

# *Geología Estructural Aplicada a la Minería y Exploración Minera*

*Principios Básicos*

*JAVIER LILLO & ROBERTO OYARZUN*



Ediciones GEMM - [Aula2punto.net](http://Aula2punto.net)



2013

# **GEOLOGÍA ESTRUCTURAL APLICADA A LA MINERÍA Y EXPLORACIÓN MINERA: PRINCIPIOS BÁSICOS**

**JAVIER LILLO**

Departamento de Biología y Geología  
Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología  
Universidad Rey Juan Carlos  
Móstoles — España

✉ javier.lillo@urjc.es

**ROBERTO OYARZUN**

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

✉ oyarzun@ucm.es

---

**Control de Edición & Internet:** Roberto Oyarzun & Paloma Cubas  
GEMM - Aula2pontonet: [www.aulados.net/GEMM/GEMM.html](http://www.aulados.net/GEMM/GEMM.html)

*Bajo Licencia Creative  
Commons (2013)  
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:** Macizo de roca fuertemente fracturado, Mina RT, Distrito de Chuquicamata (Chile).

**Javier Lillo** concluyó sus estudios de Ciencias Geológicas en la Universidad Complutense de Madrid (España) el año 1985. Trabajó los primeros años para la Empresa Nacional Adaro de Exploraciones Mineras y como profesional libre, realizando tareas de exploración minera y cartografía geológica en el Macizo Varisco español. En 1988 se traslada a la Universidad de Leeds, en Inglaterra, donde obtuvo su PhD en 1993. En 1991 comienza a trabajar en la Compañía General de Sondeos S.A., donde participa en proyectos sobre emplazamiento geológico profundo para residuos de alta actividad, cartografía geológica y geología ambiental. Desde 1999 es profesor en la Universidad Rey Juan Carlos, actualmente como Profesor Titular en el Departamento de Biología y Geología de la Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología. Su actividad investigadora de los últimos años se centra en diferentes aspectos de geología ambiental, fundamentalmente relacionados con mineralogía, geoquímica e hidrogeología, enfocados a la caracterización de medios afectados por la actividad humana y al diseño de tecnologías que permitan la conservación de los recursos hídricos. Desde 2005 es codirector del Master Universitario de Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos (Universidad de Alcalá-Universidad Rey Juan Carlos). Javier Lillo es además colaborador externo del IGeA de la Universidad de Castilla – La Mancha.

**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, 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 Ciencias 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 Aula2pontonet y el GEMM. Roberto Oyarzun es además colaborador externo del IGeA de la Universidad de Castilla – La Mancha.



*Jack Wichaup, Al Rood, Bill Swayne, and Vin Perry, Turquoise Gulch (El Salvador, Chile) in 1956\*.*

\*: Imagen: *The History of Indio Muerto: A Copper Mine in Chile.* Frank Trask III, <http://www.losandinos.com/Indio%20Muerto.htm>

## INDICE (con enlaces a los capítulos)

### 1. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y MINERÍA: PORQUÉ Y PARA QUÉ

- 1.1 Un gran comienzo: sentando las bases de la geología de minas 1
- 1.2 Ecos de un pasado brillante: o cómo se encontró Kalamazoo 4
- 1.3 Otro campo crucial: la estabilidad de los macizos de roca 10
- 1.4. Propósitos de esta obra 12

### 2. PLEGAMIENTO Y FRACTURACIÓN: PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

- 2.1 Fuerzas y esfuerzos, o el origen de la deformación 17
- 2.2 Deformación: el porqué de la diversidad de estructuras 23

### 3. PLEGAMIENTO Y MINERALIZACION

- 3.1 Cuando las rocas se pliegan 33
- 3.2 Fluidos en pliegues 45
- 3.3 Exploración de *saddle reefs* auríferos y filones asociados 51
- 3.4 Resumiendo sobre el tema 58
- 3.5 Cuando el plegamiento es posterior a la mineralización 64

### 4. FALLAS, ZONAS DE FALLA Y MINERALIZACION

- 4.1 Cuando las rocas se rompen o simplemente fluyen en las profundidades 73
- 4.2 El mundo de las fallas y zonas de falla 80
- 4.3 En busca de los “espacios” para las masas minerales 94
- 4.4 Fluidos en fallas: dónde y porqué precipita la carga mineral 104
- 4.5 La transición dúctil-frágil: oro en las profundidades 114
- 4.6 Más allá de los fluidos: vulcanismo, plutonismo y sistemas de fallas 128
- 4.7 Imágenes y análisis de fallas: Cerro Negro Norte (Chile) 133

### 5. TECTÓNICA Y YACIMIENTOS: MÁS ALLÁ DE LO EVIDENTE

- 5.1 ¿Dónde buscamos yacimientos minerales y por qué? 150
- 5.2 Cuando extensión y compresión intercambian papeles de bueno y malo 164
- 5.3 Formación de cuencas, vulcanismo y un planteamiento estratégico 171

### 6. ESTRUCTURA Y ESTABILIDAD DE LOS MACIZOS ROCOSOS

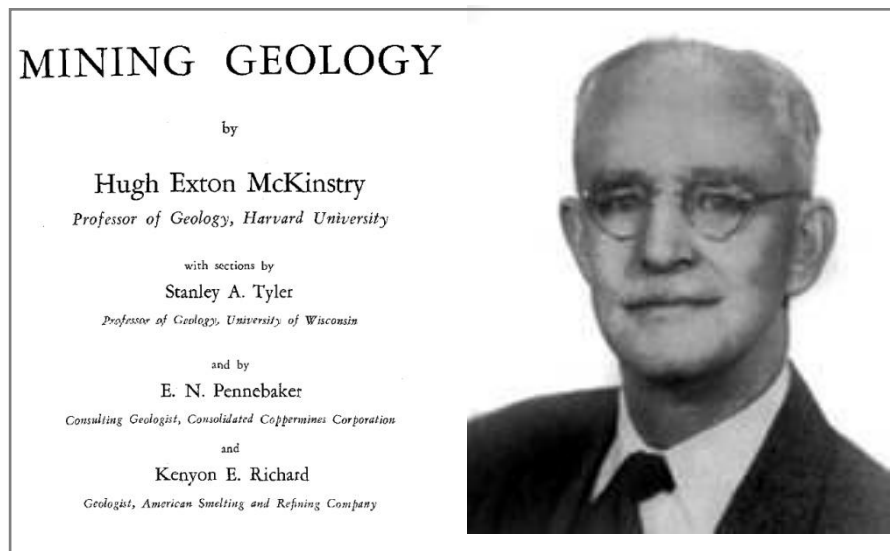
- 6.1 Introducción: la importancia de las estructuras preexistentes 181
- 6.2 Discontinuidades estructurales y estabilidad de macizos rocosos 183
- 6.3 Estado del macizo rocoso: una visión general de los problemas 187
- 6.4 Análisis cinemático: una aproximación sencilla a la evaluación de la estabilidad de macizos rocosos en excavaciones 191

### EPILOGO (VIEJOS Y NUEVOS TIEMPOS)

- 1. *Sobre anacronismo y modernidad* 197
- 2. *Viejos tiempos – Nuevos tiempos* 199
- 3. *De Anderson a Sibson* 201
- 4. *Lo que nos espera como colectivo* 201
- 5. *Una despedida* 203

## 1.1 Un gran comienzo: sentando las bases de la geología de minas

En 1948 la editorial Prentice Hall Inc. (NY) publicó un libro que pasaría a ser una de las obras más importantes en el mundo de la geología de minas, nos referimos a *Mining Geology*, que presentaba una visión integrada y balanceada de los conocimientos que debía poseer un geólogo para abordar las múltiples tareas que le esperaban en una mina a cielo abierto o subterránea. Esta es probablemente la obra más importante de Hugh Exton McKinstry, Profesor de la Universidad de Harvard, que sentaría en muchos sentidos las bases del trabajo de un geólogo en el mundo de la minería:



A la izquierda, aspecto de la primera edición del libro *Mining Geology*; a la derecha, el Profesor Hugh Exton McKinstry (1896-1961) (Sureda, 2008).

A diferencia de otros libros, éste iba más allá del mero trabajo rutinario del día a día en la mina y se implicaba además en el mundo de la exploración. En este sentido deberíamos preguntarnos: ¿dónde acaba la labor de interior mina y comienza la de exploración? ¿No es acaso la cartografía diaria y la proyección de litología, leyes y estructuras en el espacio una labor de exploración? Si no fuera así ¿a qué distancia del cuerpo mineralizado empieza la geología de exploración? Como en tantos aspectos de la vida al final todo depende de cómo queramos analizar la situación y será más un problema de semántica que cualquier otra cosa. No obstante, en nuestra opinión toda labor geológica que conlleve el hallazgo de “nuevas” reservas de mineral, aunque sólo hablemos de cambiar de categoría unas reservas de inferidas (posibles) a indicadas (probables) o a medidas

(probadas) es *per se* el resultado de un trabajo de exploración geológica; y lo será más aún si se encuentran en el yacimiento nuevos cuerpos mineralizados.

La segunda parte del libro de McKinstry trata sobre los principios geológicos que deben ser la base de la búsqueda y evaluación de cuerpos mineralizados (*Geological Principles of Ore-Search and Ore Appraisal*). Dentro de esta parte del libro, McKinstry introdujo sus famosas “guías” de exploración (fisiográficas, mineralógicas, litológicas, y de patrones de fracturación). Entre todas y dado el carácter de esta obra, queremos destacar las estructurales.

La vasta experiencia de McKinstry le hizo comprender que las fallas y zonas de falla jugaban un papel crítico en la localización de cuerpos mineralizados, tanto a la escala de yacimiento como a la regional. Normal podría uno decir, después de todo las soluciones hidrotermales se canalizan a través de espacios abiertos y ¿qué mejores espacios abiertos hay que los que generan las fallas?

Hasta aquí simple y directo, pero para llegar a relacionar el emplazamiento de cuerpos mineralizados con las fallas primero debemos entender “qué es una falla” y, sobre todo, cómo se reconoce en el campo y cómo se entiende su dinámica. En nuestra experiencia personal, la didáctica de la enseñanza sobre fallas, minerales y rocas adolece de un problema común y grave: tanto en las aulas como en el campo los alumnos ven casos casi perfectos.

Desgraciadamente la realidad cotidiana es algo más compleja y muchos hemos visto como los alumnos pueden pasar frente a una importante falla y no reconocerla, porque en vez de esa perfecta morfología planar que muestran los

*El geólogo económico y minero norteamericano **Hugh Exton McKinstry** (1896-1961), profesor de geología en la Universidad de Harvard, fue un gran entusiasta de la mineralogía de menas y de la investigación de los sistemas minerales en el equilibrio de fases entre azufre y metales. Reconocido explorador y evaluador de propiedades mineras, entre sus disciplinas predilectas figuraron también la geoquímica y la tectónica. Desde su niñez coleccionó minerales y estudió en el Haverford College. Ingresó a estudiar geología en el Massachusetts Institute of Technology (1917). La influencia de Waldemar Lindgreen lo llevó a dedicarse a la geología minera y fue su ayudante en el MIT por poco más de un año, entre 1920 y 1921. En los tres años siguientes revistó en el staff de geólogos de Cerro de Pasco Copper Corporation en Perú. Hacia 1925 ingresó en la Universidad de Harvard como instructor docente y ayudante de Louis Gratton, alcanzando su tesis doctoral en esta universidad (1926). Entre los años 1926 y 1940 viaja incansablemente como consultor minero adquiriendo considerable prestigio en el estudio de yacimientos minerales. Trabajó en México (1926-1929), en Canadá (1929-1932), en Sudáfrica, Australia y los Estados Unidos (1933-1940). Entre 1940 a 1945 integró el cuerpo docente de geología en la University of Wisconsin en Madison, pero sólo dictó clases por dos años, para luego ser convocado a Washington sirviendo al esfuerzo bélico durante la Segunda Guerra Mundial como Jefe en la Minor Ferro-Alloys Division of the Board of Economic Warfare (1942-1944) y jefe de la Minerals Division of the Foreign Economic Administration (1944-1945). Luego de la guerra ingresó como profesor de geología en la Universidad de Harvard (1945), donde se dedicó a la mineralogía, la geoquímica y la geología minera. Su amplia experiencia la plasmó en un libro de texto muy bien logrado, *Mining Geology* (1948), que fue objeto de intensa demanda en los Estados Unidos y en muchos países hispano-parlantes mediante una edición en español.*

Sureda (2008)

libros de geología estructural, lo que se observa es una roca fuertemente triturada, y a veces ni tan siquiera eso.

Para completar el desastre, los libros sobre yacimientos minerales se concentran cada vez más en las sutilezas físico-químicas e isotópicas de los fluidos mineralizadores más que en temas más “banales” (dicho irónicamente) como es la “geología” del yacimiento. Suponemos que revistas científicas especializadas como *Economic Geology*, *Mineralium Deposita*, y *Ore Geology Reviews* mantienen una sección de geología del yacimiento estudiado más por tradición que por otra cosa. Normal también, la mayoría de los trabajos están escritos o al menos co-escritos por profesores de universidad, más centrados actualmente en los aspectos de laboratorio que en los de campo de un yacimiento mineral.

## 1.2 Ecos de un pasado brillante: o cómo se encontró Kalamazoo

La historia que estamos a punto de contar constituye una de las páginas más gloriosas de la exploración de yacimientos minerales, y se inicia en Arizona (USA) en la década de los años 1940's. Lo que sigue está extraído de la brillante publicación ("otros tiempos"): *Geology of the Kalamazoo Orebody, San Manuel District, Arizona* (Lowell, 1968).

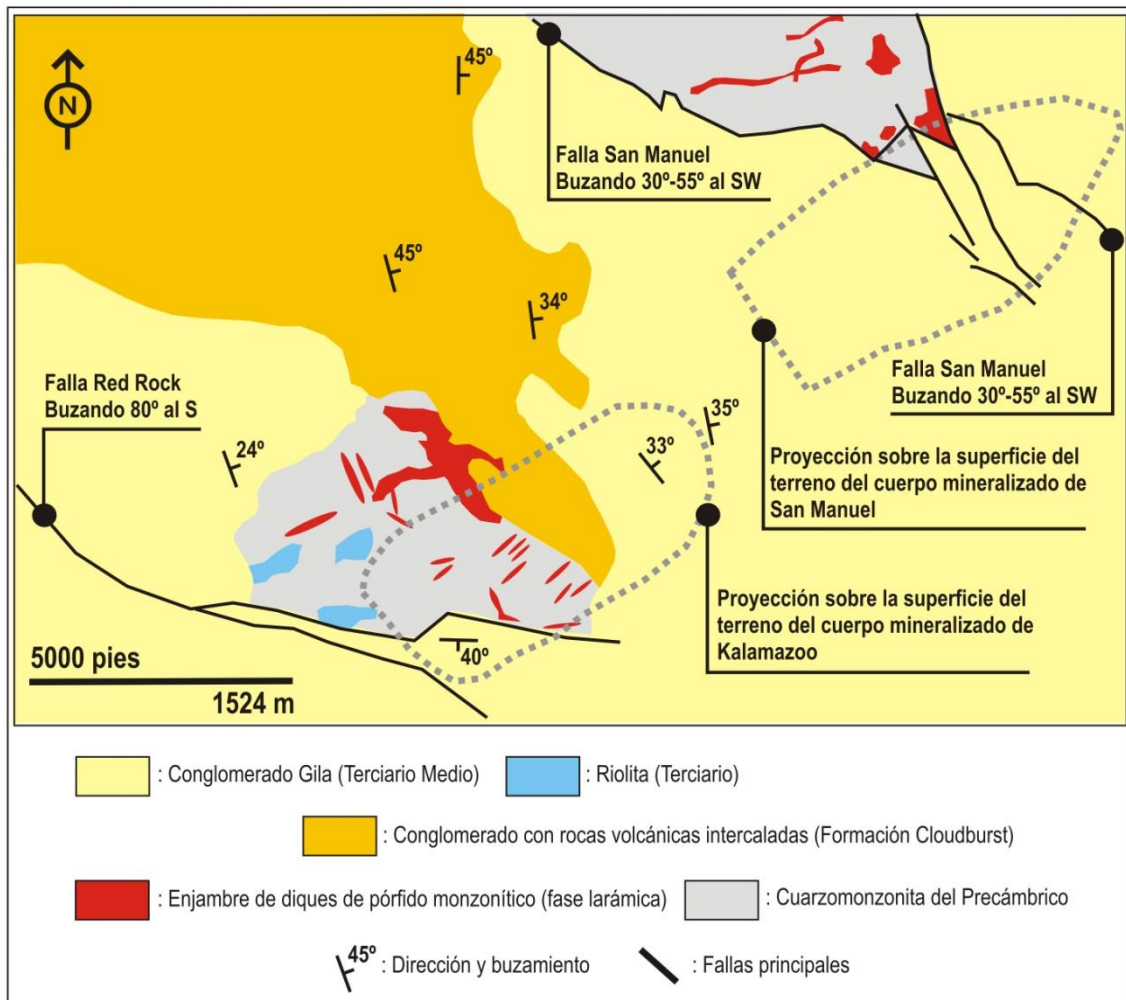
En el periodo 1943-1947, el US Bureau of Mines y la empresa Magma Copper llevaron a cabo una serie de proyectos de exploración en el área de San Manuel. Estos trabajos permitieron el descubrimiento del pórfido cuprífero de San Manuel y el desarrollo de la mina subterránea del mismo nombre, operada por hundimiento de bloques. Hacia finales de este periodo (en 1946) y en un movimiento táctico clásico en el mundo minero, F.F. Salas, R.A. Buzan, H.G. Buzan y W.C. Buzan solicitaron permisos de exploración en el área que se localizaba inmediatamente al oeste del cuerpo mineralizado de San Manuel. Estos permisos fueron licitados a Martha Purcell en 1946 y posteriormente en el periodo de 1947 a 1958 se realizaron siete sondeos con profundidades de 1400 a 2950 pies (427 a 900 m).

Los sondeos ordenados por Martha Purcell no intersectaron mineralización y toda la actividad de exploración cesó hasta 1965, cuando la Quintana Minerals Corporation comenzó un proyecto de exploración dirigido por un geólogo que a partir de entonces se convertiría en leyenda en el mundo de la exploración: David Lowell.

El inicio del Proyecto Kalamazoo se basó en las siguientes premisas de Lowell (1968):

1. La zona central de San Manuel y su alteración potásica representaban la zona de alteración más intensa y por lo tanto el núcleo de un cuerpo mineralizado originalmente cilíndrico.
2. Este cuerpo mineralizado original habría tenido zonas de alteración y mineralización coaxiales que completarían la simetría cilíndrica que se encontraba truncada en San Manuel.
3. El cuerpo estaría basculado al menos 45° de tal manera que el cuerpo mineralizado habría estado en una posición casi vertical (típica de un yacimiento tipo pórfido cuprífero) antes de la sedimentación de la Formación Cloudburst.
4. Y por último y crucial para el modelo, la falla San Manuel era de tipo normal.



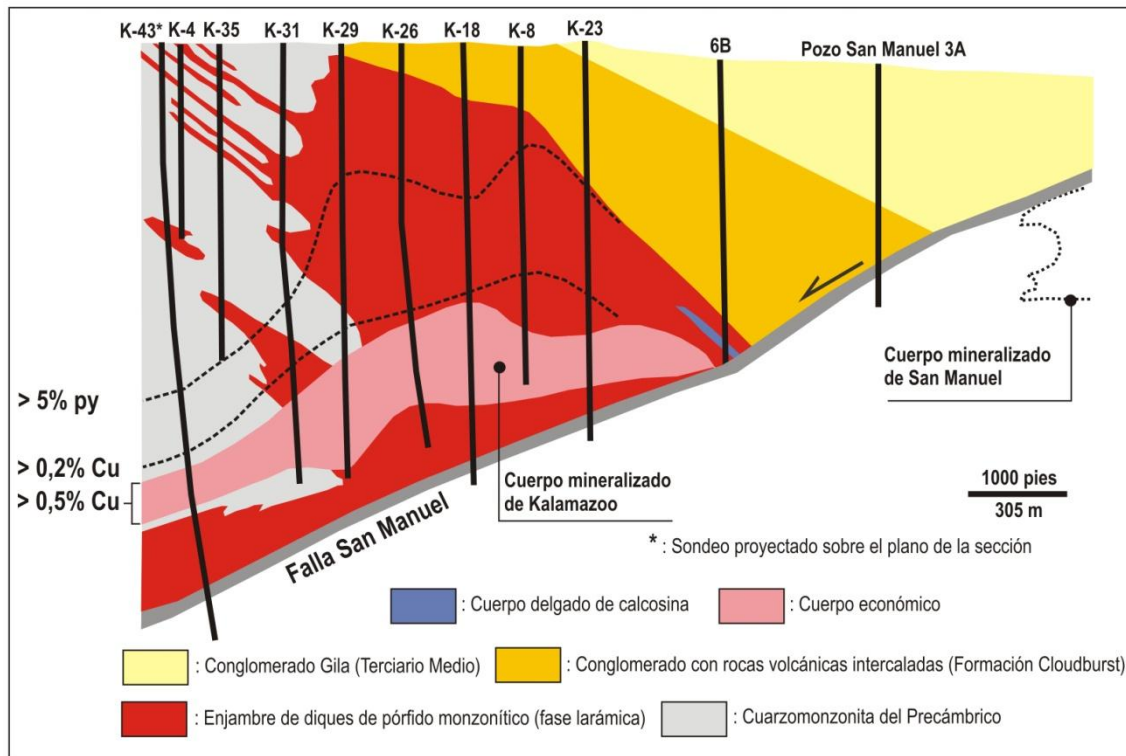


Mapa geológico de la zona de San Manuel y proyección en superficie de los cuerpos mineralizados de San Manuel y Kalamazoo. Adaptada y simplificada de Lowell (1968).

Si bien la casualidad puede intervenir en ocasiones en la vida, la mayor parte de las veces, aunque no nos percatemos, lo que ocurre (en realidad) es que concurren una serie de circunstancias en un determinado lugar y momento. Si no ocurren más accidentes en la vida cotidiana es precisamente por eso, porque no todos los elementos de riesgo estaban presentes. En ciencia es así, y los grandes cambios no suceden de esa manera porque “una” persona en “un” momento de lucidez tenga una idea. Hay más personas y por lo tanto más visiones que se están desarrollando al unísono.

En el caso que nos atañe hay que resaltar el siguiente hecho: cuando Lowell piensa y deduce sobre la alteración hidrotermal en el cuerpo de San Manuel lo puede hacer en propiedad, entre otras cosas, porque ya habían sido publicados tres trabajos clave sobre el tema: 1) *Facies and Types of Hydrothermal Alteration* (Burnham, 1962); 2) *Facies and Types of Hydrothermal Alteration (comment)* (Hemley and Hostetler, 1963); y 3) *Chemical Aspects of Hydrothermal Alteration with Emphasis on Hydrogen Metasomatism* (Hemley and Jones, 1964). A esto hay que sumar la participación en el Proyecto Kalamazoo de otro joven y brillante

geólogo, que se iba a encargar precisamente de la parte petrográfica y la alteración: John M. Guilbert. Juntos, Lowell y Guilbert (1970) publicarían más tarde un trabajo que se convirtió de inmediato en uno de los más importantes del Siglo XX: *Lateral and Vertical Alteration-Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits*. A esto podemos llamarle “el momento y la gente adecuada”.

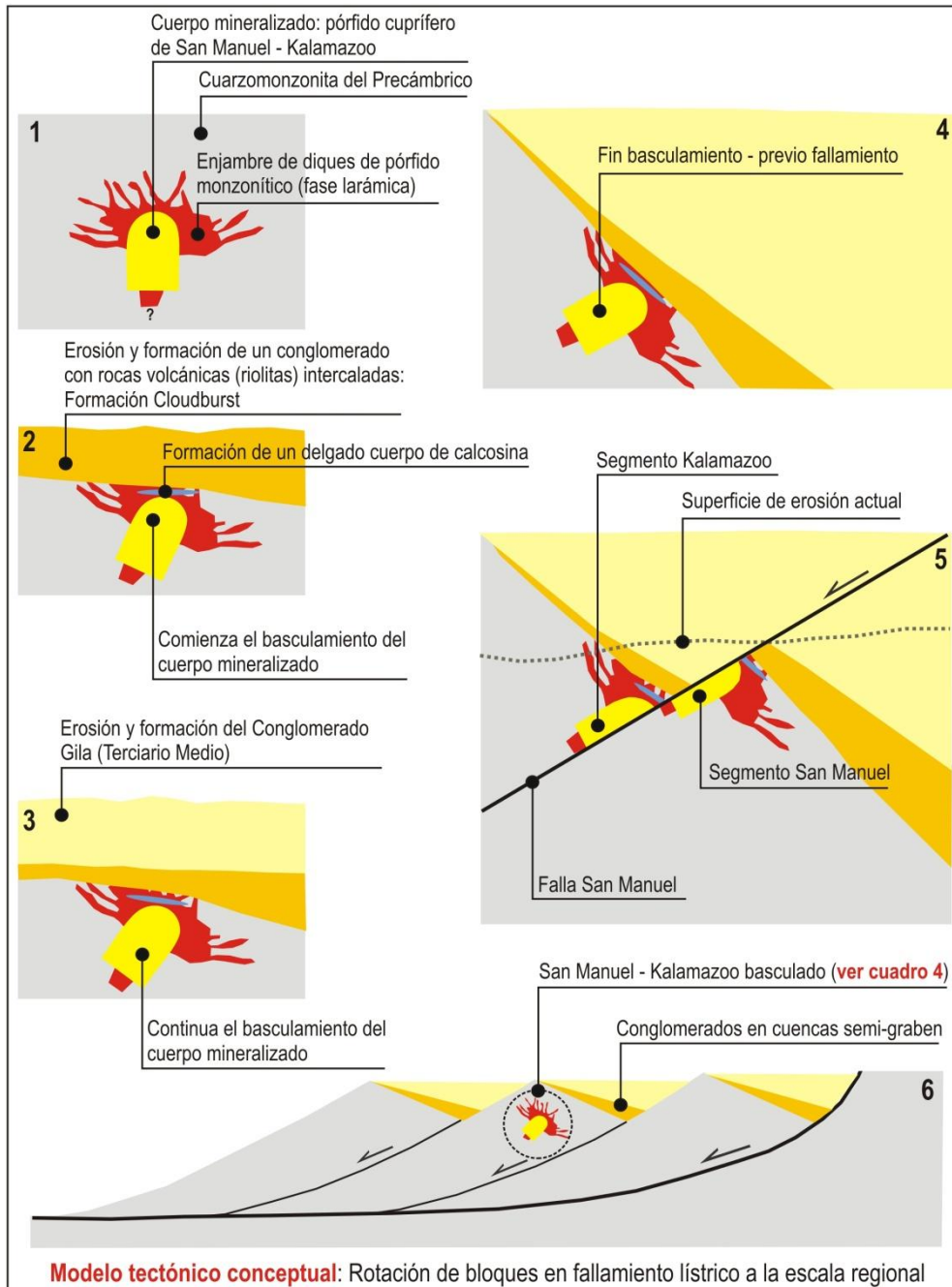


Sección geológica NE-SW a través de los cuerpos mineralizados de San Manuel y Kalamazoo mostrando los sondeos, contactos geológicos y mineralógicos (py: pirita), el cuerpo económico (> 0,5% Cu) y los sondeos. Adaptada y simplificada de Lowell (1968).

Sin embargo, la alteración hidrotermal, por importante que sea, no permite por sí sola llegar a grandes conclusiones en exploración. Es aquí donde la geología clásica, la de la cartografía bien hecha, la de las guías de exploración estructurales de McKinstry entra en juego.

No pensemos ni por un instante que la cinemática y el desarrollo espacial de la Falla San Manuel estaban resueltos. Como el mismo Lowell (1970) señala, había modelos que interpretaban la falla como transcurrente e incluso inversa. Digamos que para la época en que se desarrollaba el Proyecto Kalamazoo era infinitamente más fácil pensar que la falla era inversa ¿Por qué? Porque de acuerdo a la teoría clásica de Anderson (1905) las fallas normales no podían ser de bajo ángulo. Esto nos hace recordar una frase de R.A. Heinlein:

*Everything is theoretically impossible, until it is done. One could write a history of science in reverse by assembling the solemn pronouncements of highest authority about what could not be done and could never happen.*



*Emplazamiento y cinemática rotacional por basculamiento (1 a 4) del cuerpo mineralizado; fallamiento normal y desgarre en dos cuerpos independientes (5) (adaptada y simplificada de Lowell, 1968). Posible ambiente tectónico (6) en que se desarrolló parte del proceso (este trabajo).*

Hoy nadie se sorprendería por una falla normal de bajo ángulo, particularmente si el bloque estructural en que se inserta ha sido rotado. Eso sí, para eso primero hay que “saber” que ha habido rotación.

Ahí radica la brillantez de la aproximación al problema, en la integración de una serie de datos, de sondeos previos, de estudios geológicos, de petrografía y

alteración, de datos geoquímicos, geofísicos, etc. Es como montar una figura del “Lego” pero sin tener un plano específico para hacerlo.

Debido a la evolución lingüística hoy hablaríamos de modelización 3D. Como se indica en Oyarzun (2011), los geólogos y geofísicos que trabajan en petróleo y gas han utilizado por décadas la idea 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 en el espacio (de Kemp, 2007). Hablamos además de un modelo espacial multi-paramétrico que permite validar un blanco a través de diferentes aproximaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas.

Pero volviendo a nuestro tema central: las estructuras. Seamos claros en esto, sin una interpretación adecuada de la Falla San Manuel nada se podría haber hecho. Por ejemplo, si la falla hubiera sido interpretada como inversa esto habría sido significado que el segmento de Kalamazoo se habría movido en la dirección opuesta y por tanto habría sido erosionado. Aquí es cuando podemos decir que la interpretación correcta del sentido de movimiento de una falla vale cientos de millones de dólares o euros. Por decirlo de un modo simple, el descubrimiento de que la Falla San Manuel era de tipo normal multiplicó por aproximadamente dos las reservas de mineral y por lo tanto el valor

*... Lowell became an independent consultant in 1961. Between 1961 and 1990 he worked for 110 companies in 26 countries, largely in porphyry copper exploration. His modus operandi was to devote half his time to large company consulting and half to designing and managing contract exploration projects financed by mining companies. In 1965, this resulted in two discoveries in Arizona; the Kalamazoo ore body for Quintana Petroleum Co. and the Vekol Halls deposit for Newmont. A similar project for Newmont, Hanna, and Getty found the Casa Grande West deposit in 1975. At about the same time he made a contribution to the discovery of the J A ore body in Canada by Bethlehem Copper Co., the Dizon deposit in the Philippines by Benguet, and the Far Southeast ore body by Lepanto also in the Philippines.*

*In 1974, he became heavily involved in consulting in Chile, and starting in 1979, he planned and managed a contract grassroots program financed by Utah International and Getty Oil. In March 1981, the project discovered the La Escondida ore body, now the world's largest copper producer, and the nearby Zaldivar-Escondida Norte ore body. Moreover, in 1987, a small Chilean syndicate managed by Lowell found the million-ounce San Cristobal gold mine. In 1990, the Leonore ore body (now the core of the Luksic Tesoro Mine) was optioned and drilled by Lowell for Nuigini Mining Co. ...*

*Lowell Institute for Mineral Resources (2007)*



*JD Lowell*

de la propiedad minera. Si esta no es una buena razón para manejarse bien en geología estructural, nos preguntamos cuál podría ser.

En este sentido, resulta preocupante el énfasis cada vez mayor en el manejo de software especializado en la enseñanza y ejercicio de la profesión, lo cual no tendría nada de malo si los alumnos y profesionales controlaran también con igual entusiasmo (y capacidad) los conocimientos geológicos. Esta preocupación no es solo nuestra ni tampoco es reciente, porque como señalan Stone y Dunn (1994) en su importante libro sobre estimación de reservas:

*... Again, quoting from King et al. (1982): ... it is the geologic factor that has impressed itself on us more and more as being the key deficiency where serious weaknesses in ore reserve estimation have appeared.*

*... Mason (1993) has suggested that the two main reasons for incorrect reserve estimations are:*

- 1. A lack of detailed mine geology, including fundamental geologic understanding of the deposit.*
- 2. Advances in computers skills and technology ...*

Los puntos 1 y 2 son singularmente irónicos aunque “claros como el agua” sobre dónde y porqué se está fallando en la universidad, y conviene también decirlo aquí, en las empresas mineras. Se ha transformado en rutina en los anuncios de empleo para geólogos el pedir personal que controle un determinado software. Nos preguntamos cuando se pedirán geólogos que controlen con igual capacidad los temas “geológicos”. En este sentido, conviene recordar que un software es tan bueno (o malo) como el operador que se encuentra frente a la pantalla.

Un geólogo que trabaje en minería, bien como geólogo de minas o de exploración, tiene forzosamente que ser alguien que sepa entender las relaciones entre los diferentes elementos geológicos en juego. Dado que la conexión entre dichos elementos suele venir dada por la estructura, huelga decir aquí que sin geología estructural se pueden hacer bonitos cortes o diagramas en 3D en, a su vez, bonitos colores. Sin embargo, dado que el negocio de una empresa minera radica en la venta de minerales o metales y no las artes plásticas, mejor que quienes ingresan en esta industria posean reales y sólidos conocimientos de: 1) geología general; 2) petrografía y mineralogía; y por último (clave para entender realmente un cuerpo mineralizado en el espacio) 3) geología estructural. Agreguemos a esto la tectónica como planteamiento estratégico básico en cualquier campaña de exploración.

### 1.3 Otro campo crucial: la estabilidad de los macizos de roca

Hemos visto hasta aquí como la geología estructural juega un papel determinante en la exploración de cuerpos mineralizados, pero ésta cumple otro papel también crucial en las explotaciones mineras: la determinación de las condiciones de estabilidad de un macizo de rocas. Hablamos aquí de los problemas que pueden presentarse en los bancos de explotación en una mina a cielo abierto o en las galerías y cámaras de explotación en una mina subterránea.

Nada podría ilustrar mejor (en este preciso momento: Mayo de 2013) la importancia de controlar los problemas de estabilidad en una mina que el deslizamiento de rocas acaecido en Bingham Canyon (Kennecott Utah Copper) el Miércoles 10 de Abril de 2013. Kennecott es el segundo mayor productor de cobre en los Estados Unidos, cubriendo casi una cuarta parte de las necesidades de cobre del país (Romero y Adams, 2013).



