejo de Vulcan, ArcGis y deseable dominio de idioma inglés.

B) Geólogo de Mina: Supervisar y ejecutar el mapeo (cartografía) geológico(a) - estructural – geotécnico(a), modelamiento (modelización) estructural y proyectos especiales de los yacimientos, con el objetivo de suministrar información actualizada a los modelos geológicos, así como a las áreas operativas de las minas (geotecnia, perforación y tronadura (voladura), planificación, geometalurgia, procesos).

1. *Ejecutar el levantamiento y validación geológica-geotécnica y estructural de todos los bancos en ambos yacimientos (Escondida y Escondida Norte).*
2. *Actualización periódica de modelos estructurales de ambos pits (cortas), desde las etapas de bases de datos, hasta la confección (desarrollo) de los modelos 3D.*
3. *Validación de la geología generada en el área de Geología de Sondajes (Sondeos), previo a su ingreso oficial en las bases de datos.*
4. *Desarrollo de proyectos enfocados al mejoramiento continuo de nuestros procesos, como también de la utilización o aplicabilidad en nuestras áreas clientes en los procesos operativos.*

Se requiere experiencia en geología de mina de pórfidos y modelamiento (modelización) geológico(a) de corto plazo, uso de bases de datos AcQuire a nivel usuario. Habilidad para interpretar antecedentes geológicos de terreno (campo) mediante mapeos (cartografías) geológicos(as) digitales de bancos, sondajes (sondeos) y zonas expuestas. Manejo (Uso) de Vulcan, ArcGis y deseable conocimiento y experiencia en geología de minas subterráneas y dominio de idioma inglés.

C) Geólogo de Exploraciones: Supervisar y ejecutar programa de actividades exploratorias definidas por la compañía en los diferentes proyectos, en los plazos y con la calidad comprometida. El desafío es tener un programa de perforación continuo y poder dar cumplimiento a los programas en tiempo y forma, para seguir avanzando en la calidad de la información geológica recopilada y entregada, con el propósito de mantener y aumentar el inventario de recursos geológicos de la compañía, dar soporte geológico efectivo, a los clientes internos y/o externos, de acuerdo a sus requerimientos.

1. *Ejecutar el programa de exploraciones diseñado para el proyecto involucrado.*
2. *Lograr un óptimo resultado en la prestación de servicios de terceros y que se ajusten a lo solicitado.*

3. Contribuir a optimizar la toma de decisiones acerca de la priorización y de las actividades exploratorias a seguir en los diferentes proyectos.
4. Efectúa y/o coordina muestreos específicos y especializados tanto en sondajes (sondeos) como en geología de superficie (tierras raras, Terraspec, geocronología por diferentes métodos, micropetrografía, entre otros) y controlar su seguimiento.

Se requiere experiencia en la interpretación geológica con amplia exposición a depósitos tipo pórfidos cupríferos; planificación y diseño de programas de exploración; control y ejecución de programas de sondajes (sondeos), muestreos específicos y especializados tanto en sondajes (sondeos) como en geología de superficie y subterránea. Conocimiento en máquinas de perforación. Manejo de Vulcan, ArcGis y deseable dominio de idioma inglés.

D) Hidrogeólogo: Asesorar técnicamente a Minera Escondida en todos los temas de aguas incluyendo un responsable uso de recursos, optimización de los programas de drenaje asociados con la estabilidad geotécnica; creación, gestión e implementación de planes relacionados a los recursos de agua subterránea y programas de despresurización de las paredes del rajo (corta), con el fin de lograr la optimización y sustentabilidad (sostenibilidad) del recurso agua en Minera Escondida.

1. Lograr la optimización del uso y desarrollo sustentable (sostenible) del recurso agua.
2. Asegurar el cumplimiento de leyes chilenas e internacionales.
3. Suministrar la información hidrogeológica para apoyar la producción de agua, dirección de agua y programas medioambientales, cumpliendo la política HSEC de la compañía.

Se requiere experiencia en el área Hidrogeología, asociado a modelamientos (modelizaciones), pruebas de bombeo, análisis de datos y cálculo de parámetros hidráulicos, en la perforación de pozos de agua, exploración y explotación del recurso hídrico. Manejo de herramientas de exploración como Geofísica superficial y de pozos.

Advertised:

10 Jun 2011 Pacific S.A. Standard Time

Otro empleo en oferta es para un cargo de dirección geológica en la mina Quebrada Blanca (Teck, 2011):

Superintendente de Geología

Quebrada Blanca Operations, I Region, Chile



Mina Quebrada Blanca (imagen³).

Teck en Chile opera las minas Quebrada Blanca en la I Región y Carmen de Andacollo en la IV Región. Adicionalmente Teck está desarrollando proyectos en Chile (Quebrada Blanca II y Relincho) y tiene en ejecución un extenso programa de exploraciones. En estos momentos estamos buscando una persona para el cargo de: Superintendente de Geología.

Reportando (informando) directamente al Gerente General de Quebrada Blanca, tiene como principal objetivo supervisar, dirigir y controlar todas las gestiones geológicas que se llevan a cabo en la mina de Teck-QB, reportando (informando) sus funcionamientos tanto al Gerente General como a los inversionistas. Lograr las metas de la compañía de acuerdo con las regulaciones legales y las políticas vigentes de la organización.

Responsabilidades:

1. Supervisar que se cumpla con las políticas de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente.
2. Dirigir, Coordinar y Controlar las acciones necesarias para lograr los objetivos estratégicos específicos de la Compañía, correspondiente al área.
3. Preparar, gestionar y controlar los distintos presupuestos de operación e inversión de Capital de la superintendencia, necesarios para dar cumplimiento a los objetivos definidos por ésta.
4. Coordinar proyecto hipógeno.
5. Revisar y aprobar diseño campaña de sondaje.
6. Buscar incrementar las reservas geológicas factibles de ser explotadas, a través de la exploración en torno a la zona de Quebrada Blanca, para detectar áreas que presenten condiciones favorables para la explotación de nuevas reservas mineras, con el propósito de aumentar el valor neto presente de QB.
7. Supervisar los estudios geológicos desarrollados por el equipo de trabajo del área, tales como localización de nuevas reservas mineras, calidad y nivel de fino del material puesto en las pilas, comportamiento estructural del rajo (corta), estudios hidrogeológicos entre otros.
8. Apoyar y asesorar la labor del área de Ingeniería de Mina, en el diseño de los planes de producción y explotación de corto, mediano y largo plazo, por medio del desarrollo de los Modelos de Bloques.
9. Conciliar la producción mensual de mineral con respecto a los modelos de corto y largo plazo, definidos por el área como medida del desempeño.
10. Favorecer un clima laboral que permita mantener a las personas motivadas para el mejor desempeño de su trabajo.

Calificaciones (Cualificaciones):

- Profesional Universitario titulado de la carrera de Geología. Idealmente con formación postgrado.
- 15 años de experiencia en trabajo de geología en el rubro minero y tareas principales de ella tales como geofísica, geotécnica, conocimientos en modelos económicos.
- Conocimiento en modelo financiero fundamental, geofísica, geotécnica.
- Conocimiento informático de software tales como Vulcan, Acquire, Gemcom, ArcGis y Geosoft.
- Experiencia supervisando, liderando y formando equipos, establecimiento de directrices y estrategias, manejo de desempeño, coaching, presupuestos y planificación.

- *Excelentes habilidades de comunicación, facilitación y para establecer relaciones interpersonales.*
- *Orientado a resultados con excelentes habilidades de organización, planificación y toma de decisiones.*
- *Capacidad para trabajar en condiciones climáticas adversas y a gran altura.*
- *Licencia de conducir Tipo B.*
- *Inglés/Castellano avanzado, hablado y escrito.*

Date Posted: Jan 05, 2011 Closing Date: Jan 31, 2011 Apply for this Position

Para quien recién haya acabado sus estudios, puede que estos requisitos “asusten” un poco, aunque no deben olvidar, que la selección de personal que se está realizando, es para profesionales con cierta o mucha experiencia.

Pasaremos ahora a mostrar de manera breve cuales son las principales labores que desempeñan los geólogos e ingenieros geólogos en una mina, explicando con mayor detalle aquellos trabajos “clásicos” que por muy modernos que sean los medios, no por eso dejan de realizarse. Hasta donde este autor conoce, aun no se ha inventado un “robot” que cartografie interior o exterior mina.

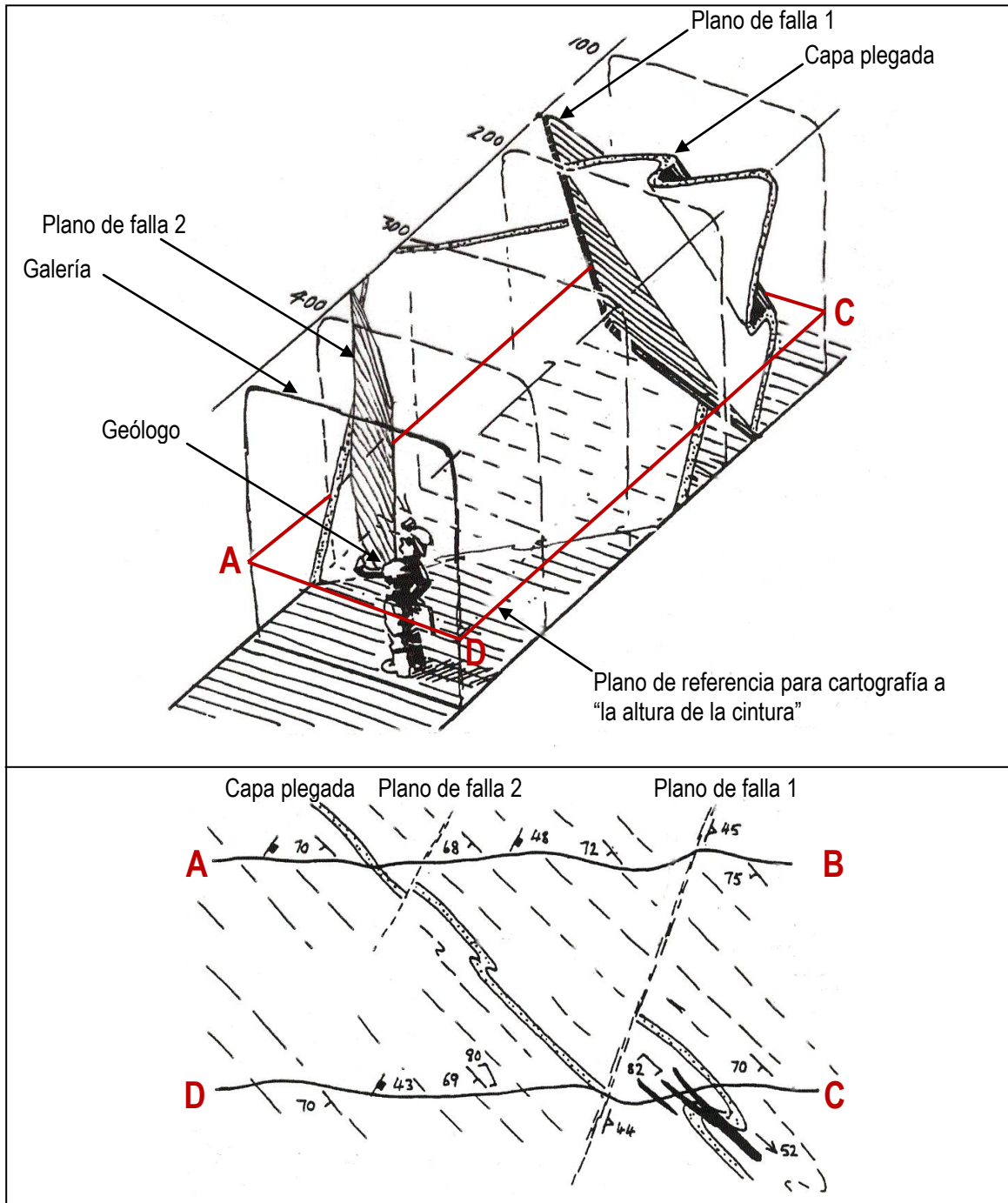
5.2.2 El mundo de las minas

Primero nos referiremos a la gran minería, porque la pequeña minería es otro cantar. Los cargos con sus responsabilidades respectivas pueden ser los siguientes (cambiando ligeramente el nombre de una empresa minera a otra).

Primero están los “geólogos de producción”. Este es el mundo más clásico del geólogo de minas: cartografían las labores mineras, describen (testifican) sondeos y apoyan los planes de explotación de la mina a corto, mediano y largo plazo, los cuales normalmente están separados y utilizan distintas fuentes y niveles de información. Las labores de cartografía minera difieren un tanto de las convencionales (estilo geología de campo), pero en esencia se utilizan equivalentes herramientas de trabajo.

En el caso de las minas subterráneas las galerías estarán ya trazadas en la cuadrícula que lleva el geólogo en su carpeta de trabajo (normalmente rígida y metálica). Si esto no es así (minas antiguas, abandonadas), el problema se resuelve fácilmente realizando un levantamiento de interior mediante brújula y cinta. El geólogo suele contar con un ayudante (minero con ciertos conocimientos sobre el tema), que colaborará en la toma y etiquetado de muestras, y en la determinación de las distancias (a partir de una estación de control) a las que el geólogo va realizando sus mediciones y toma de notas. Debido a las operaciones de voladura de roca, las paredes y el techo de las galerías suelen estar cubiertos

de polvo. Este deberá ser previamente removido mediante riego para facilitar la labor del geólogo. Lo primero que hay que definir es el nivel de cartografía, es decir, la altura sobre el piso de la galería a la que se va a representar el mapa de planta. Esta altura definirá un plano horizontal teórico que intercepta las paredes de la galería (*waist-high projection plane*). Esta altura es estándar para toda la mina, y suele “aproximadamente coincidir” (...) con la altura de la cintura del geólogo, por lo que en algunos países se denomina “cartografiar a la altura de la cintura”.



Arriba, principales elementos en juego en la cartografía de galerías. Abajo mapa del sector mostrado en el cuadro superior. Adaptada de Marjoribanks (1997).

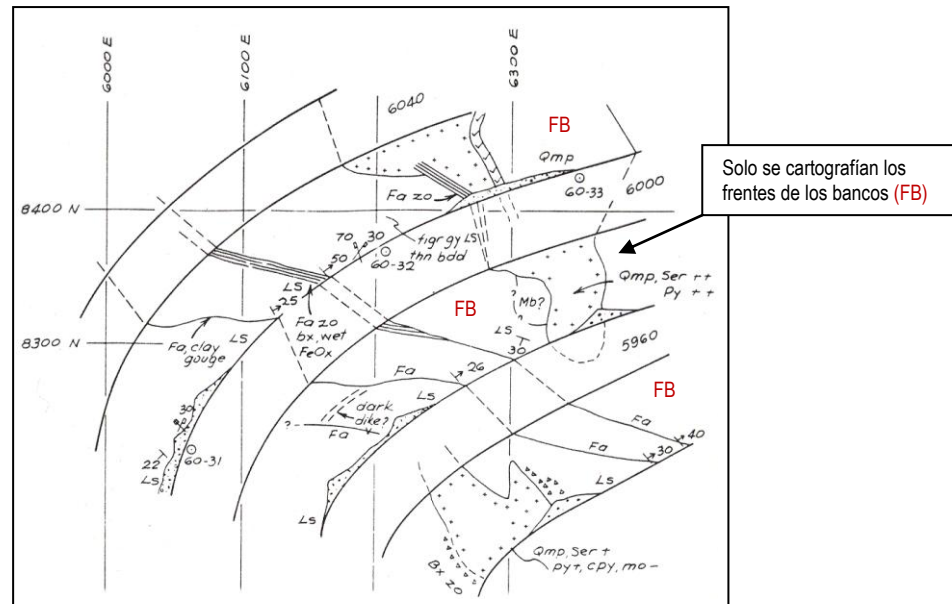
Supongamos que las paredes están limpias y que con el ayudante hemos dispuesto la cinta métrica a lo largo de unos 20 m sobre el suelo de la galería (a partir de un punto conocido (“amarrable” a la cuadrícula). ¿Qué hacemos a continuación? cartografiar de acuerdo a criterios predefinidos y con una simbología estándar (de la empresa minera) los siguientes rasgos geológicos:

- Litología.
- Estructura (fallas, diaclasas).
- Estilo de la mineralización; morfología, si es filoniana dibujaremos el filón, si es diseminada utilizaremos una simbología *ad hoc*; mineralogía de mena y ganga.
- Alteración hidrotermal (si corresponde) de la roca encajante.

En el caso de las minas a cielo abierto, las condiciones de trabajo son más agradables (aunque recuerde que estará a la intemperie) y la visibilidad total. Por otra parte, al disponer de varios bancos de trabajo en la mina se podrá obtener una visión “semi-3D” de la geología. Un aspecto a destacar es que sólo se cartografían los frentes de los bancos de la mina. La razón no es sólo convencional sino que práctica. Debido al intenso tráfico rodado (grandes camiones, cargadores frontales, palas mecánicas) sólo los frentes están limpios como para apreciar adecuadamente los rasgos geológicos. Por otra parte (y esto no es “secundario”) el tráfico rodado no permitiría tal trabajo.