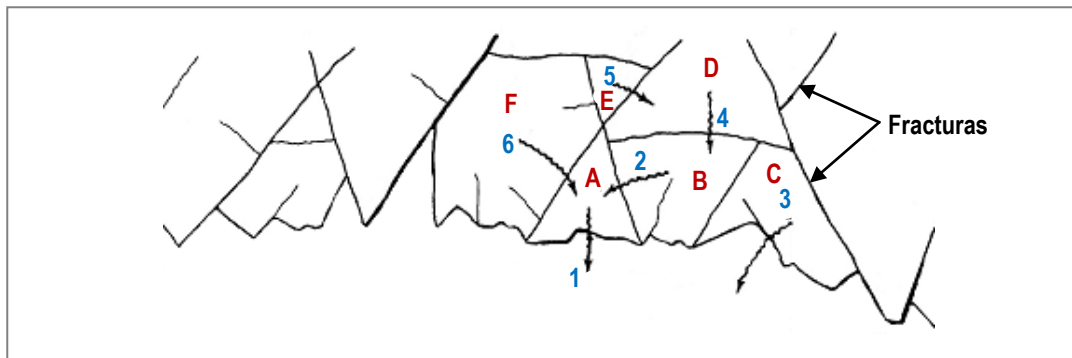
*El deslizamiento de rocas de Bingham Canyon (10.04.13). Note el color ocre del material, típico de la zona del gossan del yacimiento. Imagen<sup>1</sup>.*

La empresa Kennecott Utah Copper explicó que el deslizamiento movió más de 165 millones de toneladas de material, y estima que su producción de cobre (extraído y refinado) en 2013 será un 50 por ciento más baja de lo previsto (Green, 2013). El deslizamiento de Bingham Canyon es espectacular y en ese sentido, poco común, lo cual no significa que problemas equivalentes, pero de menor escala, sean raros en las minas a cielo abierto. Por el contrario, son más comunes de lo que cualquiera podría pensar, sólo que a una escala que no suele impresionar o causar graves pérdidas económicas.

Aquellas empresas que por su tamaño o capacidad económica no puedan costear un *staff* de especialistas en geotecnia pueden suplir estas necesidades con un trabajo geológico llevado a cabo adecuadamente para detectar zonas inestables. Este trabajo puede ser tan simple como la medición de direcciones y buzamientos

de fracturas (fallas y diaclasas) que pudieran dar lugar a la generación de deslizamientos en cuña u otros equivalentes.

Por su parte las galerías y cámaras de explotación son especialmente vulnerables a problemas de estabilidad inducidos por la fracturación, de ahí que una cartografía estructural detallada de fallas y diaclasas sea esencial para determinar zonas particularmente peligrosas.



Sección vertical de parte del techo de una galería en una mina subterránea fuertemente fracturada, ilustrando la secuencia de caída de bloques: Paso 1, cae el Bloque A; Paso 2, el Bloque B gira a la izquierda y cae; Paso 3, el Bloque C gira a la izquierda y cae; Paso 4, cae el Bloque D; Paso 5, cae el Bloque E; Paso 6, el bloque F gira a la derecha y cae. Adaptada de Federal Highway Administration (2011).



Inestabilidad en minas subterráneas. Izquierda, Bloques caídos sobre un vehículo tipo LHD pequeño en una mina subterránea; centro, más bloques caídos en una cámara de explotación; derecha, geólogo señalando una fractura en una galería. Imágenes<sup>2-4</sup>.

Los derrumbes y deslizamientos detienen los trabajos en una mina y eso significa pérdidas económicas, que incluso pueden llegar a ser humanas si hay personal trabajando en las zonas afectadas. Un control estructural de las labores mineras por parte del geólogo ayuda a prevenir estos problemas.

## 1.4. Propósitos de esta obra

### 1.4.1 Sobre laboratorios, software y botas de campo

Esta obra nace del clima de preocupación que induce el constatar que de manera progresiva se van perdiendo habilidades geológicas de campo. Hay quienes opinan que la geología es una ciencia tan respetable como cualquiera. En nuestra opinión si bien es cierto que en la geología concurren elementos propios de una ciencia, no lo es menos que existe una parte muy importante de la geología que tiene que ver más con un oficio que con otra cosa.

Se puede ser un genio de las matemáticas con 22 años (y mucho menos), pero con esa edad en geología, por más buen alumno que se sea o se haya sido, no se pasa (en el fondo) de ser un “aprendiz”. El geólogo “se hace” con los años, se hace al estudiar montes y cordilleras, con el entender y medir estructuras, al reconocer e interpretar rocas y minerales, las formas del paisaje, etc.

Da la impresión a veces que el laboratorio, con medios cada vez más sofisticados, va reemplazando el interés de los alumnos por el campo. Lo mismo se puede decir con el frenético avance en la informática, tanto a nivel de hardware como de software. Por ejemplo, hoy en día gracias al SHRIMP podemos contar complejas historias (impensables hace unas décadas atrás) sobre la evolución en el tiempo y el espacio de un humilde zircón. O con una platina enfriadora-calentadora en el microscopio, relatar la “vida y milagros” de un fluido que quedó atrapado en una microscópica inclusión dentro de un cristal de cuarzo o calcita.



Viñeta sobre los “modernos” geólogos. Imagen<sup>5</sup>.



Pero ¿y las técnicas campo? ¿Somos mejores hoy analizando pliegues o fallas que ayer? Si esto es así (y es dudoso) el progreso ha sido bastante menos vertiginoso por no decir nulo, y si no se progresa, en el fondo se retrocede.

Queremos ofrecer un manual sobre geología estructural aplicado al mundo de la minería, tanto en su vertiente del trabajo cotidiano en las labores mineras como a la exploración. Pensamos que la geología estructural juega un papel crítico en estas materias y es así que queremos contar algunas cosas que pueden ser de utilidad para los geólogos que se vayan a incorporar a la minería o trabajen en ella.

Este no es un manual para especialistas y está dirigido principalmente a los jóvenes (y no “tan” jóvenes) que empiezan su carrera en el mundo de la minería o que ya trabajan para empresas pequeñas o medianas que no pueden costearse el tener un especialista en geología estructural o geotecnia. Lo mismo decimos sobre la exploración en empresas de diverso tamaño.

Aunque, la geología estructural no puede pretender resolver (por si sola) los múltiples aspectos del mundo de la geotecnia, sí puede ayudar a entender que sectores de un macizo de roca pueden presentar más riesgos y porqué. En muchos casos la medición sistemática de estructuras (fallas y diaclasas) y su análisis mediante algún tipo de representación gráfica (p.ej., la Red de Schmidt), puede dar mucho juego llegado el momento de adoptar decisiones sobre si fortificar más adecuadamente un sector de la mina que otro. Esto sin contar que una correcta interpretación de las fallas en una mina, portadoras o no de mineralización, puede redundar en una mejor comprensión del modelo geológico del yacimiento, y por lo tanto, contribuir a una mayor valorización del mismo.



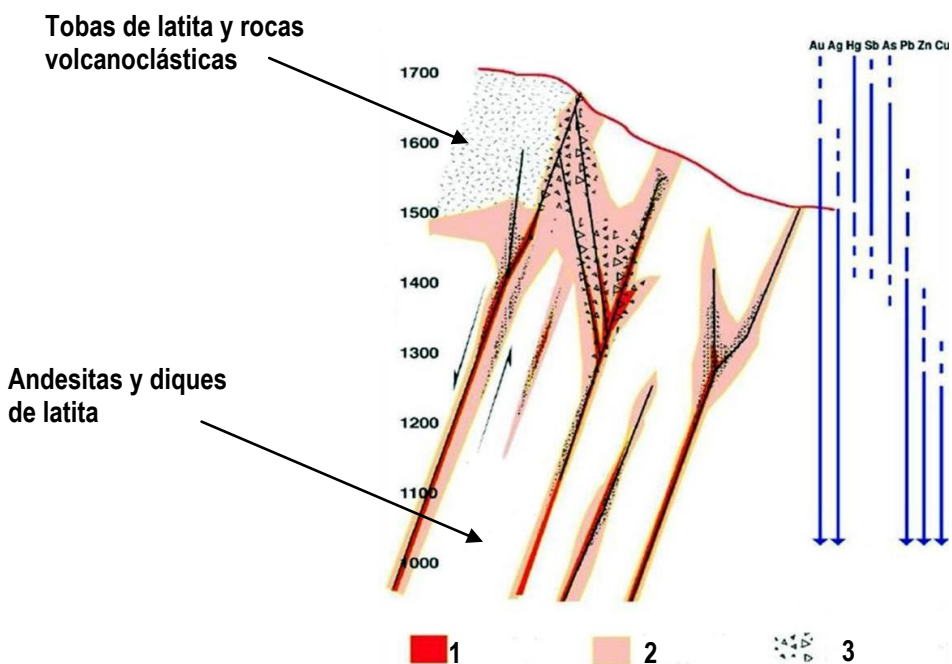
*Problemas que debemos ser capaces de resolver. A la izquierda: ¿Falla? ¿Qué tipo de falla? A la derecha: ¿Suelo gris? ¿Gravas? **Respuestas:** es una falla, de tipo normal; no, no es un suelo, se trata de una “zona de falla” y el material deleznable (típicamente) gris es “harina de falla” (fault gouge). En los siguientes capítulos veremos cómo responder a estas simples preguntas.*

### 1.4.2 Sobre los contenidos específicos de esta obra

De matemáticas y física este manual trae lo justo, no se trata de impresionar a nadie con unas matemáticas que, bien pensado, poco aportan llegado el momento de decidir si una falla es normal o inversa. Aquí hemos puesto el énfasis en aquellos problemas en los que el geólogo de minas o exploración se verá obligadamente implicado. En este sentido, intentamos entregar de la manera más simple posible las herramientas básicas como para que llegado el momento, se pueda hacer una lectura adecuada del plegamiento o el fallamiento a escala local o regional.

Todo esto nos recuerda (no obstante) que primero debemos entender la naturaleza íntima de las rocas. Por ejemplo, si una secuencia de basaltos del Plioceno está “intensamente plegada”, entonces piénselo dos veces, lo más probable es que “no” sean basaltos. El que una roca se pliegue o se rompa (a través de una falla) depende de sus propiedades mecánicas y condiciones P/T del medio, tema que tratamos en los capítulos siguientes.

Conviene aclarar además que este manual está centrado en las relaciones entre estructuras y yacimientos hidrotermales filonianos (*vetiformes*), aunque también trataremos otros temas relacionados, como el oro en secuencias sedimentarias plegadas, el oro en zonas de cizalla dúctil/frágil, o el emplazamiento de cuerpos plutónicos mineralizados (p.ej., yacimientos de hierro tipo Kiruna) en relación con las grandes zonas de falla.



Filones epitermales auríferos (esto es: fallas mineralizadas) y variaciones químicas en la vertical. 1: Filones tipo bonanza; 2: Diseminaciones y stockworks; 3: Brechas hidrotermales. Imagen<sup>6</sup>.

## Bibliografía

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

- Anderson, E.M., 1905. The dynamics of faulting. Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8, 387-402.
- Burnham, C.W. 1962. Facies and types of hydrothermal alteration. Economic Geology, 59, 332-334.
- 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.
- Federal Highway Administration, 2011. Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels - Civil Elements, Chapter 6 - Rock Tunneling, US Department of Transportation, <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/pubs/nhi09010/06.cfm>
- Green, M., 2013. Kennecott: 50 percent reduction in copper production at Bingham Canyon Mine in 2013. Fox 13, <http://fox13now.com/2013/04/16/kennecott-50-percent-reduction-in-copper-production-at-bingham-canyon-mine-in-2013/>
- Hemley, J.J. y Hostettler, P.B., 1963. Facies and types of hydrothermal alteration (comment). Economic Geology, 58, 808-811.
- Hemley, J.J. y Jones, W.R., 1964. Chemical aspects of hydrothermal alteration with emphasis on hydrogen metasomatism Economic Geology, 59, 538-569,
- King, H.F., McMahon, D.W. y Bujtor, G.J., 1982. A Guide to the Understanding of Ore Reserve Estimation. Supplement to Proceedings no. 281, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 21 pp.
- Lowell, J.D., 1968. Geology of the Kalamazoo orebody, San Manuel District, Arizona. Economic Geology, 63, 645-654.
- Lowell, J.D. y Guilbert, J.M., 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits Economic Geology, 65, 373-408.
- Lowell Institute for Mineral Resources, 2007. J. David Lowell. University of Arizona, [http://www.imr.arizona.edu/j\\_david\\_lowell](http://www.imr.arizona.edu/j_david_lowell)
- Mason, R., 1993. From Discovery to Mine—The Definition and Evaluation of Mineralized Zones and Ore Reserves. En: Integrated Methods in Exploration and Discovery, Society of Economic Geologists, AB67-AB69.
- McKinstry, H.E. 1948. Mining Geology. Prentice-Hall (NY), 680 pp.
- Oyarzun, R., 2011. Introducción a la Geología de Minas. Ediciones GEMM - Aula2punto.net, [http://www.aulados.net/GEMM/Libros\\_Manuales/index\\_libros.html](http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html)
- Romero, M. y Adams, A., 2013. Massive landslide stops production at Bingham Canyon Mine. Deseret News, <http://www.deseretnews.com/article/865578042/Kennecott-confirms-significant-landslide-at-Bingham-Canyon-Mine.html?pg=all>
- Sureda, R.J., 2008. Historia de la Mineralogía. Serie Correlación Geológica 23, [http://www.insugeo.org.ar/libros/cg\\_23/geologia\\_23.pdf](http://www.insugeo.org.ar/libros/cg_23/geologia_23.pdf)
- Stone, J.G. y Dunn, P.G., 1994. Ore Reserves Estimates in the Real World. Society of Economic Geologists, Special Publication Number 3, Littleton CO, 150 pp.

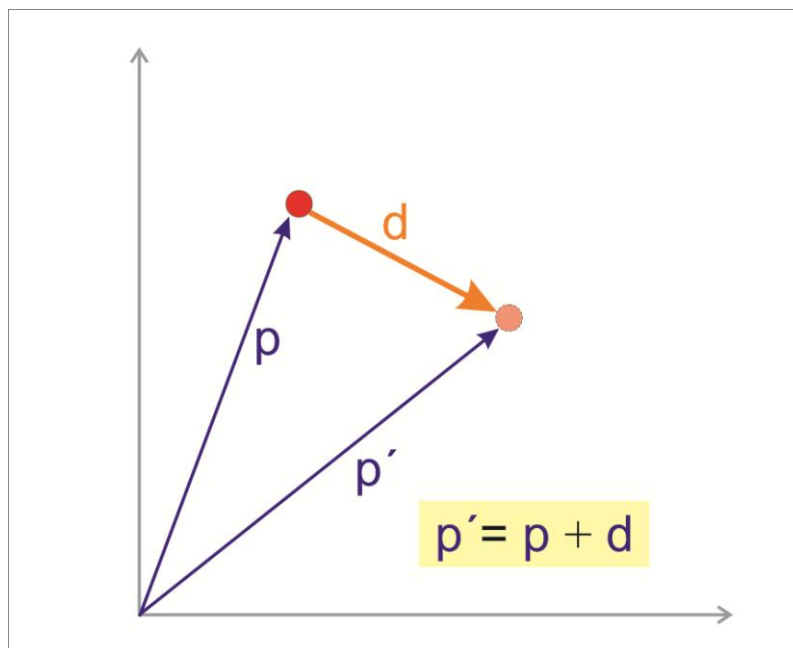
**Fuente de las imágenes** (a Mayo de 2013)

1. <http://www.news.com.au/world-news/huge-landslide-shuts-kennecott-utah-coppers-bingham-canyon-mine/story-fndir2ev-1226619124124>
2. <http://tizona.wordpress.com/2009/02/>
3. <http://www.oshrc.ictas.vt.edu/Projects/PROJECT/MiningSafety.html>
4. [http://www.mgeoscience.com/training/train\\_default.html](http://www.mgeoscience.com/training/train_default.html)
5. <http://www.sciencecartoonsplus.com/gallery/geology/index.php>
6. <http://www.cazagold.com/projects/>

## 2.1 Fuerzas y esfuerzos, o el origen de la deformación

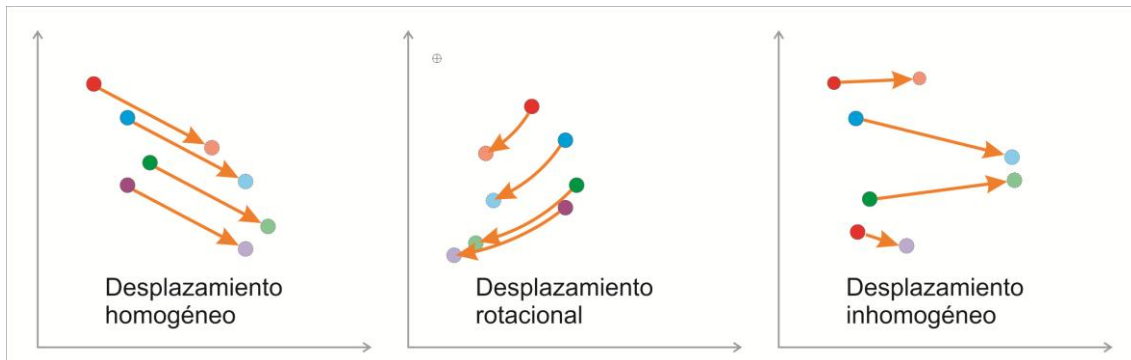
Muchas de las ideas aquí expuestas se derivan de los importantes y en muchos casos cruciales aportes de Ramsay (1967), Hobbs et al. (1976), Nicolas y Mainprice (1987), Weijermars (1997), Twiss y Moores (2007), así como del ya clásico trabajo de González de Vallejo et al. (2002). La lista es muy larga, y he aquí sólo algunos nombres entre muchos más.

Las rocas que constituyen la corteza terrestre están sometidas a un gran número de fuerzas, relacionadas con diferentes procesos tanto exógenos como endógenos. De forma que sobre esos materiales rocosos *siempre* van a existir fuerzas actuando, a todas las escalas, desde la estructura cristalina a las grandes unidades orogénicas. Pero, independientemente de la escala que estemos considerando y del tipo de fuerzas implicadas, de forma general, los efectos que estas provocan en las rocas son desplazamientos y la deformación de ellas. Así, un *desplazamiento* tiene lugar cuando las fuerzas que actúan sobre el material rocoso producen un cambio de posición de este.



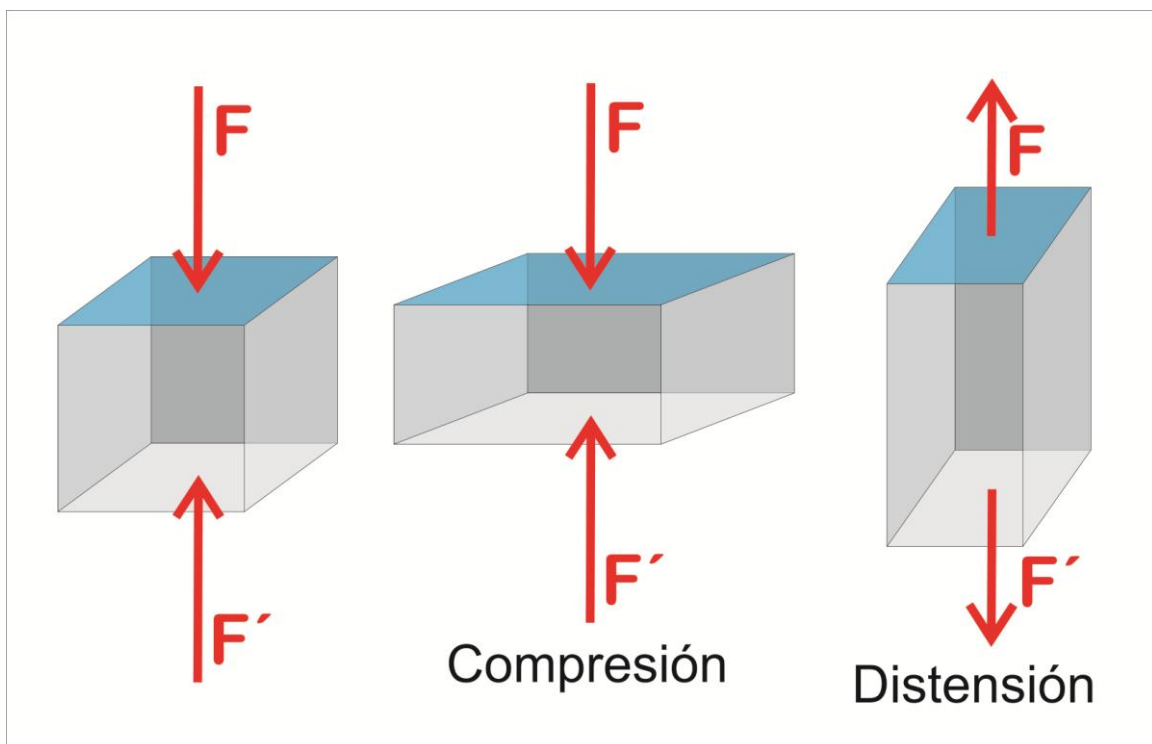
*El cambio de posición o desplazamiento del material rocoso con respecto a un punto de referencia implica que este habrá recorrido una distancia con respecto a su posición original, en una, dos o las tres direcciones del espacio, Adaptada de González de Vallejo et al. (2002).*

Dependiendo de la trayectoria del desplazamiento, este puede ser homogéneo (solidario), rotacional o inhomógeno (heterogéneo).



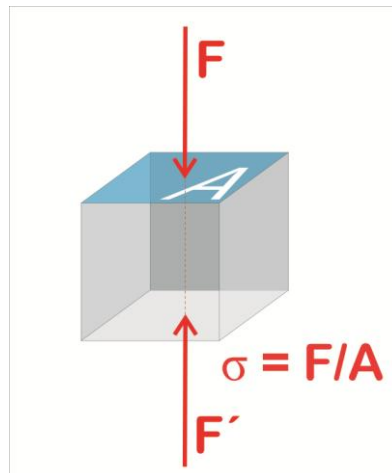
En el desplazamiento homogéneo, las trayectorias de todas las partes del material rocoso son iguales; en el desplazamiento rotacional, las trayectorias son proporcionales y paralelas, y en el caso de desplazamiento inhomogéneo, las trayectorias son erráticas.

La *deformación* ocurre cuando al actuar una fuerza sobre el material rocoso, este cambia su forma y/o tamaño.



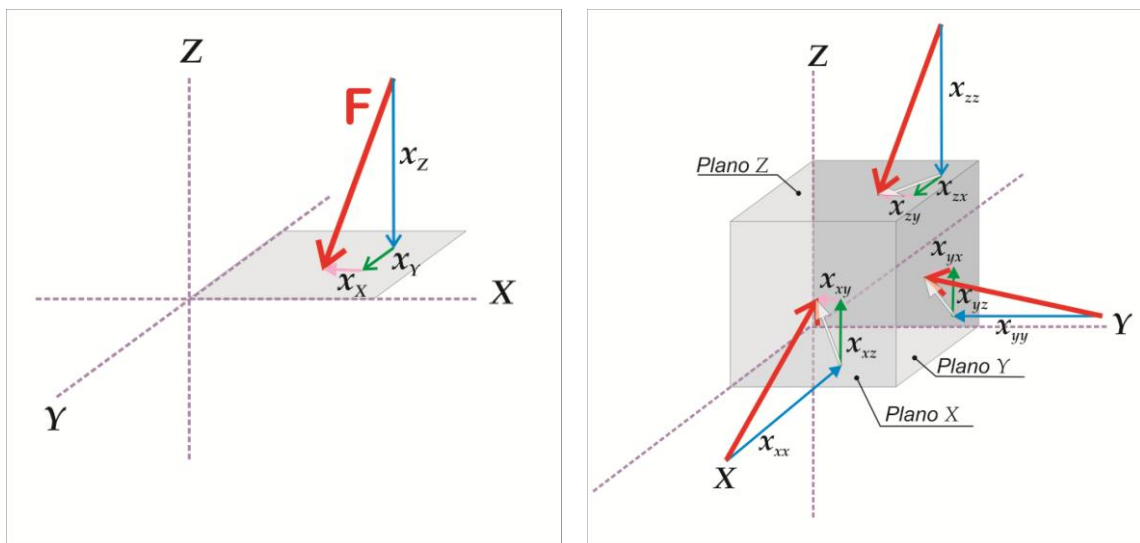
Cuando las fuerzas que actúan sobre la roca son convergentes (compresión) se produce la deformación por aplastamiento. En el caso de que las fuerzas sean divergentes (distensión) se produce la deformación por elongación o estiramiento.

Si consideramos la fuerza en un punto, entonces hablamos de *carga*. Si consideramos la fuerza aplicada sobre un área, entonces hablamos de *esfuerzo*.



El esfuerzo es un parámetro que representa la fuerza aplicada por unidad de área.

Como veremos más adelante, las estructuras de deformación que encontremos en la roca y su posible reactivación en diferentes etapas dependerán de la magnitud del esfuerzo y su orientación. El esfuerzo es una magnitud vectorial que se puede descomponer en tres componentes ortogonales  $x_x$ ,  $x_y$ ,  $x_z$ , según las direcciones principales del espacio cartesiano  $XYZ$ . Así, el estado de esfuerzos de un volumen de roca está definido por las fuerzas por unidad de área, referidas a los tres planos  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

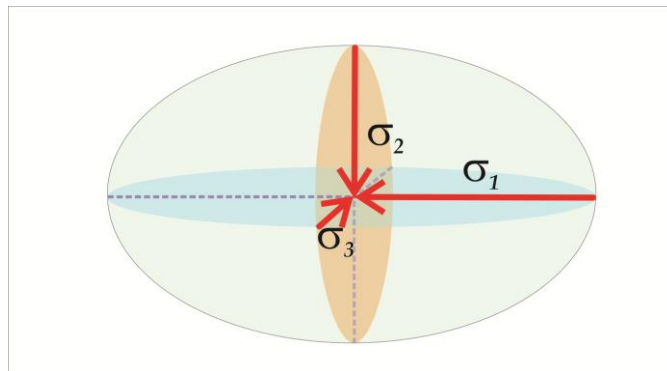


Descomposición de las fuerzas actuantes sobre un volumen de roca en sus componentes en el espacio cartesiano. Adaptada de Department of Aerospace Engineering Sciences (2012).

Si consideramos un volumen infinitesimal (esto es, lo que sería equivalente a un punto) el esfuerzo resultante podemos escribirlo como una matriz, conocida como *tensor de esfuerzos*, de manera que este tensor representaría el esfuerzo resultante en ese punto. Las componentes ortogonales a las superficies son los llamados **esfuerzos normales** ( $\sigma_n$ ). Las componentes paralelas a las superficies, son los **esfuerzos tangenciales o de cizalla** ( $\tau$ ).

$$\begin{bmatrix} x_{xx} & x_{xy} & x_{xz} \\ x_{yx} & x_{yy} & x_{yz} \\ x_{zx} & x_{zy} & x_{zz} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Para pares de fuerzas de igual magnitud ( $F = F'$ ), los esfuerzos de cizalla en los planos se compensan (si no fuera así, se produciría la rotación del volumen de roca). Teniendo en cuenta que el *estado tensional*<sup>1</sup> de un punto estará definido por *todos* los esfuerzos actuando en *todos* los planos que pasan por dicho punto, será posible encontrar tres planos ortogonales entre sí en los que los esfuerzos tangenciales son inexistentes. A los esfuerzos normales a esos planos se les conoce como **tensiones<sup>1</sup> o esfuerzos principales**  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , y  $\sigma_3$  en ese punto y definen el **elipsoide de esfuerzos**, el cual representa el estado de esfuerzos tridimensional en un punto del macizo rocoso (p.ej., Hobbs et al., 1976, Weijermars, 1997). Los esfuerzos principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , y  $\sigma_3$  corresponden al esfuerzo máximo, intermedio y mínimo, respectivamente; es decir no existe en ese punto un esfuerzo mayor a  $\sigma_1$  ni inferior a  $\sigma_3$ .



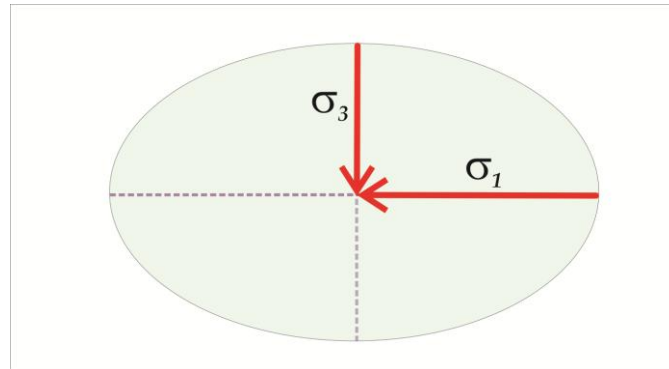
El elipsoide de esfuerzos está definido por tres ejes que corresponden a los esfuerzos principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , y  $\sigma_3$  y los planos ortogonales que los contienen.

En los casos más generales, la relación entre los esfuerzos principales es  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , definiendo así un elipsoide *poliaxial*. Si  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ , entonces el elipsoide es una esfera, y se trata de un estado tensional *isótropo* o hidrostático, caracterizado por la ausencia de esfuerzos de cizalla. El mejor ejemplo del estado tensional isótropo es la presión que ejerce el agua intersticial sobre las partículas en un medio (por ejemplo, un sedimento) saturado en agua en condiciones de ausencia de flujo (si hay flujo, se generan diferencias en esfuerzos, y con ello, esfuerzos de cizalla). La elipse de esfuerzos es una sección del elipsoide de esfuerzos que

<sup>1</sup> En geología, los términos “esfuerzo” y “tensión” son equivalentes, aunque el término “tensión” se utiliza más en aquellos casos donde las fuerzas son divergentes.



contiene a dos de los tres ejes. Generalmente se utiliza la elipse  $\sigma_1 - \sigma_3$ , como simplificación 2-D del elipsoide de esfuerzos.



La elipse de esfuerzos está definida por dos ejes que corresponden a dos esfuerzos principales y el plano que los contiene.

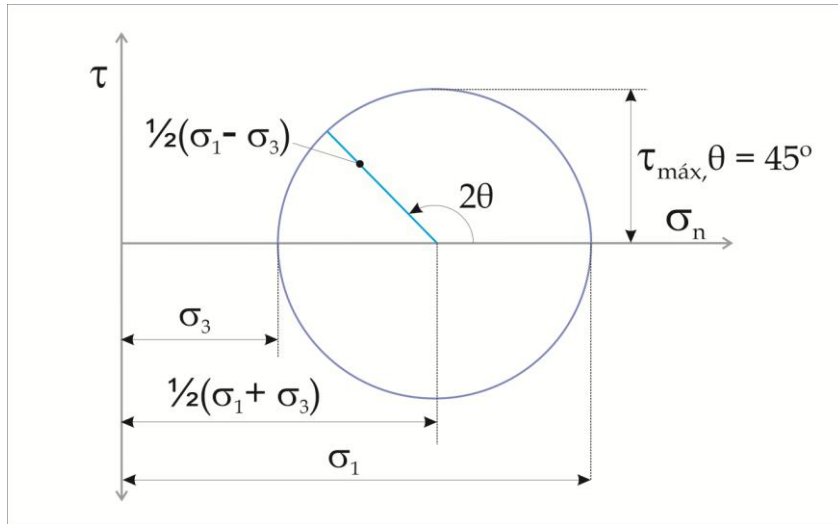
Conocida la magnitud y direcciones de los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ , se puede calcular  $\sigma_n$  y  $\tau$  para cualquier plano si se conoce su orientación:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\theta \quad (1)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta \quad (2)$$

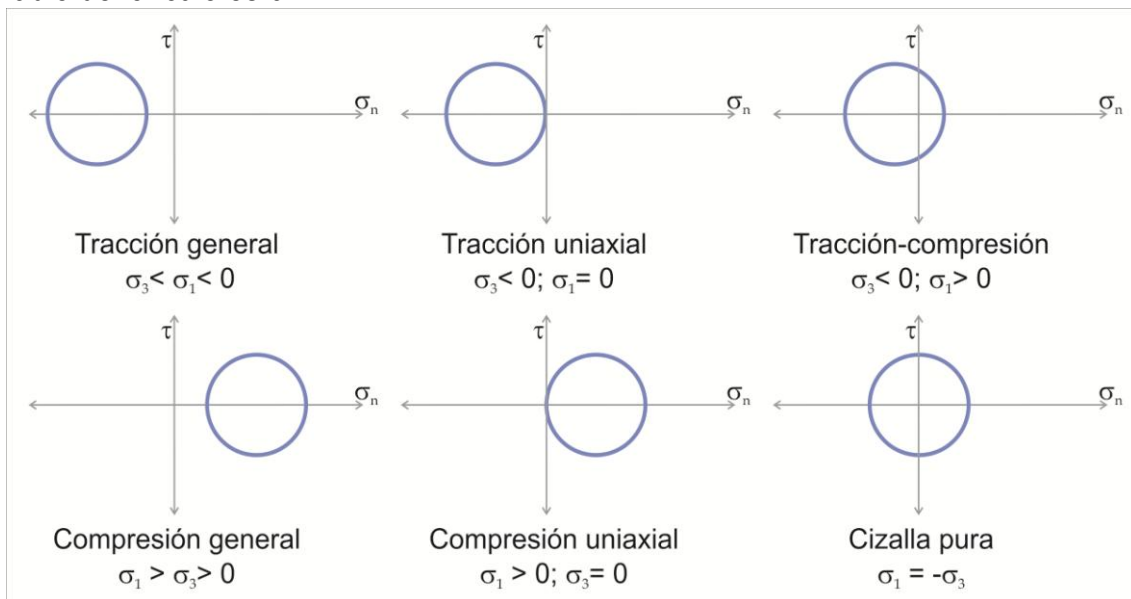
Donde  $\theta$  es el ángulo que forma la normal de dicho plano con el plano de la elipse. Esto es interesante, porque nos permite saber donde se producirán los mayores esfuerzos tangenciales. El máximo esfuerzo tangencial es  $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$  y ocurre cuando  $\theta$  es igual a  $45^\circ$  ( $\sin 2\theta = 1$ ), es decir los máximos esfuerzos normales y tangenciales se ejercen sobre planos a  $45^\circ$  entre sí. Y así, por ejemplo, si relacionamos la elipse de esfuerzos con la deformación que daría lugar en una roca isótropa, lo más probable es que se produzcan superficies de rotura a  $45^\circ$  de los esfuerzos normales. O si hay discontinuidades o roturas previas, se reactiven las que tienen una orientación más próxima a  $45^\circ$ .

Dado que las ecuaciones (1) y (2) corresponden a un círculo, las relaciones del estado de esfuerzos pueden ser visualizadas gráficamente mediante el llamado Círculo de Mohr (p.ej., Hobbs et al., 1976), de radio es  $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$  y cuyo centro se sitúa sobre el eje de abscisas (que representa  $\sigma_n$ ) a una distancia  $\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$  del origen. De esta manera, dados los esfuerzos  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ , se pueden calcular gráficamente los valores de  $\sigma_n$  y  $\tau$  para cualquier plano; e igualmente a partir de unos valores de  $\sigma_n$  y  $\tau$  dados podrán obtenerse la magnitud y la orientación de los esfuerzos principales.



El círculo de Mohr permite visualizar geoméricamente las relaciones entre los esfuerzos normales principales, y el esfuerzo normal y los esfuerzos tangenciales para cualquier plano.

Además, el círculo de Mohr permite representar y comparar diferentes estados de esfuerzos. La excepción es el caso de esfuerzo hidrostático, donde  $\sigma_1 = \sigma_3$ , y el radio del círculo es 0.



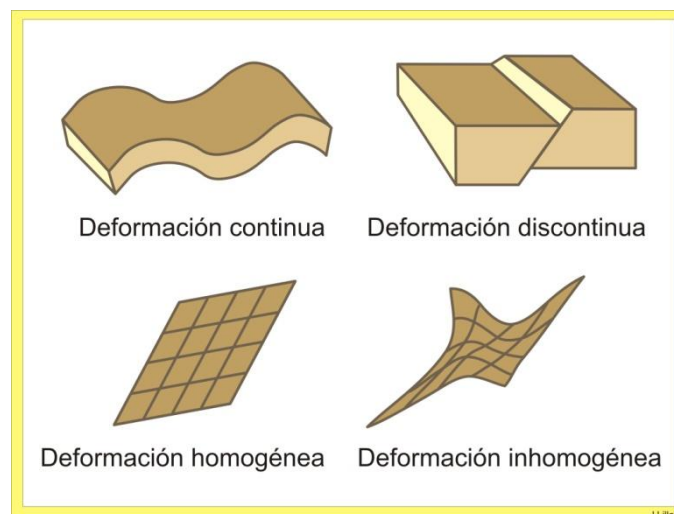
Representación del círculo de Mohr para distintos estados de esfuerzos. Adaptada de González de Vallejo et al. (2002).

En definitiva, el Círculo de Mohr es una herramienta gráfica que nos permite visualizar las relaciones entre los esfuerzos normales y de cizalla, y calcular estos para cualquier plano.

## 2.2 Deformación: el porqué de la diversidad de estructuras

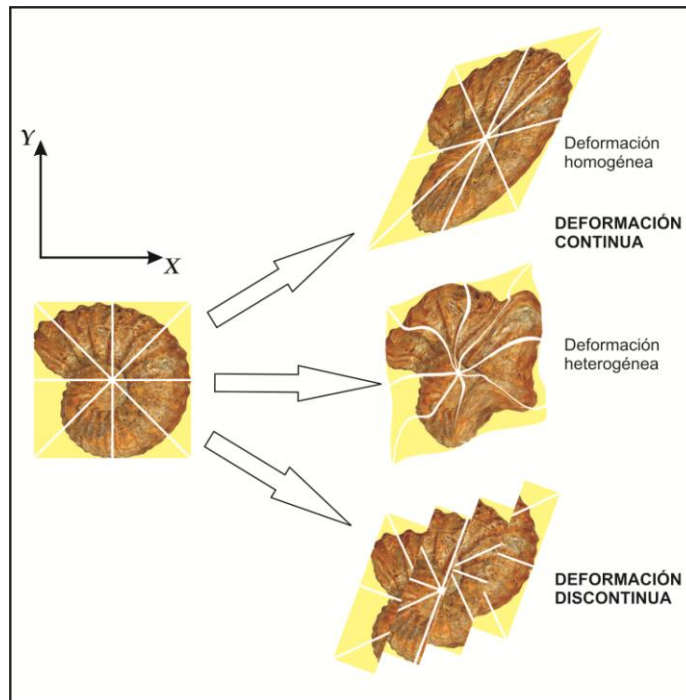
La deformación puede ser:

- Continua, cuando el cambio de forma o tamaño tiene lugar de manera continua, sin cambios bruscos.
- Discontinua, cuando existen cambios importantes o variaciones acusadas de la deformación, a través de superficies o zonas discretas.
- Homogénea, cuando cada partícula o parte de la roca es deformada de la misma manera.
- Inhomogénea o heterogénea: la cuantía de la deformación varía notablemente en un volumen de roca dado.



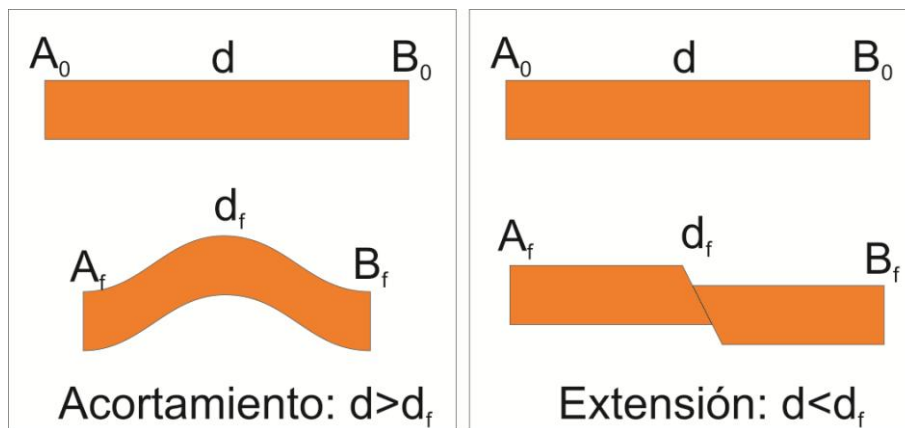
*Los conceptos de homogeneidad y continuidad de la deformación no son equivalentes, aunque sí están muy relacionados.*

El carácter de continuidad y homogeneidad depende de la escala que estemos considerando, de manera que a una escala determinada la deformación puede ser homogénea, y a otra escala, la deformación puede ser inhomogénea. Por ejemplo, las características macroestructurales de un pliegue concéntrico paralelo representan una deformación homogénea. Sin embargo, si se estudia la deformación interna de cada uno de los estratos o capas que constituyen ese pliegue, se ve que la deformación no es homogénea, ya que hay zonas de estiramiento y zonas de aplastamiento en la misma capa. Estos aspectos serán analizados con mayor detalle más adelante.



Para evaluar la naturaleza (y también la cuantía) de la deformación es fundamental disponer de marcadores geométricos. Adaptada de Nicolas y Mainprice (1987).

En realidad, toda deformación implica cierto desplazamiento relativo, ya sea de átomos, cristales, granos, partículas, o zonas del macizo rocoso. Pero no siempre el desplazamiento implica deformación interna.



La deformación se resuelve con un acortamiento o extensión de los materiales.

La deformación se expresa comparando las dimensiones en el estado deformado con las del estado inicial de la roca sin deformar. Así, podemos considerar la deformación longitudinal, *elongación* o *estiramiento/acortamiento*  $\Sigma$ , y la deformación volumétrica o *dilatación/retracción*  $\Delta$ .

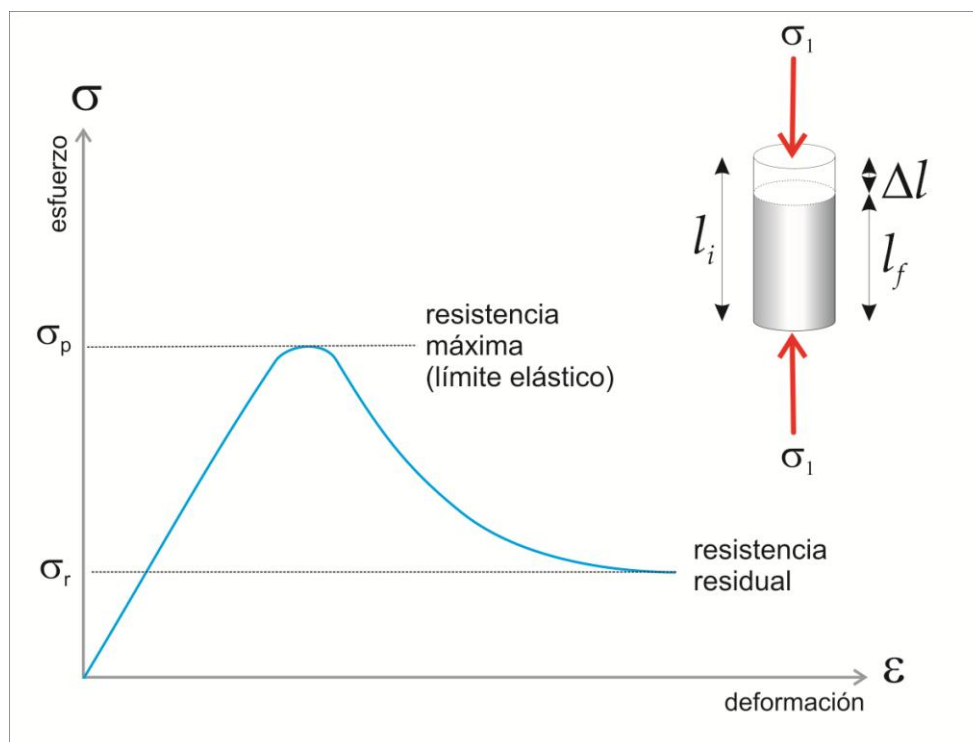
$$\Sigma = (L_i - L_f) / L_i$$

$$\Delta = (V_i - V_f) / V_i$$

Siendo  $L_i$  y  $L_f$ , las dimensiones lineales inicial y final, respectivamente; y  $V_i$  y  $V_f$ , los volúmenes inicial y final, respectivamente.

La *resistencia* es el esfuerzo que la roca puede soportar para ciertas condiciones de deformación. La *rotura* ocurre cuando la deformación elástica o en algunos casos, plástica, no puede acomodar el esfuerzo y se generan discontinuidades en el cuerpo rocoso. La diferencia fundamental entre la deformación elástica y la deformación plástica, es que en la primera el material recupera su forma inicial si cesa el esfuerzo que ha provocado la deformación, siempre que no se haya superado el límite elástico. En el caso de la deformación plástica, el material no recupera su forma original, aunque cese el esfuerzo que ha producido la deformación.

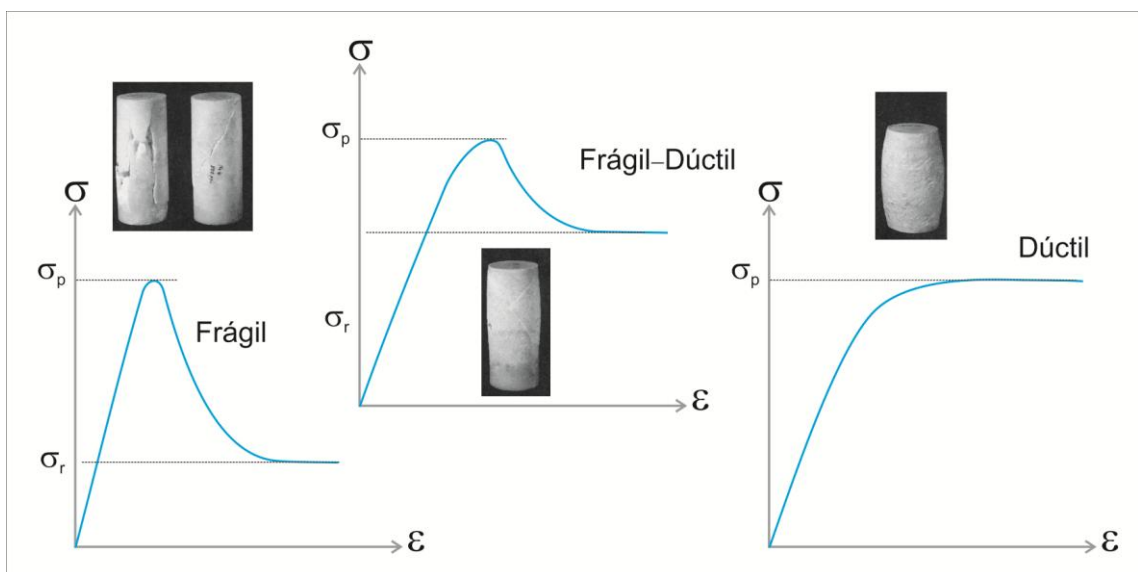
En el caso de los materiales con un comportamiento frágil, la rotura tiene lugar cuando se alcanza el límite elástico, o esfuerzo máximo a partir del cual la deformación es permanente.



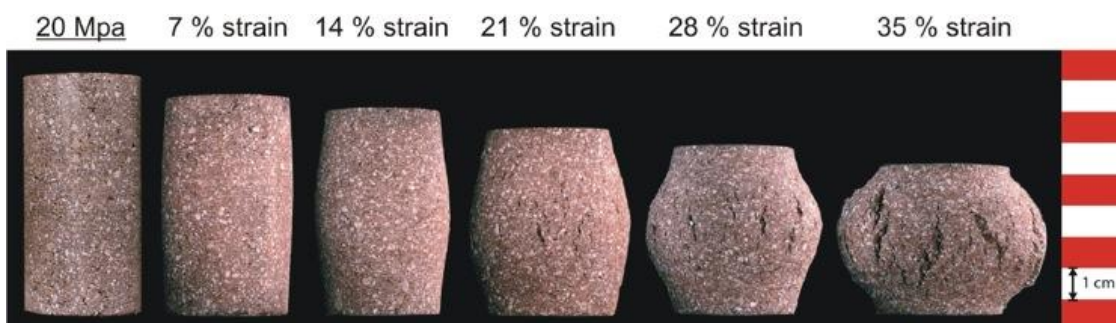
En los materiales con un comportamiento frágil frente al esfuerzo que se ejerce sobre ellos, la rotura tiene lugar cuando se supera el llamado límite elástico. Adaptada de González de Vallejo et al. (2002).

Si consideramos la relación entre la variación de los esfuerzos aplicados y la deformación producida, podremos ver que existen en los materiales tres tipos de comportamiento:

- *Comportamiento frágil*: implica una deformación elástica con pérdida brusca de la resistencia, a través de un plano o conjunto de planos, sin ninguna o muy poca deformación plástica. Este comportamiento es común en rocas coherentes sanas, las típicas rocas “duras”.
- *Comportamiento frágil-dúctil*: implica deformaciones elásticas y plásticas, con una resistencia residual mayor. Este comportamiento es común en rocas con discontinuidades preexistentes y arcillas, las típicas rocas “blandas”.
- *Comportamiento dúctil*: implica deformaciones plásticas (no recuperables), la resistencia se mantiene constante aunque la deformación aumenta. En sales o en otras rocas, sometidas a alta temperatura, y/o circulación de fluidos.

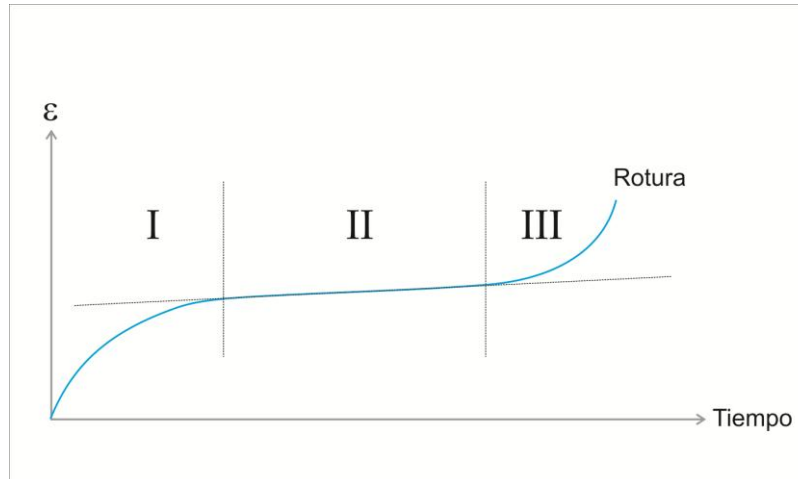


Curvas esfuerzo-deformación para comportamiento frágil, frágil-dúctil y dúctil. Obsérvese como en el caso del comportamiento frágil, la resistencia residual es mucho más baja que la resistencia máxima (límite elástico). En el caso del comportamiento dúctil, la resistencia residual es prácticamente la misma que la resistencia máxima. En el caso frágil-dúctil se produce una deformación plástica inmediatamente antes de la rotura ( $\sigma_p$ ), y por tanto el límite elástico tiene un valor inferior a  $\sigma_p$ . Imágenes: Twiss y Moores (2007).



Ejemplo de deformación dúctil-frágil, donde la roca sometida a un esfuerzo uniaxial compresivo desarrolla una deformación plástica hasta que finalmente se rompe, disminuyendo su resistencia a partir de ahí (imagen<sup>1</sup>).

En determinadas condiciones, tiene lugar la deformación por *fluencia* o *creep*. Esta deformación se produce bajo esfuerzos más o menos constantes, pero muy prolongados en el tiempo. Tiene lugar en rocas con un comportamiento viscoelástico asociado a microfisuración, con variaciones de humedad, presión y/o temperatura.

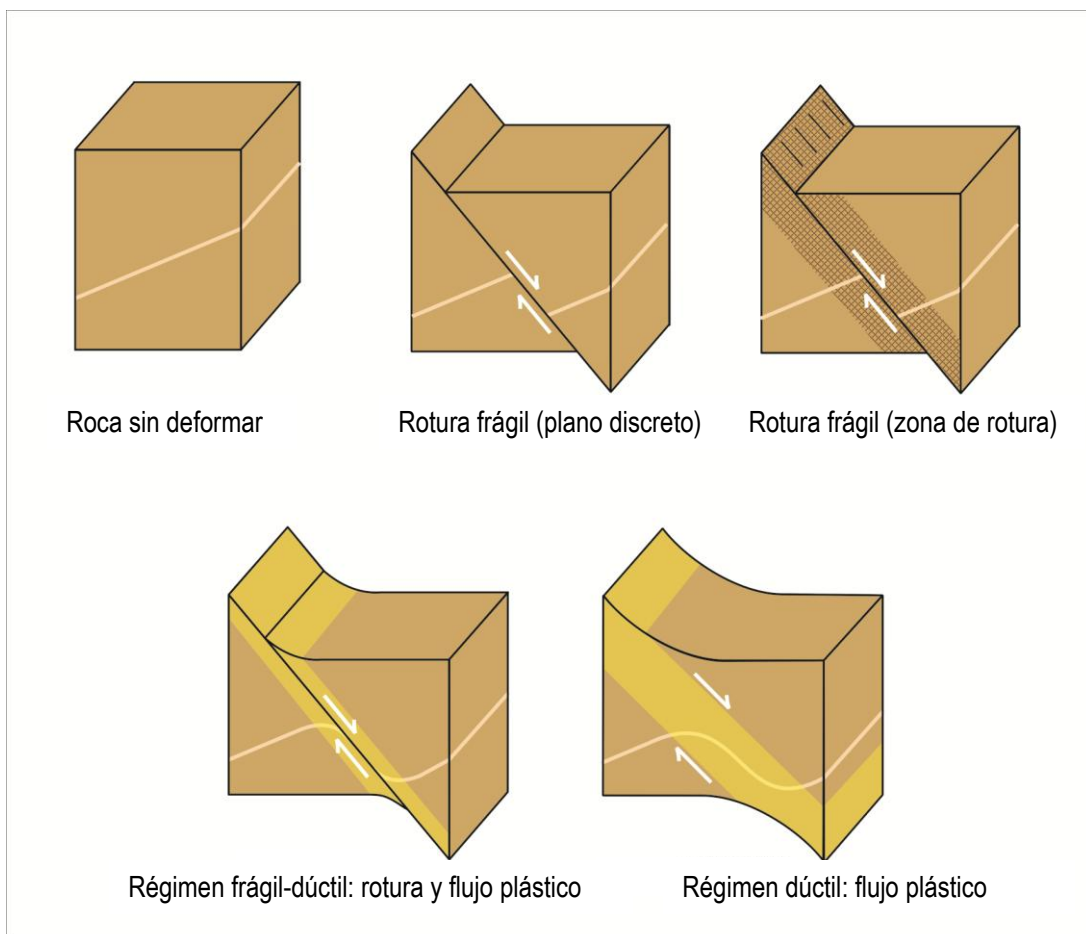


*Evolución de la deformación por fluencia en el tiempo: I) Etapa inicial con incremento acusado de la deformación (creep primario); II) etapa intermedia, con muy poco aumento de la deformación (creep secundario); y III) etapa final, con un aumento de la deformación (creep terciario) y rotura final (imagen²).*

Con la deformación se generan en la roca una serie de estructuras que inicialmente no estaban en la roca original sin deformar. Es lo que llamamos *estructuras de deformación*, y que es en definitiva lo que nos interesa conocer por su relación con los depósitos minerales. Tal conocimiento no solo incluye aquellos aspectos puramente morfológicos de tales estructuras, sino que también, y esto es fundamental, incluye también conocer aspectos genéticos que serán imprescindibles para una correcta interpretación morfológica a partir de los datos disponibles. La naturaleza y orientación de las estructuras de deformación van a depender de dos factores fundamentales: a) de la orientación de los propios esfuerzos que generan tal deformación, y b) de las propiedades mecánicas de la roca. Así, a partir del conocimiento de la geometría de las estructuras y de las relaciones entre estas, podremos ser capaces de determinar el tensor de esfuerzos que las han generado, y viceversa, si conocemos el tensor de esfuerzos dominante en un área, podremos ser capaces de predecir o anticipar la posible localización y orientación de estructuras. Esto es especialmente importante, porque en muchos casos necesitamos interpretar las estructuras que pueden existir en el subsuelo, únicamente a partir de datos de superficie.

Como hemos señalado en los párrafos precedentes, la rotura siempre se asocia a la formación de discontinuidades, que pueden manifestarse como planos discretos singulares (planos de fractura), o bien como un conjunto de

numerosos planos de discontinuidad, que definen una *zona de rotura o fractura*. Pero no siempre el material tiene un comportamiento frágil, de manera que no siempre se generan planos de rotura bien definidos, sean estos únicos o múltiples. Muchas veces, el material tiene un comportamiento frágil-dúctil o dúctil, de manera que la “rotura” se resuelve como una zona con intensa deformación, que involucra fenómenos de reorientación, disolución y recristalización mineral. **Importante:** dado que en la deformación dúctil el régimen es “asísmico” quizás más que de “rotura” deberíamos hablar de “discontinuidad por flujo plástico” del material. Es decir, la roca más que romperse lo que hace es deformarse y “fluir”.

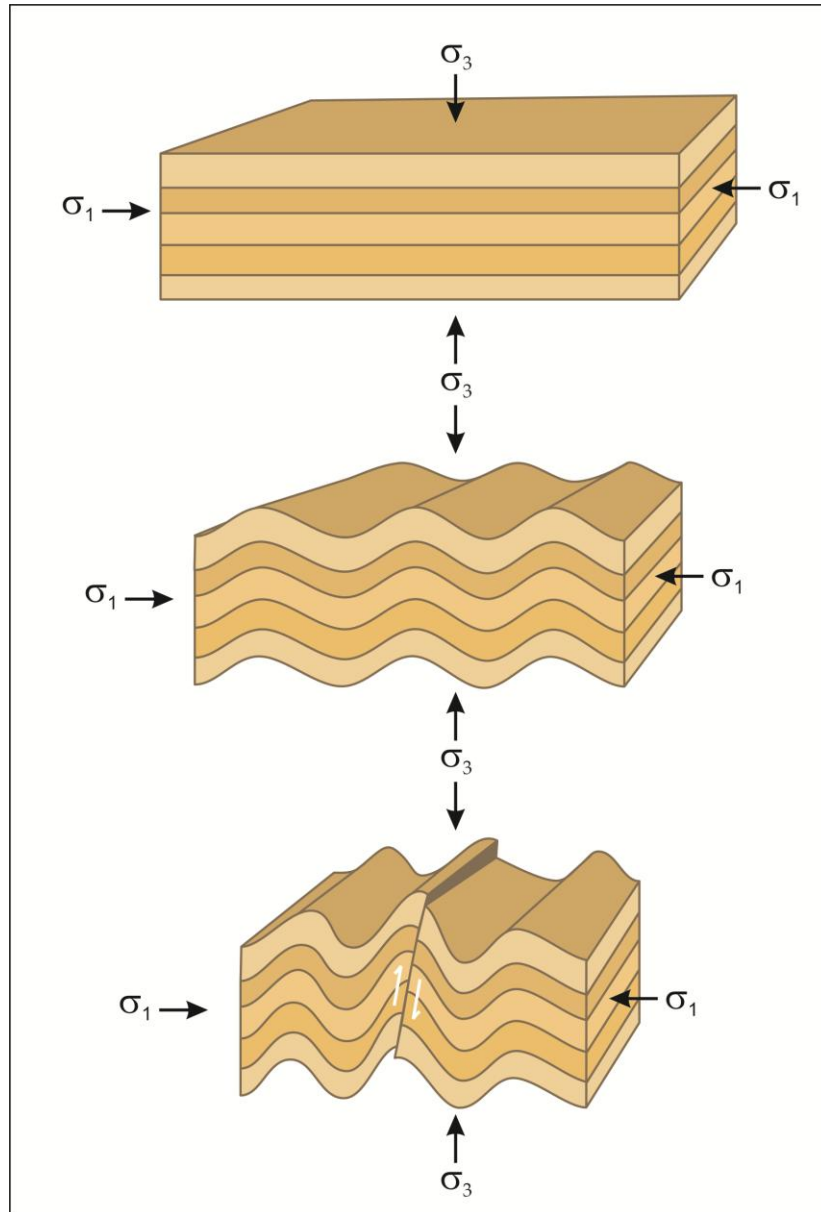


La rotura y flujo de los materiales (régimen sísmico y asísmico) siempre supone una discontinuidad en el macizo rocoso, aunque no siempre se manifiesta como un único plano discreto. El flujo plástico supone una zona con deformación intensa, que va acompañada de fenómenos de reorientación y disolución-recristalización mineral (p.ej., durante la formación de milonitas).

Además de fracturas, roturas o estructuras propias de deformación discontinua en la roca, podemos encontrar estructuras donde la deformación se resuelve de manera más o menos continua, sin formación de discontinuidades netas, este es el caso de los pliegues. Pero ocurre que la roca (al menos en profundidades relativamente someras de la corteza terrestre) no tiene un comportamiento

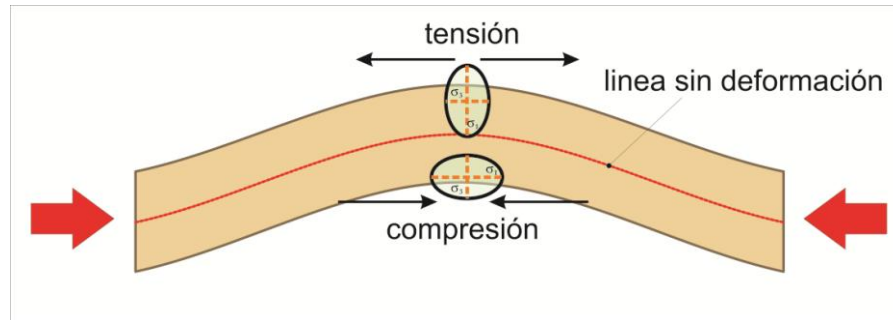


plástico, sino más bien elástico, por lo que indefectiblemente la deformación por plegamiento irá acompañada de fracturación, de manera que encontraremos pliegues y fracturas generadas por un mismo estado o tensor de esfuerzos regional.



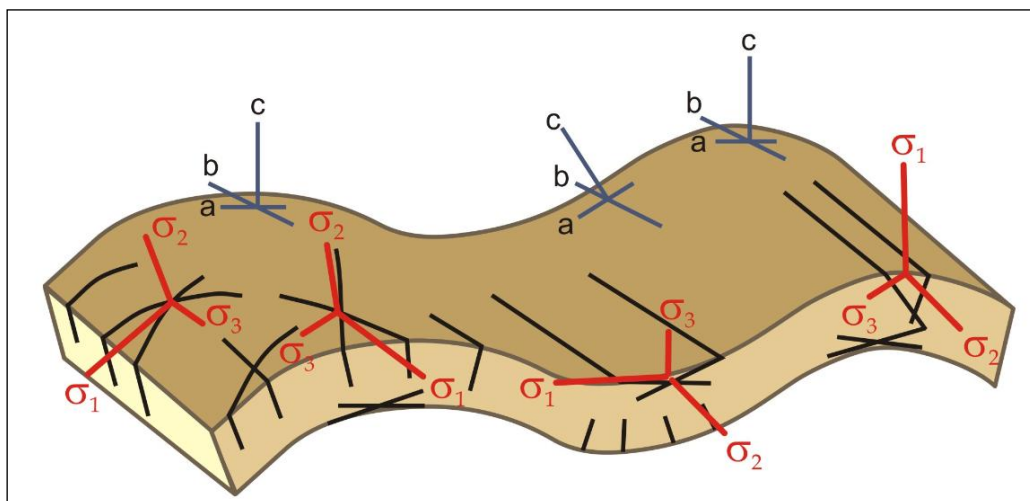
*El comportamiento elástico de la roca supone la formación de fallas durante el plegamiento, coherentes con el tensor de esfuerzos que ha generado este.*

La propia progresión de la deformación hace que la distribución de esfuerzos en la roca varíe, de manera que en una misma estructura podemos encontrar situaciones muy distintas respecto al estado tensorial de la roca, lo que a su vez va a determinar que se generen diferentes estructuras de deformación secundarias asociadas. Por ejemplo, si consideramos la formación de un pliegue, veremos que hay zonas de extensión y otras zonas de apretamiento, simplemente por un condicionante geométrico.



La propia formación de un pliegue hace que se desarrollen zonas sometidas a tensión (extensión), contrastando con zonas sometidas a compresión (apretamiento).

Así, la distribución interna de los esfuerzos en un pliegue hace que se generen diferentes sistemas de fracturas en función de los tensores locales, de manera que se pueden encontrar sistemas de diaclasas y fracturas en apertura (extensión, zona externa de la charnela), en cierre (compresión, zona interna de la charnela) y fracturas con movimientos en dirección (cizalla, en zonas de flancos).



Distribución de tensores de esfuerzos en un estrato plegado, y formación de sistemas de diaclasas y microfracturas según estos tensores.

## **Bibliografía**

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

Department of Aerospace Engineering Sciences, 2012. Introduction to Aerospace Structures (ASEN 3112) - Fall 2012, University of Colorado at Boulder, <http://www.colorado.edu/engineering/CAS/courses.d/Structures.d/IAST.Lect01.d/IAST.Lect01.pdf>

González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C., 2002. Ingeniería geológica. Prentice Hall, Madrid, 715 pp.

Hobbs, B.E., Means, W.D. y Williams, P.F., 1976. An outline of structural geology. John Wiley & Sons, p.73

Nicolas, A. y Mainprice, D.H., 1987. Principles of Rock Deformation. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.

Ramsay, J.G., 1967. Folding and Fracturing Rock. McGraw-Hill, NY, 568 pp.

Twiss, R.J. y Moores, E.M., 2007. Structural geology, 2nd ed. W. H. Freeman, New York: 736 pp.

Weijermars, R., 1997. Principles of rock mechanics: Amsterdam, Alboran Science Publishing, 360 pp.

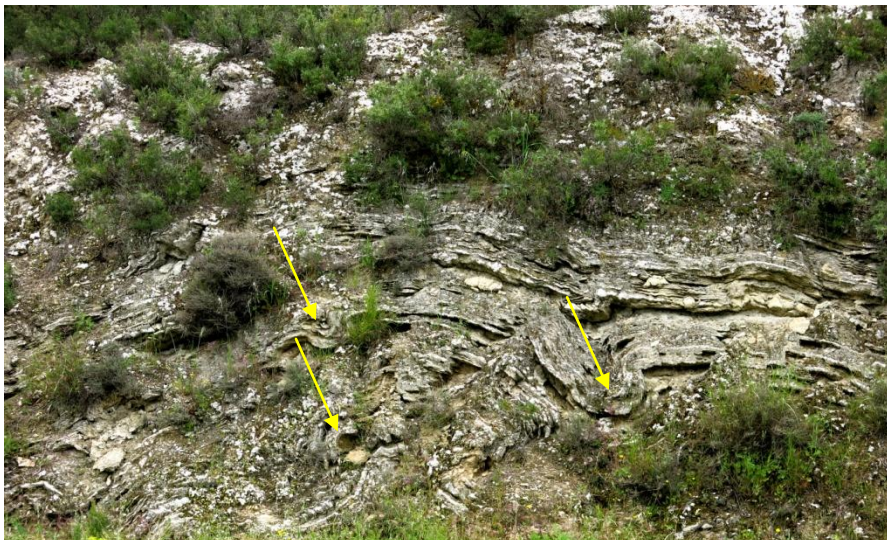
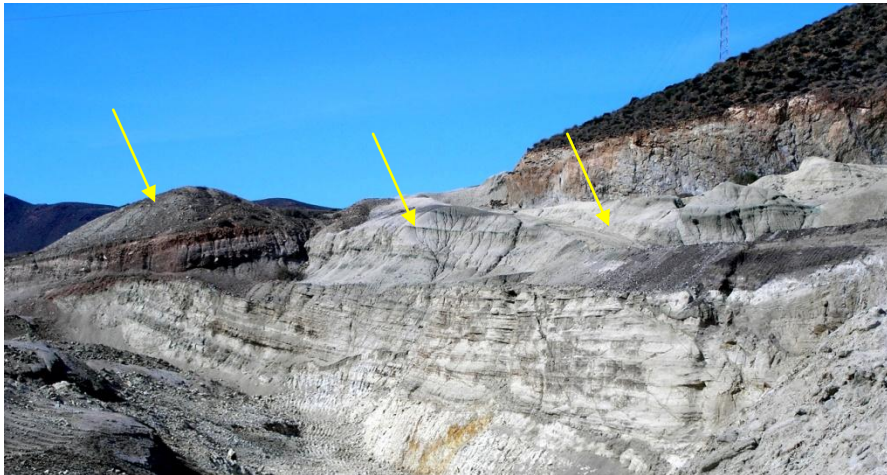
**Fuente de las imágenes** (a Mayo-Julio de 2013)

1. <http://www.ucl.ac.uk/~ucfbpmb/>
2. <http://courses.washington.edu/me354a/chap8.pdf>

### 3.1 Cuando las rocas se pliegan

#### 3.1.1 Antecedentes generales

Como veíamos en el capítulo anterior, una roca sometida a deformación pasa por una breve primera fase de deformación elástica, seguida de una deformación plástica, hasta que llegado el momento si el esfuerzo persiste la roca se rompe (se falla).