Arriba, bancos de trabajo en Mina Sur (Distrito Minero de Chuquicamata), abajo izquierda, Mina Sur y a la derecha RT (mismo distrito). No hay nada que cartografiar en el piso de los bancos, pero mucho que hacer en los frentes de los mismos (imágenes inferiores).



¿Pasado y futuro de la cartografía minera en minas a cielo abierto (imagen⁴)? No tan seguro, podemos substituir el cuaderno de campo por un ordenador portátil, pero el geólogo tendrá igual que entrar a la mina (y caminar). Imagen de arriba, adaptada de Peters (1978).



Lo que sí existe en este momento. A la izquierda geólogo tomando notas en soporte digital (Orellana, 2005). A la derecha, ordenador tipo Tablet para el trabajo de testificación de sondeos.

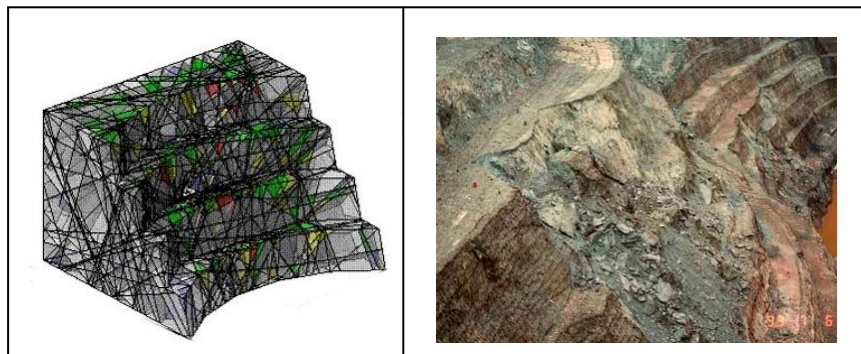
Otras tareas son desarrolladas por los geólogos que trabajan en “geotecnia”. Son los especialistas en el “macizo rocoso” y apoyan a los ingenieros responsables de su estabilidad, tanto en la planificación y monitoreo de la corta (rajo) o de la explotación subterránea. Estos geólogos (o ingenieros geólogos como se les denominaría en España) también colaboran con el personal a cargo de la voladura de rocas.

Los trabajos que realizan estos profesionales son de la mayor importancia, ya que resulta imposible conocer enteramente la composición, estructura interna y comportamiento geomecánico del macizo rocoso (Oyarzún y Oyarzun, 2011). Durante la explotación y a causa de ésta, la distribución de los esfuerzos en el macizo de roca varía continuamente en una mina subterránea. En los casos más extremos, esto puede dar lugar a explosiones de rocas (*rockbursts*), incluso en macizos de rocas competentes pero sujetos a elevados esfuerzos.



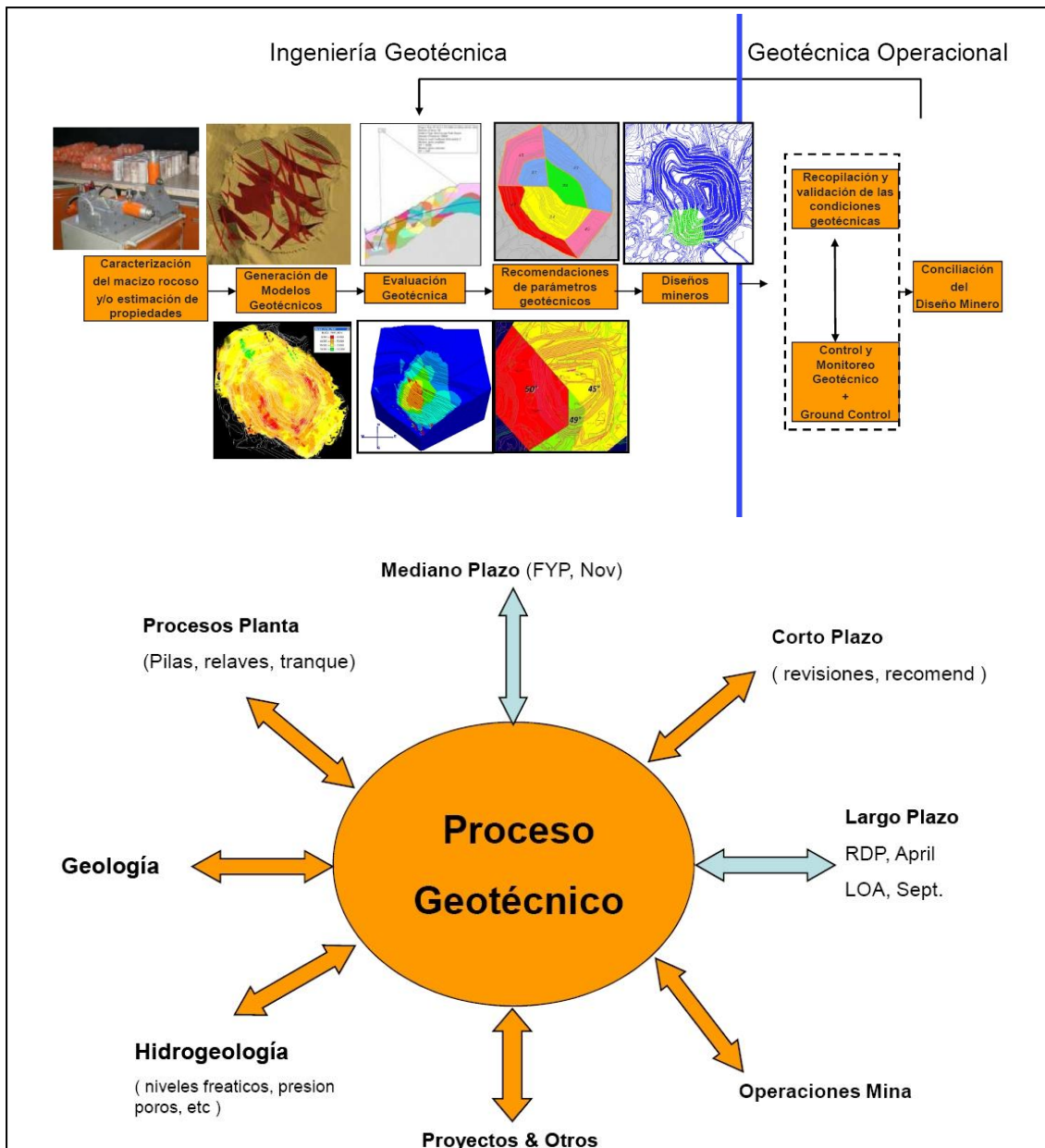
Casos de explosiones de roca (*rockbursts*) en galerías de minas subterráneas (imágenes^{5,6}). Oyarzún y Oyarzun (2011).

Este es el caso de los niveles inferiores de la gran mina subterránea de cobre El Teniente (Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile) o de muchas de las profundas minas de oro del Witwatersrand (Sudáfrica), lo que hizo que los ingenieros sudafricanos fueran pioneros en el estudio científico de este fenómeno, comenzando sus investigaciones con geófonos ya en 1910 (SAIMM, 2011). Por otra parte también están los deslizamientos abruptos de parte del talud en una mina a cielo abierto, como ocurrió hace años en el yacimiento de hierro de El Romeral (Región de Coquimbo, Chile) o en el gran yacimiento de cobre-oro de Grasberg (Irian Jaya, Indonesia) (Oyarzún y Oyarzun, 2011). Naturalmente, la masa y velocidad de las rocas desplazadas por estos fenómenos puede ser letal.



Deslizamientos de roca en minas a cielo abierto. A la izquierda se ilustra el grado de fracturación que puede presentar el macizo de rocas (en verde, amarillo y rojo potenciales cuñas de deslizamiento). A la derecha, un caso real (imágenes^{7,8}). Oyarzún y Oyarzun (2011).

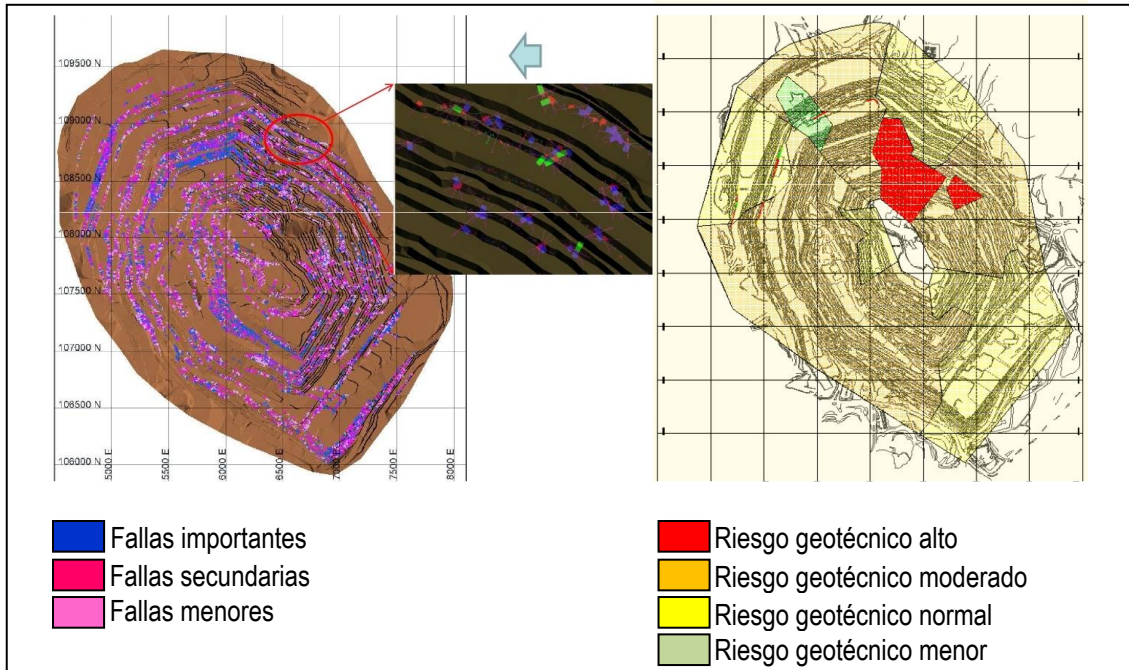
Los variados trabajos de geotecnia que se realizan en una gran mina como Escondida (Chile) se muestran en la siguiente figura.



Trabajos de geotecnia que se llevan a cabo en Minera Escondida (Rodríguez y Elgueta, 2011).

Otra labor geológica que ha ido cobrando importancia progresivamente en las empresas mineras es la “geometalurgia”. La geometalurgia es una actividad interdisciplinar que se realiza mediante la integración del conocimiento geológico (mineralógico), metalúrgico y minero, buscando la optimización de los procesos extractivos en las plantas de tratamiento de minerales (Cánepa, 2009). Aunque el tema está de moda (e incluso tenga un nombre acuñado), la importancia de los trabajos de mineralogía aplicada viene de lejos. Todos los que han cursado una asignatura de mineralogía de opacos como tal o como prácticas de recursos

minerales, saben que los minerales de mena pueden presentar arreglos texturales complejos.



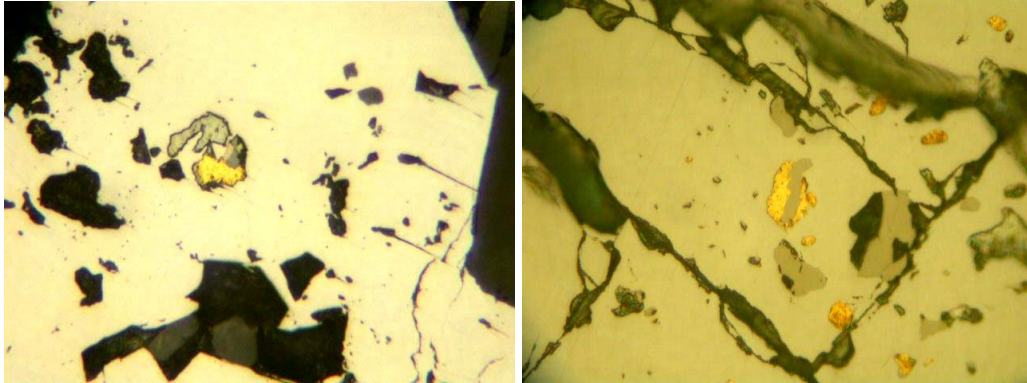
Mina Escondida (Chile). A la izquierda, cartografía estructural de los bancos; a la derecha, determinación del riesgo geotécnico. Adaptada de Rodríguez y Elgueta (2011).

Por ejemplo, que el mineral que se intenta concentrar o lixiviar se encuentre encapsulado en otro sin interés económico. Esto no es solo un problema de relevancia mineralógica, ya que la liberación de las partículas de interés económico puede tener costes extras de importancia para la empresa minera. Un buen estudio de mineralogía aplicada durante los estudios de factibilidad económica de un yacimiento puede ahorrarle muchos dolores de cabeza a la gerencia y dinero a la empresa.



Como se inserta la geometalurgia en el contexto de la actividad minera (Cánepa, 2005).

Puede que la mineralogía de opacos “enamora” poco, pero que es una herramienta útil e incluso fundamental en algunos casos está fuera de cuestión, no solo para la planificación de producción de una mina sino también para la temática ambiental en relación con el desarrollo de drenaje ácido de mina, tanto durante la explotación como llegado el momento del cierre de la explotación minera.



A la izquierda, oro encapsulado en arsenopirita (imagen original: nicoles //, x 500); a la derecha, oro encapsulado en bismutina (imagen original: nicoles //, x 500). Collao et al. (2011). Esto significa problemas de liberación de la fase oro y puede ser un problema particularmente complejo en el caso de la cianuración en pila dado el carácter cianicida de los sulfuros.

Por su parte los “estudios hidrogeológicos” son una parte integral de la industria minera moderna, donde las investigaciones son necesarias para permitir una planificación adecuada. El control de las aguas de infiltración en una mina a cielo abierto o subterránea puede suponer costes importantes para una operación minera, y una amenaza potencial para el personal y equipo, así como una limitación de la flexibilidad operativa. El análisis detallado de los pozos existentes, o perforaciones de exploración, los datos geológicos locales y regionales, y las entradas de agua a la mina, se utilizan para diseñar los programas de investigación (Eon.inc, 2007). Esto ayuda a minimizar los costes sin dejar de ofrecer un nivel suficiente de confianza en la calidad de la información para la planificación de la mina, su desarrollo y los requisitos reglamentarios. En minas a cielo abierto como Escondida se extraen hasta 50 L/s, lo cual da una idea de lo que puede significar este problema. También hay que considerar las implicaciones ambientales del tema sobre el cual existen famosos (y desastrosos) ejemplos a nivel mundial como son el caso del Berkeley Pit (Butte, Estados Unidos) o Faro (Yukón, Canadá) (Oyarzún y Oyarzun, 2011).

Berkeley Pit: Large open pit copper mine with over 17 billion gallons of wastewater contaminated from mining operations. The pit and much of the surrounding mines and smelting areas, including the Anaconda area and the 120-mile long Clark Fork River drainage area, have been designated as an EPA Superfund toxic site. The mine, which ceased operations in 1982, once employed thousands of people. Now the pit supports a growing industry of remediation technologies and clean-up personnel

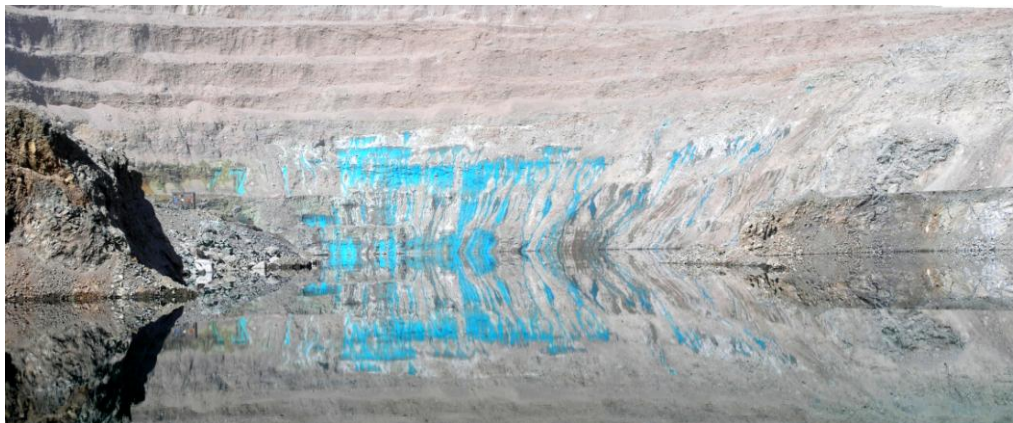
Center for Land Use Interpretation (2011).



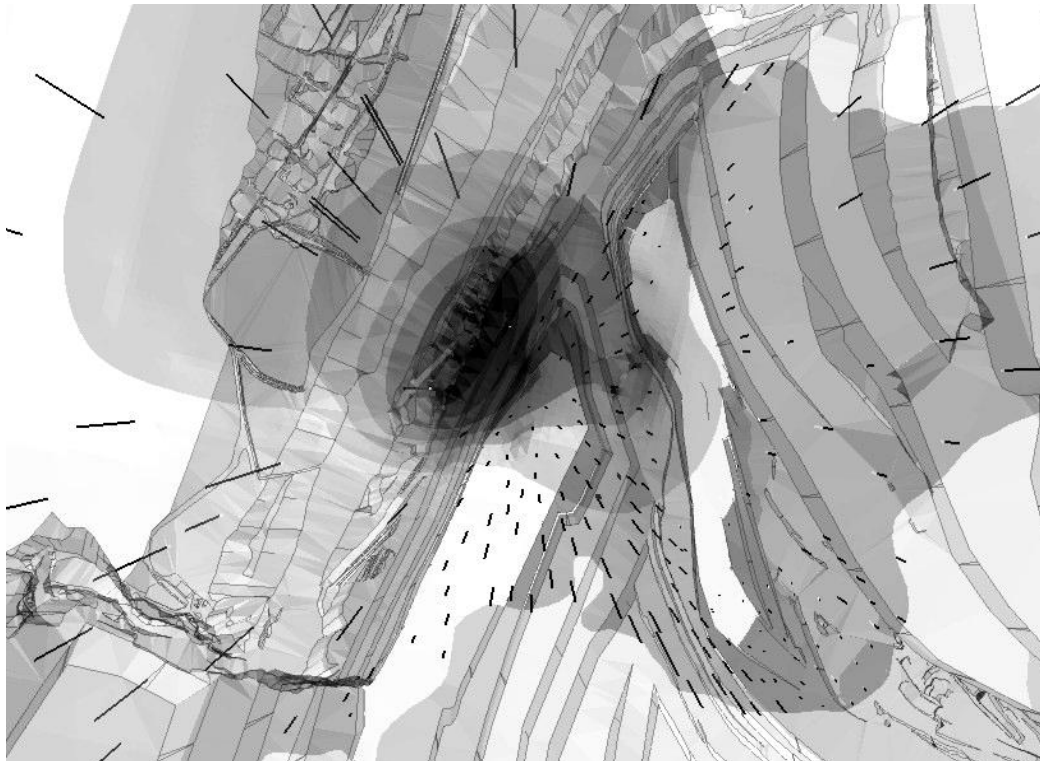
A la izquierda, la mina a cielo abierto Berkeley y su lago de drenaje ácido (imagen⁹). A la derecha, La mina Faro (Yukón, Canadá). Los costes de remediación de la mina Faro (plomo-zinc) en Yukón (Canadá) rondarán los 450 millones de dólares (el proceso más caro en la historia) y el sitio minero requerirá vigilancia durante los próximos 500 años. La historia minera se inicia hacia 1953 con el descubrimiento del yacimiento; hacia 1965 había ya unas 100 personas trabajando allí, y en 1998 se produjo el cierre definitivo de las labores (Faro Mine Closure, 2011; Munson, 2011).

Cabe aquí recordar que las minas subterráneas no están exentas de generar también riesgos ambientales inmensos en relación a la infiltración de aguas. Tal es el caso de la Giant Mine (Yellowknife), en Canadá (Oyarzún y Oyarzun, 2011), donde entre 1951 y 1999 se acumularon 237 mil toneladas de trióxido de arsénico en labores subterráneas de la mina, cuya posterior agua de infiltración contiene unos 4 g/L de As (16 mil veces mayor que lo permitido por la norma). Otras 25 minas abandonadas en el norte de Canadá implican gastos por rehabilitación por encima de mil millones de dólares (Nahir y Davis, 2007).

De cualquier manera, se mire como se mire, los hidrogeólogos tienen mucho que decir en minería, sea esta a cielo abierto o subterránea, durante la explotación o en la preparación del cierre, teniendo siempre en mente que las minas son auténticos “colectores” de aguas subterráneas.



Infiltración de aguas ricas en cobre en Mina Sur (Distrito Minero de Chuquicamata, Chile).



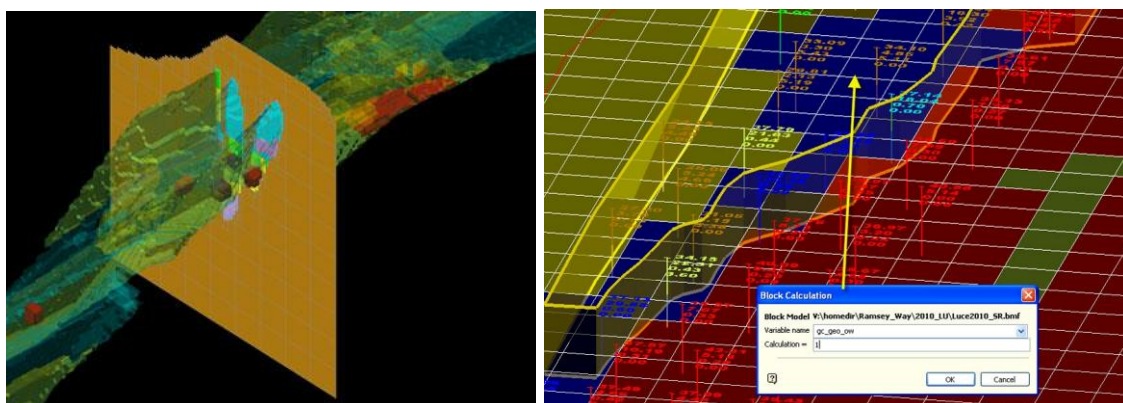
Simulación del cono de depresión de las aguas subterráneas en una mina a cielo abierto (Rapantová et al., 2007).

Ya solo nos quedan dos ocupaciones formales en el *staff* de geólogos de una gran mina, los “geoestadísticos” encargados del cálculo de reservas y los geólogos de “exploración” a escala distrital o zonal.

Sobre el primer tipo de trabajo hemos ya explicado las bases en el Capítulo 4, por lo cual queda poco que mencionar aquí, salvo que debemos diferenciar entre lo que es la definición de reservas que se realiza: 1) durante la fase del estudio de factibilidad económica del yacimiento, de 2) la del día a día cuando la mina está en marcha. Son mundos aparte, y el segundo trabajo puede ir modificando, y a veces de manera importante, los estudios que se realizaron durante la etapa del estudio de factibilidad. En la planificación a corto, mediano y largo plazo se toman decisiones que significan millones de dólares y este autor ha podido comprobar cómo se toman decisiones incluso sobre la marcha, “en las labores mineras”, para decidir si un material se va a estériles o a planta. No es un trabajo para gente con graves temores a equivocarse. Requiere de muy sólidos conocimientos geológicos y matemáticos, cosa que puede ser difícil de aunar en ocasiones.

Al respecto una reflexión. No basta con saber utilizar un determinado software, infinitamente más importante es entender lo que este software puede ofrecer y conocer sus limitaciones. Ni el hardware ni el software “piensan”, y son tan buenos (o malos) como quien los utiliza. Esto es como en música, el mejor instrumento no transforma (necesariamente) en virtuoso a quien lo toca.

Otro aspecto a tener en cuenta son los grados de isotropía – anisotropía de las mineralizaciones. Puede que en cuerpos tipo pórfido cuprífero, con escasa direccionalidad, la vida de un geoestadístico no sea particularmente compleja; pero los cuerpos estratoligados y fuertemente plegados-replegados (como los que existen a montones por el mundo en regiones del Precámbrico o Paleozoico) sí que requieren de habilidades extraordinarias, que empiezan (como no) por entender la geología del yacimiento como algo integral.



Modelado de bloques con Maptek® de Vulcan® (imágenes^{10,11}).

Con respecto al geólogo de “exploración” trabajando en una mina y/o distrito minero, digamos que su labor puede ser muy amplia. No hay mejor zona para buscar nuevos yacimientos que aquella que contiene yacimientos conocidos. Como dice una vieja expresión del mundo minero inglés: *¿Dónde buscar elefantes? En tierra de elefantes*. En esto se resume toda una filosofía pragmática y además tremendamente exitosa. Los ejemplos a nivel mundial son variados, como Almadén en España; a partir de la mina de Almadén se definió progresivamente lo que luego sería el mayor distrito de mercurio del mundo con yacimientos (aparte de la mina de Almadén) como la Nueva y Vieja Concepción, El Entredicho y Las Cuevas. O que decir del Distrito de Chuquicamata en el norte de Chile, con nuevos yacimientos como Mina Sur (antigua Exótica), Radomiro Tomic (RT), Ministro Hales (Mansa Mina), o el Cluster Toki. También tenemos los ejemplos de Damiana en El Salvador o Sur-Sur en Andina (Chile norte y centro respectivamente). La lista es inmensa, ya que donde hay un yacimiento puede haber otro en las cercanías. Esto es *brownfield exploration*, quizás no tan glamurosa como su equivalente de *greenfields*, pero tanto o más importante que esta, ya que para una empresa siempre será mejor (económicamente hablando) tener una nueva mina cerca de la primera que a cientos de kilómetros de distancia.

Solo queda un tema que no hemos tratado ya que el cargo de “geólogo ambiental” no acaba de “cuajar” cabalmente en las empresas mineras, al menos al nivel de explotaciones mineras. No queremos decir aquí que el tema ambiental no interese a las empresas mineras, les interesa y mucho hoy en día (Oyarzún y Oyarzun, 2011). El tema ambiental está presente en todas las explotaciones mineras pero

falta en muchos casos un especialista en el tema, que por múltiples razones “tiene” que ser un geólogo. Sobre esto se podrá decir lo que se quiera, pero por su preparación académica el geólogo es el profesional más idóneo (a mucha distancia del resto) para abordar los temas ambientales de una mina, y la razón es elemental: las minas explotan minerales y quien sabe (realmente) de sus comportamientos físico-químicos es un geólogo. Debido a su importancia trataremos el tema minero-ambiental en la siguiente sección, centrándonos en uno de los problemas más graves a nivel mundial: la generación de drenaje ácido.

En lo que respecta a la “pequeña y mediana minería” aquí las cosas pueden ser variadas. Para empezar, las pequeñas explotaciones mineras simplemente no pueden permitirse “el lujo asiático” (en este caso) de contratar a un geólogo y solo podrán contar con uno si algún organismo estatal o regional les presta cierta asesoría. Existen incluso medianas explotaciones que tampoco tienen un geólogo en plantilla (*staff*) y solo reciben la visita de uno como consultor externo para casos específicos, o sobre una base regular cada cierto tiempo.

Estos geólogos de mina no contarán con los sofisticados medios tecnológicos modernos, así que más les valdrá tener sólidos conocimientos geológicos y ser capaces de realizar cubicaciones de mineral por medios más rudimentarios: los viejos métodos volumétricos, con planimetría, que no pasan de moda porque “hay vida más allá de la geoestadística y los caros paquetes informáticos”.

As first cut, quick look at the salaries of people working on US mines in 2010. These data are from the most recent CostMine document 2010 Survey Results U.S. Metal and Industrial Mineral Mine Salaries, Wages and Benefits.

The following are some average annual salaries in thousands of dollars:

- * General Manager = 131
- * Mine Manager = 107
- * Mill Superintendent = 103
- * Chief Engineer = 100
- * Metallurgist = 84
- * Environmental Coordinator = 87
- * Personnel Manager = 98
- * Administrative Assistant = 41
- * Secretary = 38

Salaries vary from underground mine to surface mine. Here are a few comparisons. The first number is annual salary for an underground mine; the second is for a surface mine:

- * Mine Manager = 110/106
- * Mine Foreman = 78/77
- * **Mine Geologist = 67/65**
- * Warehouse Clerk = 34/43

Caldwell (2011)

5.3 El mundo ambiental minero: entorno natural de un geólogo

5.3.1 Una introducción al tema

En la presentación del libro *Minería Ambiental: Principios y Prácticas* (Oyarzún y Oyarzun, 2011) se dice que *ninguna persona informada ignora que la minería y la extracción de hidrocarburos son esenciales para la supervivencia de nuestra sociedad, pero que el rechazo a estas se ha convertido en una moda, como muestra de sensibilidad ambiental*. También se dice que por otro lado, *graves errores cometidos por algunas empresas mineras han dado argumentos a los detractores de esta actividad económica*. En este sentido, las empresas mineras deben redoblar sus esfuerzos en materias ambientales para evitar las críticas (justificadas e injustificadas) que provienen de múltiples grupos ambientalistas y algunos políticos, que han visto detrás del medioambiente un tema al que se le puede sacar partido. Aquí hay de todo, están los que sincera pero desinformadamente critican cualquier aspecto de la minería, y los que sabiendo perfectamente que exageran, lo hacen igualmente por las razones que sean. De esta manera, la minería no solo debe comportarse “correctamente” sino que además debe “parecerlo”.

Los yacimientos contienen minerales que en muchos casos se encuentran en desequilibrio con las condiciones de superficie por el mero expediente de haber quedado en contacto con el oxígeno atmosférico y las aguas. Así, muchos de los problemas ambientales derivados de la actividad minera están relacionados con la mineralogía del yacimiento y de su encajante litológico. De esta manera hablamos de un problema mineralógico y litológico que debe ser atendido por quienes están preparados para abordar estas tareas.

De una u otra forma hemos tratado en este capítulo algunos de los problemas ambientales que enfrenta la minería en su devenir diario. A continuación iremos un paso más lejos, perfilando las razones por las que el tema ambiental minero debería estar en manos de geólogos cualificados, para abordar una tarea tan compleja como lo es hoy en día el evitar desastres ambientales. Lo absurdo es que en muchos casos, estos podrían tener soluciones abordables desde el inicio. A continuación trataremos algunas ideas ya planteadas en un trabajo sobre la temática minero-ambiental (Oyarzun et al., 2010a).

El tema ambiental ha ganado importancia de manera progresiva en la geología, tanto en la enseñanza como en la investigación teórica y aplicada. Aunque los aspectos más “paisajísticos” de los problemas ambientales suelen a veces llamar de manera importante la atención de la opinión pública, existen otros, “de fondo”, que imprescindiblemente deben ser tratados.



Pascua-Lama (Chile). Signos preocupantes para un geólogo, que es capaz de ver el problema que se oculta detrás de los llamativos colores y la abrupta topografía (imágenes^{12,13}).

Muchos países registran una historia minera y metalúrgica que se extiende de manera importante en el tiempo. Décadas, incluso siglos de minería, han dejado un legado a veces oculto de escombreras de mineral y otros residuos de origen minero que constituyen de facto potenciales bombas químicas de relojería. La carga mineral que no se explotó en su momento está sometida a procesos químicos naturales (oxidación, hidrólisis) que actúan sobre dichos minerales, contribuyendo a su disolución y por lo tanto, a la liberación de metales pesados. Los metales puestos en solución pasan directamente a los suelos, pueden alcanzar por infiltración a las aguas subterráneas, o continuar a través de los cursos fluviales, ampliándose considerablemente el área afectada y los riesgos potenciales para el medioambiente y la salud humana. Ejemplos de esta naturaleza no hay que buscarlos necesariamente en remotas regiones del mundo, ya que en España existen también abundantes ejemplos, incluso en las inmediaciones de ciudades y/o explotaciones agrícolas.

Obviamente, los peligros ambientales derivados de la minería no se circunscriben al legado minero de un país, sino que se extienden de manera incluso más importante al presente y se proyectan con fuerza en el futuro. Esto es debido a que la minería continúa y continuará siendo un factor importante en la economía de muchos países del mundo.

Para abordar estos problemas hace falta que los encargados de investigar lo hagan con una visión amplia de la geología. La geoquímica y la mineralogía son importantes herramientas ambientales, pero ninguna puede *per se* responder las múltiples interrogantes que surgen durante una investigación de campo. En otras palabras, los estudios minero-ambientales no pueden estar (exclusivamente) en manos de geoquímicos o mineralogistas. Tienen que estar controlados por “geólogos” profesionales que vayan más allá del uso de una “palita” para la toma de muestras de suelos o sedimentos y del posterior estudio más, o menos

aristocrático, de los datos mediante sofisticados procedimientos analíticos y matemáticos.

Para finalizar aquí quisiéramos sugerir las características que debería tener un geólogo que trabaja en temas minero-ambientales. Así, el experto en recursos minerales y medioambiente debería ser capaz de:

1. Comprender la naturaleza “geológica” (integral) de los recursos minerales, tanto a escala local como regional.
2. Comprender el potencial contaminante que poseen los yacimientos minerales y el papel que puede jugar su encajante.
3. Comprender los principales métodos de explotación minera y procesos metalúrgicos.
4. Comprender los procesos de traspaso geoquímico de metales y metaloides a la atmósfera, suelos, aguas y biota.
5. En función de lo anterior evaluar los riesgos potenciales que se derivan de los yacimientos minerales y explotaciones mineras en activo o abandonadas.
6. Por último, debe ser capaz de proponer soluciones ambientales acordes a cada caso concreto: previniendo riesgos y estableciendo normas para la prevención y si corresponde, la remediación.