Arriba, bloques basculados (flechas) por fallas y superpuestos; depósitos piroclásticos de caída en Morrón de Mateo (Mioceno; Almería, España). La rotación de los bloques genera una idea errónea de plegamiento. Abajo, yesos fuertemente plegados (flechas) en el Mioceno de la Sierra de Ujué (Navarra, España).

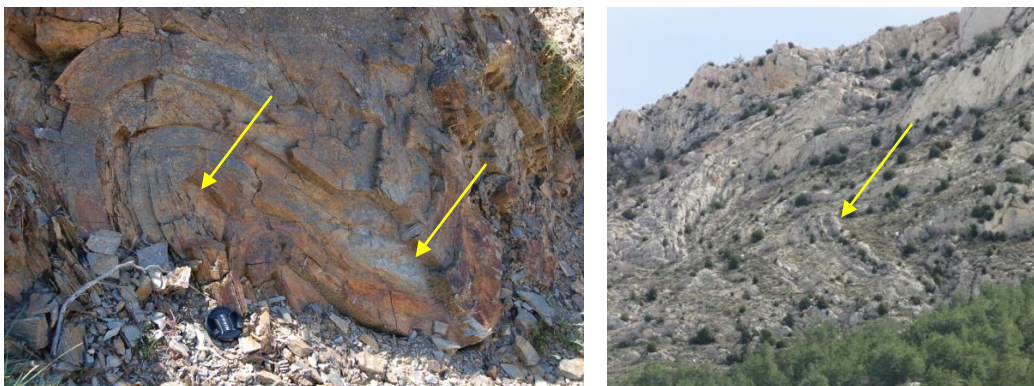
En este capítulo nos ocuparemos del paso intermedio, es decir, la deformación de la roca pero sin rotura (plegamiento), que en las rocas volcánicas es más restringido, pero que en las sedimentarias, particularmente en las calizas o yesos, tiene una importancia decisiva. Al respecto, dado que las mineralizaciones hidrotermales se asocian de manera preferente a los complejos volcánicos y plutónicos (aporte de calor  $\pm$  metales  $\pm$  fluidos) en ese ambiente observaremos menos plegamiento que en regiones más ricas en sedimentos, ya que se trata de rocas muy competentes, “rígidas”, que “tienden” más a romperse (por fallamiento) que a plegarse. Al respecto, se dice que una secuencia de estratos sedimentarios está plegada cuando estos han sido “curvados” como resultado de una deformación permanente. Esto puede ocurrir:

- Antes de que las capas se consoliden y entonces hablaremos de pliegues “sinsedimentarios”. Estos se forman cuando un material sedimentario semiconsolidado se desliza sobre una superficie inclinada, debido a una inestabilidad gravitacional inducida (o no) por un sismo.



*Izquierda, secuencia de margas del Mioceno cerca de Sorbas (Almería, España); a la derecha (detalle) se observan pliegues (flecha) sinsedimentarios en la secuencia.*

- Con posterioridad a la consolidación de los sedimentos como roca sedimentaria. En este caso intervienen fuerzas activas (producidas durante una fase orogénica) que inducen la deformación.



*Pliegues hercínicos en cuarcitas de la Formación Constante (Ordovícico) (Riaza, España). A la derecha calizas mesozoicas fuertemente plegadas (plegamiento alpino), carretera de Martín del Río a Utrillas (Aragón, España).*



*Espectaculares pliegues en bancos de calizas y margas mesozoicas como resultado del plegamiento alpino. Las Calanques, costa de Francia entre Marsella y Goudes.*



*Espectaculares pliegues en calizas del frente alpino (Alpes Marítimos, Sur de Francia). Rocher de la Baume (Sisteron). Se trata de una estructura compleja con varios pliegues apretados (con planos axiales subverticales: ver flechas) en calizas del Jurásico (Titoniense).*

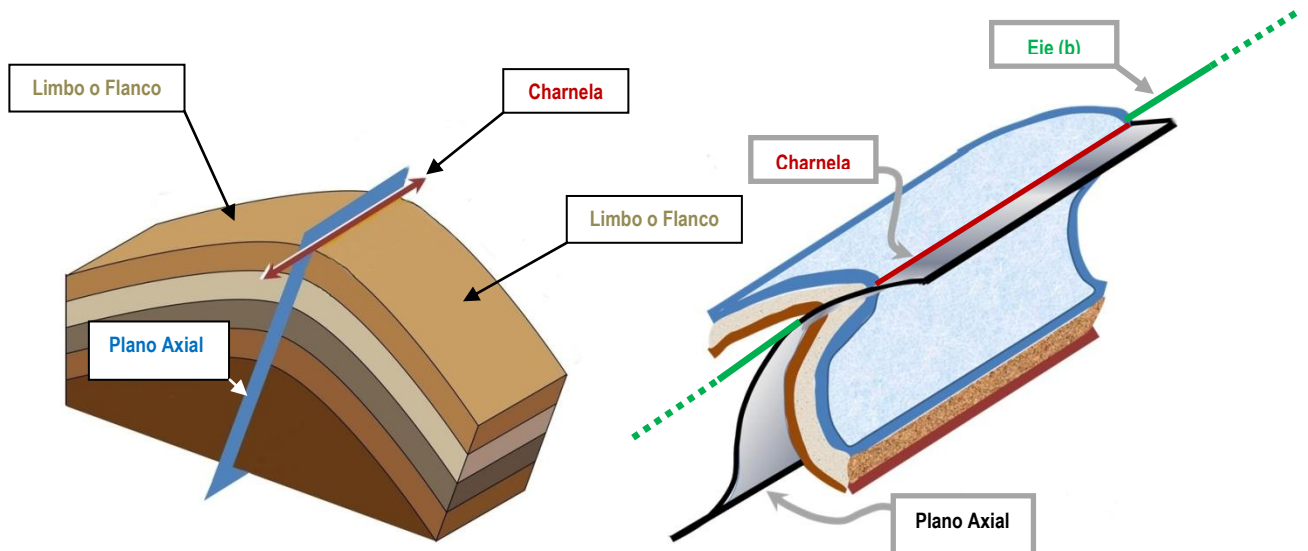
- Deberíamos aquí también agregar los llamados “pliegues de arrastre” asociados en este caso a la dinámica del movimiento de una falla.



Pliegue de arrastre (PA) en la llamada Brecha Roja de la Serrata de Níjar (Almería, España).

### 3.1.2 Elementos de un pliegue y tipos de pliegues

Hay varios elementos geométricos diferenciables en un pliegue: sus limbos o flancos, que representan la superficie curvada; el plano axial, que separa el pliegue en dos mitades; la charnela, que surge de la intersección de ese plano axial con la superficie curvada; y por último el eje (denominado  $b$  o  $\beta$ ), que es paralelo a la charnela y está contenido dentro del plano axial.

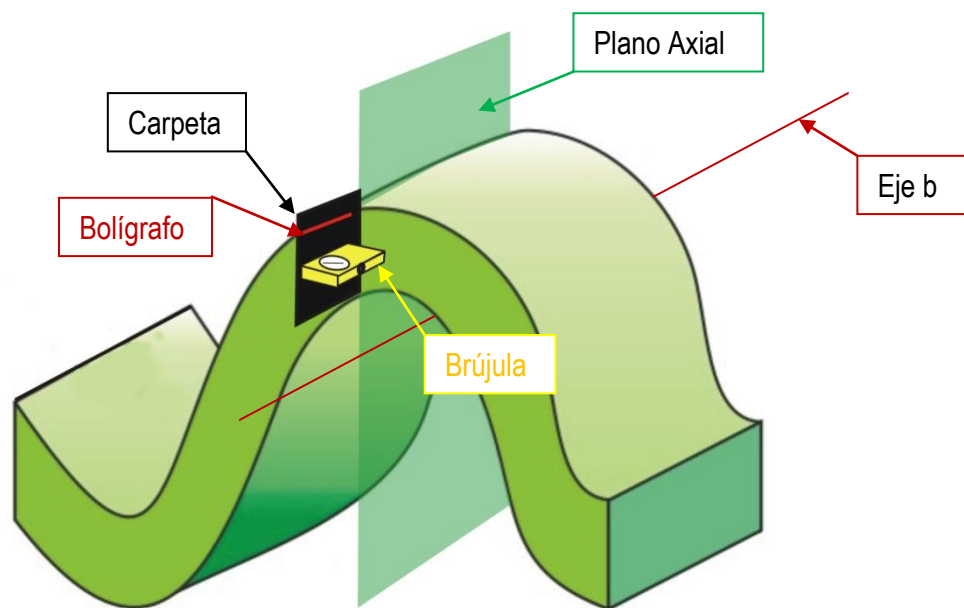


Elementos de un pliegue en dos series de estratos plegados con menor (izquierda) o mayor intensidad (derecha). Imagen<sup>1</sup>.



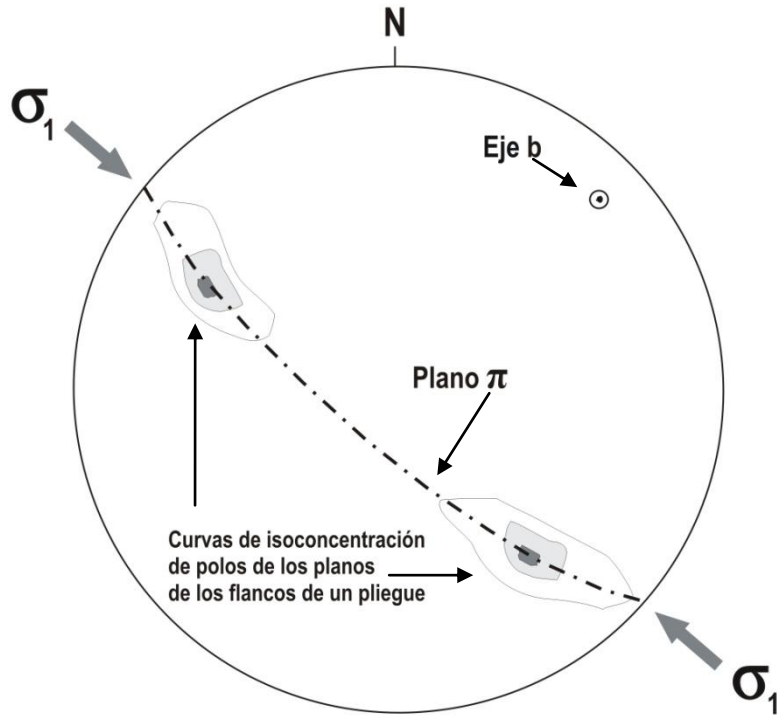
Una vez identificados estos elementos en un pliegue deberemos medirlos para luego analizar la información mediante (por ejemplo) el uso de la Red de Schmidt. Medir los flancos no difiere en nada a medir la dirección y buzamiento de una capa cualquiera. El plano axial, el eje, y la charnela, siendo elementos geométricos no representados físicamente en la roca, requieren de un tratamiento especial.

- Para medir el plano axial podemos usar una carpeta rígida, posicionándola en el pliegue de manera que coincida con el plano axial teórico. Lo siguiente es medir la dirección y buzamiento de dicha carpeta.
- Medir el eje del pliegue es aún más fácil, ya sabemos qué dirección tiene (porque está contenido en el plano axial) y tan solo resta medir los grados de inclinación (y hacia dónde) que tiene con respecto a la horizontal. Si volvemos al uso de la carpeta, y para estar seguros, digamos que podemos poner un bolígrafo sobre el plano de la carpeta. La inclinación de ese bolígrafo nos dará el valor que falta de  $b$  ( $\beta$ ).

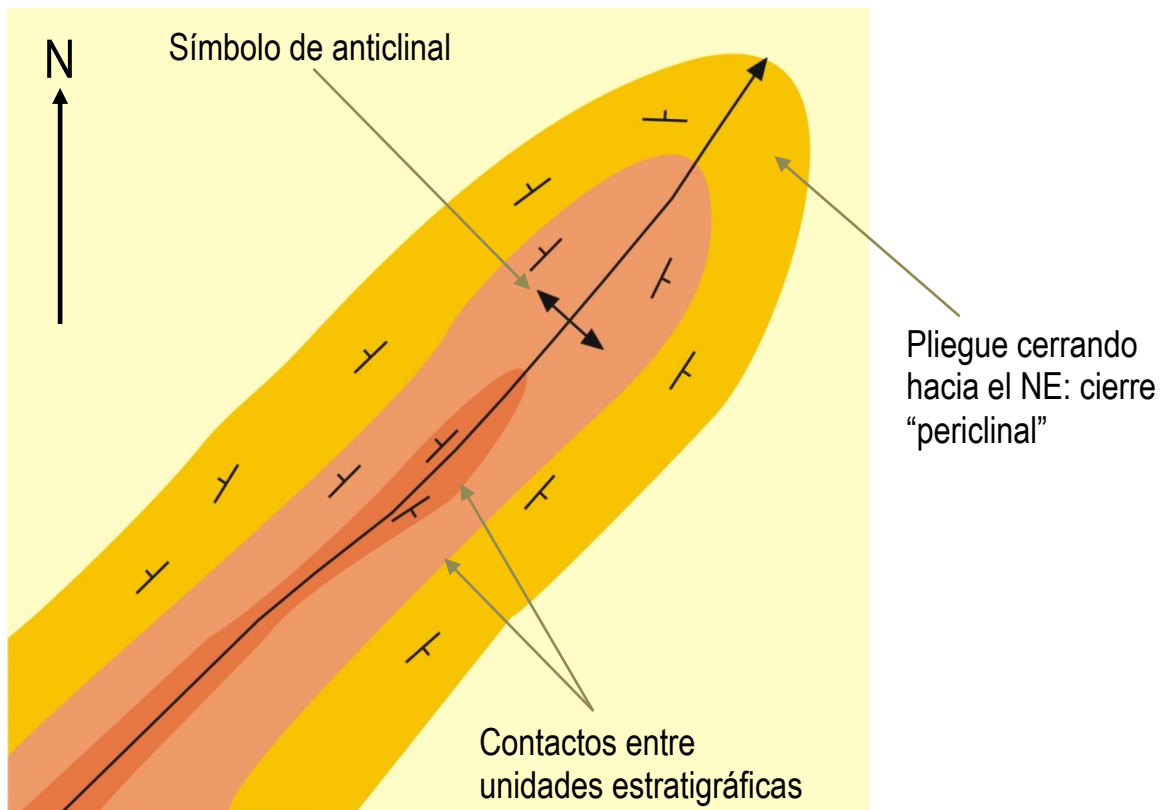


*Midiendo el plano axial y el buzamiento del eje (= inmersión del pliegue). 1. Posicionar una carpeta rígida (de unos 25 x 30 cm) que quede contenida en el plano axial; 2. Medir la dirección y buzamiento de la carpeta. 3. La dirección del eje  $b$  y el plano axial es la misma (eje contenido en plano), en este caso, de la carpeta y el bolígrafo rojo, por lo que solo queda medir la inclinación (buzamiento) del bolígrafo respecto de la horizontal y muy importante, hacia donde (p.ej., N, S, NW, etc.); en este caso es muy simple y el buzamiento es  $0^\circ$  ya que el pliegue no tiene inmersión.*

Una vez que se tiene un número importante de mediciones en una zona se puede pasar a realizar un análisis estadístico de distribución de los polos de los planos medidos en los flancos, así como de los ejes medidos.

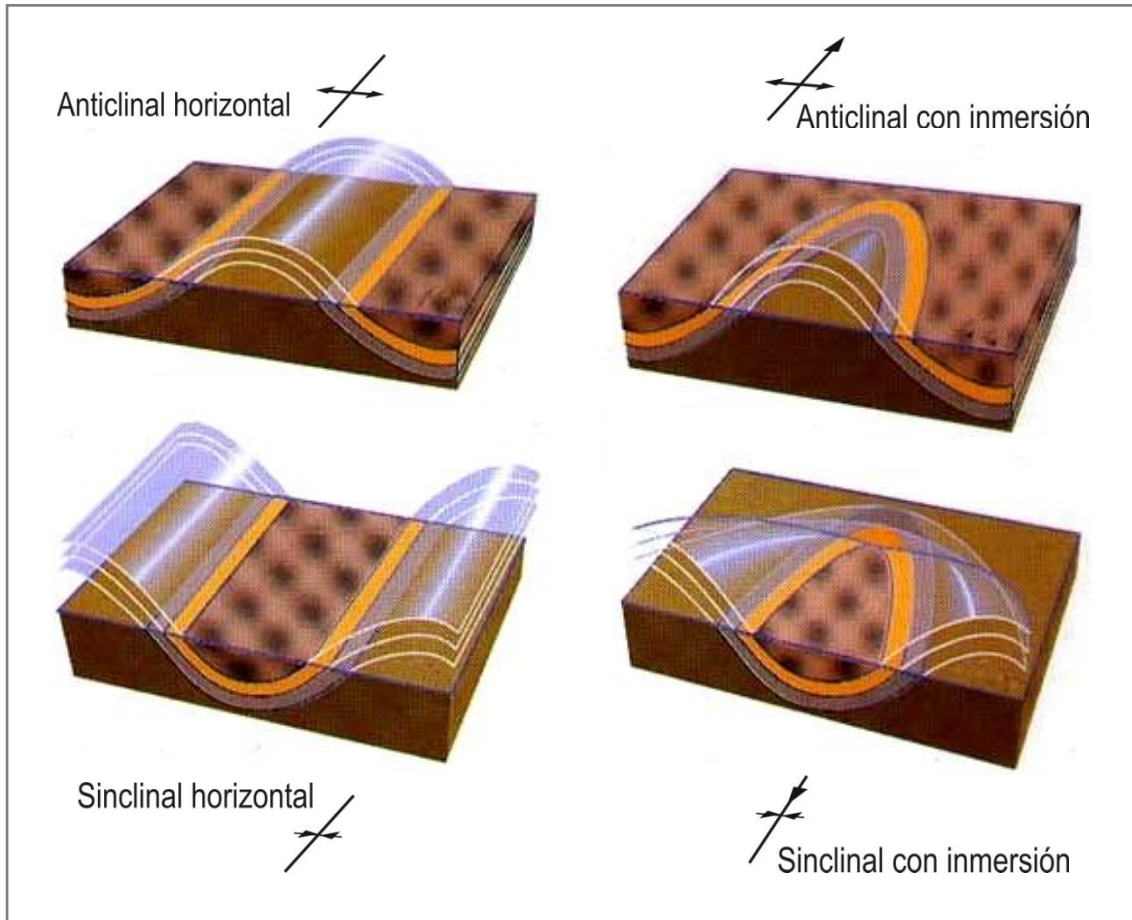


Representación estereográfica simplificada de los polos de los planos de un pliegue anticlinal cuyo eje buza hacia el NE. La unión de las zonas de máxima densidad de polos permite determinar el Plano  $\pi$  que contiene el vector (máximo) de esfuerzos  $\sigma_1$



Caso aproximado a la situación de la figura de arriba, estratos plegados por una componente de esfuerzo principal de dirección NW-SE.

Hemos introducido el término anticlinal sin mostrar su opuesto geométrico, el sinclinal. El que se diga que los estratos constituyen un pliegue tipo sinclinal o anticlinal solo depende de si la curvatura apunta hacia arriba (anticlinal) o hacia abajo (sinclinal).

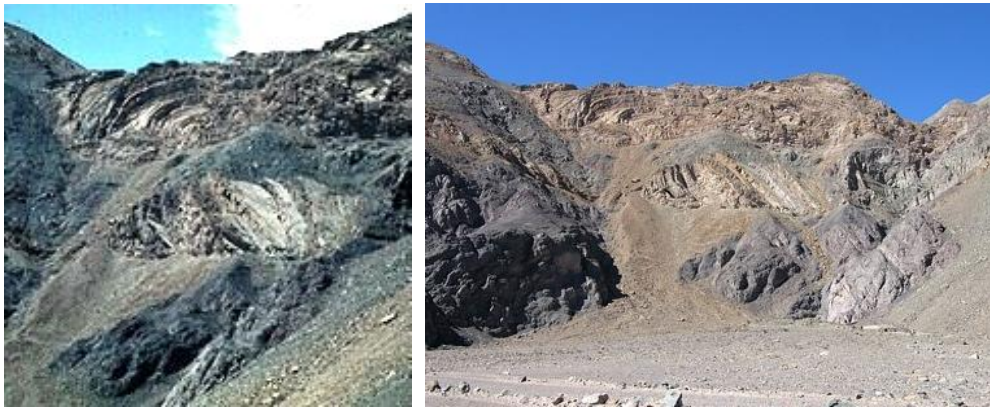


*Diversas formas posibles de plegamiento simétrico y su simbología cartográfica. Imagen<sup>2</sup>.*

La complejidad de los pliegues depende de los materiales a plegar. Así como comentábamos anteriormente, mientras las rocas volcánicas se resisten a plegarse y pasan de manera relativamente fácil (dependiendo de su composición) a la rotura mediante falla, las rocas sedimentarias, especialmente las calizas y yesos pueden formar complejas estructuras de plegamiento.

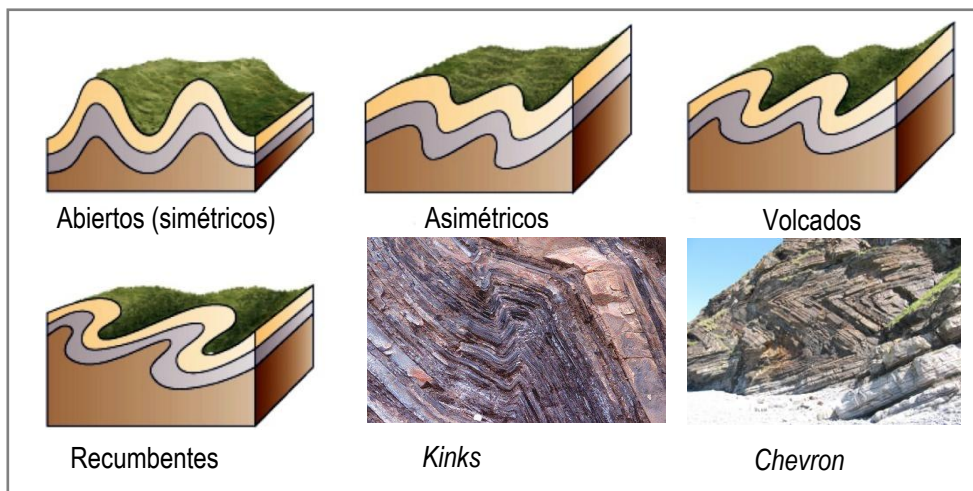
No obstante, el estilo de plegamiento dependerá también en gran medida de la tectónica, esto es, si hablamos de orógenos colisionales (una placa continental colisiona con otra; p.ej., Alpes, Béticas-Rif, Himalayas) o de márgenes activos de tipo andino donde el régimen de compresión-extensión está básicamente controlado por la velocidad de convergencia de las placas (oceánica y continental). Del primer caso y habiendo calizas implicadas, resultan las más espectaculares cadenas de plegamiento. Por el contrario, en los márgenes activos la sedimentación de facies marinas es restringida. Por ejemplo, en el norte de Chile

las facies calcáreas del Jurásico de Cerritos Bayos o del Neocomiense del Grupo Chañarcillo son insignificantes comparadas con los miles de metros de rocas de edad equivalente de origen volcánico. Tampoco los esfuerzos de las fases compresivas en los niveles superiores son tan intensos como para generar plegamiento masivo al estilo alpino. De hecho, y es casi una paradoja, que el plegamiento y fallamiento más complejos en facies sedimentarias en el norte de Chile no se asocia a una fase compresiva, sino que a una extensional que dio como resultado el llamado “Caos de Puquios” (Copiapó, III Región) (Mpodozis y Allmendinger, 1992, 1993).



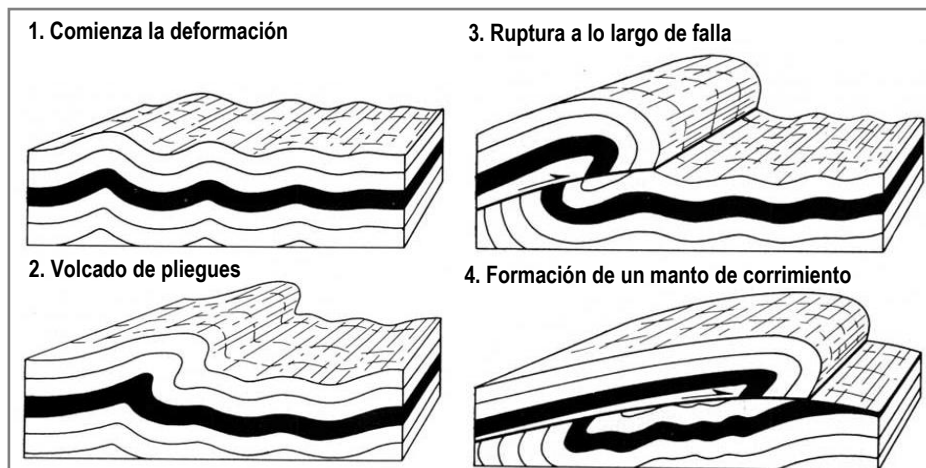
El llamado “Caos de Puquios” (Mpodozis y Allmendinger, 1992, 1993) en la III región de Chile. Imágenes<sup>3,4</sup>.

Aún así, para al geólogo de países andinos (o tipo andino) es importante conocer algunos de los tipos más comunes de pliegues, más allá de si se trata de un pliegue sinclinal o anticlinal (ver siguiente figura). Además como veremos, comprender el plegamiento significa entender cómo y porqué algunas mineralizaciones se asocian a este fenómeno y dónde se localizará la mena principalmente.



Algunos tipos de pliegues. Imágenes<sup>5-7</sup>.

Finalmente, debemos recordar que por muy plástico que sea el comportamiento de una roca sedimentaria, inevitablemente, si persiste el esfuerzo de deformación, la roca se romperá a lo largo de una falla. Esta falla será de tipo inverso (ver capítulo siguiente) y el fenómeno podrá ocurrir desde la escala de afloramiento (o menor) a la regional. En este último caso hablaremos de “mantos de corrimiento” (o “escamas”) para referirnos a la secuencia que se escurrirá por encima de la falla, dando origen a una tectónica típicamente alpina. Si el deslizamiento es verdaderamente importante, al nivel de kilómetros, puede que la cobertera desaparezca en algún sector dejando ver el zócalo. En este último caso hablaremos de una “ventana tectónica”.



Etapas del plegamiento/fallamiento bajo condiciones de esfuerzo continuado. Imagen<sup>8</sup>.

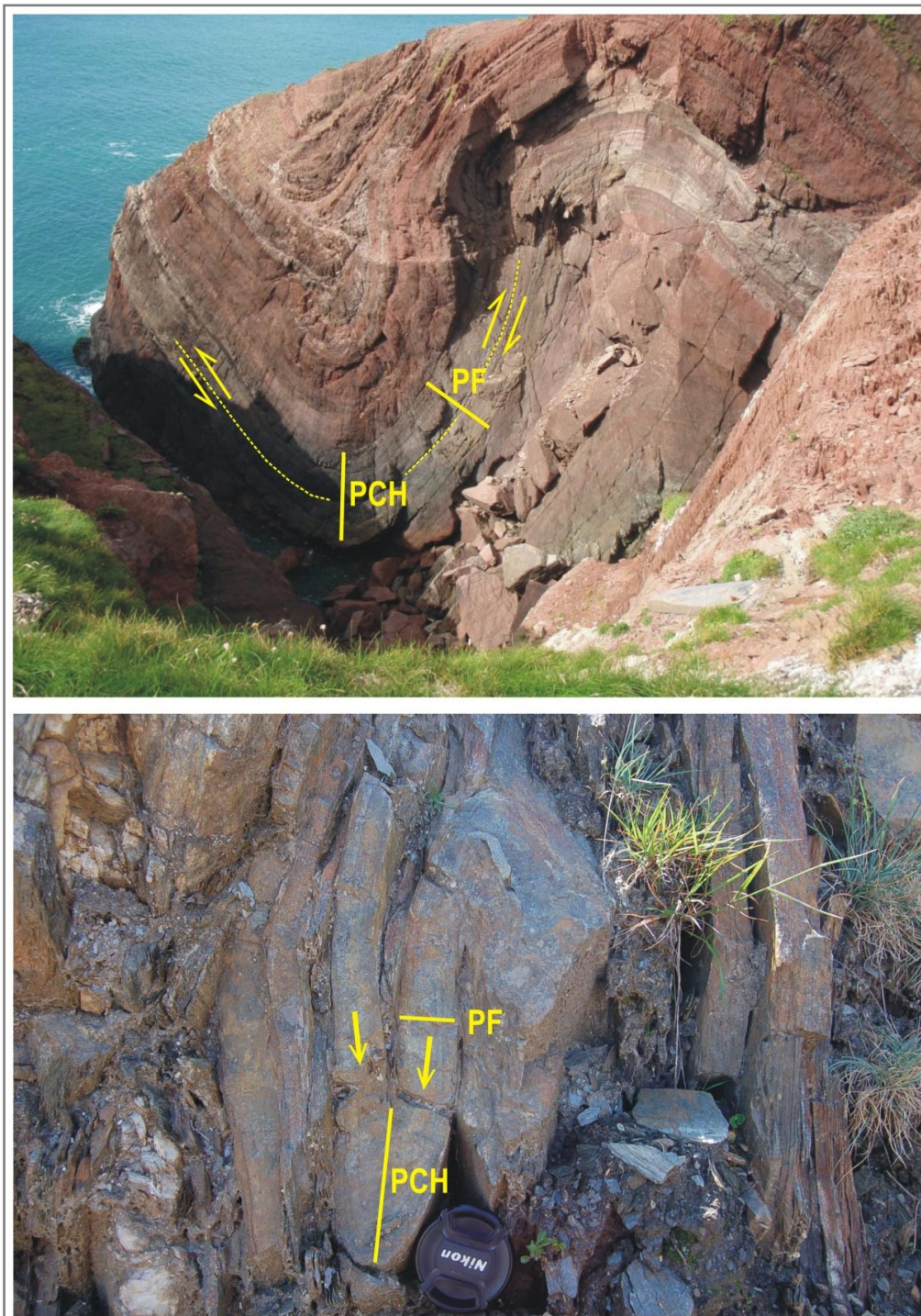
### 3.1.3 Mecanismos de plegamiento

Revisaremos aquí brevemente los principales mecanismos de plegamiento de una secuencia estratificada en el mundo frágil y su transición a la ductilidad. Existen dos mecanismos posibles que se agrupan en el concepto de plegamiento flexural, el cual a su vez depende de que exista una cierta anisotropía mecánica entre las capas (competentes versus incompetentes) (Donath y Parker, 1964):

- *Deslizamiento flexural (flexural slip)*, donde las capas se deslizan “entre” ellas a lo largo de los planos de estratificación. Solo en la charnela no hay deslizamiento. En este plegamiento el espesor de las capas se mantiene constante en todo el pliegue.
- *Flujo flexural (flexural flow)*, que se desarrolla por flujo de material “dentro” de las capas. En este caso la zona de la charnela puede ser engrosada por movimiento de materiales desde los flancos (limbos).

El que se desarrolle uno u otro mecanismo (o una combinación de ambos) depende del comportamiento mecánico de las capas, la profundidad de

plegamiento, el gradiente geotérmico y la presión. Así, en niveles superiores de la corteza el plegamiento se realizará por deslizamiento flexural y a medida que aumente la ductilidad de los materiales tendremos flujo flexural.

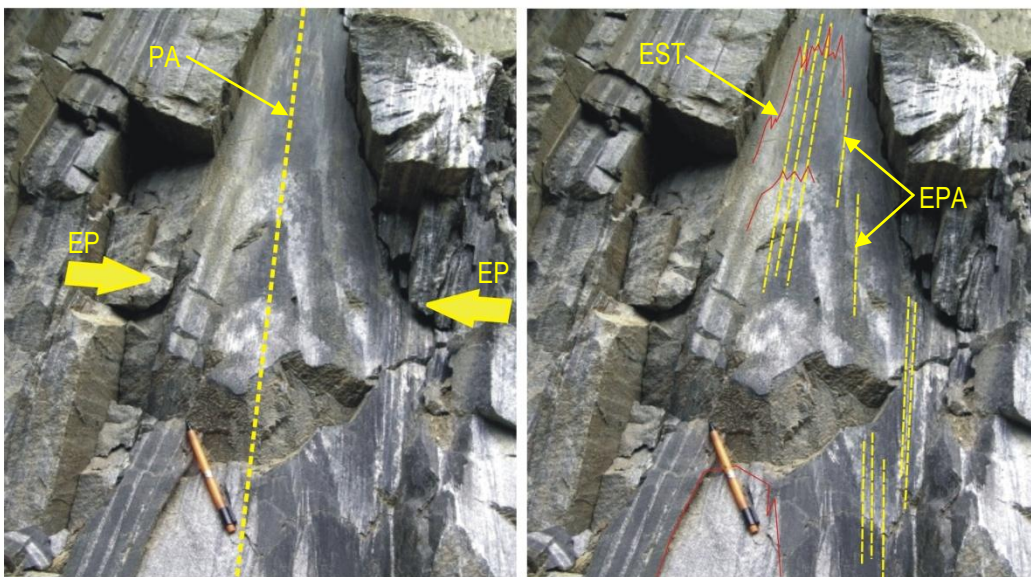


Arriba, deslizamiento flexural en capas de un pliegue de areniscas devónicas (secuencia del Old Red Sandstone) muy poco metamorizadas en la costa de Gales (UK) (imagen<sup>9</sup>). Note que la potencia de las capas permanece prácticamente constante en los flancos (PF) y charnelas (PCH). Abajo, flujo flexural en el Puerto de la Quesera (Riaza, España), en cuarcitas de la Formación Constante (Ordovícico). Note que la charnela presenta fuerte engrosamiento respecto a los flancos. El mayor grado de metamorfismo ( $> P-T$ ) en esta última secuencia permitió el desarrollo de flujo dentro de las capas.

### 3.1.4 Esquistosidad de plano axial, pliegues parásitos y grietas de tensión.

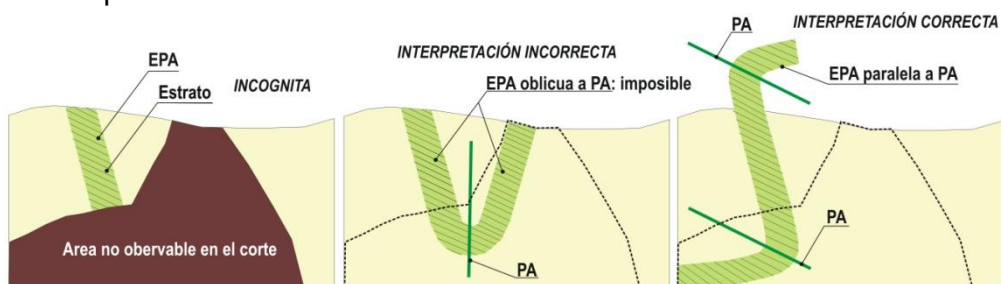
El plegamiento conlleva la formación de estructuras asociadas que es conveniente conocer ya que pueden ser útiles llegado el momento de resolver estructuras en el campo.

Un fenómeno comúnmente asociado al plegamiento es la llamada “esquistosidad de plano axial”, esto es, una fábrica planar desarrollada más o menos paralela al plano axial de los pliegues y normal al esfuerzo principal. Si la secuencia contiene rocas pelíticas (p.ej., lutitas) y psamíticas (p.ej., areniscas) además se producirá una “refracción” de la fábrica planar debido a la distinta competencia de los materiales.



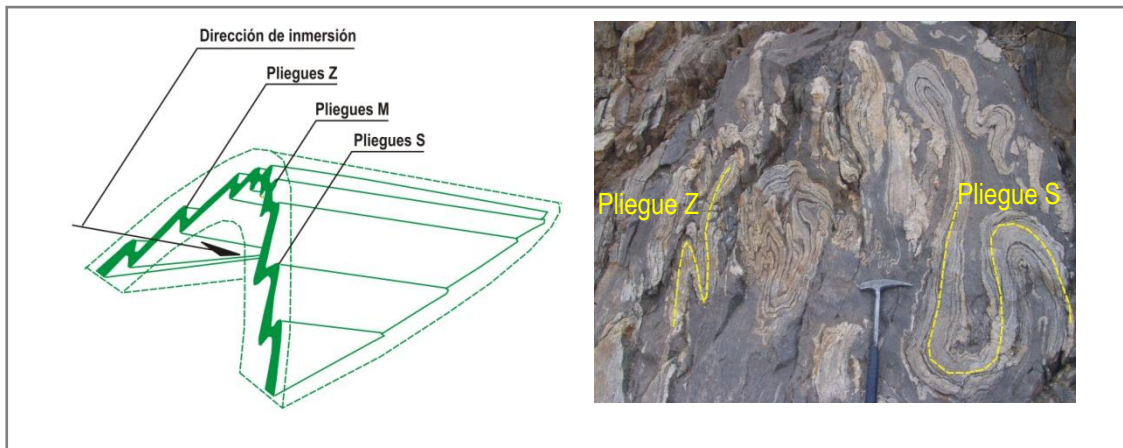
Esquistosidad de plano axial desarrollada en un pliegue apretado de metapsamitas (Song et al., 2010). Para mayor claridad sólo algunos planos de la esquistosidad y de la estratificación han sido representados. EP: esfuerzo principal ( $\sigma_1$ ); EPA: esquistosidad de plano axial; EST: planos de estratificación; PA: plano axial del pliegue.

Por otra parte, el reconocimiento de la esquistosidad de plano axial constituye un criterio de primer orden llegado el momento de reconstituir la geometría de un pliegue del que solo observamos un flanco.



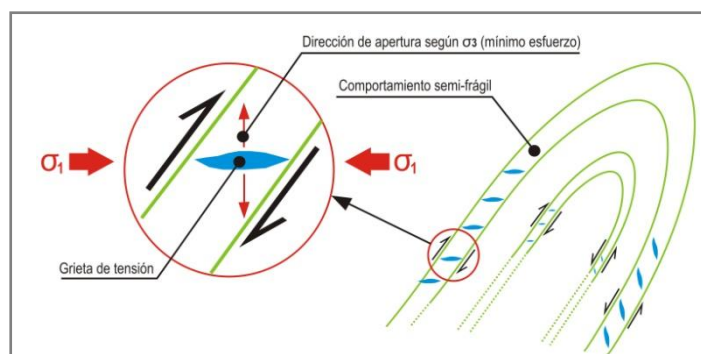
Reconstruyendo la trayectoria de un pliegue por observación de la dirección y buzamiento de la esquistosidad de plano axial: EPA (adaptada de Davis y Reynolds, 1996).

Otro elemento importante llegado el momento de determinar las características del plegamiento son los denominados “pliegues parásitos”. Se trata de pliegues menores (longitud de onda corta) insertos en pliegues mayores (mayor longitud de onda). Si se observa un gran pliegue en la dirección de su inmersión (hacia donde buza su eje) observaremos una serie de pliegues menores cuya forma nos recuerda las letras “Z” (flanco izquierdo), “M” (zona de la charnela), y “S” (flanco derecho). Puede que el pliegue que contiene los pliegues parásitos sea tan grande que no podamos observarlo en su verdadera magnitud, razón por la cual los pliegues Z, M, y S constituyen una ayuda inestimable en el campo para poder entender la gran estructura.



Izquierda, esquema para los pliegues parásitos en un pliegue con inmersión (adaptada de Fleuty, 1987); derecha, metapsamitas plegadas (Tangtse, Karakoram Shear Zone, Ladakh, India), imagen<sup>10</sup>.

Por otra parte, y aunque menos común, conviene aquí mencionar también el desarrollo de “grietas de tensión” en los flancos de un pliegue (volveremos sobre este tema en el siguiente capítulo). El arrastre con fricción que resulta del deslizamiento de las capas superiores sobre las inferiores en el plegamiento por deslizamiento flexural, genera una cizalla sobreimpuesta que actúa sobre la parte superior e inferior de cada capa. Si las condiciones son favorables se formarán grietas de tensión a 45° con respecto al plano de estratificación. La orientación de estas fracturas con respecto a la estratificación nos indicará la dirección de deslizamiento (Wilson, 1982).



Formación de grietas de tensión en los flancos de un pliegue (adaptada de Wilson, 1982).



## 3.2 Fluidos en pliegues

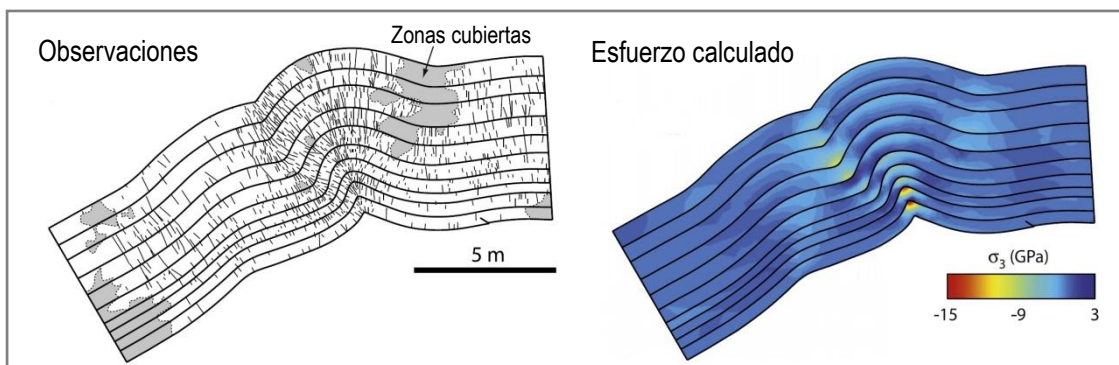
### 3.2.1 Régimen de fluidos en un pliegue

Bajo el punto de vista de la exploración de yacimientos minerales, así como de la detección de nuevos cuerpos mineralizados en un yacimiento sólo conocido “en parte”, es importante determinar cuáles serán los sitios preferentes para la formación de cuerpos mineralizados en una secuencia plegada.

El movimiento de fluidos en un pliegue así como la posterior deposición de su carga mineral depende en gran medida de los siguientes parámetros. En primer lugar tenemos la permeabilidad de las capas. Por ejemplo, si no están sellados los poros, una arenisca o una toba de lapilli poseerán una gran porosidad efectiva que permitirá en gran medida el libre tránsito de fluidos a lo largo del estrato. Por el contrario, las lutitas o calizas representan condiciones de baja permeabilidad y por tanto ofrecen escasas posibilidades de movimiento a un fluido.

Por otra parte tenemos el gradiente de presión, ya que los fluidos se moverán preferentemente hacia aquellos sitios donde esta sea más baja, en condiciones normales: “hacia arriba”.

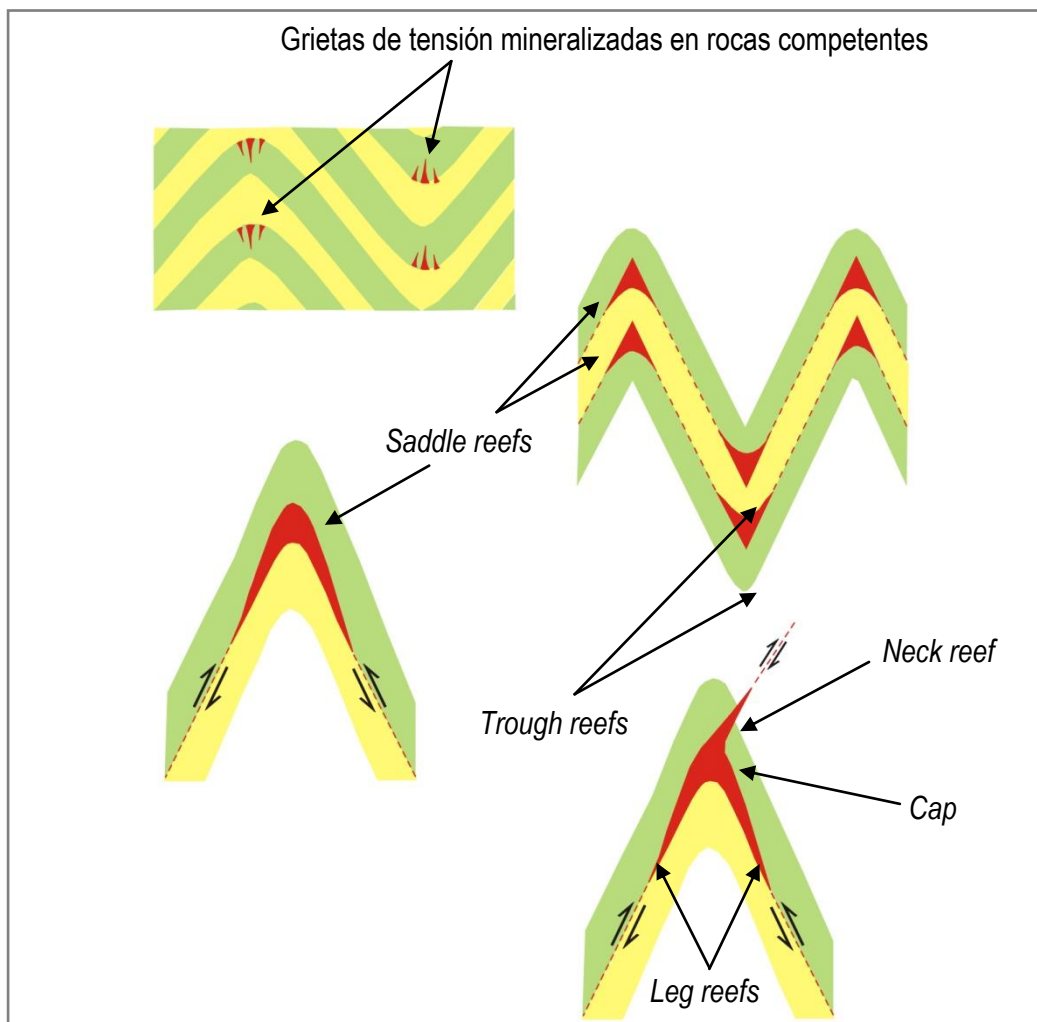
Clave para entender el posicionamiento de los cuerpos mineralizados son además el esfuerzo y deformación (*stress* y *strain*). Conviene aquí recordar una vez más el significado de estos dos términos que en ocasiones suelen confundirse. El “esfuerzo” es una fuerza que actúa sobre una roca por unidad de superficie, es decir, hablamos de presión “dirigida”. Digamos además que el esfuerzo en el plegamiento puede ser de compresión o tracción (“negativo” en este último caso). Por su parte la “deformación” es un cambio en la forma o tamaño en la roca que resulta del esfuerzo aplicado.



Lo que parece intuitivo se corresponde a lo observado durante la modelización matemática del proceso. En esta figura (situación a pequeña escala) podemos observar como las fracturas se concentran de manera preferente en las zonas de charnelas de los pliegues (izquierda), y que mientras más apretados son estos el esfuerzo teórico es menor (hasta valores negativos; derecha). Tomada y simplificada de Evans y Fischer (2012).

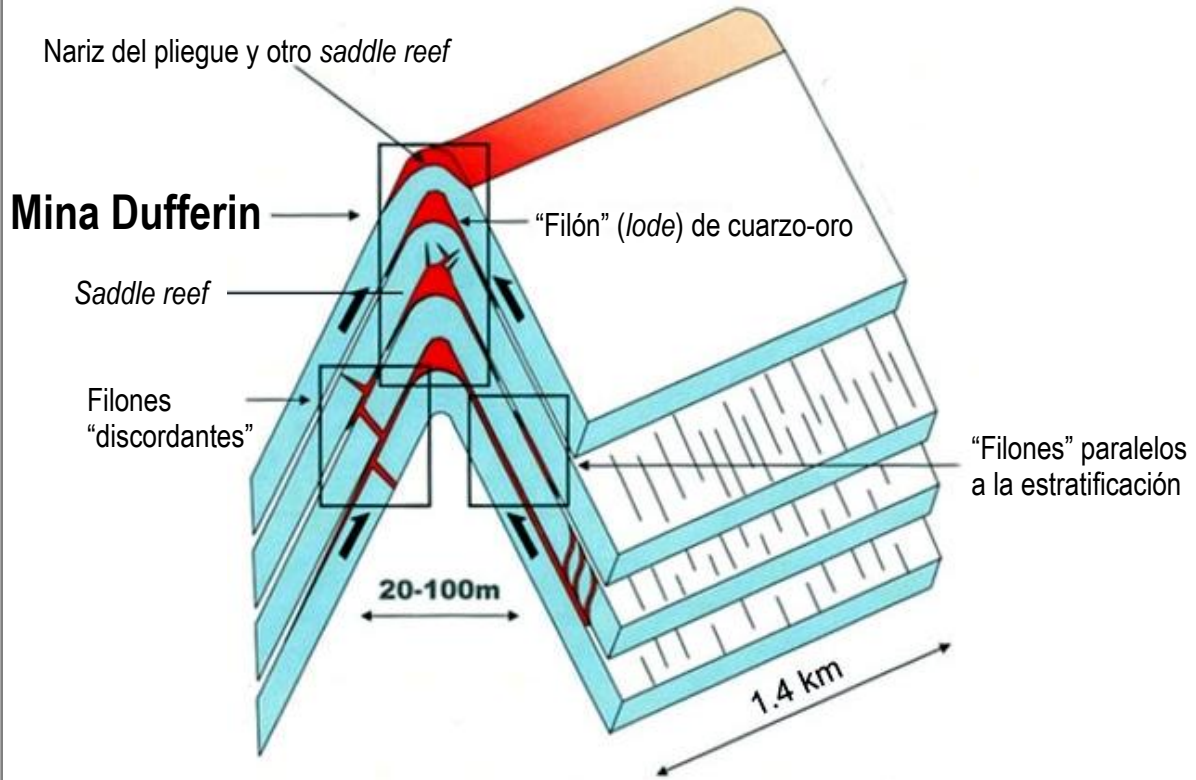
Como cualquiera podrá imaginar los fluidos “huirán” de las zonas en un pliegue sometidas a una fuerte deformación y migrarán donde el esfuerzo sea mínimo o negativo (zona de apertura). Podemos pensar como análogo simple en una “esponja de cocina” con agua en los poros. Si la apretamos el agua saldrá de los poros abandonando la esponja mayoritariamente.

En este mismo sentido, las zonas de mínimo esfuerzo se localizan (como cabría esperar) no en los flancos (lugar de aplicación del esfuerzo) sino que en las charnelas de los pliegues. Es ahí, en la zona de las charnelas donde se podrá encontrar los cuerpos mineralizados más importantes. Estos cuerpos mineralizados pueden ser de dos tipos: 1. Filones en grietas de tensión en las charnelas de pliegues con rocas competentes (rígidas); y 2. Los llamados filones tipo *saddle reef* (o *trough reef* si están en la charnela de los sinclinales) que también se localizan en los mismos sectores pero con mayor masa mineral.



Sectores de formación de cuerpos mineralizados en secuencias plegadas (deslizamiento flexural). Adaptada de Sibson (2005). Importante: aunque en teoría los cuerpos tipo *trough reef* tienen tantas posibilidades de formarse como los *saddle reefs*, la práctica muestra que las mineralizaciones corresponden casi en exclusiva al segundo caso. Normal, los fluidos tienden a moverse hacia arriba por un tema de gradiente de presión.

Un filón (en este caso del inglés: *lode*) tipo *saddle reef* (“silla de montar” por su morfología) es un cuerpo mineralizado asociado a la charnela de un pliegue y que sigue el plano de estratificación. Esto puede causar ciertas confusiones ya que la tendencia normal en español es a considerar un filón como discordante (*per se*) con respecto a una secuencia de rocas sedimentarias y/o volcánicas. Por esta razón en la siguiente figura hemos entrecomillado el término filón.



Arriba, saddle reef no. 2 en la mina Crown Reserve (Dufferin Gold District, Canadá) (Bierlein et al., 2004); abajo, esquema 3D para la mineralización de oro en la mina Dufferin. Adaptada de Strikepoint Gold Inc. (2010).

### 3.2.2 Tipos de yacimientos

El tipo característico de yacimiento asociado a este tipo de estructuras son los “mesotermales de oro” (*mesothermal gold deposits*). Estos se asocian a terrenos metamórficos de diverso grado y de todas las edades. Quizás si el término “mesotermal” está algo desprovisto de contenido dado el amplio espectro de profundidades de formación y grado metamórfico de los terrenos que los albergan; al respecto Groves et al. (1998) sugieren el nombre de “yacimientos orogénicos de oro” (*orogenic gold deposits*). Estos autores indican que tal vez la característica más constante de estos yacimientos sea su asociación con terrenos metamórficos deformados de todas las edades y tipos, incluyendo los cinturones de rocas verdes del Arqueozoico y fajas metamórficas del Fanerozoico; por otra parte se reconoce una fuerte asociación con las facies de los esquistos verdes, aunque también hay casos de mayor grado (hasta granulitas). Mineralógicamente estos yacimientos se caracterizan por poseer leyes relativamente altas de oro (5-30 g/t Au), donde este metal aparece en sistemas filonianos (*vetiformes*) dominados por la presencia de cuarzo, con sulfuros ( $\leq 3-5\%$ ) (principalmente sulfuros de Fe) y carbonatos ( $\leq 5-15\%$ ). Las venas suelen ser muy continuas en leyes o mineralogía a lo largo de la vertical. La alteración hidrotermal consiste básicamente en carbonatos (ankerita, dolomita, calcita).

Los yacimientos tipo *saddle reefs* en charnelas se reconocen sobre todo en secuencias turbidíticas (pizarras y metagrauvas), aunque no son el único tipo morfológico, siendo acompañados por otros tipos filonianos, brechas y stockworks en rocas competentes y zonas de foliación en sectores de deformación más dúctil. En términos muy generales estos yacimientos podrían ser encuadrados en dos categorías principales:

AB - StrikePoint Gold Inc. reports that a second 2010 drill program is underway at the **Dufferin Mine property in Nova Scotia**, having commenced on October 22, 2010. This second drill program follows the successful completion of the first 2010 drill program that was designed to extend the primary axis of Dufferin gold mineralization, to investigate fold structures and to test the host turbiditic greywackes for different styles of mineralization. **The highest gold values obtained from the 2010 summer drill program in terms of grade and intercept length were 79.40 g/t over 0.6m and 7.37 g/t over 1.8m**, respectively as shown in the tables below. The program achieved all objectives, leading to the current drill program which is designed to more precisely locate the extensions of the large, stacked gold-bearing saddle deposits ...

...The 2010 summer field program on the Nova Scotia Projects consisted of an airborne LiDAR survey, ground magnetometer survey, prospecting and mapping. A drill program was carried out on the Dufferin Project and to date has doubled the strike length of the mineralized zones from the previous 700m to 1400m extending ENE along the Dufferin property ...

... The mineralization on the properties **is turbidite-hosted gold where gold is concentrated in quartz vein saddles along the nose of the Crown Reserve anticlinal axis formed in greywacke, and argillite of the Paleozoic Meguma Group**. A total of 13 saddles have so far been identified in a 400m drill hole along the anticline at the Dufferin Mine and the mineralization has been confirmed over a strike length of about 700m in shallower holes.

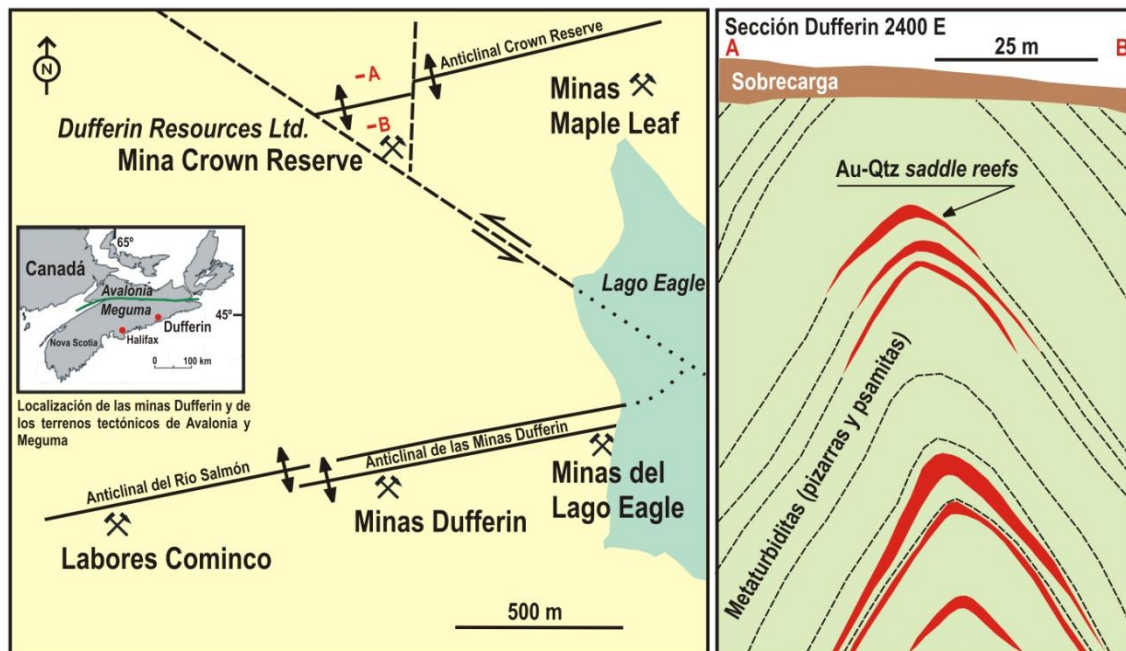
**Strikepoint Gold Inc. (2010)**

- Cuarzo-oro en zonas de cizalla dúctil/frágil.
- Cuarzo-oro en charnelas o flancos de pliegues.

Revisaremos el tema del oro en zonas de cizalla en el capítulo siguiente, concentrándonos aquí en los yacimientos tipo *saddle reef* en pliegues.

### 3.2.3 Dufferin (Nueva Escocia - Canadá): un clásico

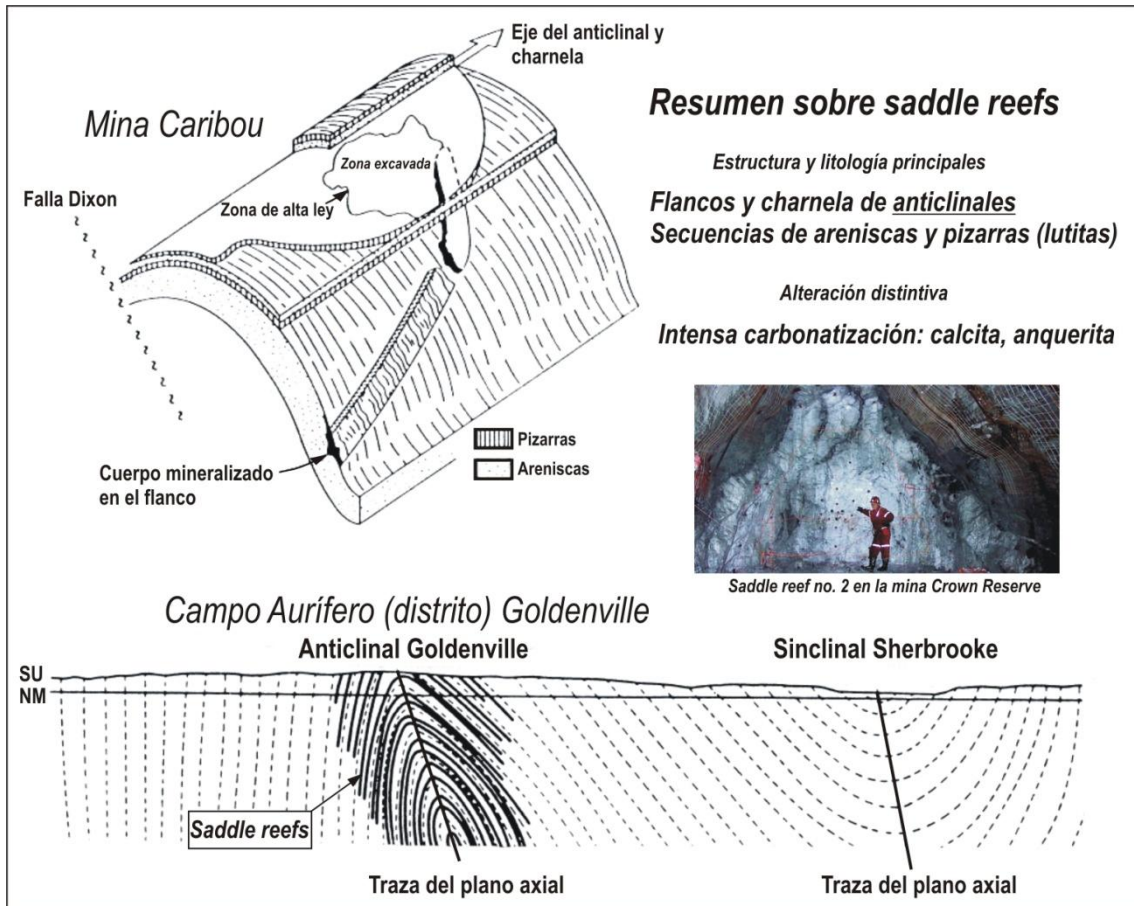
Uno de los mejores ejemplos de mineralización de cuarzo-oro en *saddle reefs* lo constituye el caso de Dufferin en Nueva Escocia (Nova Scotia, Canadá). En estas mineralizaciones las venas estratoligadas que se observan en los flancos de anticlinales son delgadas (< 30 cm), pero pueden alcanzar potencias importantes (> 6 m) en las charnelas de los pliegues.



Minas Dufferin y sección perpendicular al eje del anticlinal Crown Resources (adaptada de Groves et al., 1998).

La mina Dufferin había producido hacia 1998 1,4 millones de gramos de oro y sus reservas en la época eran de unas 103.000 t a 13 g/t Au. Pero la historia de esta mina no termina aquí, porque datos más recientes (Strikepoint Gold Inc., 2010) indican que más reservas esperan ser extraídas.

Las minas Dufferin se localizan dentro del terreno tectónico Meguma del Paleozoico Inferior en Nueva Escocia, el que alberga unos 60 distritos auríferos con una producción histórica de 1,2 millones de onzas Au. La zona es considerada como una de las áreas clásicas de oro emplazado en secuencias plegadas de turbiditas (Kontak et al., 2001).



Cuadro resumen con los rasgos característicos de las mineralizaciones tipo saddle reef de Dufferin (Canadá). NM: Nivel del mar; SU: Superficie.

### 3.3 Exploración de *saddle reefs* auríferos y filones asociados

#### 3.3.1 En busca de un modelo simplificado: las claves del Meguma

Los yacimientos auríferos del Meguma comparten una serie de características que permiten elaborar un modelo común para estos más allá de las relativas divergencias que pueda haber entre un yacimiento y otro. Así se puede establecer el siguiente modelo para dichas mineralizaciones (Kontak et al., 2001):

1. Los filones están confinados a las charnelas de pliegues y flancos con gran buzamiento, lo que implica que los fluidos se movieron a lo largo de estructuras previamente generadas.
2. Los filones se emplazaron en una fase tardía del plegamiento por deslizamiento flexural.
3. En base a consideraciones estructurales y dataciones absolutas la edad de mineralización se estima en 370 Ma y en algunos casos fue coincidente con el emplazamiento de granitos.
4. Los fluidos son exóticos con respecto a las rocas encajantes de la mineralización, pero muestran diversos niveles de interacción entre fluidos y rocas.
5. El régimen de presiones varió entre litostático y supralitostático durante la formación de los filones.

Aunque Kontak et al. (2001) sugieren que los fluidos serían de origen metamórfico, Sangster y Smith (2007) van más allá señalando lo siguiente. Edades  $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  sugieren una edad en torno 360-380 Ma para los yacimientos y permiten sugerir una relación con los granitos devónicos; sin embargo dataciones más recientes (Re/Os) en arsenopirita sugieren que la formación de los filones comenzó con el inicio del metamorfismo (ca. 408 Ma) lo que reafirmaría la idea de Kontak et al. (2001). Sin embargo otras edades entorno a 375 Ma sugieren también la posibilidad de un segundo episodio de mineralización o que la mineralización fue episódica o continua entre la deformación (metamorfismo) y la intrusión de los granitos.

Cualquiera sea el caso, resulta evidente que los elementos fundamentales necesarios para que se formen yacimientos tipo Meguma son los siguientes:

- Rocas sedimentarias turbidíticas plegadas por deslizamiento flexural y con metamorfismo de grado bajo. La presencia de grauvacas-metagrauvacas parece esencial dado que presentan una porosidad importante (de otra manera impediría el movimiento de fluidos). Por otra parte, un metamorfismo de grado alto haría desaparecer esos rasgos sedimentarios que precisamente permiten el paso de los fluidos.

- Metamorfismo-intrusiones graníticas-fluidos: o el huevo y la gallina. Que los fluidos sean de origen metamórfico o granítico puede que no sea un argumento decisivo por dos razones principales: 1) ambos suelen estar presentes en orógenos de tipo hercínico (= varisco y sus equivalentes en Canadá-USA, África o Sudamérica); 2) como señalan Sangster y Smith (2007), puede que tanto el metamorfismo como el plutonismo hayan participado en el proceso mineralizador.
- Resumiendo, los atributos esenciales de estos yacimientos tipo *saddle reef* son:
  - 1) La presencia de secuencias que impliquen la presencia de metagrauvascas y metapelitas plegadas flexuralmente.
  - 2) Metamorfismo y plutonismo no necesariamente contemporáneos pero sí relacionados con la evolución tectonotermal de una región.

### 3.3.2 Dónde y por qué: la búsqueda de un escenario potencial

Dada la naturaleza y posición paleo-geográfica del terreno Meguma, una de las primeras regiones que saltan a la vista es la del orógeno hercínico de Iberia (España-Portugal), ya que tanto los terrenos canadienses (p.ej., Avalonia, Meguma) como los ibéricos (Galicia-tras-os-Montes, Zona Centro Ibérica) estuvieron relacionados tectónica y paleo-geográficamente a comienzos del Paleozoico (Martínez Catalán et al., 1997). Sin embargo, un terreno como el Meguma difiere substancialmente en grado metamórfico de los terrenos alóctonos ibéricos del NW (de mucho mayor grado) (Alcock et al., 2005).