5.3.2 De todos los males posibles el peor

Dadme un yacimiento sulfurado y os daré drenaje ácido (...)

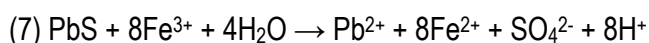
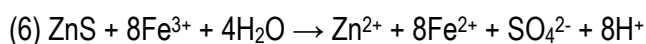
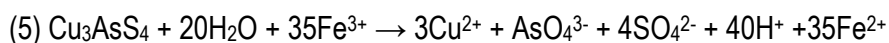
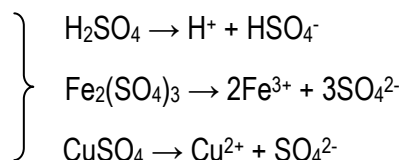
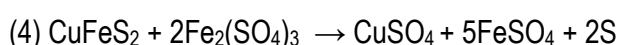
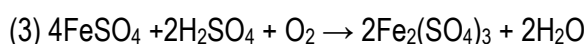
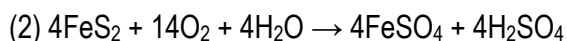
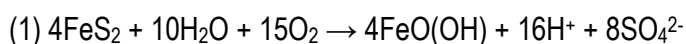
Aquí trataremos el tema del drenaje ácido de mina, que no solo es problemático por su acidez sino porque contiene generalmente metales pesados en solución. El drenaje ácido puede contaminar las aguas subterráneas y las superficiales, con las consecuencias nefastas que esto puede representar para la vida acuática y las personas.

Las explotaciones subterráneas que pueden llegar a generar desde decenas a miles de kilómetros de galerías (que multiplican el área de reacción roca-agua-aire) y las explotaciones a cielo abierto abandonadas, se pueden convertir en reactores químicos que contaminan el drenaje subterráneo y superficial (Oyarzún y Oyarzun, 2011). Tres cuartas partes de lo

Acid mine drainage is the formation and movement of highly acidic water rich in heavy metals. This acidic water forms through the chemical reaction of surface water (rainwater, snowmelt, pond water) and shallow subsurface water with rocks that contain sulfur-bearing minerals, resulting in sulfuric acid. Heavy metals can be leached from rocks that come in contact with the acid, a process that may be substantially enhanced by bacterial action. The resulting fluids may be highly toxic and, when mixed with groundwater, surface water and soil, may have harmful effects on humans, animals and plants.

US EPA (2010)

mismo se aplica a las explotaciones mineras a cielo abierto. Todo comienza con la oxidación de la piritas, pieza clave en el proceso de oxidación-lixiviación, que genera, más allá de la reacción simplificada (1), sulfato férrico que aporta iones Fe^{3+} y ácido sulfúrico, el que a su vez aporta iones sulfato SO_4^{2-} y H^+ al sistema (2,3). A su vez, el sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) es una pieza química clave en los procesos de oxidación que se producen en el resto de los sulfuros (Blanchard, 1968; Gupta, 2010).



Arriba: el drenaje ácido de mina es fácilmente detectable por sus notables colores rojos o anaranjados derivados de la presencia de hierro oxidado; a la izquierda charca en el Distrito Minero de Mazarrón (Murcia, España); a la derecha, arroyo ácido en el Grupo Minero San Quintín (Ciudad Real, España). En ambos casos se explotó plomo y zinc. Abajo: la oxidación de los sulfuros y la lixiviación de metales pueden ser tan fuertes en superficie (izquierda) como en profundidad (derecha) en las galerías de una mina (imágenes^{14,15}). Oyarzún y Oyarzun (2011).

En un sistema ácido rico en sulfato férrico (esto es, rico en Fe^{3+}), los sulfuros y sulfosales son oxidados y los metales puestos en solución. En las reacciones (4) y (5) observamos como la calcopirita (CuFeS_2) libera cobre y la enargita (Cu_3AsS_4) libera cobre y arsénico, mientras que en (6) y (7) observamos la puesta en solución del zinc y el plomo a partir de esfalerita (ZnS) y galena (PbS) respectivamente.

Los yacimientos sulfurados generan algo de drenaje ácido aunque jamás hayan sido explotados, después de todo, una de las guías de exploración que analizamos en el Capítulo 3 son precisamente las limonitas, que se derivan del mismo. Como en otros ámbitos de la vida, todo depende de lo que estamos hablando. Si lo hacemos sobre yacimientos minerales o exploración, nos referiremos a procesos oxidantes, formación de una cubierta de limonitas, etc., pero si el tema es ambiental, hablaremos de drenaje ácido. ¿Significa esto que habrá drenaje ácido con o sin explotación minera? Bueno, la respuesta es “sí” pero con matices y muy importantes por cierto. La razón es simple, si explotamos un yacimiento, la superficie expuesta a las aguas y el oxígeno se multiplicará por mucho, lo cual es particularmente importante en el caso de la minería subterránea. En otras palabras, la minería incrementa fuertemente lo que en otras circunstancias es tan solo un fenómeno natural de escasa entidad (salvo que hablemos del Río Tinto en España).



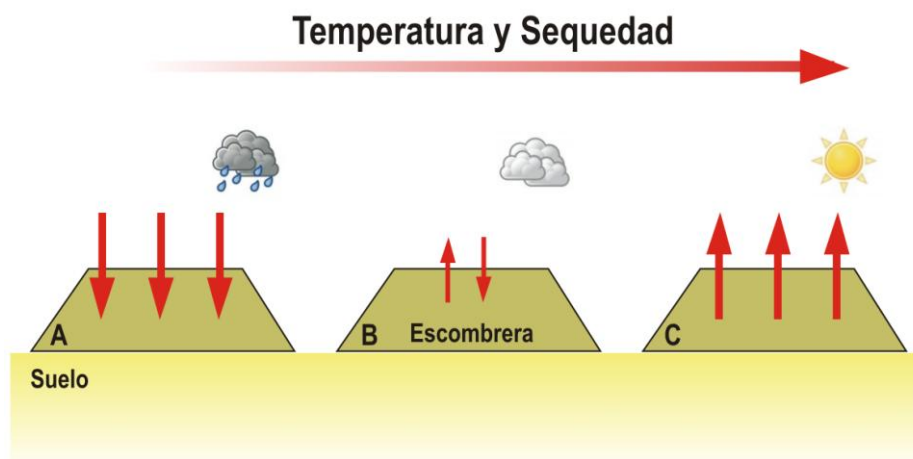
Si un yacimiento mineral ha podido generar tal volumen de limonitas, derivadas del drenaje ácido “natural”, imaginemos lo que se podrá generar durante la explotación minera si no se toman medidas (y muy serias) de tipo preventivo (imágenes^{12,13}). Esto es particularmente preocupante si el yacimiento es además rico en arsénico.

Pero la actividad minera no solo induce la formación de drenaje ácido debido a la apertura de labores mineras subterráneas o de nuevos bancos en una mina a cielo abierto, existen otras dos fuentes potenciales de drenaje ácido y en ambas un geólogo tiene mucho que decir al respecto:

1. Las escombreras de los mal llamados “estériles”, que muchas veces solo corresponden a mineral sub-económico que, para complicar más las cosas, puede ser mucho más rico en pirita que el mineral económico.
2. Las balsas (relaves) con las colas (residuos sub-económicos) de las plantas de concentración, que también llevan pirita.

Para entender y prevenir hay que enfocar el tratamiento de estos problemas bajo una perspectiva mineralógica. Aquí llegamos otra vez más a la mineralogía de opacos, tan (injustamente) denostada por este autor cuando era alumno. En este sentido, sería más que deseable que se llevara un control químico-mineralógico periódico de los materiales que van a parar a las escombreras y balsas. ¿Por qué? Porque las minas evolucionan en el tiempo, es decir, a medida que se profundiza en el cuerpo mineralizado la mineralogía se va modificando y por lo tanto también la de los materiales sub-económicos.

Las escombreras no son un “problema más”, ya que pueden llegar a tener dimensiones gigantescas a medida que transcurre la vida útil de una mina. Si bien el problema no es importante en una mina subterránea, donde la explotación es selectiva (si no sería una actividad ruinosa), sí lo es en el caso de las minas a cielo abierto, donde las razones estériles a mineral operativas pueden ser de 3:1. Si estos materiales tienen pirita, y están expuestos a los elementos (como es natural) las consecuencias pueden ser graves. No lo serán tanto en el caso de climas desérticos como en la zona central de Atacama, pero sí en regiones con clima Mediterráneo o Templado-Lluvioso, e incluso en las regiones más “andinas” de Atacama donde sí ocurren precipitaciones de lluvia y/o nieve.



Migración de soluciones metalíferas en una escombrera en función de las condiciones climáticas. Si el clima es lluvioso (A), habrá un lavado químico de la escombrera; en el caso de climas secos y cálidos (C), cualquier solución interior en la escombrera ascenderá por capilaridad hacia los niveles superiores, donde precipitarán las especies minerales en solución (sulfatos, carbonatos, cloruros). B representa el caso intermedio típico de los regímenes climáticos de tipo mediterráneo, donde no existen marcadas tendencias en una dirección u otra, aunque episodios tormentosos podrán decantar la situación hacia un caso tipo A (Oyarzún y Oyarzun, 2011).



Mina Escondida (imagen²). Observar las dimensiones de las escombreras. Afortunadamente esta mina está localizada en una región desértica de Chile (Atacama) y no existen núcleos poblacionales que puedan verse afectados.

El tema del control del drenaje ácido no solo es un aspecto crítico durante una explotación minera sino que también lo es y de manera aún más importante durante la fase del cierre de la explotación minera. Así tenemos el tristemente célebre caso de la mina Faro en Canadá (Faro Mine Closure, 2011; Munson, 2011), donde los costes de remediación rondarán los 450 millones de dólares; y no solo es el problema monetario, ya que el sitio minero requerirá vigilancia durante los próximos “500 años”. En esto no se trata de ser un mago de la “remediación” sino que de la “prevención”.



Residuos de tratamiento oxidados, abandonados en el Distrito Minero de Mazarrón (Murcia, España), ricos en plomo, zinc y arsénico (Oyarzun et al., 2010b).

Ojalá que los geólogos ambientales encuentren su justo lugar en las empresas mineras. La biología está bien, pero para atender “otros” problemas ambientales, como los posibles impactos sobre la flora y fauna. Pero como comentábamos

antes, *más vale prevenir que curar*. Así, más importante que salvar a los peces de un río, es no tener que hacerlo.

Esto último nos lleva a una reflexión final, sin química la geología ambiental es simplemente inconcebible. Al igual que con las matemáticas (tema ya tratado), el alumno que piense dedicarse a esto en un futuro, tiene que “comprender” la química de las soluciones. Deseo insistir en este punto, porque si algo me queda claro después de más de 35 años de ejercicio de la profesión, es que la química no está dentro de las preocupaciones fundamentales de los geólogos.

El problema radica en que sin química, la visión que se tiene de los procesos geológicos no es mejor que la que posee un daltónico con los colores (y a veces peor). Seamos claros en esta materia, no se trata de ser un “erudito” en los procesos químicos de la naturaleza, pero sí de “comprender” en qué consiste la concentración de un catión o anión en una solución (molaridad-normalidad), los procesos de oxidación-reducción, pH y Eh, la hidrólisis de los minerales y la subsecuente puesta en solución de cationes, etc.

Bibliografía

Atención: Algunos links han sido divididos por estética, deberán ser restaurados antes de pegar en un browser.

- Cánepa, C., 2009. Geometalurgia: una visión personal. PERUMIN, 29 Convención Minera, http://www.convencionminera.com/perumin_cms/upload/archivos/CESAR%20CANEPa.pdf
- Caldwell, J., 2011. 2010 – 2011 Mine Salaries. I Think Mining, sharp opinions about mines and mining from Jack Caldwell, <http://ithinkmining.com/2011/01/20/2010-2011-mine-salaries/>
- Center for Land Use Interpretation, 2011. Berkeley Pit. <http://ludb.clui.org/ex/i/MT3133/>
- Collao, S., Farfán, D. y Merello, G., 2011. Minerales de Mena. Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción, <http://www2.udec.cl/~menas/>
- Eon.inc, 2007. Mining hydrogeology. <http://www.aeoninc.com/ground/mining.html>
- Faro Mine Closure, 2011. Faro Mine: History. <http://www.faromine.ca/mine/history.html>
- Marjoribanks, R. 1997. Geological methods in mineral exploration. Chapman & Hall, London, 115 pp.
- Munson, J., 2011. Cost of Faro's toxic tomb to top \$450 million. Yukon News, <http://www.yukon-news.com/news/11195/>
- Nahir, M. y Davis, C., 2007. Abandoned mines in northern Canada: programme challenges and case studies. En: A. Fourie, M. Tibbett y J. Wiertz (Eds.) Proceedings of Mine Closure, Santiago, Chile, 777-785.
- Orellana, M., 2005. TIC&A en CODELCO: Nuestra estrategia y su Ejecución 2005/2006. Gerencia Corporativa de Tecnología de la Información y Comunicaciones, CODELCO, <http://www.codelco.com/tic/contenidos/MarcoOrellana.pdf>
- Oyarzun, R., Higuera, P., Lillo, J., Oyarzún, J. y Maturana, H., 2010a. Investigando temas minero-ambientales en el norte de Chile: Más allá de los megaproyectos, la investigación formateada y la retórica ambientalista. *Tierra y Tecnología*, 37, 81-90.
- Oyarzun, R., Lillo, J., López García, J.A., Esbrí, J.M., Cubas, P., Llanos, W. e Higuera, P., 2010b. The Mazarrón Pb–(Ag)–Zn mining district (SE Spain) as a source of heavy metal contamination in a semiarid realm: Geochemical data from mine wastes, soils, and stream sediments. *Journal of Geochemical Exploration*, 109, 113-124.
- Oyarzún, J. y Oyarzun, R., 2011. Minería Sostenible: Principios y Prácticas. Ediciones GEMM – Aula2punto.net, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html
- Peters, W.C., 1978. Exploration and Mining Geology. John Wiley & Sons, NY, 696 pp.
- Rapantová, N., Grmela, A., Vojtek, D., Halir, J. y Michalek, B., 2007. Groundwater flow modelling applications in mining hydrogeology. En: , R. Cidu y F. Frau (Eds.) Water in Mining Environments, IMWA Symposium 27-31 May 2007, Cagliari, Italy.
- Rodríguez, W. y Elgueta, R., 2011. Riesgo geotécnico en la operación minera. XVI Congreso Colombiano de Minería, 20-22 de Junio de 2011, Medellín, Colombia.
- SAIMM, 2011. Centenary of Rockburst Research. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, <http://www.saimm.co.za/saimm-events/item/24-centenary-of-rockburst-research>
- SNAC, 2011. McLaughlin, Donald H. (Donald Hamilton), 1891-1984. Social Networks and Archival Context Project (SNAC), <http://socialarchive.iath.virginia.edu/xtf/view?docId=McLaughlin+Donald+H+Donald+Hamilton+1891-1984-cr.xml>
- St. John, J., 1988. Los Metales Nobles. Editorial Planeta, Colección Planeta Tierra, 176 pp.
- US EPA, 2010. Acid mine drainage. http://water.epa.gov/polwaste/nps/acid_mne.cfm
- UtilitiesJobs.com, 2011. Geólogos. <http://www.utilitiesjobs.com/job.asp?id=34298631&aff=6F3F2FA0-9086-47B2-BF92-5E236FA388D5>

Fuente de las imágenes (a Julio de 2011)

1. <http://www.homestakevisitorcenter.com/gallery-1.html>
2. <http://www.theaustralian.com.au/business/mining-energy/bhp-billiton-approves-escondida-copper-project/story-e6frg9dx-1226031253078>
3. http://4.bp.blogspot.com/_rS9oO6l_8Ec/TGCNIh6LQdl/AAAAAAADjE/Yy0ODjkeQJc/s1600/%286%29.JPG
4. <http://www.dmt.de/en/services/exploration-geosurvey/exploration-geology.html>
5. http://www.acg.uwa.edu.au/research/underground_mining/mine_seismicity_and_rockburst_risk_management
6. <http://www.itascacg.com/ici/ram.html>
7. <http://www.sirovision.com/text/SIROMODEL.htm>
8. http://www.amccconsultants.com.au/2005_june.asp
9. <http://www.vulgare.net/berkeley-pit-butte-montana/>
10. http://www.maptek.com/products/vulcan/geology_solutions/block_modelling_tools.html
11. http://www.maptek.com/pdf/vulcan/case_studies/vulcan_IOC_casestudy.pdf
12. http://www.e-pol.com.ar/newsmatic/index.php?pub_id=99&eid=53&sid=0&sef=0
13. <http://www.cronicadigital.cl/news/pais/16959.html>
14. http://wiki.biomine.skelleftea.se/wiki/index.php/Image:Leaching_of_chalcopryrite.jpg
15. http://www.pebblescience.org/pebble_mine/acid_drainage.html

1. Sobre cómo (y sobre todo porqué) se gestó esta idea

Hace ya muchos años subí unos apuntes de la vieja asignatura de Geología de Minas (Facultad de CC Geológicas, UCM) a la red, primero a través de la página de mi Departamento, y luego (después de algunas mejoras, más de “estética” que otra cosa) al sitio web Aula2punto.net. Poco después el documento HTML pasó a integrar parte de los cursos de la nueva página del GEMM, cuando esta fue albergada en el nuevo sitio.