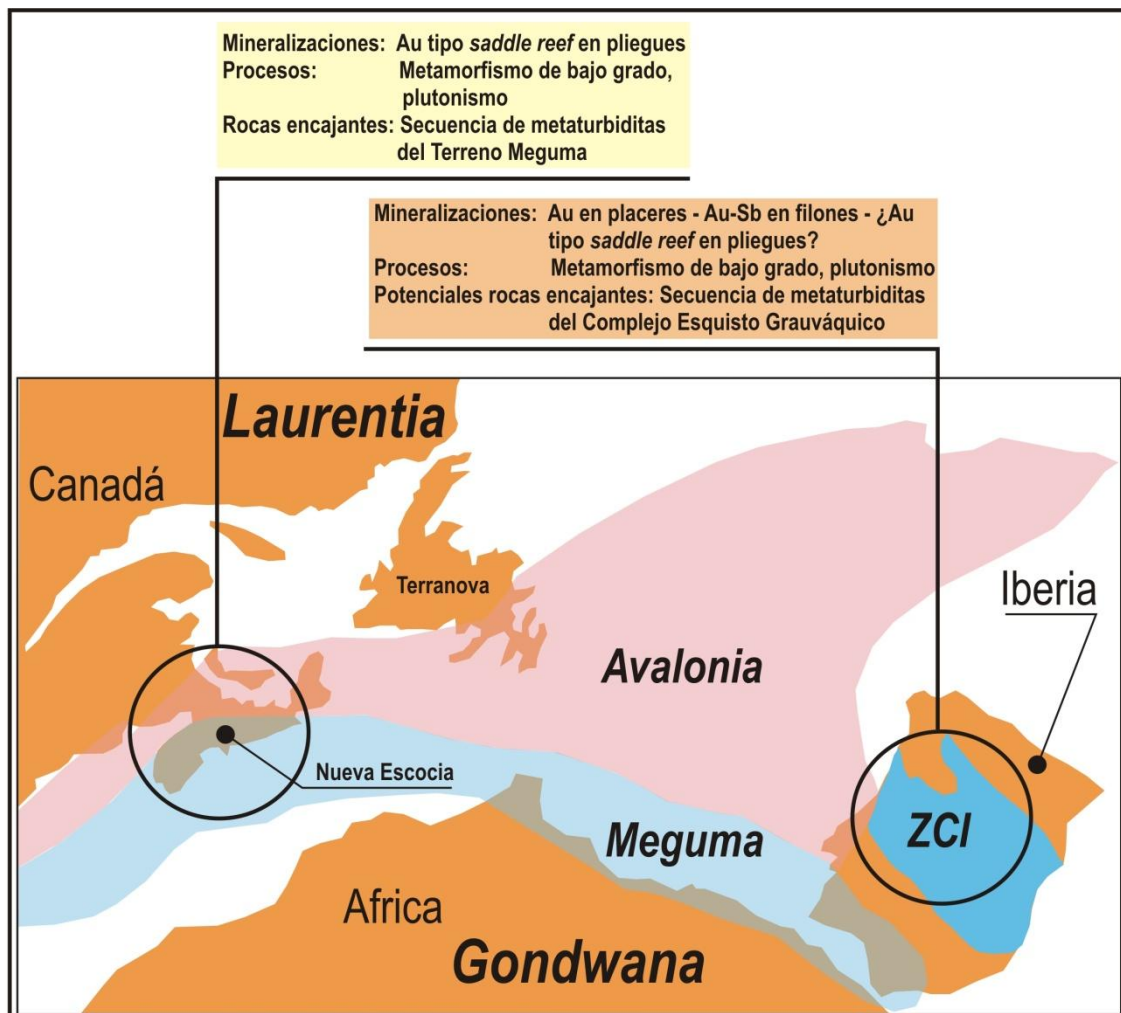
Por otra parte, la Zona Centro Ibérica (ZCI) contiene una unidad cuyas características litológicas y de metamorfismo se parecen mucho a las del terreno Meguma. Nos referimos al Complejo Esquisto Grauváquico (Proterozoico-Cámbrico Inferior). La serie está constituida por una potente serie de varios miles de metros de materiales detríticos parte de los cuales muestran características turbidíticas de tipo *flyschoide*.

Al respecto, aunque el terreno Meguma es de otra edad y no alcanza la posición de la Zona Centro Ibérica (ZCI; autóctono relativo) y debemos considerar los siguientes aspectos:

- Que tanto Meguma como el Complejo Esquisto Grauváquico (CEG) en la ZCI contienen alrededor de 10.000 metros de secuencias turbidíticas muy parecidas (Keppie y Dallmeyer, 1987).



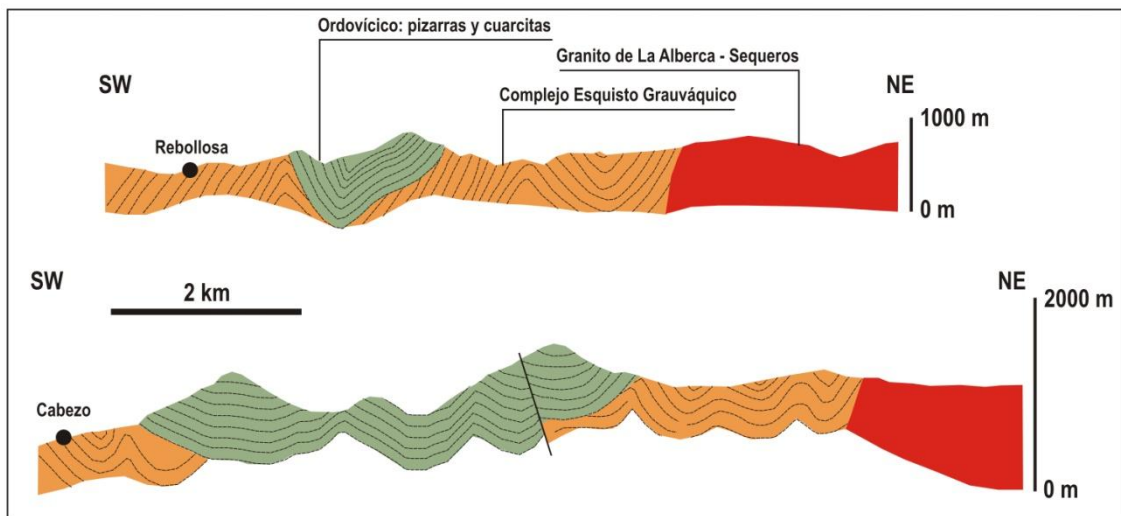
- Que tanto Meguma como el CEG sólo sufrieron metamorfismo de grado bajo.
- Que sus edades no son substancialmente diferentes y podrían ser consideradas como facies diacrónicas: CEG → Neoproterozoico-Cámbrico, Meguma → Cámbrico-Ordovícico (Keppie y Dallmeyer, 1987).
- Que Meguma y el “autóctono” de Iberia (incluyendo el CEG) pueden ser considerados como sistemas de rifts conjugados (Martínez Catalán et al., 1997).
- Y por último pero no por ello menos importante, que mientras en el Meguma de Nueva Escocia existe toda una provincia metalógena aurífera, en el CEG se reconocen (no obstante) una serie de anomalías auríferas, depósitos de oro residual tipo placer (Herrero et al., 1987; Barrios Sánchez et al., 2009), y yacimientos filonianos de Au-Sb (Ortega et al., 1995).



Reconstrucción de Pangea en el entorno de Iberia, mostrando la posición de los principales terrenos tectónicos (Avalonia, Maguma, CIZ) (simplificada de Martínez Catalán et al., 1997), mineralizaciones auríferas y sitios potenciales para el desarrollo de estas.

Si tomamos en cuenta estos cinco puntos tendremos que concluir que bajo un punto de vista geológico, el CEG tiene “al menos” el potencial para albergar mineralizaciones auríferas del tipo *saddle reef* como aquellas del terreno Meguma.

Habiendo valorado los argumentos geológicos (primer paso en cualquiera campaña de exploración) pasaremos a continuación a realizar un análisis de las características estructurales más relevantes del Complejo Esquisto Grauváquico. Lo primero es determinar que ocurrió con el CEG en términos de plegamiento durante los tiempos hercínicos. La figura de abajo nos muestra una configuración con pliegues muy simples de planos verticales, que de alguna forma nos recuerda el estilo de Dufferin.

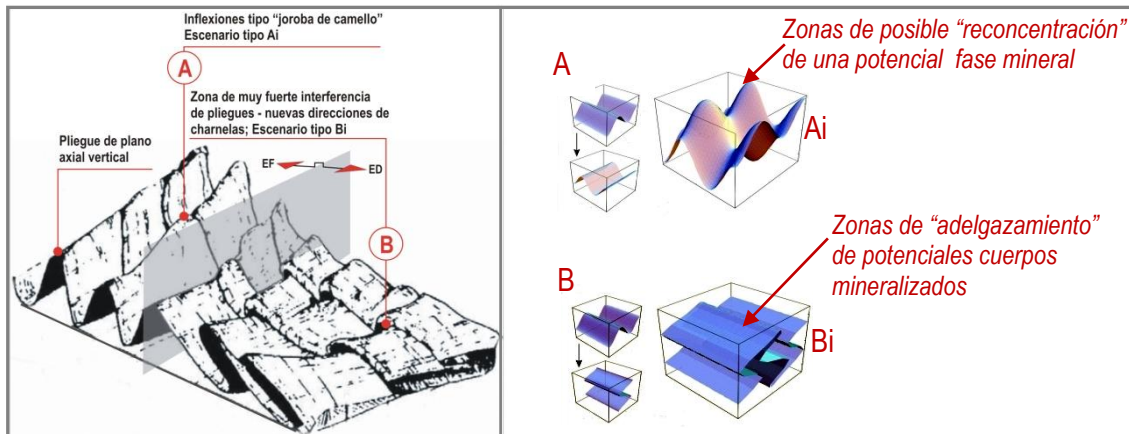


*Plegamiento del Complejo Esquisto Grauváquico y unidades más jóvenes en la Sierra de Francia (Salamanca, España). Simplificada de Macaya (1981).*

Martín-Izard (1986) señala que el CEG sufrió los efectos de tres deformaciones hercínicas ( $D_1$ - $D_3$ ), con desarrollo de diversas formas de plegamiento y fenómenos de interferencia de pliegues. Analicemos brevemente la situación bajo el punto de vista de la interferencia de pliegues, lo descrito por Martín-Izard (1986) en el bloque diagrama de la Figura 5 de su trabajo, y de si efectivamente se hubieran formado *saddle reefs* después de la primera fase de deformación:

- Dicha figura nos muestra la existencia de pliegues cerrados de dirección NW-SE ( $D_1$ ) con planos sub-verticales (ver “A” en la siguiente figura) y sólo ligeramente retocados por las fases posteriores. Sin embargo, la situación cambia en la región de un sector a otro y en algunas zonas los pliegues han sido retocados fuertemente. En este caso se aprecia una curvatura oscilante a lo largo de la charnela estilo “joroba de camello” (ver “Ai” en la siguiente figura). En este caso podemos esperar una “reconcentración” de la mineralización hacia las cúspides de la curvatura de las charnelas.

- Sin embargo la figura también nos muestra situaciones de muy fuerte deformación, donde los pliegues iniciales (B) son volcados y las charnelas malamente preservadas (Bi). En este caso las potenciales mineralizaciones iniciales serían “adelgazadas” pudiendo perder valor económico, como puede pasar con las venas de Au-Qtz en los flancos de los pliegues.



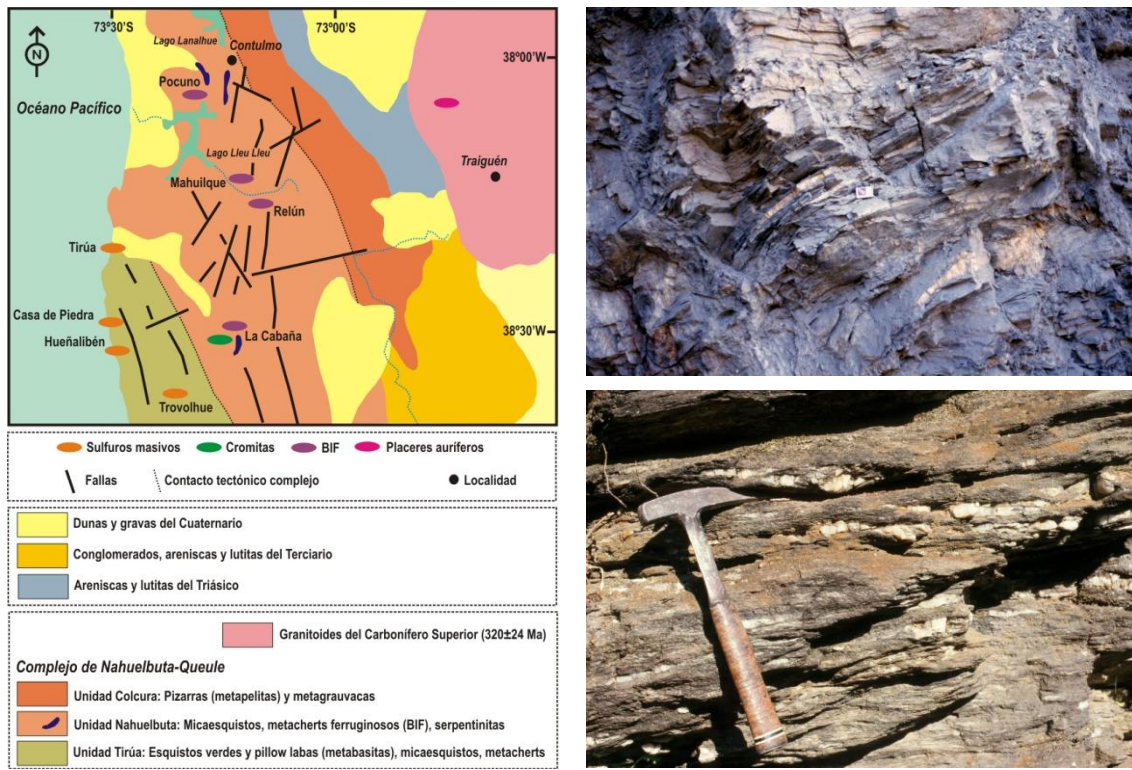
Izquierda, modelo de interferencia de pliegues para el CEG (Oeste de la Provincia de Salamanca, España) (simplificada y modificada de Martín-Izard, 1986). Hemos diferenciado dos zonas que se corresponden a lo que podríamos denominar escenarios Favorables (EF) y desfavorables (ED). El primero (A) comprende pliegues de plano axial vertical y modificaciones oscilantes de la charnela tipo "joroba de camello" donde podría reconcentrarse una mineralización después de una segunda fase de deformación (Ai) (derecha). En el segundo escenario (B) la deformación por interferencia ha sido de gran envergadura, por lo cual es probable que cualquier mineralización que potencialmente pudiera haber estado albergada en las charnelas de los pliegues iniciales habría sido obliterada (Bi) (derecha). Imagen<sup>11</sup>.

### 3.3.3 El sur de Chile: ¿otro escenario potencial?

Chile es conocido como un país tectónicamente ligado a una convergencia entre una placa oceánica (Nazca) y otra continental (Sudamérica), cuyo resultado final es un magmatismo calco-alcalino importante que se manifiesta como vulcanismo e intrusiones masivas. En términos de yacimientos se le conoce como un país de gigantescos pórfidos cupríferos, yacimientos epitermales de oro-plata, y yacimientos de hierro. Si bien esto es correcto para lo que allí se denomina el Ciclo Andino (equivalente temporal al Ciclo Alpino) la geología más antigua muestra una realidad bastante desconocida en el extranjero, y en cierta medida hasta para muchos geólogos chilenos.

Chile centro-sur posee un basamento metamórfico cuya máxima expresión se alcanza al sur de la ciudad de Concepción, allí donde empieza la Cordillera de Nahuelbuta (*cordillera del puma grande*) y continúa a lo largo de la Cordillera del Queule (= árbol que da unos pequeños frutos comestibles; *Gomortega nitida*). Estas cordilleras costeras, en general de baja altitud, se caracterizan

geológicamente por la presencia ubicua de un complejo de acreción paleozoico, denominado Complejo de Nahuelbuta-Queule (Oyarzun, 1986), el que puede ser subdividido de Este a Oeste en tres unidades:



A la izquierda, geología y yacimientos minerales de la Cordillera de Nahuelbuta (Oyarzun, 1986; Oyarzun et al., 1986); a la derecha, arriba, pizarras (metapelitas) de la Unidad Colcura en la localidad de Capitán Pastene; abajo micaesquistos de la Unidad Nahuelbuta (Mahuilque).

- Unidad Colcura (= *Serie Oriental*), con pizarras y metapelitas muy plegadas.
- Unidad Nahuelbuta (= *Serie Occidental*), con micaesquistos, metacherts ferruginosos (BIF), y serpentinitas.
- Unidad Tirúa (= *Serie Occidental*), con esquistos verdes (metabasitas), pillow lavas, y metacherts; en la Cordillera del Queule se reconocen además afloramientos de serpentinitas.

La deformación aumenta de manera notable de Este a Oeste no reconociéndose en los sectores centrales o costeros ningún rasgo textural o estructural que recuerde al protolito de estas rocas (excepción hecha un pequeño afloramiento de pillows basálticas). El metamorfismo varía de alta temperatura en el Este a relativa alta presión en el Oeste, alcanzándose “transiciones” a la facies de los esquistos azules (anfíboles calco-sódicos a sódicos, pero sin jadeíta).

El potencial para mineralizaciones auríferas en estas unidades es interesante y abarca desde mineralizaciones auríferas asociadas a las zona de esquistos verdes y facies BIF (Oyarzun y Helle, 1985) o como hipótesis de exploración aquí

planteada, en las rocas de la Unidad Colcura, una secuencia monótona de metapelitas y metagrauvasas como las que hemos descrito anteriormente para el terreno Meguma o el Complejo Esquisto Grauváquico.

Adicionalmente, en la Cordillera de Nahuelbuta también se reconoce la intrusión de granitoides del Carbonífero Superior, que jugaron algún papel en el metamorfismo de la Unidad Colcura (Oyarzun, 1986). Recordar que en el caso de los yacimientos tipo Meguma, las intrusiones graníticas parecen haber intervenido en la formación de estas mineralizaciones (Sangster y Smith, 2007); recordar también que en el caso del Complejo Esquisto-Grauváquico el oro también parece asociado a intrusiones de esta naturaleza (Ortega et al., 1995).

### 3.4 Resumiendo sobre el tema

#### 3.4.1 Los atributos básicos

Como punto de partida la exploración de yacimientos minerales necesita dos cosas fundamentales:

- Un blanco de exploración bien caracterizado en sus atributos esenciales.
- Ideas geológicas sobre el “dónde” y (sobre todo) el “porqué” buscarlo en una determinada región o zona.

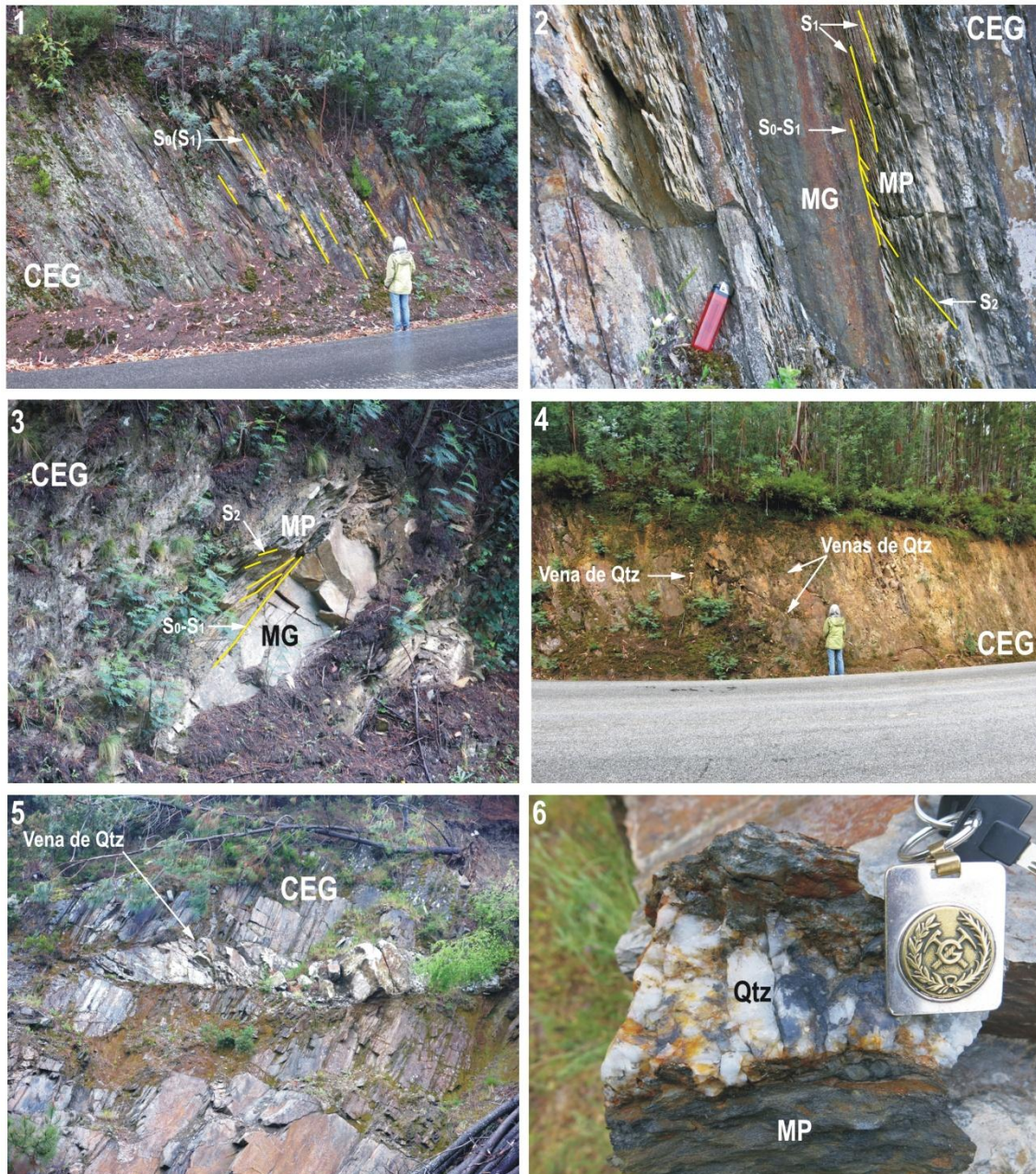
La razón es simple, hay que tener claro el tipo de yacimiento que estamos buscando y por supuesto, debemos saber “cómo” buscarlo. En el ejemplo que acabamos de revisar (que por cierto, dejamos aquí como una “idea” geológica), conocíamos los siguientes hechos:

- El tipo de yacimiento: *saddle reefs* auríferos y filones asociados.
- Sabemos en qué rocas buscarlos: secuencias turbidíticas: rocas con “alta” y “baja” porosidad.
- Y por último sabemos cuál es el ambiente estructural donde buscarlo: pliegues de plano axial vertical con charnelas bien definidas.

Otros atributos importantes son el desarrollo de un metamorfismo de grado bajo que preserve algunos rasgos sedimentarios (el grado alto acabaría con la porosidad) y por último, un plutonismo. El Complejo Esquisto Grauváquico cumple con todos o casi todos los atributos requeridos para albergar mineralizaciones auríferas tipo *saddle reef*, y de hecho existen evidencias, llamémoslas indirectas (placeres y anomalías de oro), que hacen “subir la apuesta” por esta unidad.



El Complejo Esquisto Grauváquico en Logrosán, (Cáceres, España). Izquierda, filón de cuarzo tipo grieta de tensión en las pizarras; a la derecha, detalle de la anterior.



Aspecto del Complejo Esquisto Grauwáquico (CEG) en la Sierra de Caramulo (Portugal). 1: Aspecto de los afloramientos, con la foliación principal ( $S_0$  y/o  $S_1$ ) a gran ángulo. 2 y 3: Relaciones entre las metagrauvascas (MG) y metapelitas (pizarras) (MP), mostrando las relaciones oblicuas entre las foliaciones. 4: Venas de cuarzo (Qtz) oblicuas a la foliación principal. 5: Gran vena sigmoidal de cuarzo que podría representar una mega grieta de tensión. 6. Filón de cuarzo paralelo a la foliación.

### 3.4.2 Olympic Dam (o “Alien el 8º Pasajero”): expect the unexpected

Hasta aquí todo parece razonable o más que razonable, pasa que es de “exploración” de lo que estamos hablando y como dice una frase de Lowell (1987):

“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 equivocarse la mayor parte del tiempo.”

Al respecto debemos aquí contar una pequeña historia que nos muestra que junto con los conocimientos y determinación, debemos siempre estar preparados para esperar lo inesperado (como dice la expresión en inglés: *expect the unexpected*).



*Aprender a “esperar lo inesperado” ... Imagen<sup>12</sup>.*

En los años 1950's se desarrolló una auténtica revolución en el pensamiento geológico en Australia con respecto a el origen de los yacimientos metalíferos del Precámbrico. Hasta entonces estos yacimientos habían sido considerados como hidrotermales s.s., esto es, generados por soluciones calientes ascendentes provenientes de un magma granítico. Pero de pronto, empezaron a aparecer rasgos geológicos que apuntaban a que estas mineralizaciones podían ser de origen sedimentario, por ejemplo, el caso de Broken Hill.

Este pensamiento se vio reforzado por los estudios que habían realizado los geólogos ingleses en el Copper Belt de Zambia (en esa época: Rodesia del Norte). De acuerdo a las ideas prevalecientes, esos yacimientos de cobre (p.ej., Mufulira, Rokana, N'kola, y muchos otros) se habían generado por procesos sedimentarios. Sumemos a esto que se suponía (y supone), que el cobre se había derivado del basamento Arqueozoico de la secuencia Proterozoica que alberga las mineralizaciones estratiformes.

De esta manera, con sentido común, los geólogos australianos hicieron un rápido ejercicio mental percatándose de que en principio también ellos disponían de un basamento antiguo y una cubierta Proterozoica-Cámbrica, de tal manera, que ¿por qué no podía haber en Australia yacimientos de cobre equivalentes a los del Copper Belt?



En Australia del Sur estaban las rocas antiguas del cratón Gawler, y encima de éstas, en discordancia, las facies sedimentarias del Stuart Shelf. Reforzando aún más este pensamiento estaba la presencia de un pequeño yacimiento estratiforme de cobre emplazado en las facies del Stuart Shelf: Mount Gunson.

Los geólogos de la Western Mining decidieron donde sondear utilizando datos indirectos, tales como intersecciones de lineamientos gravimétricos y magnéticos de carácter regional-continental. 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.

Los geólogos de la Western Mining rápidamente se dieron cuenta de que había dos cosas que no encajaban con el modelo de cobre estratiforme en la cobertera del Proterozoico:

- La zona mineralizada estaba en el basamento, no por encima de éste.
- La roca encajante de la mineralización eran brechas graníticas hematíticas, no sedimentos.
- De hecho se trataba de un yacimiento principalmente hidrotermal formado hace unos 1600 Ma, asociado a diatremas que se formaron en relación con un vulcanismo félsico.

... Upton says many people know **Olympic Dam** was an unusual discovery because there were no outcropping rocks to guide Western Mining's geologists to the area.

"But there's so much more to the story. For example, Western Mining was very short of funds when it made the discovery. In fact, the company's first exploration base in Adelaide was the garage of a home at Flagstaff Hill."

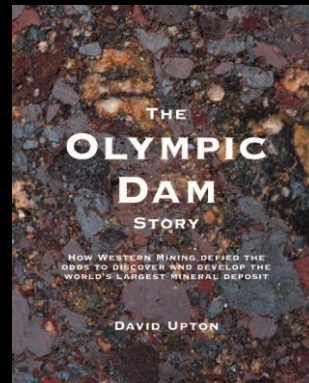
He also writes that Western Mining's leaders were aghast when they realised Olympic Dam contained uranium.

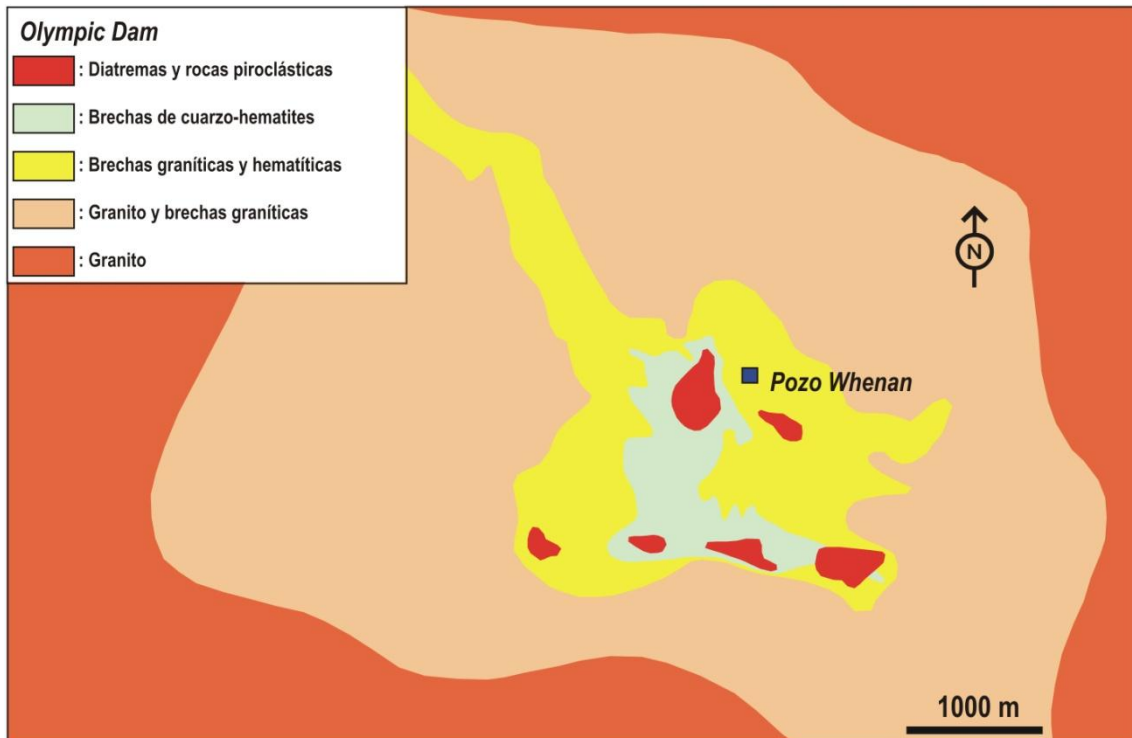
"The company had searched desperately for copper for almost 20 years, and the last thing they wanted was a copper deposit with all the additional costs and problems of uranium, especially the political problems."

He says research he conducted reveals Olympic Dam today is the world's largest mineral deposit, with an in-ground value of minerals approaching \$1 trillion dollars.

"Australia is incredibly lucky to have Olympic Dam. The discovery was the result of a brilliant combination of science, teamwork, courage and luck. Thirty five years later, there still has not been a discovery to rival it anywhere in the world."

*The Olympic Dam Story* (2013)





Geología (profunda) de Olympic Dam. Adaptada de Haynes et al. (1995). Pozo: shaft, pique.

En resumidas cuentas, el yacimiento que encontró la Western Mining no tenía “nada que ver” con el modelo inicial. Peor aún, no tenía que ver con nada que se conociera hasta entonces. Fue como ir a buscar elefantes (a tierra de elefantes) y encontrarse con “Alien el 8º Pasajero”.



El hallazgo de Olympic Dam fue como ir a buscar elefantes “a tierra de elefantes” (ver cuadro de texto) y dar con Alien el 8º Pasajero (imágenes<sup>13,14</sup>).

Olympic Dam acabó por fin siendo un yacimiento de Cu, Au, Fe y U (más raro imposible en aquellos años), y acabaría con los años dando lugar a un término algo “descafeinado” comparado con el hallazgo inicial: los IOCGs (Iron Ore Copper Gold).

*There's a saying in mining, especially when you're looking for big volume bodies, that if you're looking for elephants you have to go to elephant land.*

Bloomberg (2013)

Como comentaremos en el siguiente capítulo, ha habido una auténtica “burbuja inflacionaria” con el término IOCG, que hoy en día

guarda, en muchos casos, poca y ninguna relación con las características de Olympic Dam.

Conocimientos, entendimiento, sentido común, pero sobre todo persistencia y una gran capacidad como para aceptar que por buenas razones que tengamos, la geología (casi siempre) nos depara sorpresas, y al respecto una pequeña historia.

Era tal la “fe” en el modelo de exploración inicial, que las primeras brechas que fueron detectadas por sondeos en Olympic Dam fueron interpretadas como depósitos sedimentarios y volcánicos, dando lugar a la definición de dos formaciones: la *Greenfield Formation* y la *Olympic Dam Formation*. Esto debería hacernos reflexionar. Las ideas cuando son buenas (aunque sean equivocadas) son muy poderosas en la mente. Digamos que se niegan a morir.

El riesgo en geología es inmenso, y aunque en el caso de Olympic Dam en el fondo daba lo mismo (el yacimiento se habría explotado igual) y por lo tanto la historia acabó felizmente, en otras ocasiones el obcecarse con una idea puede ser muy peligroso, especialmente si la idea “es buena” y viene de alguien “con mucha experiencia”.

El problema en exploración no consiste tanto en equivocarse sino en mantenerse en el error, retorciendo los datos tanto como para que aunque no calcen con la realidad, se siga sosteniendo la buena pero equivocada idea inicial. Nadie debería juzgar mal a un geólogo por equivocarse, pero sí por persistir en un error cuando la evidencia apunta abrumadoramente en otra dirección.

En cualquier caso, ojalá todos los errores conceptuales fueran como el que dio origen a la campaña de exploración y hallazgo de Olympic Dam,

**Contrario a lo que dice el tango, 10 años son mucho, al menos en geología ...**

... The Proterozoic sediments comprising the local basement sequence are predominantly **sedimentary breccias** ranging from matrix-poor granite breccias to matrix-rich polymict breccias containing clasts of a variety of rock types. This sequence is over 1 km thick and has been divided into two main units: the Olympic Dam Formation and the Greenfield Formation ...

Roberts and Hudson (1983)

... The Olympic Dam Breccia Complex comprises a **large body of fractured, brecciated, and hydrothermally altered granite**, a great variety of hematite-bearing breccias, and minor tuffs and sediments. The orebody is predominantly hosted by the hematite-bearing breccias. The breccias and sediments display fabrics and textures indicating that they were formed in a high-level subvolcanic environment characterized by phreatic and phreatomagmatic activity.

Haynes et al. (1995)

### 3.5 Cuando el plegamiento es posterior a la mineralización

#### 3.5.1 La vieja historia del “sin-“ y el “epi-“ genetismo (or who cares)

Resulta tentador decir sin más que aquellos yacimientos que se formaron con posterioridad al plegamiento de rocas sedimentarias (acompañadas o no de volcánicas) son “epigenéticos” y que aquellos que se formaron más o menos contemporáneamente con dichas rocas son “singenéticos”. Sin embargo, estos son términos cargados de “veneno” en geología, y en muchos sentidos casi sería mejor desterrarlos definitivamente.

Para empezar, aún asumiendo que la mineralización fue (más o menos) contemporánea con la formación de las rocas que la albergan, los cambios que puedan haber ocurrido con posterioridad pueden ser tantos y tan importantes que suscitan en ocasiones la pregunta ¿cuánto queda de los rasgos originales de la mineralización? En cierta medida esto recuerda a esos programas de la televisión americana (p.ej., *Overhaulin’* en el *Discovery Channel*) en que un grupo de expertos en diseño, mecánica, chapa y pintura cogen un coche que debería haber ido al desguace hace décadas y lo dejan como nuevo, todo esto para gran sorpresa del dueño de ese coche. Normal que se sorprenda, porque entre lo que había y lo que le entregan hay (muy) pocas cosas en común (muchas veces ni tan siquiera el motor...).