Pero faltaba algo y era muy consciente de esta carencia, que se había compensado en parte a través de las presentaciones de Power Point de las asignaturas de Geología Minera & Minería Ambiental (Licenciatura en Geología) y Exploración y Evaluación de Recursos (Carrera de Ingeniero Geólogo). Pero claro, esto tan solo era una relativa mejora a “escala local”. La oportunidad vino cogida de la mano de la escritura de otra obra que realicé con Jorge Oyarzún, Profesor del Departamento de Minas de la ULS (Chile). El ver como había quedado el libro *Minería Sostenible: Principios y Prácticas* (Oyarzún y Oyarzun, 2011) me motivó lo suficiente como para retomar el tema de los apuntes de geología de minas y expandirlos.

Expandir los apuntes sí, qué duda cabía al respecto, pero no tanto como para llevar al aburrimiento de quienes tienen que (o desean) leerlos. No se trataba de minería sostenible, el tema de los apuntes no era ni tan extenso (en el fondo) ni requería de un detalle como el alcanzado en el libro anterior. Después de todo lo que se quería era escribir una obra del tipo “introducción a”, no en plan “todo lo que Ud. debería saber sobre”.

Los libros y las conversaciones pueden tener tantas palabras como uno quiera o pueda. Lo mismo se aplica a las clases, que se pueden hacer atrozmente largas cuando frente a uno está un profesor que ama sus palabras. Puede que mis clases sean aburridas también, pero al menos son tan breves como me lo permite el reglamento. La cosa es que si algo se puede contar “bien” en 5 palabras ¿por qué hacerlo en 30? Siempre me han gustado los libros de geología de autores británicos, siempre tan claros y resumidos. Ojalá que este, aunque solo sea remotamente, se aproxime al estándar británico.

2. Sobre la geología de minas y la exploración

El mundo de la minería y de los profesionales que tienen el privilegio de trabajar en ésta pasa por un momento dorado. A todos los detractores del mundo minero les repito las palabras de una de las especialistas mundiales en eco-eficiencia, Rene van Berkel (2007): *hay que reconocer que los minerales y los metales son actualmente indispensables para hacer disponibles a la sociedad (de una manera global) los productos y servicios que componen nuestro estilo de vida moderno*. Al respecto, pensemos por un instante que sería de nuestra vida cotidiana si eliminásemos la actividad minera. Entre muchos ejemplos (y sólo señalaremos los relacionados con los metales), los edificios se vendrían abajo (eliminamos el acero), no podríamos tener acceso a la electricidad (eliminamos los cables de cobre), los coches no se podrían fabricar (eliminamos el acero, el aluminio, el cobre), las baterías serían inviables (eliminamos el plomo, el níquel, el cadmio, el mercurio), los aparatos electrodomésticos no existirían (eliminamos el acero, el cobre), y lo mismo vale para el material científico y médico. Esto sin contar con que la población aumenta y aumenta (Higueras y Oyarzun, 2007).

Se percibe la agricultura como una actividad “noble”, mientras que la minería aparece como el “malo de la película”. Qué duda cabe que se han cometido errores en el pasado, pero ¿es esto óbice para que quien goza de todos los privilegios tecnológicos que permite la minería se permita atacarla sin más, y ya de paso, negarle a otros la posibilidad de tener cosas tan básicas en casa como la electricidad? Ya que resulta casi inconcebible que la ignorancia sea tan extensa entre la gente que ha recibido una cierta educación (y a veces hasta universitaria de tercer ciclo), pienso que los ataques tienen que ser adjudicados más a una actitud de eco-hipocresía o fundamentalismo acérrimo que a cualquier otra cosa.



Incluso las organizaciones fuertemente militantes en temas ambientales como Greenpeace necesitan los metales (y petróleo) para poder llevar a cabo sus tareas (imagen¹).

Las cosas van bien en la minería en general y excelente para los geólogos e ingenieros geólogos que estén dispuestos a ir a trabajar allí donde están las grandes operaciones mineras del mundo. Los precios de los metales pasan por un

excelente momento y los salarios de los profesionales que trabajan en minería no van a la zaga.

¿Por qué va todo tan bien en el mundo minero? La respuesta es un acrónimo: “BRIC”, que significa Brasil, Rusia, India y sobre todo China, que tiran fuertemente de la economía mundial, requiriendo entre otras cosas, ingentes cantidades de metales. No parece, al menos a corto o mediano plazo que las cosas vayan a cambiar substancialmente, aunque como todo el mundo sabe, los pronósticos económicos hacen que los meteorológicos hasta parezcan fiables (¿alguien predijo la actual crisis financiera?).

Esto en lo que respecta a la parte económica de la minería y de la profesión de geólogo de minas/exploración. Pero hay un último aspecto que me gustaría mencionar, aunque solo sea brevemente, y se refiere al papel que cumple la geología de yacimientos minerales, en cualquiera de sus vertientes. Esta aporta a la sociedad de la que formamos parte, mucho más de lo que gente (incluso un geólogo) llega a pensar. Sin metales ni minerales la sociedad actual, al menos en la parte desarrollada del mundo, sería inconcebible. Sin metales ni minerales, la otra parte del mundo, la subdesarrollada, no puede ni soñar con llegar a poseer los privilegios de los que gozan los habitantes del mundo desarrollado.

Muchos hablan de llevar la educación (como salvación) al mal llamado “tercer mundo”; a estos me gustaría recordarles que sin cobre no hay energía eléctrica y sin esta, los alumnos no podrían ni “leer” después de la puesta de sol (menos aún “enchufar” un ordenador a la red eléctrica). Empecemos entonces por donde corresponde, llevando al progreso a donde se necesita, sin olvidar que este se sustenta en una base minera. Por favor, que nadie olvide esto último.

Hasta siempre,

ROBERTO OYARZUN

Madrid, Julio de 2011

Bibliografía

Atención: Algunos links han sido divididos por estética, deberán ser restaurados antes de pegar en un browser.

- Higueras, P. y Oyarzun, R., 2007. Minerales, metales, compuestos químicos, y seres Vivos: una difícil pero inevitable convivencia. En: Apuntes de Geología de Minas: Exploración y Evaluación (R. Oyarzun), http://www.aulados.net/Geologia_yacimientos/Geologia_Minas/Geologia_Minas_portada.htm
- Oyarzún, J. y Oyarzun, R., 2011. Minería Sostenible: Principios y Prácticas. Ediciones GEMM – Aula2punto.net, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html
- Van Berkel, R. 2007. Eco-efficiency in primary metals production: context, perspectives and methods. Resources, Conservation and Recycling, 51, 511-540.

Fuente de las imágenes (a Julio de 2011)

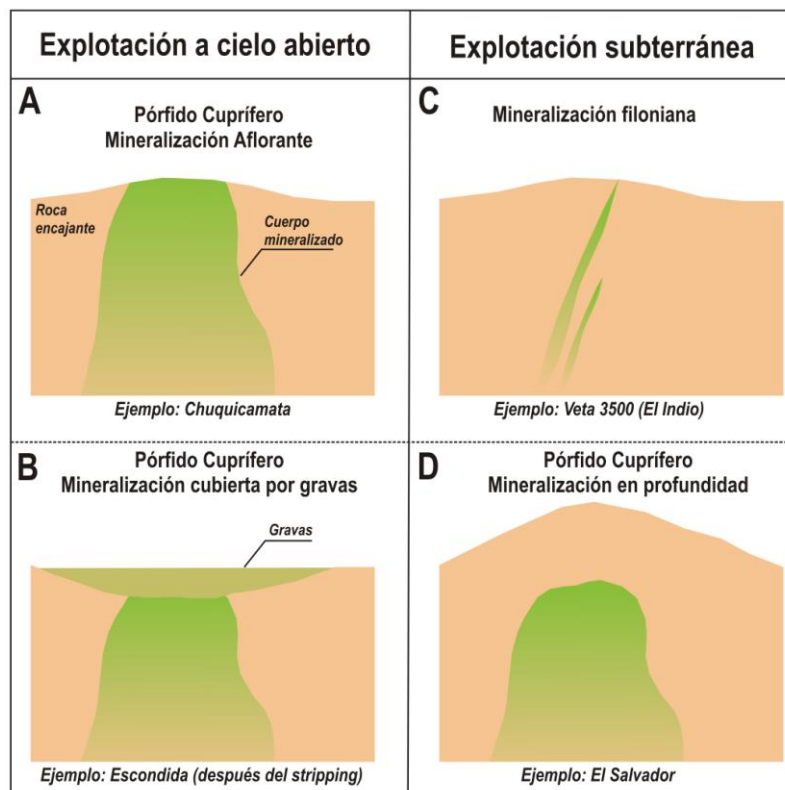
1. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Greenpeace_vessel_in_1991.jpg

1. Una introducción a las explotaciones mineras

1.1 Ideas fundamentales

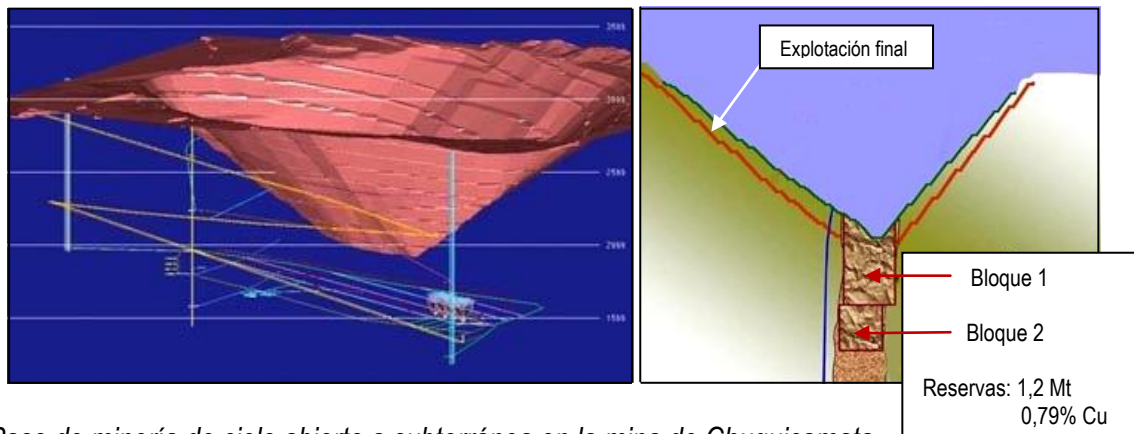
El diseño y elección del método de explotación en una mina no es competencia de un geólogo; tampoco lo es la voladura de rocas, pero sobre uno y otro tema tiene mucho que aportar en un trabajo de colaboración con los ingenieros de minas. Las razones son las siguientes:

1. El método de explotación se elige en función de las características morfológicas del o de los cuerpos mineralizados y su relación con la superficie.
2. También incide en la elección las características estructurales (p.ej. fracturación) del macizo de roca que alberga la mineralización.
3. Para el tema de voladura de rocas, las propiedades estructurales del banco o macizo de roca en profundidad incidirán de manera crucial en el diseño del diagrama de disparo, el tipo de explosivo y la cantidad de este.



Ejemplos muy simples (A-D) sobre la elección entre minería a cielo abierto o subterránea en función de la morfología del depósito y cercanía a superficie: cuatro ejemplos de Chile.

Si nos centramos en el punto 1, la primera elección que hay que adoptar se refiere a si la explotación minera será a cielo abierto o subterránea. Esto dependerá nuevamente de varios factores. Hay que considerar la morfología del cuerpo (regular o irregular) y la cercanía de la mineralización a superficie. Por ejemplo, para un cuerpo irregular aflorante (A) o cercano a la superficie y sólo cubierto por gravas removibles (*stripping*) a un coste asumible (B) (ver figura anterior), la elección recae en la minería a cielo abierto. Pero si tratamos con cuerpos regulares como las masas filonianas (C), la elección recaerá en los métodos de explotación subterráneos, aunque al comienzo podría realizarse una operación a cielo abierto dependiendo de las dimensiones (potencia) del cuerpo filoniano. La razón es simple, a cielo abierto la razón estéril/mineral sería inasumible después de un tiempo (la obra minera no solo avanza en la vertical sino que también en la horizontal). Al respecto, una operación a cielo abierto (como en A) también con los años puede pasar a subterránea dependiendo de múltiples factores técnicos y económicos. Por otra parte, si la mineralización es irregular, pero en profundidad (D), la elección también recaerá en un método subterráneo, ya que hacer *stripping* en roca dura seguramente superaría cualquier coste económico razonable.



Paso de minería de cielo abierto a subterránea en la mina de Chuquicamata, programado para 2013 (Minería Chilena, 2004).



A la izquierda, la mina a cielo abierto de Chuquicamata; a la derecha, preparación de las labores subterráneas bajo la explotación actual (imagen¹).

Con respecto a los puntos 2 y 3 podemos concluir que la comunicación fluida entre los diferentes departamentos de una mina es crítica, para que el día a día de la explotación funcione adecuadamente, y por supuesto, la planificación a futuro se

realice bajo bases sólidas. Por lo tanto, dado que el geólogo de mina interaccionará con sus colegas de los departamentos de ingeniería, es importante que al menos tenga una visión de conjunto, aunque solo sea somera, sobre los diferentes métodos de explotación.

1.2 Terminología de interior mina

En minería subterránea todo se resume en dos términos ingleses:

- *Stoping* → *to remove (ore) from or mine by means of a stope* → *an excavation in the form of steps made by the mining of ore from steeply inclined or vertical veins.*
- *Caving* → *to cause to collapse or fall in.*

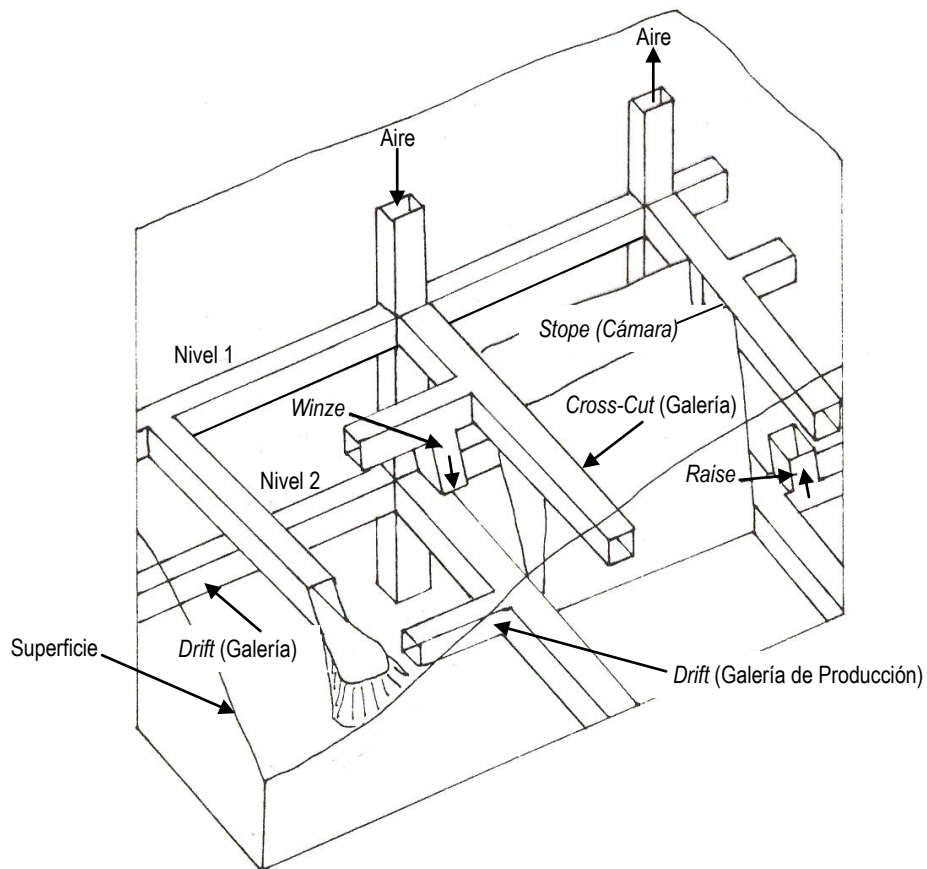
A fin de cuentas, bien se excavan agujeros bajo la superficie siguiendo la mineralización o se colapsa la masa mineral. Al respecto, no hay que entender la minería subterránea como algo de un pasado remoto, ya que yacimientos muy importantes en el mundo se explotan hoy en día a través de este procedimiento. Entre éstos podemos resaltar las minas de oro del Witwatersrand (Sudáfrica; las más profundas del mundo), El Teniente (Chile), Olympic Dam (Australia) o Neves Corvo (Portugal).

En este anexo usaremos una terminología clásica (en inglés), de amplia implantación en distintos países. Estos términos fueron recogidos por el US Bureau of Mines, en 1936. Desde entonces ha cambiado el grado de mecanización de los trabajos, pero no la filosofía básica de éstos. Antes de entrar en los métodos propiamente tales, revisaremos algunos términos básicos en minería subterránea.

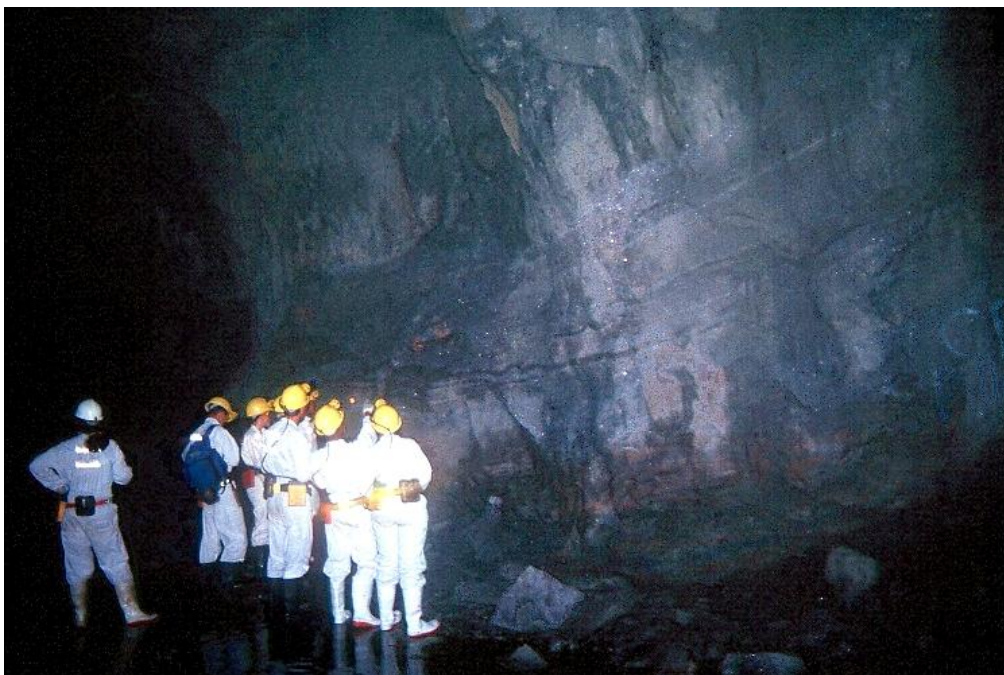
Si la explotación se va a realizar a cotas inferiores del terreno base, entonces el acceso a las labores se realizará por un pozo (*shaft*) o una rampa (*decline spiral, decline, ramp*). Los pozos cumplen diversas funciones, entre otras permitir el acceso y salida del personal de mina, la ventilación de las labores mediante inyección de aire desde la superficie, y por supuesto, el transporte del material extraído a la superficie. Las rampas por su parte han ido ganando adeptos con gran velocidad en la minería moderna. Estas permiten el acceso directo a la mina de camiones, lo que facilita las labores de transporte de mineral.

Dentro de la mina tenemos las galerías, que pueden ser en la dirección de la masa mineralizada (→ *drifts*) o perpendiculares a ésta (→ *cross-cuts*). La conexión entre los distintos niveles de una mina se realiza por pozos inclinados (→ *raise – winze*), que sirven para el trasvase de mineral y el movimiento del personal. Tendremos niveles de producción, y por debajo de éstos, de transporte de mineral. Entre los

equipos más comunes están los minadores (*miners*), las perforadoras tipo Jumbo, los equipos de carga y transporte de mineral tipo LHD (\rightarrow *load-haul-dump*), etc.



Principales tipos de labores mineras en una mina subterránea. Adaptada de Shackleton (1986).



Gran cámara (stope) en la mina Broken-Hill (Australia) (imagen²).



A la izquierda, Jumbo perforando con sus dos brazos articulados (visto desde atrás); a la derecha, equipo LHD en operación de carga (imágenes^{3,4}).

En cuanto a la minería a cielo abierto, los principales elementos a tener en consideración son el sistema de explotación por bancos, el ángulo de talud de la explotación, el ángulo de los bancos y el diseño de las pistas de rodaje para el acarreo de mineral.



Operación minera a cielo abierto (imagen⁵).

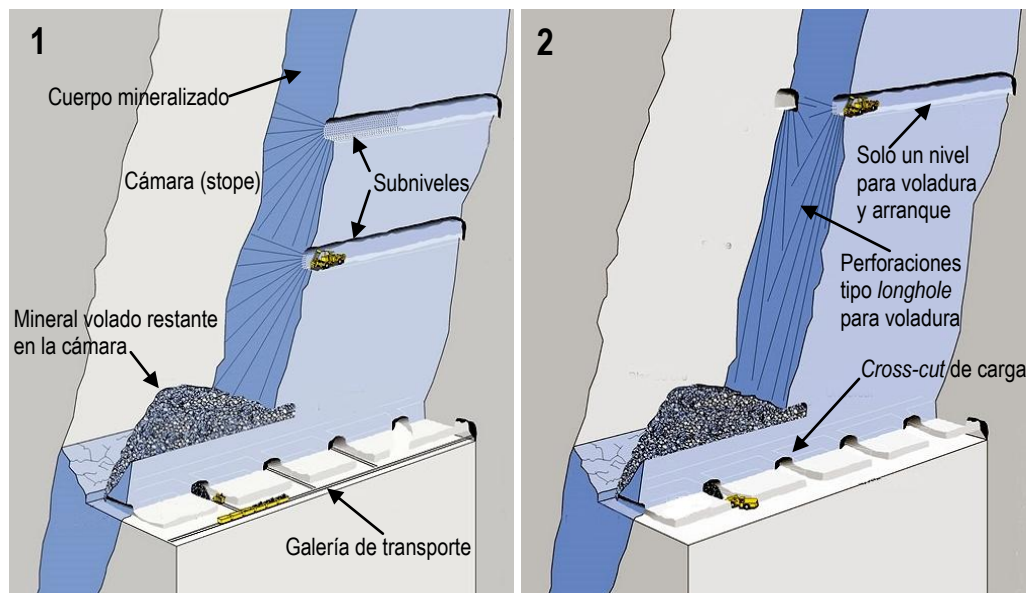
2. Principales métodos de explotación

2.1 Minería subterránea

Los métodos de explotación subterránea se eligen en función de la morfología del cuerpo (regular – irregular) y las características geotécnicas del macizo de roca. Así habrá métodos específicos para labores mineras autosostenibles (roca en buenas condiciones) y para aquellas que requieren de algún tipo de sustentación, por problemas de estabilidad. Esto último se puede realizar rellenando las cámaras (stopes) de explotación con materiales externos o internos. La minería subterránea está llena de desafíos. Algunas explotaciones, como las de oro en el Witwatersrand alcanzan más 3 km de profundidad; ahí las temperaturas superan con creces los 40°C (aún con ventilación fría forzada) y el riesgo de explosiones de roca es elevado.

A. Cámaras naturalmente (auto) sostenidas

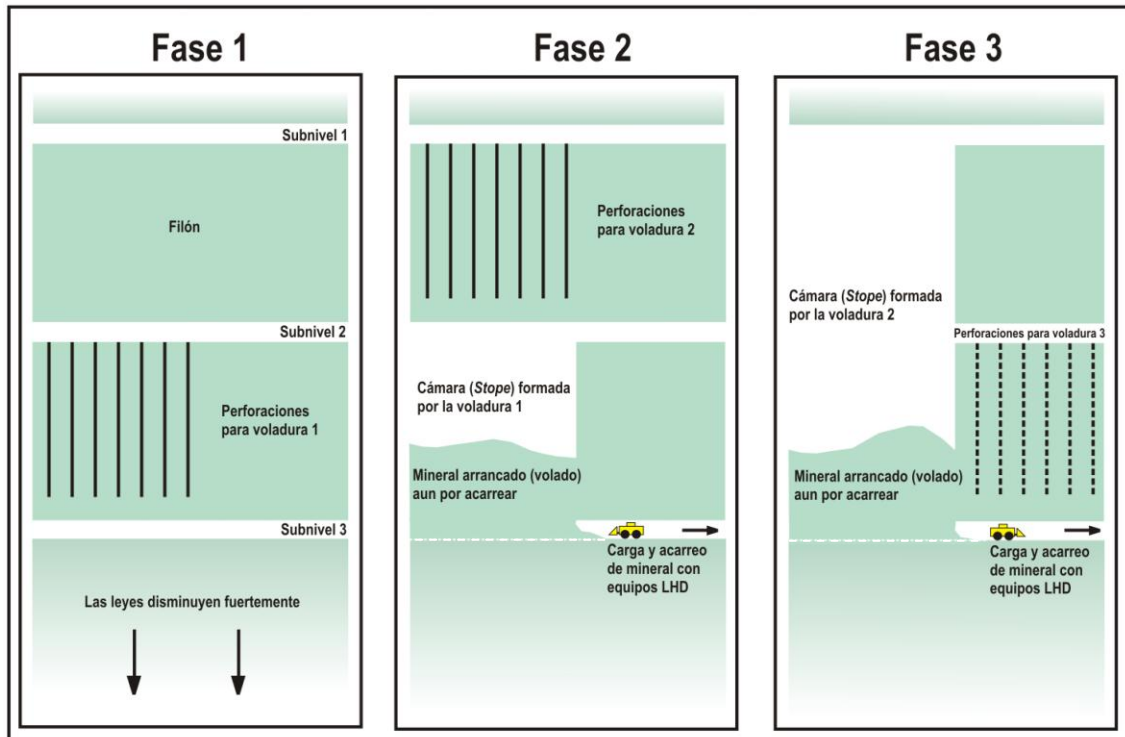
- Cámaras Abiertas (*Open Stoping*): Cuerpos filonianos o estratiformes con gran buzamiento. (1) Hundimiento por Subniveles (*Sublevel Stopping*). (2) *Longhole Stopping*. La principal diferencia radica en la longitud de perforación para voladura y el número de niveles de explotación asociados.



Diagramas simplificados sobre los métodos de hundimiento en sus vertientes 1 (sublevel stopping) y 2 (longhole stopping) (imágenes^{6,7}) (Atlas Copco, 2007).



Equipo LHD como los que operan cargando en los cross-cuts (imagen⁸), Fotografía: Kelly Michais.



Esquema simplificado (explicado por fases) del método de Hundimiento por Subniveles. En este caso consideramos un filón y perforaciones verticales. La sección pasa “a lo largo” del filón.

- Cámaras con Soporte de Pilares (*Room and Pillar*). Método particularmente indicado para cuerpos mineralizados con escaso buzamiento, por ejemplo, cuerpos tipo manto en secuencias poco plegadas.

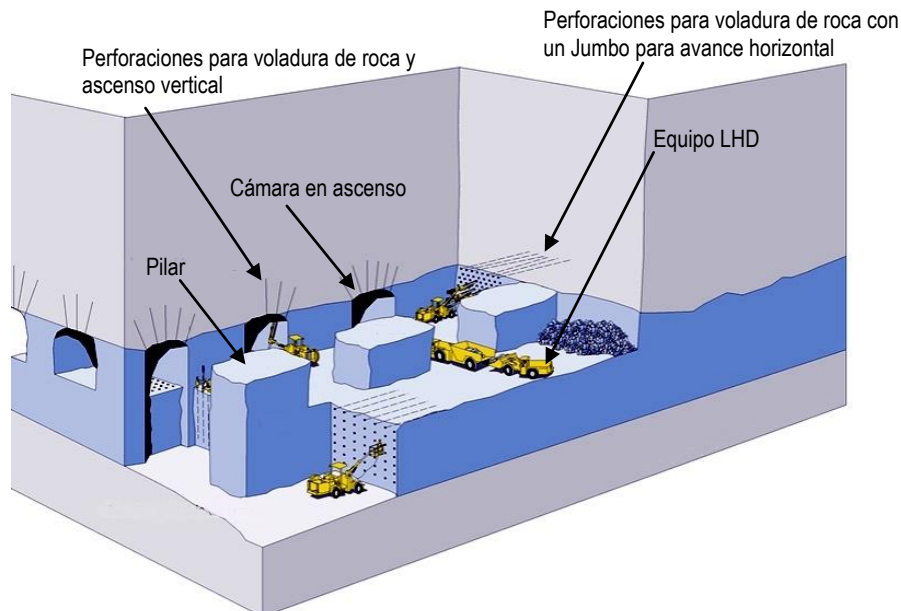


Diagrama simplificado que muestra una operación minera por el método de Cámaras y Pilares (*Room and Pillar*) (imagen⁹) (Atlas Copco, 2007).

B. Cámaras artificialmente sostenidas

Si la roca no es autosostenible, por ejemplo, por encontrarse muy fracturada, no se podrán dejar cámaras abiertas como en el caso del hundimiento por subniveles. El problema se resuelve de dos maneras: acumulando parte del mineral volado dentro de la cámara (este sustentará la labor), o bien rellenando con arenas o colas de la planta de flotación. En el primer caso hablamos de Almacenamiento de Zafras (*Shrinkage Stopping*), cuyo nombre en español proviene del árabe (*sajra* = piedra). En el segundo, hablamos de Corte y Relleno (*Cut and Fill*). Ambos procedimientos son los indicados para filones o capas plegadas con gran buzamiento. Existe un tercer método llamado Grandes Barrenos en Cráter (*Vertical Crater Retreat: VCR*), que posee elementos de los dos procedimientos anteriores.

- Almacenamiento de Zafras (*Shrinkage Stopping*), donde el avance de la labor se realiza “hacia arriba”. El procedimiento está basado en el fenómeno de “esponjamiento” del mineral arrancado, esto es, el volumen aumenta una vez que el filón ha sido volado debido al contacto irregular entre los fragmentos. Esto permite que el mineral sea extraído por los buzones, mientras siempre permanece un volumen en la cámara que permite seguir trabajando hacia arriba.

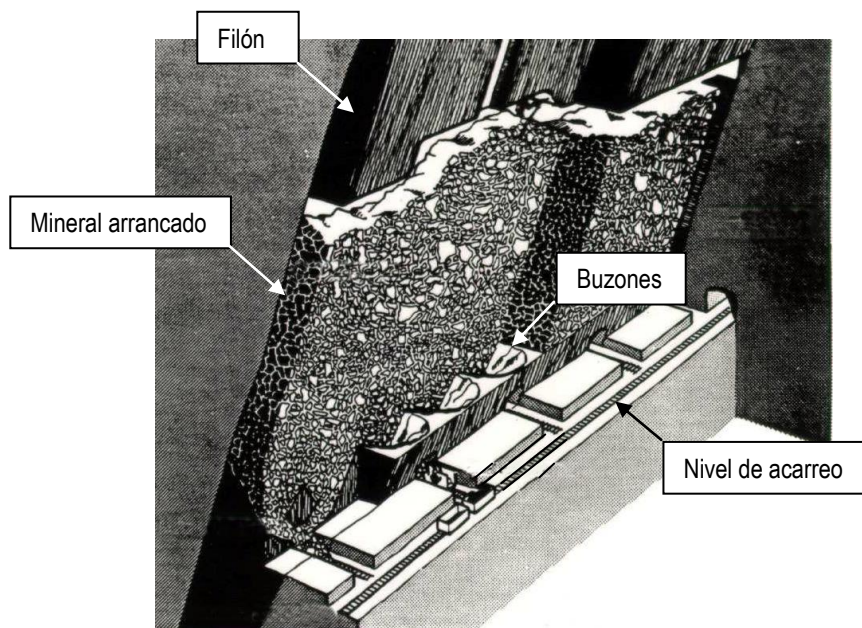


Diagrama simplificado que muestra una operación minera por el método de Almacenamiento de Zafras (*Shrinkage Stopping*). Adaptada de Rossi (1990).

- Corte y Relleno (*Cut and Fill*), procedimiento equivalente al anterior, pero en vez de rellenar con el mismo mineral arrancado, se utiliza arena o colas de flotación. Esto último puede tener interés ambiental, ya que rellenar las labores mineras en profundidad con un material que en superficie presenta

múltiples problemas puede ser una solución. Eso sí, hay que considerar la interacción de las aguas subterráneas con las colas.