Supongamos por un momento que unos sulfuros son depositados en un fondo marino con sedimentación activa y vulcanismo contemporáneo. Hasta ahí hablar de singenetismo sería (en principio) correcto ¿pero qué pasa si con posterioridad la secuencia es plegada y metamorfizada? ¿Podemos acaso pensar (seriamente) que nada ha pasado con los sulfuros o que los rasgos iniciales se han preservado “impolutos” cual milagro de la naturaleza? Difícil de creer.

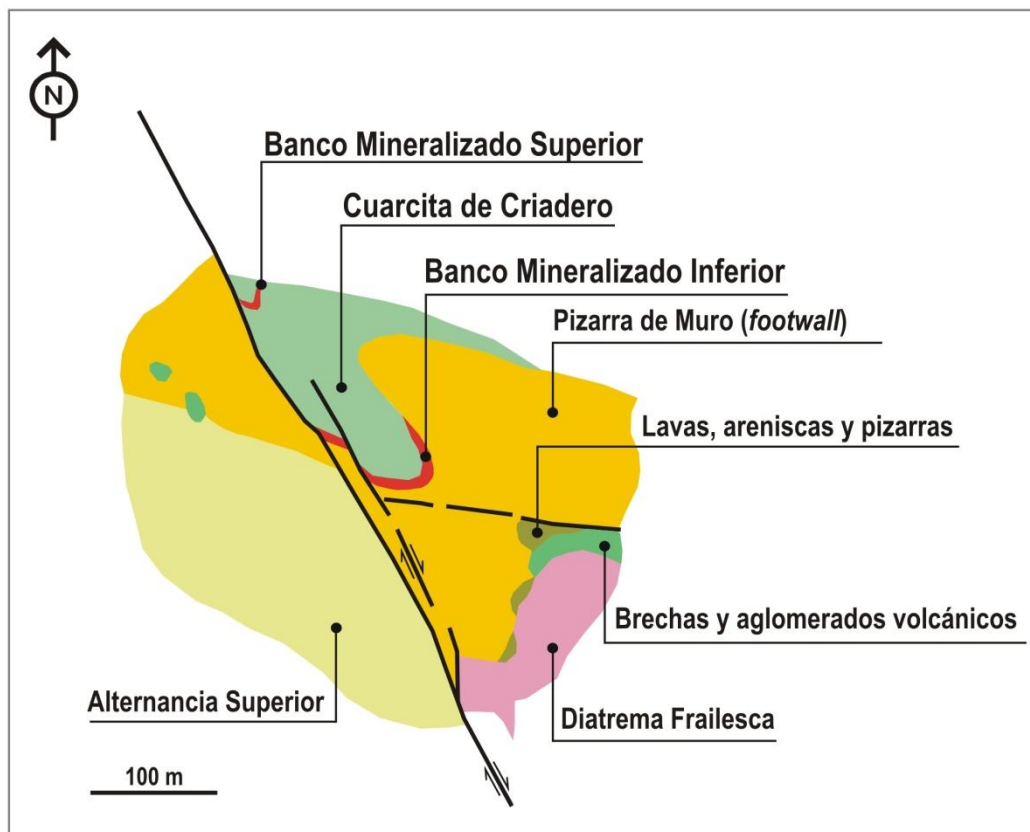
Dice un buen amigo nuestro que: *después de un severo y duro interrogatorio, los datos geoquímicos confesarán lo que haga falta (y quiera el investigador)*. Como corolario a esta frase, y aunque no queremos darle el carácter de axioma, digamos que: *la fortaleza de una modelización geoquímica disminuye a medida que aumenta su grado de sofisticación y complejidad*. La paradoja radica en que a más sofisticación y complejidad más “impresionada” puede quedar la gente: *el ser humano reacciona así en ocasiones ante lo que no entiende* (la misa en Latín impresionaba más que la actual) ¿Pero qué pasa si una modelización sofisticada no se entiende simplemente porque está mal planteada?

Sin entrar en más consideraciones sobre este tema (que aún así conviene aclarar) nos gustaría aquí introducir someramente dos casos interesantes de plegamiento hercínico sobre secuencias volcánicas y sedimentarias.

### 3.5.2 Plegando capas sulfuradas

Ejemplos de plegamiento “posterior” a los procesos de mineralización los hay muchos y de diferentes tipos, sin embargo hemos querido seleccionar aquí dos casos españoles por pertenecer a distritos mineros mundialmente conocidos (Almadén y Rio Tinto).

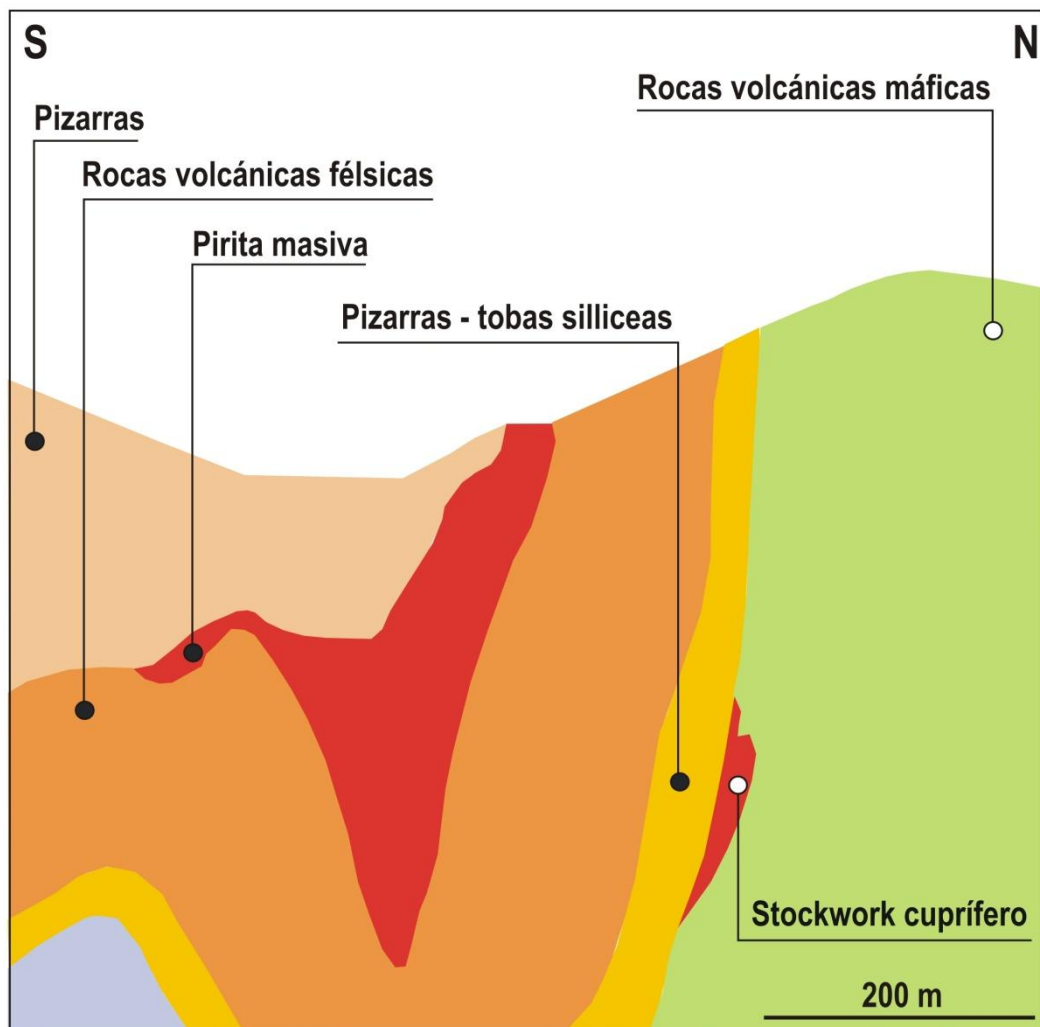
- El Entredicho (Distrito de Almadén) (Palero y Lorenzo, 2009): El Entredicho, al igual que el emblemático yacimiento de Almadén, encaja en la llamada Cuarcita de Criadero (Silúrico Inferior). El yacimiento comenzó a explotarse en 1979 y cerró (una vez agotadas las reservas) en 1997. El tamaño final de la explotación a cielo abierto cuando cerró la mina era de 450 x 350 x 70 m. Su estratigrafía es similar a la de Almadén, con las llamadas Pizarras de Muro en la base (*footwall*), la Cuarcita de Criadero (que porta la mineralización de cinabrio), la Alternancia Superior con pizarras (*hangingwall*), la diatrema Fraileasca y dos sistemas de diques máficos.



*El Entredicho (simplificada de Palero y Lorenzo, 2009). Quizás el rasgo más notable de este mapa geológico lo constituya la singular disposición de los bancos mineralizados inferior y superior, los cuales aparecen en las charnelas de la estructura sinclinal compleja de la figura.*

- Las Minas de Rio Tinto (Tornos et al., 2009): se trata de uno de los distritos mineros más famosos en el mundo por el tamaño de la mineralización y por

su intensa historia, habiéndose trabajado de manera discontinua durante aproximadamente 5000 años por tartesios, fenicios, romanos, árabes, ingleses y españoles. El elevado interés geológico de este distrito minero de sulfuros masivos se debe a que es probable que se trate de la mayor anomalía de azufre en la corteza de la Tierra, con tonelajes originales de alrededor de los 2500 millones de toneladas de roca mineralizada. Una quinta parte correspondía a sulfuros masivos con un contenido medio de 45% S, 40% Fe, 0,9% Cu, 2,1% Zn, 0.8% Pb, 0,5 g/t Au, y 26 g/t Ag. El distrito encaja en rocas del Carbonífero Inferior fuertemente plegadas durante la orogenia hercínica (*thin skin tectonics: TST*) bajo condiciones de metamorfismo bajo. La secuencia estratigráfica está caracterizada por la presencia del llamado Complejo Volcanosedimentario (hasta 1300 m de pizarras, dacitas, riolitas, basaltos, areniscas, en un contexto volcánico bimodal).

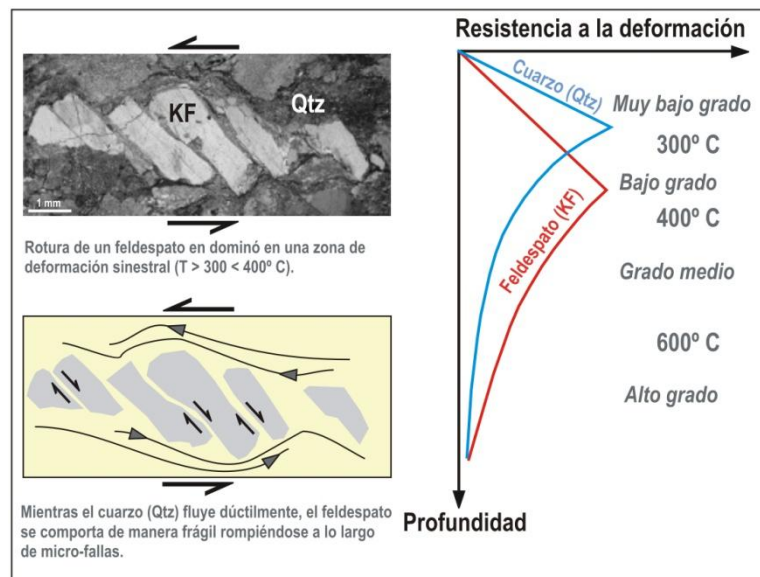


Sección geológica N-S en Corta Atalaya (Río Tinto) (simplificada de EMED Mining Public Limited, 2010). La mineralización de pirita masiva aparece principalmente en la charnela de la forma sinclinal. Otro rasgo significativo es el fuerte plegamiento de las rocas volcánicas (volveremos sobre este tema).

### 3.5.3 Plegando capas sulfuradas y “retocando” los materiales iniciales

Los minerales sulfurados y las rocas volcánicas no parecen en principio candidatos “ideales” para la deformación plástica. Si bien las rocas volcánicas máficas (p.ej., basaltos) o intermedias (p.ej., andesitas) responden mal a la deformación por plegamiento, resolviéndose tal deformación como una rotura (esto es, por fallamiento), en algunos casos no ocurre así como en las riolitas. Efectivamente, estas rocas volcánicas saturadas en sílice se caracterizan por tener un módulo elástico sensiblemente menor que otras rocas como basaltos o andesitas, es decir, se requiere un esfuerzo menor para deformarlas.

La mejor respuesta de las riolitas a la deformación plástica y plegamiento hay que buscarla en su composición mineralógica y su frecuente textura porfírica (grandes cristales de cuarzo y feldespato en una matriz de grano fino o vítrea), lo que favorece los procesos deformativos intracristalinos y de reajuste de granos en la matriz. Más aún, tal comportamiento plástico se verá facilitado o acrecentado si hay condiciones de temperatura no necesariamente altas. En este sentido, a partir de 300°-350°C, temperaturas propias de metamorfismo de grado bajo, el cuarzo y el feldespato pasan a tener un comportamiento dúctil (Passchier y Trouw, 2005). Lo mismo señala Sibson (1977), que indica una temperatura de 300°C para la transición frágil/dúctil en una corteza cuarzo-feldespática. Esta es una temperatura baja que marca el límite inferior de la facies de esquistos verdes en el metamorfismo regional.



*Comportamiento reológico del cuarzo (Qtz) y feldespato (KF) en función de sus resistencias a la deformación y temperaturas en profundidad (gráfico: Passchier y Trouw, 2005). Al comienzo de la deformación, cuando las temperaturas aún no son muy altas (alrededor de 300° C), el cuarzo empieza a comportarse dúctilmente y a fluir. Hacia los 400° C también lo hará el feldespato. De ahí que las rocas cuarzo-feldespáticas (p.ej., una riolita) se plieguen con facilidad aún a temperaturas relativamente bajas durante la deformación y el metamorfismo acompañante.*

En lo que se refiere a los sulfuros, evidencias texturales del yacimiento de sulfuros masivos de Renström (Suecia) (Duckworth y Rickard, 1993) sugieren que la pirita puede dar lugar a fenómenos importantes de deformación plástica, mientras que otros sulfuros como la galena, pirrotina, o calcopirita, se rompen y recrystalizan. Brown y McClay (1993) en su estudio del yacimiento de sulfuros masivos de Vangorda (Yukón, Canadá) llaman la atención también sobre el papel de los fluidos en zonas de alta deformación, llegando a sugerir que una fase fluida actuando a lo largo de los flancos de un pliegue puede reducir significativamente el esfuerzo requerido para inducir la deformación plástica de la pirita. Estos autores concluyen su trabajo indicando que se puede esperar que la deformación de la pirita en yacimientos tales como Vangorda no sólo haya cambiado profundamente las características texturales de la mena sino que también haya podido afectar las características químicas e isotópicas de la misma.



*Sulfuros y plegamiento, mina Pyhäsalmi (Suecia); minerales principales: pirita, pirrotina, esfalerita, y calcopirita. A la izquierda, contacto entre la mena profunda y la roca encajante milonitizada; a la derecha, pliegue en la mena profunda. Geological Survey of Finland (2011).*

Si observamos las figuras anteriores sobre El Entredicho y Corta Atalaya (Río Tinto) veremos que las mineralizaciones de cinabrio y pirita sufrieron un severo movimiento de acomodo hacia las regiones de las charnelas de los pliegues que las albergan. En el caso de Corta Atalaya (Río Tinto) la deformación hercínica afectó también severamente a las unidades volcánicas. En este sentido, cabe preguntarse si lo que hoy observamos química e isotópicamente en estos yacimientos sea lo mismo que había cuando los sulfuros se depositaron en condiciones submarinas (como un sedimento más). Dado que el flujo de sulfuros desde los flancos a las charnelas tiene que haber implicado, de alguna manera, la presencia activa de fluidos (Brown y McClay, 1993) y una cierta temperatura que permitiera el plegamiento de las rocas volcánicas (Sibson, 1977; Duckworth y Rickard, 1993; Passchier y Trouw, 2005), resulta más que posible que efectivamente, los cambios no hayan sido meramente “decorativos” (paso de sulfuros a las charnelas) sino que más profundos a escala de las composiciones química e isotópica de los mismos.



En este sentido, como explican Marignac et al. (2003) para el yacimiento de Tharsis (Faja Pirítica Ibérica), las condiciones máximas de metamorfismo estuvieron en 300 MPa y 300° C, aunque en el paso de un régimen principalmente litostático a otro hidrostático (a una profundidad de unos 4 km), los fluidos circulantes alcanzaron temperaturas de hasta 430° C. Los mismos autores indican que hubo removilización de metales por los fluidos metamórficos hercínicos en la Faja Pirítica. Esto, sumado a la movilización mecánica de la mineralización hacia charnelas de pliegues nos indica que (como mínimo) estos yacimientos fueron “retocados” durante la deformación y metamorfismo hercínicos.

Entonces, son los yacimientos de la Faja Pirítica ¿singenéticos? ¿epigenéticos? ¿singenéticos pero con “retoques” más o menos severos? Lo dejamos en mano de quienes deseen profundizar en estos temas.

Finalmente, más allá de estas discusiones, en lo que a los aspectos prácticos se refiere, recordar la siguiente regla: *La parte “económicamente” interesante de un pliegue suele estar en la charnela, sea este un pliegue anticlinal o sinclinal.* Es hacia ahí donde la carga mineral migrará desde los flancos de un pliegue.

## Bibliografía

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

- Alcock, J., Arenas, R. y Martínez Catalán, J.R., 2005. Shear stress in subducting continental margin from high-pressure, moderate-temperature metamorphism in the Ordenes Complex, Galicia, NW Spain. *Tectonophysics*, 397, 181-194.
- Barrios Sánchez, S., Florido Laraña, P. y Reguilón Dragado, R.M., 2009. Estudio Preliminar del oro residual sobre el Complejo Esquisto Grauváquico en el entorno del Embalse de Borbollón (Santibáñez el Alto, Cáceres). *Macla*, 11, 37-38.
- Bierlein, F.P., Christie, A.B. y Smith, P.K., 2004. A comparison of orogenic gold mineralisation in central Victoria (AUS), western South Island (NZ) and Nova Scotia (CAN): implications for variations in the endowment of Palaeozoic metamorphic terrains. *Ore Geology Reviews*, 25, 125-168.
- Bloomberg, 2013. Sweden's LKAB doubles spending to find 'elephant' iron mine. <http://www.bloomberg.com/news/2013-05-22/sweden-s-lkab-doubles-spending-to-find-elephant-iron-mine.html>
- Brown, D. y McClay, K.R., 1993. Deformation textures in pyrite from the Vangorda Pb-Zn-Ag deposit, Yukon, Canada. *Mineralogical Magazine*, 57, 55-66.
- Davis, G.H. y Reynolds, S.J., 1996. *Structural Geology of Rocks and Regions*, John Wiley & Sons, NY, 776 pp.
- Donath, F.A. y Parker, R.B., 1964. Folds and folding. *Geological Society of America Bulletin*, 75, 45-62.
- Duckworth, R.A. y Rickard, D., 1993. Sulphide mylonites from the Renström VMS deposit, Northern Sweden. *Mineralogical Magazine*, 57, 83-91.
- EMED Mining Public Limited, 2010. Reopening the Rio Tinto Copper Mine, Huelva Province, Spain. NI43-101 Technical Report, EMED.
- Evans, M.A. y Fischer, M.P., 2012. On the distribution of fluids in folds: A review of controlling factors and processes. *Journal of Structural Geology*, 44, 2-24.
- Fleuty, M.J., 1987. Folds and Folding. En: *Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Berlin, 249-271.
- Geological Survey of Finland, 2011. Pyhäsalmi - ZINC Database. <http://en.gtk.fi/information/services/commodities/Zinc/pyhasalmi.html>
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G. y Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Review*, 13, 7-27.
- Haynes, D.W., Cross, K.C., Bills, R.T. y Reed, M.H., 1995. Olympic Dam ore genesis: A fluid-mixing model. *Economic Geology*, 90, 281-307.
- Herrero, F., García Sánchez, A., Gonzalo, F. y Gracias, Q., 1987. Prospección de oro en una zona del Complejo Esquistograuváquico, Guijuelo (Salamanca). *Cuaderno do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 11, 339-348.
- Keppie, J. D. y Dallmeyer, R. D., 1987. Dating transcurrent terrane accretion: An example from the Meguma and Avalon composite terranes in the northern Appalachians. *Tectonics*, 6, 831-847.
- Kontak, D.J., Horne, R.J. y Smith, P.K., 2001. Meguma gold deposits, Nova Scotia: overview of past work with implications for future work. *The Gangue*, 71, 1-9.
- Lowell, J.D., 1987. Exploración geológico-minera: aspectos prácticos. Universidad de Chile, Santiago.
- Macaya, J., 1981. Estudio geológico estructural de la Sierra de Francia (Provincia de Salamanca y Cáceres). *Cuadernos de Geología Ibérica*, 7, 567-576.
- Marignac, Ch, Diagona, B., Cathelineau, M., Boiron, M.Ch., Banks, D., Fourcade, S. y Vallenge, J., 2003. Remobilisation of base metals and gold by Variscan metamorphic fluids in the south Iberian pyrite belt: evidence from the Tharsis VMS deposit. *Chemical Geology*, 194, 143-165.
- Martín-Izard, A., 1986. Caracteres tectónicos de los metasedimentos del oeste de la provincia de Salamanca. *Estudios Geológicos*, 42, 415-432.
- Martínez Catalán, J.R., Arenas, R., Díaz García, F. y Abati, J., 1997. Variscan accretionary complex of northwest Iberia: Terrane correlation and succession of tectonothermal events. *Geology*, 25, 1103-1106.
- Mpodozis, C. y Allmendinger, R. W., 1992. Extensión cretácica a gran escala en el Norte de Chile (Puquios-Sierra Fraga, 27°S): significado para la evolución tectónica de los Andes. *Revista Geológica de Chile*, 19, 167-197.
- Mpodozis, C. y Allmendinger, R.W., 1993. Extensional tectonics, Cretaceous Andes, northern Chile (27°S). *Geological Society of America Bulletin*, 105, 1462-1477.
- Ortega, L., Oyarzun, R. y Gallego, M., 1995. Metasediment-hosted epithermal Sb-(Au) mineralization in Central Spain - Role of hidden Hercynian Granitoids. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Sect. B: Appl. earth sci.)*, 104, 80-86.
- Oyarzun, R. y Helle, S., 1985. Una posible guía de prospección aurífera en rocas del Basamento Metamórfico de Chile Central Sur. *Revista Minerale*, 39, 19-25.

- Oyarzun, R., 1986. El Complejo de Nahuelbuta-Queule: Un posible caso de acreción paleozoica en Chile central sur. *Estudios Geológicos*, 42, 11-22.
- Oyarzun, R., Clemmey, H. y Collao, S., 1986. Geologic and metallogenic aspects concerning the Nahuelbuta Mountains banded iron formation, Chile. *Mineralium Deposita*, 21: 244-250.
- Palero, F. y Lorenzo, S., 2009. Mercury mineralization in the region of Almadén. En: García-Cortés, A., Agueda-Villar, J., Palacio Suárez-Valgrande, J., Salvador González, C.I., Eds., *Spanish Geological Frameworks and Geosites: An Approach to Spanish Geological Heritage of International Relevance*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 65-72.
- Passchier, C.W. y Trouw, R.A.J., 2005. *Microtectonics*. Springer. Berlin, 366 pp.
- Roberts, D.E. y Hudson, G.R.T., 1983. The Olympic Dam copper-uranium-gold deposit, Boxby Downs, South Australia. *Economic Geology*, 78, 799-822.
- Sangster, A.L. y Smith, P.K., 2007. Metallogenic summary of the Meguma gold deposits, Nova Scotia. En: 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 no. 5, 723-732.
- Sibson, R.H., 1977. Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society London*, 116, 301-309.
- Sibson, R.H., 2005. Hinge-parallel fluid flow in fold-thrust belts: how widespread? *Proceedings of the Geologists's Association*, 116, 301-309. *Lithos*, 120, 327-346.
- Song, Sh., Niu, Y. y Wei, Ch., 2010. Metamorphism, anatexis, zircon ages and tectonic evolution of the Gongshan block in the northern Indochina continent—An eastern extension of the Lhasa Block.
- Strikepoint Gold Inc., 2010. Drilling doubles Dufferin Mine gold zone from 700 m to 1.4 km along strike, second drill program underway. Strikepoint Gold Inc., Press Releases, October 25, 2010, <http://www.strikepointgold.com/s/QwikReport.asp?IsPopup=Y&printVersion=now&X1=424771,413263,402849,402844,400342>
- The Olympic Dam Story, 2013. The surprising story of Olympic Dam told for the first time. <http://www.theolympicdamstory.com/Media-releases.php>
- Tornos, F., López Pamo, E. y Sánchez España, F.J., 2009. The Iberian Pyrite Belt. En: García-Cortés, A., Agueda-Villar, J., Palacio Suárez-Valgrande, J., Salvador González, C.I., Eds., *Spanish Geological Frameworks and Geosites: An Approach to Spanish Geological Heritage of International Relevance*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 57-64.
- Wilson, G., 1982. *Introduction to Small-scale Geological Structures*. George Allen & Unwin, London, 128 pp.



## 4.1 Cuando las rocas se rompen o simplemente fluyen en las profundidades

### 4.1.1 Antecedentes generales

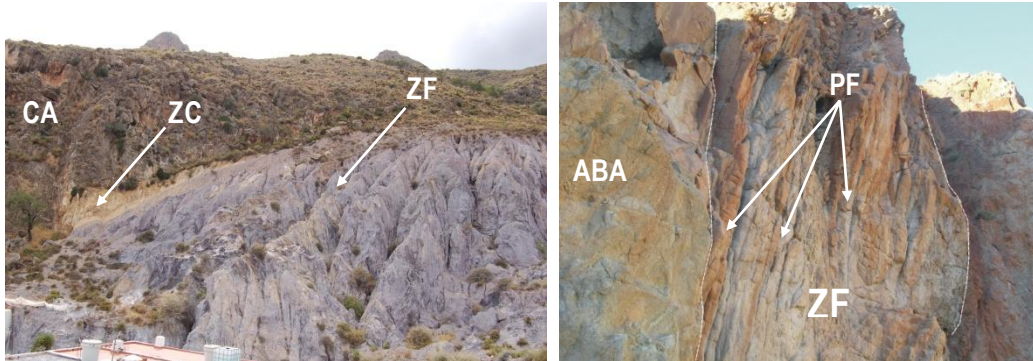
Existen tres conceptos relacionados entre sí: falla, zona de falla y zona de cizalla (McClay, 1987; Davis y Reynolds, 1996; entre muchos), que en ocasiones son utilizados de manera poco rigurosa:

- **Falla:** se trata de una fractura frágil en una roca, a lo largo de la cual se ha producido un desplazamiento visible paralelo a la superficie de la fractura. Si no existe tal desplazamiento a lo largo del plano de rotura, entonces hablamos de una “diaclasa”.



*Falla normal desplazando elementos en una ignimbrita del Mioceno. Cabo de Gata (Almería, España).*

- **Zona de Falla:** Se trata de una estructura frágil compuesta por innumerables planos de falla, sub-paralelos o marcadamente oblicuos entre sí, interconectados, y estrechamente espaciados. En algunos sectores la zona de falla puede contener zonas de brecha o harina de falla (*fault gouge*) que obviamente no permitirán observar los planos interconectados antes mencionados. El color de la roca afectada cambia sensiblemente y se pueden formar bandas (paralelas al fallamiento) de colores variados (rojos, violetas, amarillos, verdes, etc.)



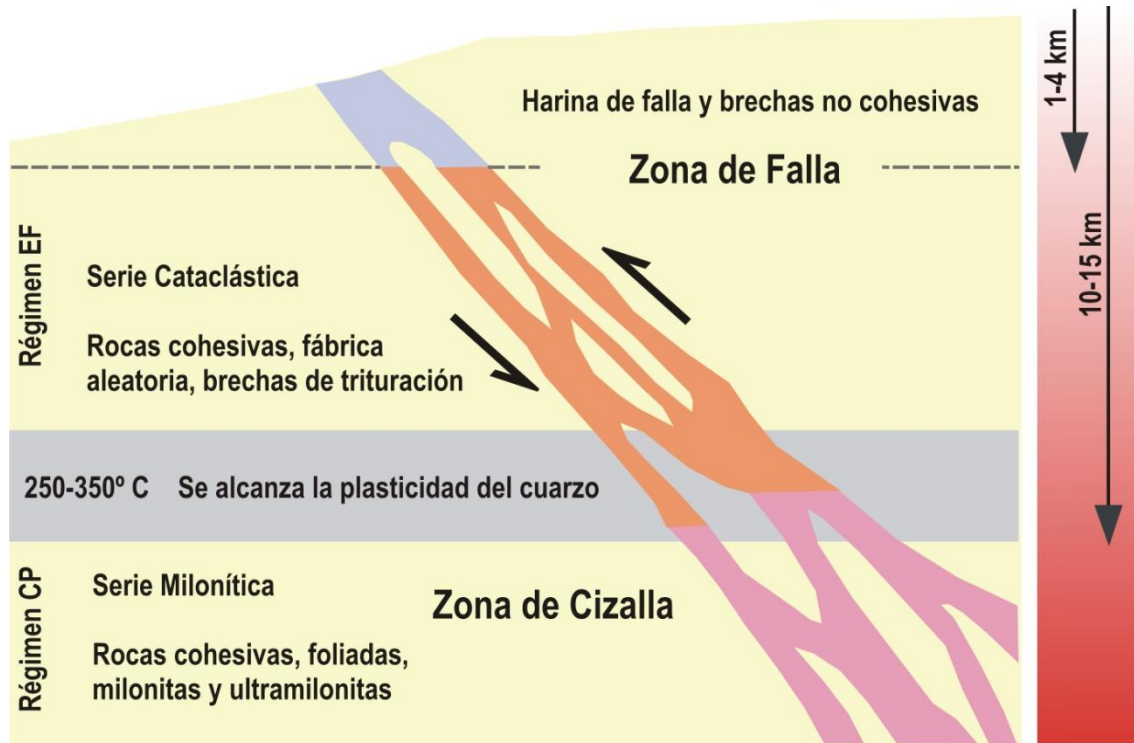
Izquierda, zona de falla (color violeta) (ZF) cortando el Complejo Alpujarrides (CA) en la localidad de Huebro (Almería, España). Esta zona de falla está compuesta por brechas y harina de falla. La zona de contacto (ZC) está representada por el color amarillo. Derecha, las menores tasas de trituración de la roca permiten ver los planos discretos de falla (PF) paralelos entre sí; zona de falla afectando a aglomerados y brechas andesíticas (ABA) en San José (Almería, España).

- **Zona de Cizalla:** Se trata normalmente de una ancha banda de deformación generada bajo condiciones dúctiles, lo que para rocas cuarzo-feldespáticas significa temperaturas mínimas de 300-400° C. Las condiciones de ductilidad, para un gradiente geotérmico normal, empiezan a unos 10-15 km de profundidad. A estas profundidades se encuentra la transición dúctil-frágil, a partir de la cual, las rocas en vez de “fluir” se “romperán”. Es el paso de una “zona de cizalla” a una “zona de falla”. Las rocas más típicas formadas por la deformación dúctil son las milonitas.



Izquierda, milonita de la zona de la Falla Alpina (NZ); derecha, milonita en Hong Kong. Imágenes<sup>1,2</sup>.

En otras palabras, las rocas pueden romperse (zona de falla) o simplemente fluir (zona de cizalla) dependiendo del nivel de profundidad al que nos encontremos, y si existe un régimen de esfuerzos que lo permita. Dejemos esto claro, la transición dúctil-frágil existirá siempre en la corteza, pero para que se forme una zona de falla o cizalla hace falta que además exista un campo de esfuerzos, normalmente con  $\sigma_1$  en la horizontal.



Tipos de roca y régimen en una zona de falla (arriba) y cizalla (abajo) en función de la profundidad y por lo tanto, la temperatura. Adaptada de Sibson (1990). CP: cuasi-plástico; EF: elástico-friccional.

#### 4.1.2 De la deformación frágil a la dúctil (o del ladrillo al chicle)

Llegados a este punto conviene aclarar algunas ideas restrictivas que podamos tener en mente. Solemos clasificar las rocas en ígneas, sedimentarias y metamórficas y hasta aquí todo bien. Sin embargo, bajo un punto de vista estructural, la deformación manda, de tal manera que a final de cuentas, todas las rocas se relacionan de una manera u otra con las tasas de deformación y de recuperación.

La primera es bastante intuitiva de entender, la segunda no tanto. Digamos que la textura final de una roca que ha sido deformada es función no tan solo de la deformación (en sí) sino también de la recuperación (Wise et al., 1984). Los procesos de recuperación implican el escape de la energía de deformación acumulada en las celdas cristalinas de los minerales. Esto puede suceder por

recristalización sintectónica que conlleve la reducción en el tamaño de grano de los minerales o por recristalización post-tectónica dando lugar a la formación de granos equidimensionales con ángulos de intersección a  $120^\circ$  (Wise et al., 1984). Esto último es típico en las cuarcitas (metamórficas), donde pueden ocurrir ambos procesos.



A la izquierda, ultramilonita con importante reducción del tamaño de grano de los minerales; a la derecha, esquistos de cuarzo-muscovita donde los cristales de cuarzo forman arreglos poligonales a  $\sim 120^\circ$  (círculo). Imágenes<sup>3,4</sup>.

Así, en la siguiente figura podemos observar que las rocas de deformación constituyen en la práctica un continuo, desde las cataclasitas (rotura: *stick-slip*) a las milonitas y las rocas metamórficas (deslizamiento estable).