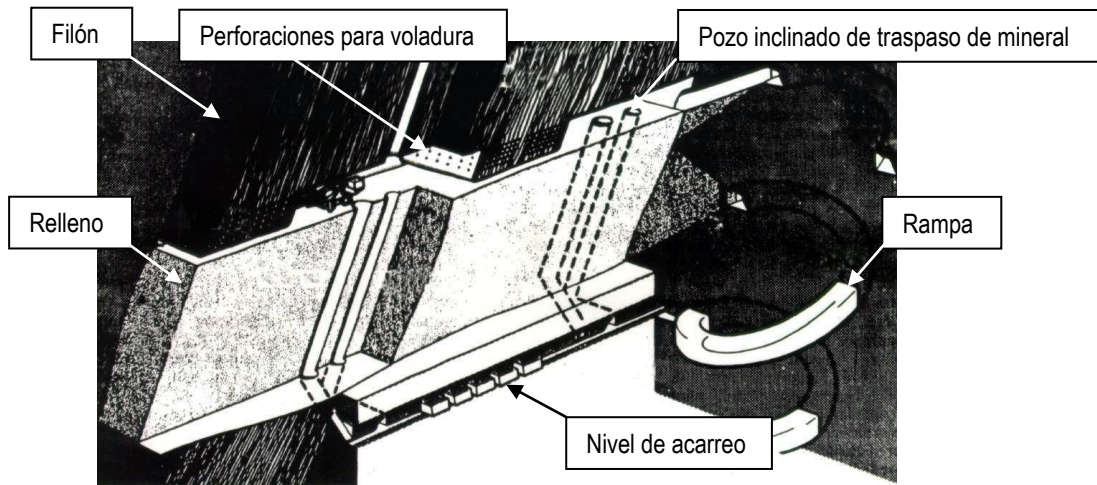


Diagrama simplificado que muestra una operación minera por el método de Corte y Relleno (Cut and Fill). Adaptada de Rossi (1990).

- Grandes Barrenos en Cráter (Vertical Crater Retreat, VCR), procedimiento híbrido en el que durante un tiempo se mantiene el mineral dentro de la cámara (como en *Shrinkage Stopping*) y luego esta es rellena con material externo a la mina (como en *Cut and Fill*).

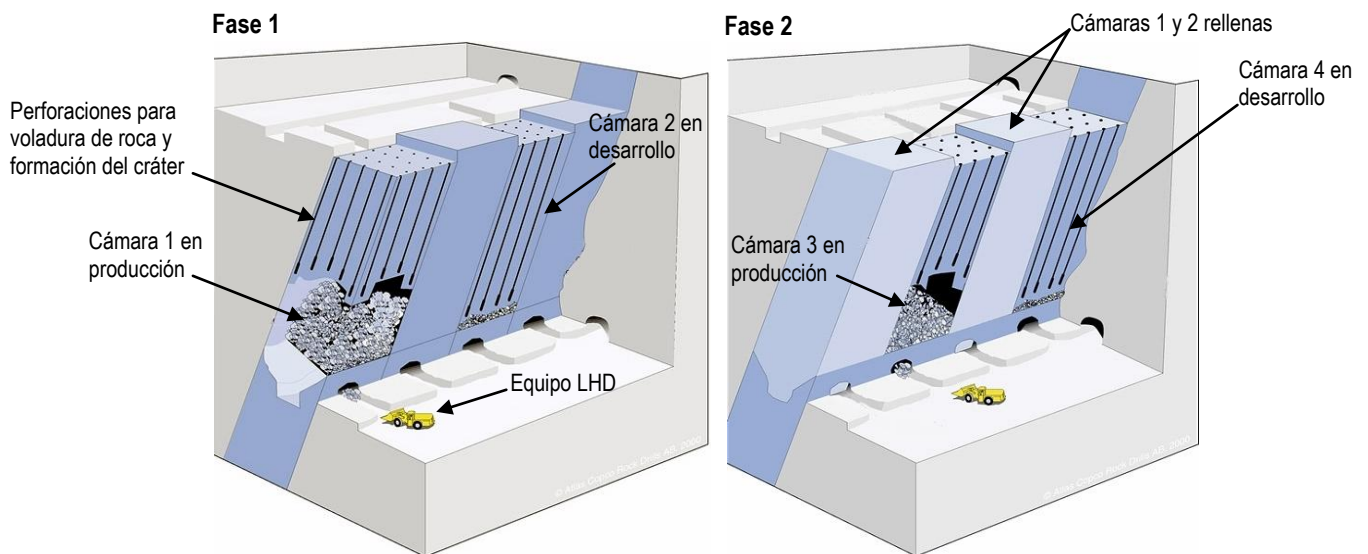


Diagrama simplificado que muestra una operación minera por el método de Grandes Barrenos en Cráter (Vertical Crater Retreat) (imágenes¹⁰) (Atlas Copco, 2007).

C) Hundimiento (caved stopes)

Existen dos variantes en esta metodología. La más conocida por su aplicación en los gigantes del cobre, esto es, los pórfidos cupríferos, es el método por Hundimiento de Bloques (*Block Caving*). El segundo se denomina Pisos de Hundimiento (*Sublevel Caving*) y también es utilizado para grandes cuerpos mineralizados pero, a diferencia de los pórfidos cupríferos, con una dirección y fuerte buzamiento. Además estos cuerpos deben poseer una importante continuidad en profundidad (Atlas Copco, 2007).

- Hundimiento de Bloques (*Block Caving*). A destacar en esta metodología que se basa fuertemente en la gravedad: A) Un nivel de hundimiento desde donde se realiza la voladura de la base del bloque para lograr su colapso, contribuyendo así a su trituración; B) Una zona de traspaso que consta de buzones, pozos inclinados, y un nivel de selección (*grizzly level*); y C) Un nivel de acarreo. Dadas las características del proceso (colapso inducido de una enorme columna de roca) hay que tener en cuenta los posibles fenómenos de dilución de leyes que puedan ocurrir; colapsar un bloque (de diseño “en el papel u ordenador”) sin que entre “algo” de material del bloque adyacente es improbable.

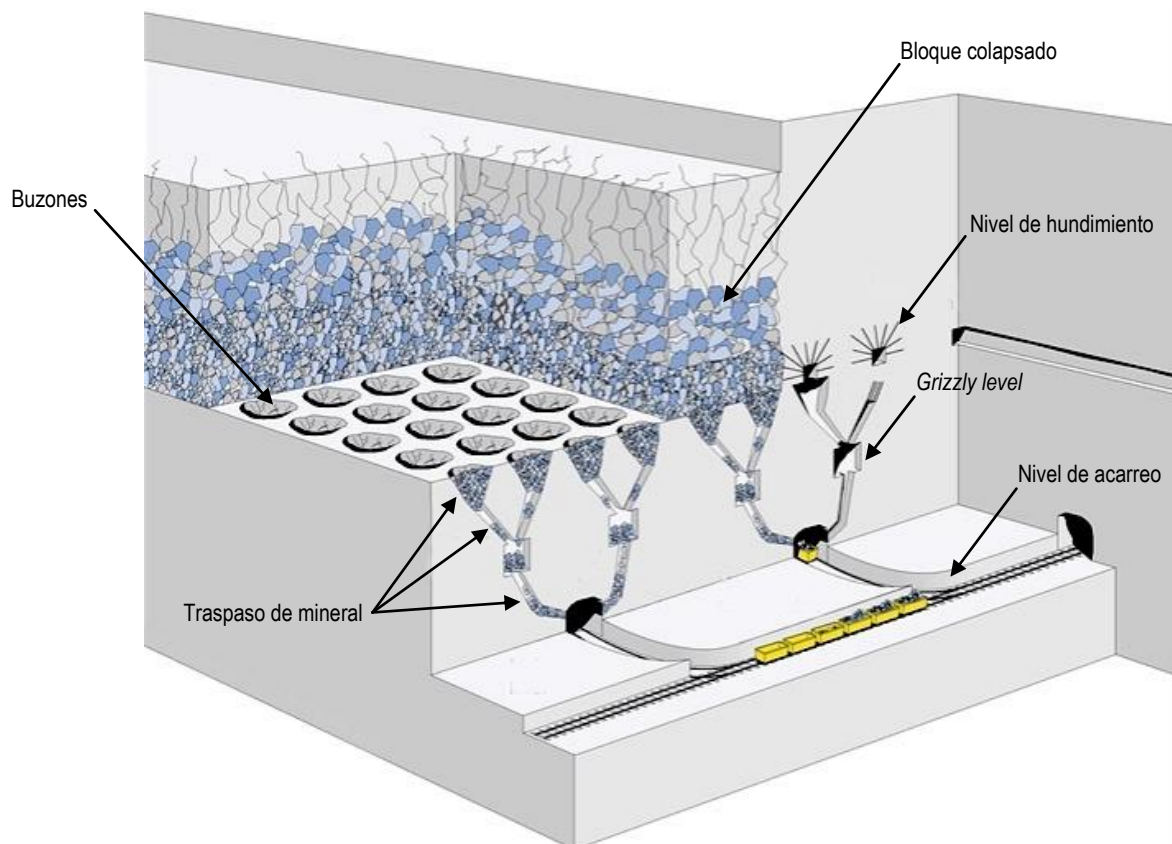
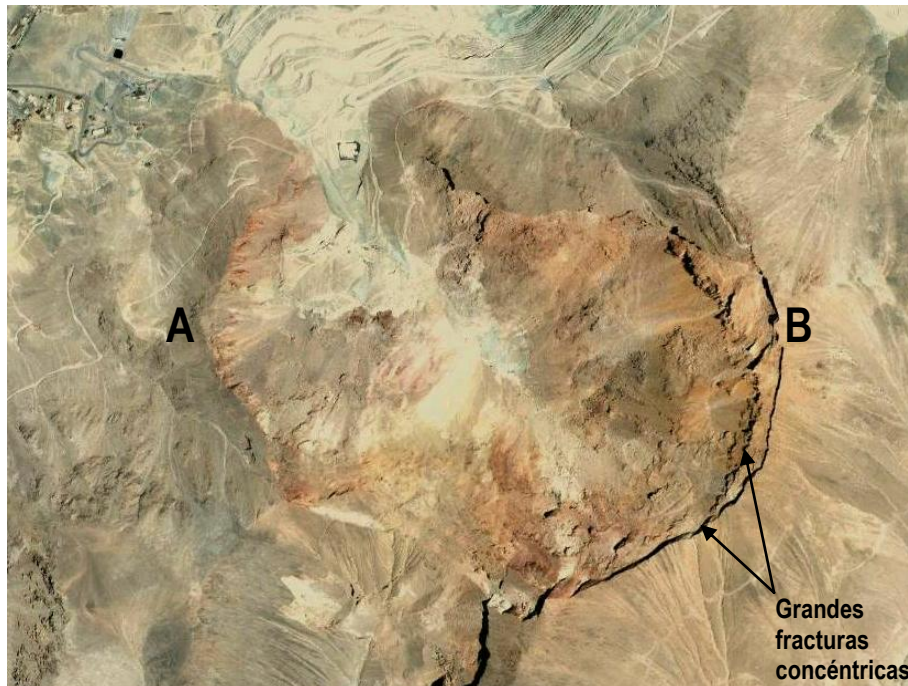


Diagrama simplificado que muestra una operación minera por el método de Hundimiento de Bloques (*Block Caving*) (imagen¹¹) (Atlas Copco, 2007).



Cráter de colapso de la mina El Salvador. La distancia A-B es de 1,60 km. Norte hacia arriba. Imagen Google Earth.

- Pisos de Hundimiento (*Sublevel Caving*). Se trata de una metodología que de alguna manera comparte elementos con los métodos de *Sublevel Stopping* y *Block Caving*.

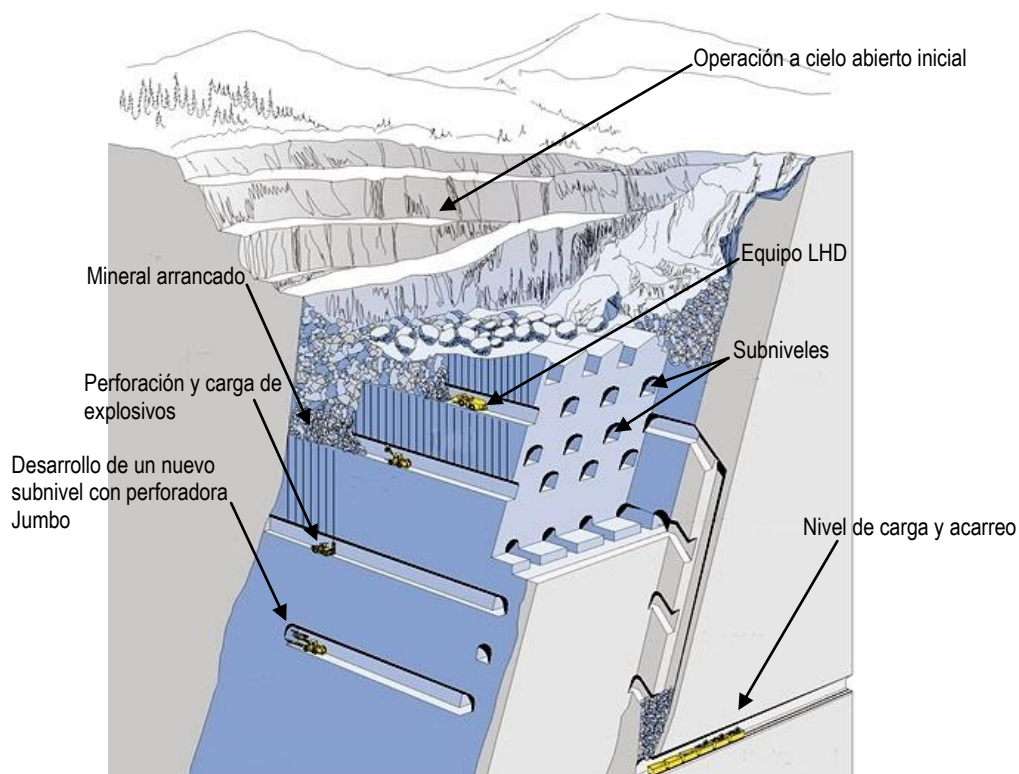


Diagrama simplificado que muestra una operación minera por el método de Pisos de Hundimiento (*Sublevel Caving*) (imagen¹²) (Atlas Copco, 2007).

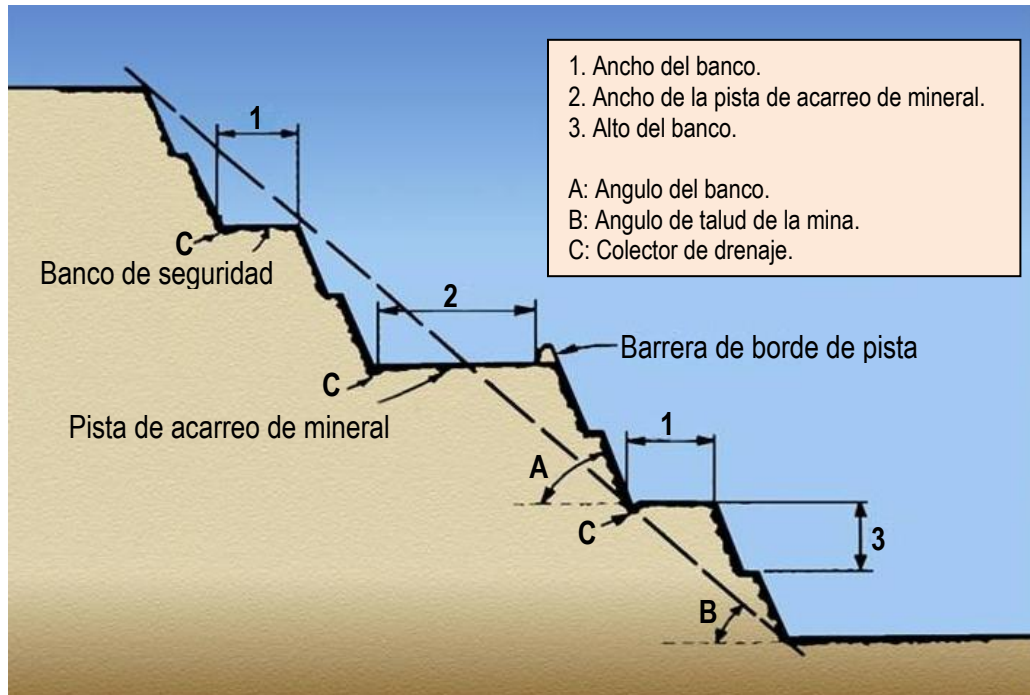
2.2 Minería a cielo abierto

En lo que respecta a minería a cielo abierto, los temas clave son:

- La profundidad y vida útil del proyecto minero. Angulo del talud.
- El potencial para cambios en las condiciones geomecánicas del macizo de roca, como en la respuesta a esfuerzos, eventos sísmicos, cambios litológicos, etc.
- El tamaño, forma y orientación de la excavación.
- La ubicación de los principales bancos de trabajo y las rutas de transporte.
- El potencial para problemas con las aguas superficiales y subterráneas.
- El equipo a utilizar, los métodos de excavación, y manejo del mineral y el estéril.
- Relaciones con el exterior, vías públicas, ferrocarriles, tuberías, canales naturales de drenaje o edificios públicos.
- La posibilidad de que el público tenga acceso a las labores mineras durante y después de la actividad minera.
- Evolución temporal del macizo de rocas, especialmente después del cierre minero.



Grandes minas a cielo abierto. Arriba, Grasberg (Irian Jaya, Indonesia); abajo izquierda, Palabora (Sudáfrica); a la derecha Bingham (Estados Unidos) (imágenes¹³⁻¹⁵).



Principales elementos en una explotación a cielo abierto. Adaptada de Coal Trading Blog (2010).



Mina Radomiro Tomic (RT), Distrito Minero de Chuquicamata. A la izquierda, geólogos en la “torre de control” de RT; a la derecha, operación de carga de un camión, en segundo plano se aprecian los bancos de la mina (RT).

Digamos finalmente que en términos muy simples, las minas a cielo abierto son enormes excavaciones que se explotan volando roca mineralizada y estéril o sub-económica, tanto en la horizontal como en la vertical; es decir, las explotaciones a cielo abierto progresan en ambos sentidos. Esto tiene que ser así para mantener un ángulo de talud seguro y evitar así accidentes por colapso de uno de los flancos de la explotación. Las minas a cielo abierto pueden llegar a tener cientos de metros de profundidad y varios kilómetros de ancho y largo.

Bibliografía

Atención: Algunos links han sido divididos por estética, deberán ser restaurados antes de pegar en un browser.

Atlas Copco, 2007. Mining Methods in Underground Mining. http://www.atlascopco.com/us/news/applicationstories/reference_book_about_underground_mining_methods_in_a_new_edition.asp

Coal Trading Blog, 2010. Mine design: benching. <http://bestcoaltrading.blogspot.com/2010/06/mine-design-benching.html>

Department of Minerals and Energy, 1999. Geotechnical considerations in open pit mines guideline. The Government of Western Australia, http://www.dmp.wa.gov.au/documents/Guidelines/MSH_G_GeotechnicalConsiderationsOpenPitMinespdf.pdf

Rossi, G., 1990. Biohydrometallurgy. McGraw-Hill, NY, 609 pp.

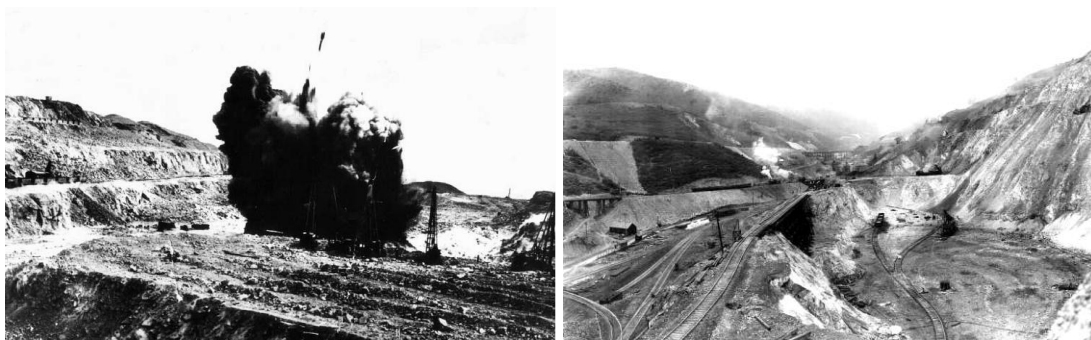
Shackleton, W.G., 1986. Economic and Applied Geology. Croom-Helm, London, 227 pp.

Fuente de las imágenes (a Julio de 2011)

1. <http://www.elamerica.cl/principal/chuquicamata-subterraneo-avanza-con-fuerza-y-se-acerca-la-licitacion-de-obras-tempranas/>
2. <http://web.uct.ac.za/depts/geolsci/dlr/hons2000/index.html>
3. http://www.vista-start-smart.com/html/body_mining_ug_drill_simulator.html
4. <http://www.westrac.com.au/pages/productsfamily.aspx?psfid=13866081>
5. http://www.psmconsult.com.au/open_pit.html
6. <http://img01.atlascopco.com/lowres/jpeg/202540.pcd.jpg>
7. <http://img01.atlascopco.com/lowres/jpeg/202541.pcd.jpg>
8. <http://www.flickr.com/photos/28685581@N06/2739967133>
9. <http://img01.atlascopco.com/lowres/jpeg/202534.pcd.jpg>
10. [http://194.132.104.143/Websites%5CRDE%5Cwebsite.nsf/\\$All/2B0103C539FA78984125674D004AA392?OpenDocument](http://194.132.104.143/Websites%5CRDE%5Cwebsite.nsf/$All/2B0103C539FA78984125674D004AA392?OpenDocument)
11. <http://img01.atlascopco.com/lowres/jpeg/202546.pcd.jpg>
12. [http://194.132.104.143/Websites%5CRDE%5Cwebsite.nsf/\\$All/DD6EE84F7D32F22F4125674D004C122B?OpenDocument](http://194.132.104.143/Websites%5CRDE%5Cwebsite.nsf/$All/DD6EE84F7D32F22F4125674D004C122B?OpenDocument)
13. <http://kaganga.com/i-want-to-know/grasberg-mine-in-indonesia-big-hole-mine.html>
14. <http://www.pbse.com/bmcmorrow/image/46101662>
15. <http://www.pipiota.com/2008/09/los-10-hoyos-ms-impresionantes-del.html>

1. Sobre el Distrito Minero de Chuquicamata

Hablar del Distrito Minero de Chuquicamata es hacerlo “a lo grande”, todo lo es, su historia, el tamaño de sus minas, su producción, sus reservas, etc. El distrito recibe el nombre de la mina principal, Chuquicamata, que tradicionalmente ha “competido” con Bingham Canyon (Estados Unidos) por cual es la mayor excavación hecha por el hombre en el planeta. El 18 de mayo de 1915 puede ser considerado como la fecha oficial del inicio de Chuquicamata, cuando los hermanos Guggenheim inauguraron las instalaciones (Norte Minero, 2001), aunque ya en 1910 comienza la explotación de Chuquicamata, a cargo de la Chile Exploration Company (propiedad de la familia Guggenheim) (Codelco Educa, 2011).



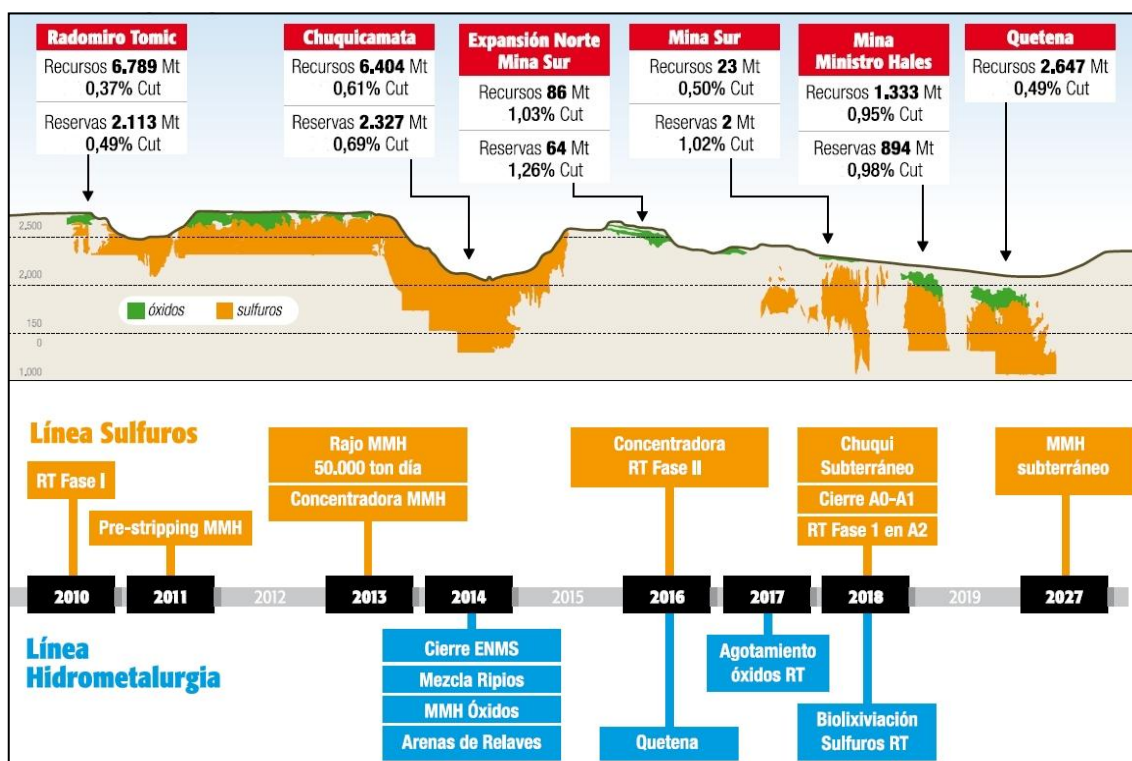
Los comienzos de la minería a gran escala. A la izquierda, voladura de roca en Chuquicamata ca. 1920; a la derecha, Bingham en 1909 (imágenes^{1,2}).

Pero si algo tienen en común Bingham Canyon y Chuquicamata, más allá del tamaño actual de uno y otro, es el tipo de yacimiento mineral, ambos corresponden a casos de yacimientos tipo pórfido cuprífero. Además, ambos entraron en producción en la misma época.

En 1966, se inició un proceso llamado *chilenización del cobre*, que consistió en la creación de sociedades mixtas con las empresas norteamericanas en las cuales el Estado de Chile tendría el 51 por ciento de la propiedad de los yacimientos. El proceso afectó a las principales minas de Chile en esa época: Chuquicamata, Andina, El Teniente y El Salvador. Sin embargo el gran cambio llegó en 1971, cuando el Congreso de Chile aprobó el proyecto sobre *nacionalización de la gran minería del cobre*. A su vez, en 1976 se creó la actual empresa minera que gestiona las minas del distrito de Chuquicamata, El Salvador, Andina y El Teniente, esto es, la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO) (Codelco Educa, 2011).



Parte del Distrito Minero de Chuquicamata (Norte de Chile) (imagen Google Earth). La imagen cubre 20 km en dirección N-S, y el norte está indicado por la flecha amarilla grande. Tomada de Oyarzún y Oyarzun (2011)



Recursos minerales del Distrito Minero de Chuquicamata (sección ~ N-S) mostrando además fechas de cierre y apertura de operaciones en las diversas minas (Minería Chilena, 2010).
 Glosario: Cut: cobre total; MMH: Mina Ministro Hales, también conocida como MM o Mansa Mina; Mt: millones de toneladas; Óxidos: todo tipo de minerales oxidados de cobre; Rajo: corta, open pit; Ripios: roca triturada para lixiviación en pila; RT: Mina Radomiro Tomic. Tomada de Oyarzun y Oyarzún (2011).

Comentan Oyarzún y Oyarzun (2011) que quizás el ejemplo más notable de sinergias en el campo de la nueva minería del cobre lo constituya CODELCO Norte, con la fundición de Chuquicamata, Mina Sur y la mina Radomiro Tomic (RT) (Distrito Minero de Chuquicamata, Región de Antofagasta, Chile). La fundición de Chuquicamata produce ácido, Mina Sur y RT lo consumen para su tratamiento de minerales oxidados de cobre, constituyendo así un gigantesco complejo minero-metalúrgico con una producción combinada anual de unas 875.000 toneladas de cátodos con una pureza de 99,99% Cu. Se trata de una cifra inmensa, equivalente a la producción anual de todas las minas de Australia.



Construcción de las pilas de lixiviación en RT.



Izquierda, soluciones ricas en cobre que emergen de la base de las pilas de RT. Las soluciones pasan a continuación a una planta de SX/EW para la producción de cátodos de cobre. A la derecha vagones cargados de cátodos rumbo al puerto de Antofagasta para su exportación a diferentes países del mundo (imagen³).

The Chuquicamata mine is a large open pit copper mine located 1,650km north of Santiago, Chile. The mine, popularly known as Chuqui, has been operating since 1910. Despite being explored for over 90 years, the mine produced 29 million tonnes of copper by the end of 2007.

The mine is owned and operated by Codelco and forms part of the company's Codelco Norte division, which includes Radomiro Tomic (RT), found on the same mineralised system, the developing Alejandro haies mine, and the newly discovered Toki cluster of copper porphyries. The Chuquicamata site is expected to be closed by 2013.

A new underground mine will be developed in addition to the present open pit mine. The conceptual engineering for the underground Chuquicamata mine began in 2007 and was finalised in March 2009.

Underground mining

The new underground mine will begin operations in 2018. Four subterranean tunnels extending 1,500km will be constructed under the surface of the mine.

The tunnels will deepen the mine by nearly 787m by the end of production in 2060. The underground mine will be developed at an estimated cost of \$2bn and will produce an estimated 120,000t/d.

Mining-Technology.com (2011)

2. Algunas imágenes del distrito

2.1 Chuquicamata



La operación minera de Chuquicamata (vista hacia el norte). Dimensiones (aproximadas): 4,3 km de largo, 3 km de ancho y 800 m de profundidad. Mayo de 2006.



Complejo metalúrgico de Chuquicamata. Al fondo, parte de las gigantescas escombreras. Mayo de 2006.

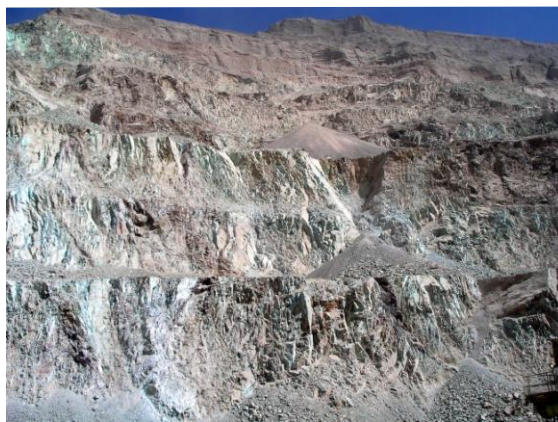


A la izquierda, vaciado de escorias a alta temperatura; a la derecha, vista de las escombreras desde el pueblo. Mayo de 2006.

2.2 Radomiro Tomic (RT)



La densa capa de polvo no permite apreciar bien el interior de la operación minera de Radomiro Tomic. Mayo de 2006.



A la izquierda los bancos, donde se pueden apreciar colores verdes y rojizos que representan a los oxidados de cobre y hierro; a la derecha, operación de carga de uno de los grandes camiones. Mayo de 2006.



Preparación de un banco para voladura. A la izquierda, perforadora; a la derecha, hueco de perforación (Mayo de 2006).

2.3 Mina Sur



En primer plano parte de las escombreras de Chuquicamata; al fondo, Mina Sur. Mayo de 2006.



Mineralización de oxidados de cobre en Mina Sur. Mayo de 2006.



Maquinaria minera en mina Sur. Mayo de 2006.

2.3 Cluster Toki



Pampa Toki, sitio del cluster de pórfidos del mismo nombre. Dentro de poco cambiará la imagen desolada que tiene ahora. Chuquicamata se encuentra a la izquierda detrás del cordón de montañas. A la derecha de la imagen se observan las líneas de sondeos. Abril de 2010.



Arriba y abajo, aspecto de Pampa Toki. Abril de 2010.



A la izquierda, sitio de uno de los sondeos; a la derecha, ascenso por una pista de tierra en el cordón occidental de cerros. Abril de 2010.

Bibliografía

Atención: Algunos links han sido divididos por estética, deberán ser restaurados antes de pegar en un browser.

- Codelco Educa, 2011. Historia. <https://www.codelcoeduca.cl/codelco/organizacion/t-historia.html>
- Minería Chilena, 2010. Codelco y su reestructuración. Revista Minería Chilena, 344, 10-15.
- Mining-Technology.com, 2011. Chuquicamata copper mine, Chile. Website for the mining, tunnelling and quarrying industries, <http://www.mining-technology.com/projects/chuquicamata-copper/>
- Norte Minero, 2001. Chuquicamata: historia de un gigante. <http://www.mercurioantofagasta.cl/site/apg/minero/pags/20010413163613.html>
- Oyarzún, J. y Oyarzun, R., 2011. Minería Sostenible: Principios y Prácticas. Ediciones GEMM – Aula2pontonet, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html

Fuente de las imágenes (a Julio de 2011)

1. http://www.aulados.net/Ciencia_Sociedad/Patrimonio_minero_Chile/Patrimonio_minero_Chile.pdf
2. <http://hickmansfamily.homestead.com/Bing1909.html>
3. <http://www.reuters.com/article/2011/04/12/us-europe-copper-idUSTRE73B2V420110412>