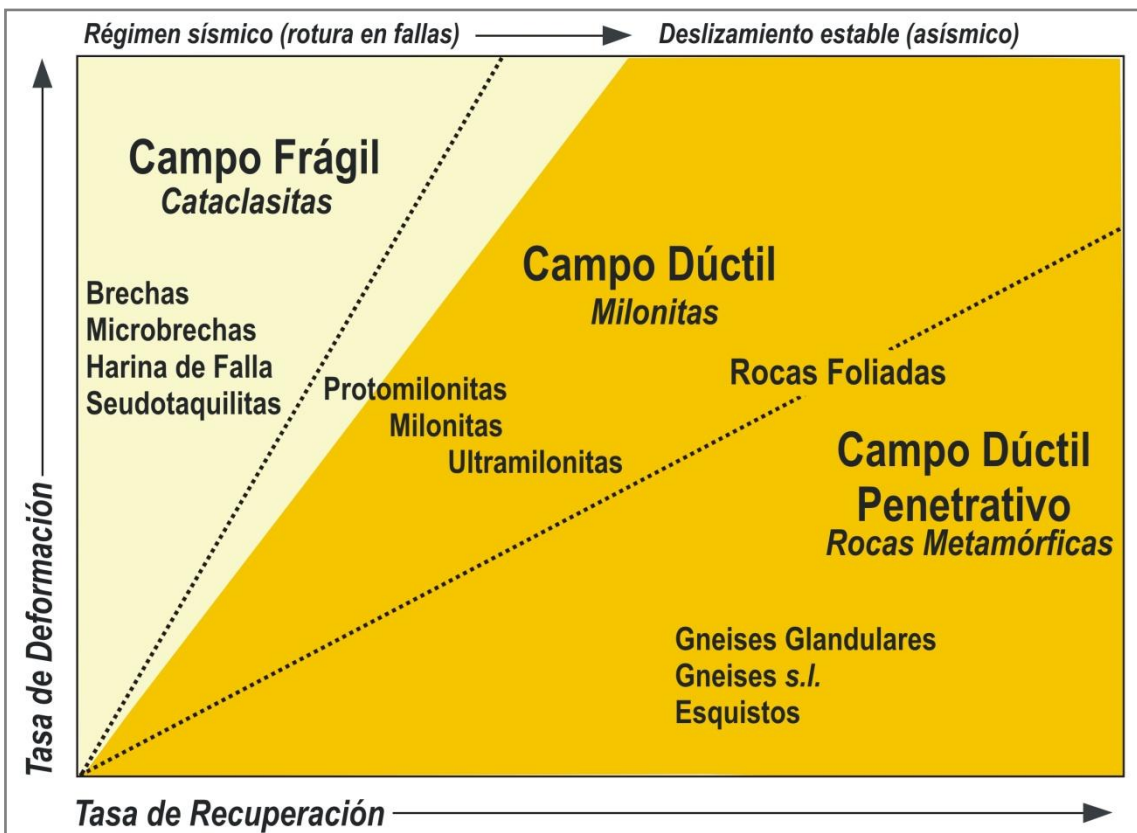
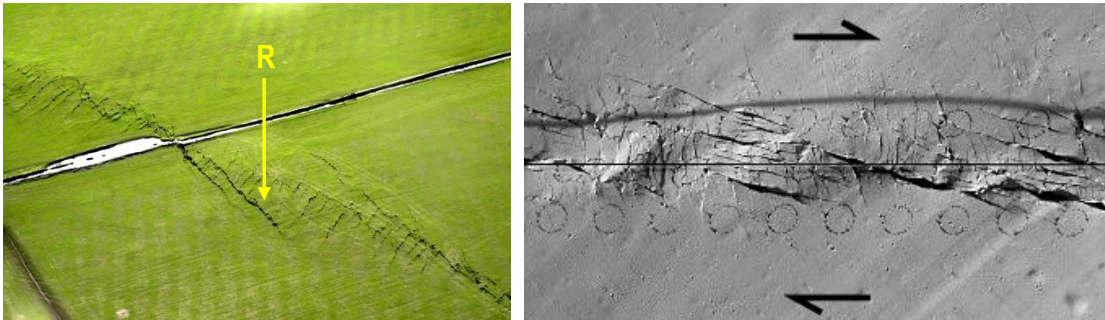


Diagrama de Wise et al. (1984) (modificado) para las rocas de deformación. Digamos que las rocas del campo frágil se comportarán “tan dúctilmente como un ladrillo”, mientras que las otras, fluirán “estirándose como un chicle”.



Es importante destacar que el campo frágil se relaciona con el régimen sísmico (porque hay “rotura” a lo largo de una falla), mientras que el campo dúctil se corresponde con un régimen asísmico (las rocas no se rompen: fluyen).

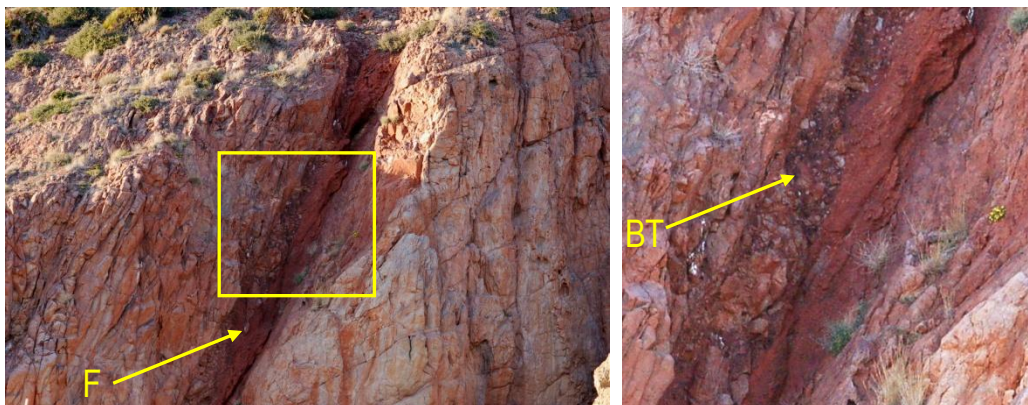


Cuando las rocas “no” fluyen. Espectacular imagen de lo que “ahora” es la Falla Greendale cerca de Christchurch (NZ), rotura de la corteza que ocasionó el destructor terremoto del 4 de Septiembre de 2010. En la imagen se pueden observar fracturas de Riedel (R) conjugadas (desarrollaremos este tema más adelante) (imagen<sup>6</sup>). Compare con el experimento de laboratorio de la derecha (adaptada de Schwarz y Kilfitt, 2008).

#### 4.1.3 Rocas de falla (y “cizalla”)

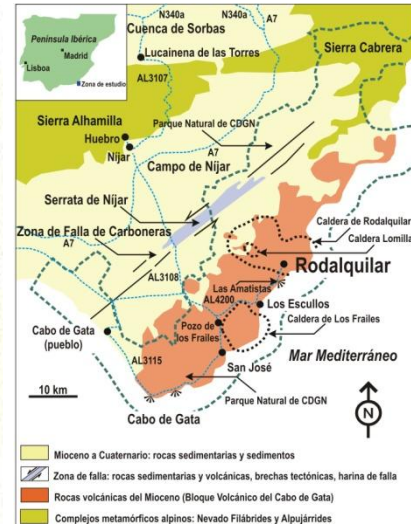
Los materiales que se encuentran sometidos a una rápida deformación a temperatura relativamente baja, con recuperaciones bajas o nulas, originan rocas pertenecientes a la serie cataclástica. En el otro extremo, ahí donde domina la recuperación-recristalización, a temperaturas más elevadas, se formarán rocas pertenecientes a la serie milonítica y las metamórficas (Wise et al., 1984).

Las rocas de la serie cataclástica (o simplemente “cataclasitas”) se generan en un régimen frágil de rotura e incluyen rocas tales como brechas, micro-brechas, la denominada o harina de falla (*fault gouge*) y las seudotaquilitas. Aunque volveremos más adelante sobre el tema de las brechas en las secciones sobre yacimientos minerales, conviene aquí aclarar que su mecanismo básico de formación es la trituración de la roca a lo largo de la falla.



Brecha de trituración (BT) a lo largo de una falla (F); a la derecha detalle del recuadro en amarillo. Andesitas del Mioceno, San José (Almería, España).

Por su parte, la harina de falla (*fault gouge*) es una roca pulverulenta, poco consolidada y rompible con los dedos (salvo cuando ha sido cementada por fluidos hidrotermales), que puede presentar colores desde el blanco grisáceo hasta llamativos colores (rojos, verdes, violáceos).



Aspecto multicolor de la Zona de Falla de Carboneras (Almería, España), constituida mayoritariamente en este caso (aunque subsisten grandes clastos) por harina de falla (imagen<sup>5</sup>); a la derecha, geología de la zona (imagen<sup>6</sup>).

Como se puede apreciar en la figura anterior, los vivos colores, sumados a la presencia de arcillas, pueden dar lugar a confusiones con las zonas de alteración argílica avanzada en sistemas epitermales, particularmente si estos están controlados por grandes fallas.

En lo que se refiere a la serie milonítica existe un tema de interés que si no se aclara puede inducir a confusiones, es el de las milonitas y gneises. Las milonitas recuerdan en más de un sentido a las rocas metamórficas, por ejemplo, en su textura y procesos de recrystalización de minerales, rotación de porfiroclastos, etc.



¿Gneis? ¿Milonita? Se trata de una milonita de un corredor extensional del Hercínico tardío en la Sierra de Gredos (Sistema Central, España) (Doblas, 1990).

De hecho en Chile se acuñó hace décadas atrás el término *esquistos dinámicos* para referirse a rocas de la serie milonítica pertenecientes a la mega-zona de fallacizalla de Atacama. Sin embargo, a diferencia del metamorfismo regional (que abarca extensas zonas), en el caso de las rocas miloníticas el proceso se encuentra circunscrito a una banda de deformación más o menos estrecha, también conocida como “corredor milonítico”.



*Banda (corredor) de deformación milonítica en una zona de leuco-gneises*

*Paredes (Madrid, España)*



*Gneises glandulares (augen) en una zona de leuco-gneises*

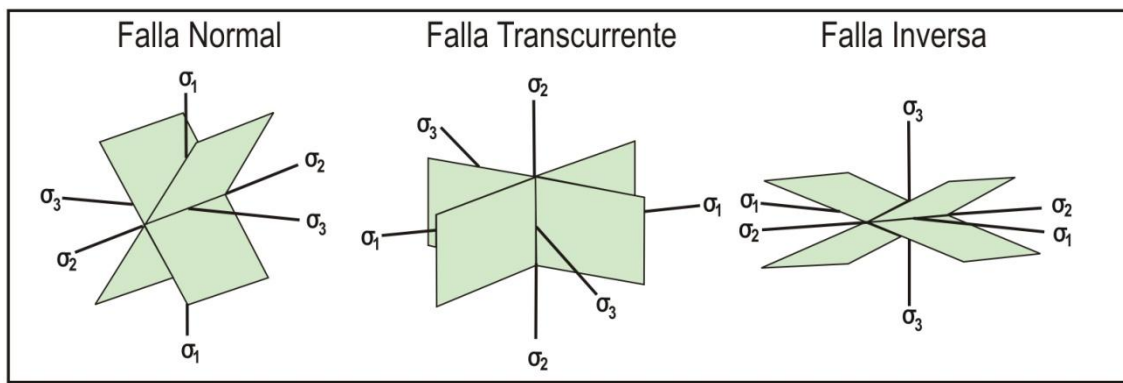
*Piñuecar (Madrid, España)*

Si no se estudia la zona de trabajo con un mínimo de detalle es posible, incluso muy probable, que se puedan generar equivocaciones entre gneises y milonitas. **Recordar:** el principal criterio de campo no será “textural” sino de “tamaño”. Por ejemplo, el granito de Mortagne (Macizo Armoricano, Francia) presenta corredores miloníticos de 200 m a 2 km de espesor, además el paso de granito no deformado a milonitas se verifica en cortas distancias de unas decenas de metros (Guineberteau et al., 1987). Por su parte, los terrenos metamórficos abarcarán kilómetros de distancia en todas las direcciones y son más complejos en términos litológicos, abarcando desde los esquistos a los gneises.

## 4.2 El mundo de las fallas y zonas de falla

### 4.2.1 Definiendo algunos conceptos básicos

Lo que el alumno de geología aprende sobre fallas se deriva normalmente del trabajo clave y pionero de Anderson (1905), que realizó a comienzos del Siglo XX una clasificación dinámica de los planos de rotura basada en el posicionamiento de los tres vectores principales de esfuerzos. Estos vectores ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ) son ortogonales entre sí, cumpliendo el requisito general de:  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ . Dependiendo de las posiciones de estos vectores se definen los tres tipos de fallas principales: normal ( $\sigma_1$  vertical,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  horizontal), transcurrente ( $\sigma_2$  vertical,  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  horizontal), e inversa ( $\sigma_3$  vertical,  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  horizontal).



Los tres tipos de fallas de Anderson en función de la orientación de los vectores de esfuerzo y planos de rotura.  $\sigma_1$  siempre bisecta el ángulo menor ( $< 45^\circ$ ) entre los planos de deslizamiento.

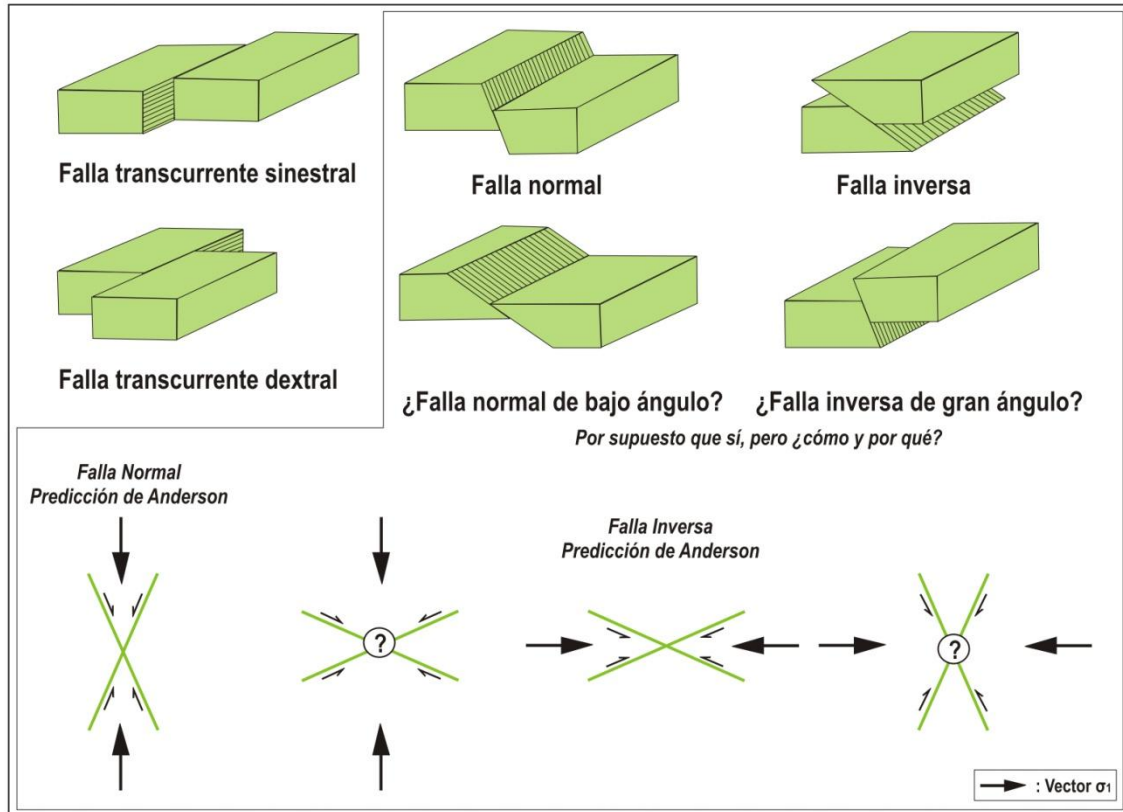
Como veremos más adelante, la clasificación *andersoniana*, con todo lo bueno que tenía (y tiene) es sin embargo algo restringida y presenta problemas para la interpretación de algunos casos. Por ejemplo, no explica la existencia de fallas normales de bajo ángulo o inversas de gran ángulo. Tampoco explica el comportamiento lítrico de muchas fallas normales en profundidad ni la notable curvatura que experimentan las grandes fallas transcurrentes.

... Experimentalists endeavour to recreate structures observed in nature under controlled stress conditions. Earth scientists studying earthquakes attempt to monitor or deduce stress changes in the Earth as it actively deforms. All are building upon the pioneering researches and concepts of **Ernest Masson Anderson** dating back to the start of the 20th century. His insights, encapsulated in a small number of research papers and in the book **The Dynamics of Faulting and Dyke formation with Applications to Britain**, continue to influence investigations in structural geology, seismology, rock mechanics, processes of hydrothermal mineralization and physical volcanology ...

Healy et al. (2012)

En resumen, las fallas distan mucho de presentar un comportamiento “ideal” *andersoniano* y al respecto deberíamos recordar una premisa fundamental: las fallas se curvan y de hecho casi nunca son “planos” sino más bien “superficies curvadas”. Producto de esas curvaturas se generan situaciones asimétricas en la

distribución de esfuerzos a ambos lados de la falla o zona de falla, resultando en zonas de extensión (*transtensión*) o compresión (*transpresión*) locales. Discutiremos esto más adelante ya que se trata de un tema crítico para entender la distribución de masas minerales y poder elaborar predicciones en la exploración local o regional.

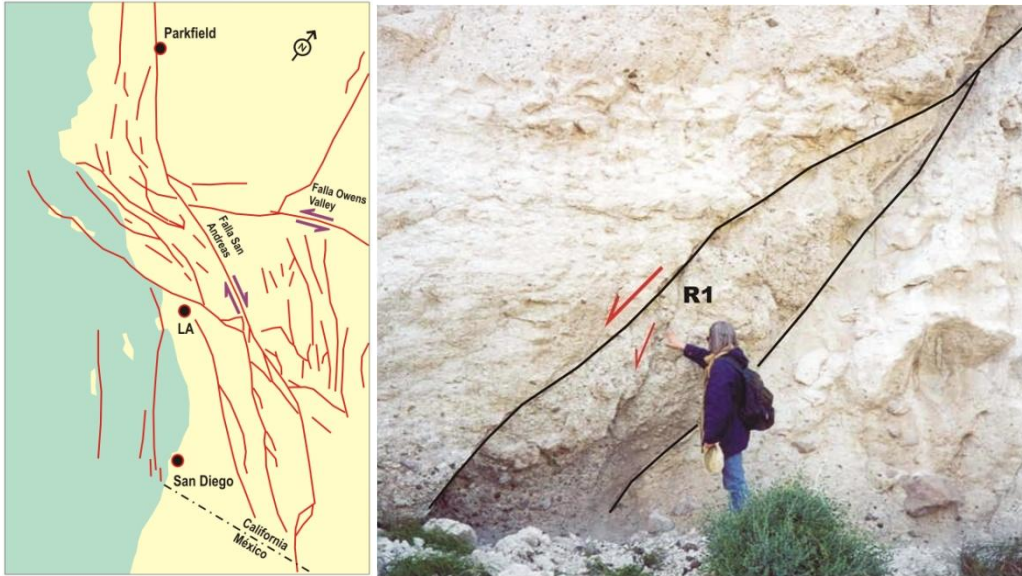


Los tres principales tipos de fallas (más surgen por combinaciones entre estas) y por qué existen, a pesar de que “no” encajan en el movimiento andersoniano, las fallas normales de bajo ángulo y las inversas de gran ángulo. No hay que buscar complejas explicaciones físicas para entender este fenómeno: se forman porque utilizan (“reciclan”) el plano de falla que antes jugó de otra manera. De normal a inversa → falla inversa de gran ángulo; de inversa a normal → falla normal de bajo ángulo.

Que las fallas cambien de dirección en el espacio es más que esperable, ya que la orientación de la superficie de rotura está condicionada por el comportamiento físico de los materiales. Dado que la geología es (a cualquier escala) heterogénea (cambia la litología o se producen cambios físicos dentro de una litología), es de esperar que las superficies cambien a su vez de dirección cuando la rotura va atravesando medios físicamente diferentes.

En lo que se refiere a las fallas inversas de gran ángulo o las normales de bajo ángulo (contrarias a los principios *andersonianos*), digamos que la naturaleza busca siempre el camino más fácil para la disipación de energía. Así, si durante una fase tectónica compresiva se han formado fallas inversas (a bajo ángulo), cualquier relajación cortical posterior utilizará (en parte) esos mismos planos de

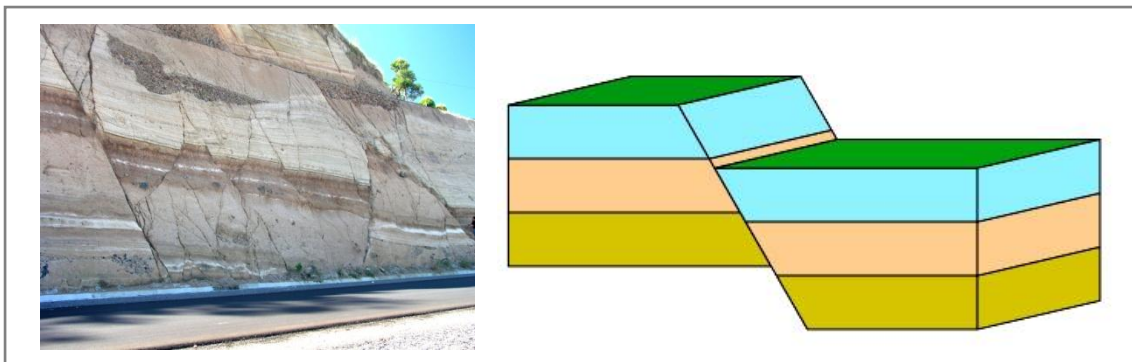
falla para formar fallas normales, sólo que estas serán a bajo ángulo. Lo mismo explica de manera opuesta el caso contrario; así, después de una relajación cortical a través de fallas normales, una fase compresiva utilizará (en parte) los planos de aquellas fallas para formar fallas inversas de gran ángulo. A este fenómeno le podríamos llamar “herencia estructural”.



Las fallas se curvan (mucho) y a todas las escalas. A la izquierda la Zona de Falla de San Andreas (California) (mapa original: imagen<sup>7</sup>); a la derecha, pequeña falla normal (con R1 asociado) en la base de una ignimbrita del Mioceno; Cortijo de la Capitana (Almería, España).

#### 4.2.2 “Leyendo” las fallas: indicadores cinemáticos (I)

De nada vale tener conocimientos “genéricos” sobre el movimiento de las fallas si en el campo o una explotación minera no sabemos cómo interpretar el movimiento. Los libros de geología general (e incluso en algunos cursos de Geología Estructural) suelen explicar el movimiento de las fallas mediante casos en los cuales una “capa” o un “dique” se mueven en una dirección, lo que se suele mostrar en un bloque diagrama o una sección.



Fallas (extremadamente) fáciles de interpretar y representación simplista del movimiento de los bloques (imágenes<sup>8,9</sup>).

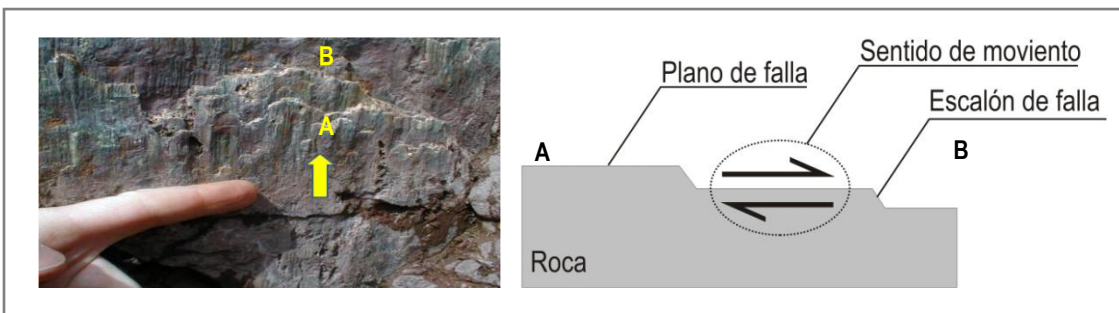
Esto es en cierta medida lo que en inglés se llama un *booby trap* (o “trampa caza bobos”), porque salvo que estemos trabajando con rocas sedimentarias (o volcánicas) y con fallas de movimiento vertical u horizontal escaso (unos pocos metros), la situación suele ser bastante menos clara de lo que cuentan los libros.

Existen numerosos criterios para determinar el sentido de movimiento en fallas (más allá de si una capa “se ha movido”). También existen criterios de movimiento para las zonas de fallas, aunque dejaremos eso para otra sección. Aquí nos concentraremos en fallas “individuales” y revisaremos los criterios cinemáticos de las estrías y escalones de falla, que no por viejos dejan de ser muy pertinentes.

El deslizamiento de una superficie sobre otra puede o no resultar en la formación de escalones, lo cual depende de los materiales y de la energía implicada en el proceso de ruptura y deslizamiento. Asumiendo que los escalones se han formado, las reglas del juego son relativamente simples “la mayor parte de las veces”. Decimos esto último porque los escalones pueden ser congruentes o incongruentes (Doblas, 1998). Esto es, puede haber escalones que indican lo opuesto al sentido real de desplazamiento (= escalones incongruentes).

Nos centraremos aquí en el caso más común, esto es, el de los escalones congruentes. Todo se basa en la cantidad relativa de fricción que se produce cuando la mano del observador se mueve (a lo largo del desplazamiento) en sentidos opuestos sobre el plano de falla; así encontraremos (Doblas, 1998):

- Baja fricción a favor del movimiento.
- Alta fricción en el sentido opuesto de movimiento.

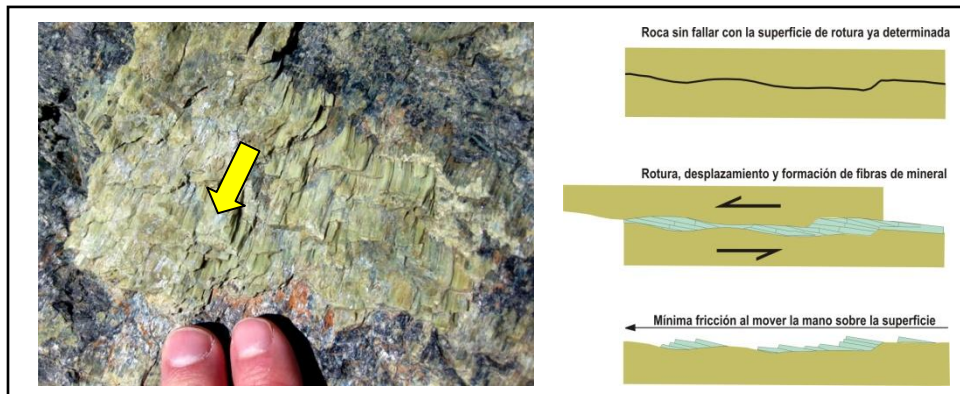


Escalones congruentes sobre plano de falla. Izquierda, la flecha indica el sentido de movimiento del bloque superior (imagen<sup>10</sup>); derecha, interpretación simplificada del movimiento en la figura de la izquierda. Recordemos que en matemáticas módulo es la longitud de un vector, dirección es la recta sobre la que descansa el vector y sentido hacia donde apunta la punta de flecha.

Otros dos elementos que pueden ser necesarios para realizar una interpretación adecuada de los planos de falla son:

- Las fibras minerales (que crecen en los escalones).

- Las estrías de falla (que nos marcan la dirección aunque no el sentido del movimiento).



Fibras de crecimiento en un plano de falla. El criterio a seguir será el mismo que con los escalones, esto es, la búsqueda de la mínima fricción al mover la mano sobre el plano de falla. La imagen de la izquierda nos muestra un conjunto de fibras de epidota (imagen<sup>11</sup>). A la derecha, crecimiento de fibras minerales en escalones de falla (adaptada de Davis y Reynolds, 1996).

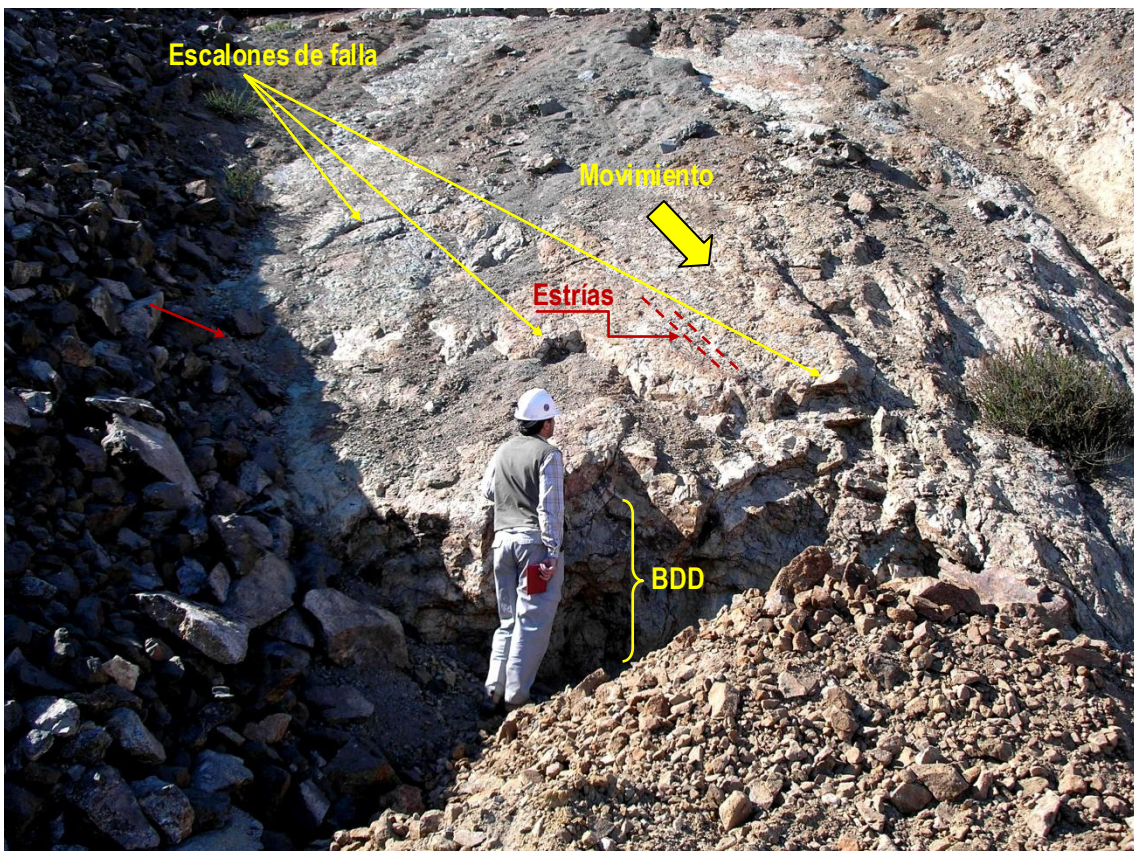


Estrías y espejo de falla, la línea amarilla muestra la orientación de las estrías (imagen<sup>12</sup>); cuando la superficie es limpia, casi “reflectante” por el pulimiento (debido al roce de un bloque contra el otro) pasa a denominarse “espejo de falla”. A la derecha, estrías de falla en muestra de mano (imagen<sup>13</sup>).

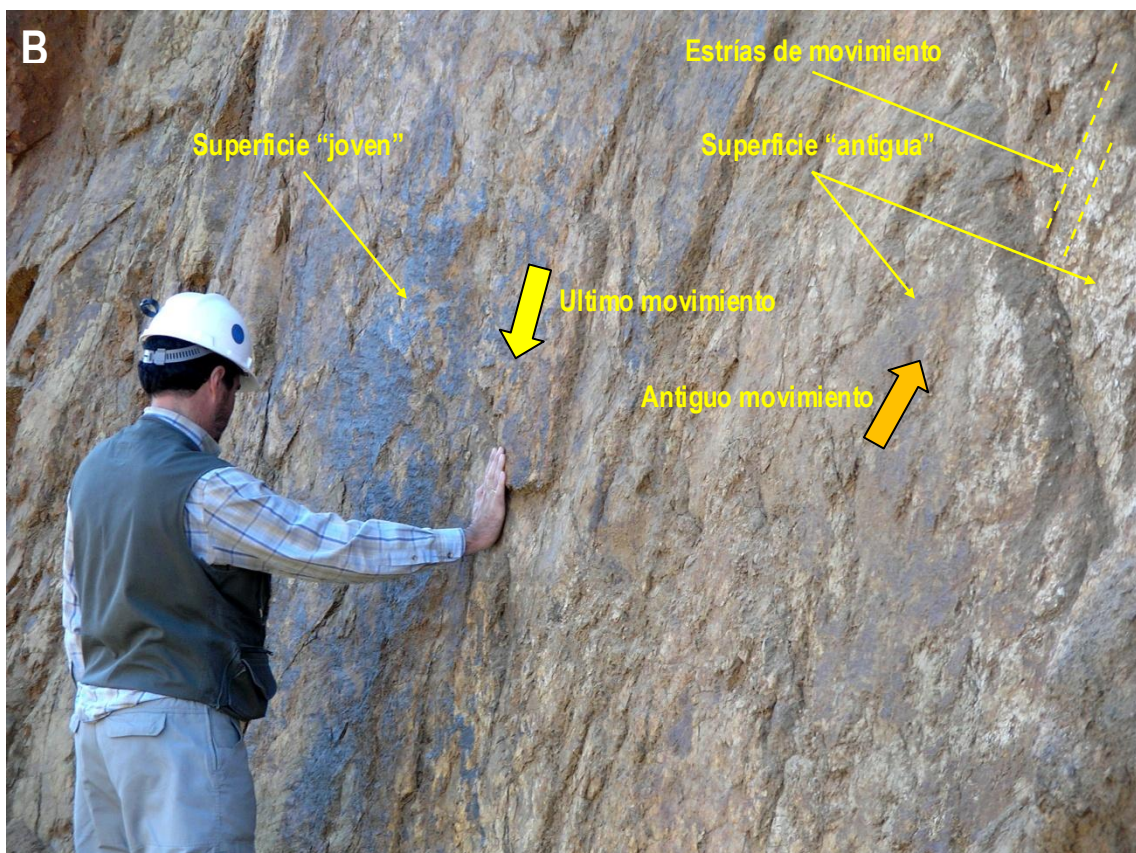
Resumiendo, los pasos necesarios para realizar una interpretación adecuada de una superficie de falla son los siguientes:

1. Identifique la superficie de falla.
2. Busque en ésta el sector o sectores donde la superficie es más suave.
3. Localice estrías de falla para determinar la dirección de movimiento.
4. Deslice su mano a lo largo de la zona de estrías en uno y otro sentido.
5. Determine en que sentido la fricción es mínima.
6. En ocasiones (como veremos en las siguientes imágenes) los escalones de falla pueden ser notables; si es así determinar el sentido de movimiento no debería ser particularmente complejo.
7. Determine si existe crecimiento de fibras en los escalones pequeños.
8. Realice a lo largo de las fibras las mismas operaciones requeridas para los escalones.





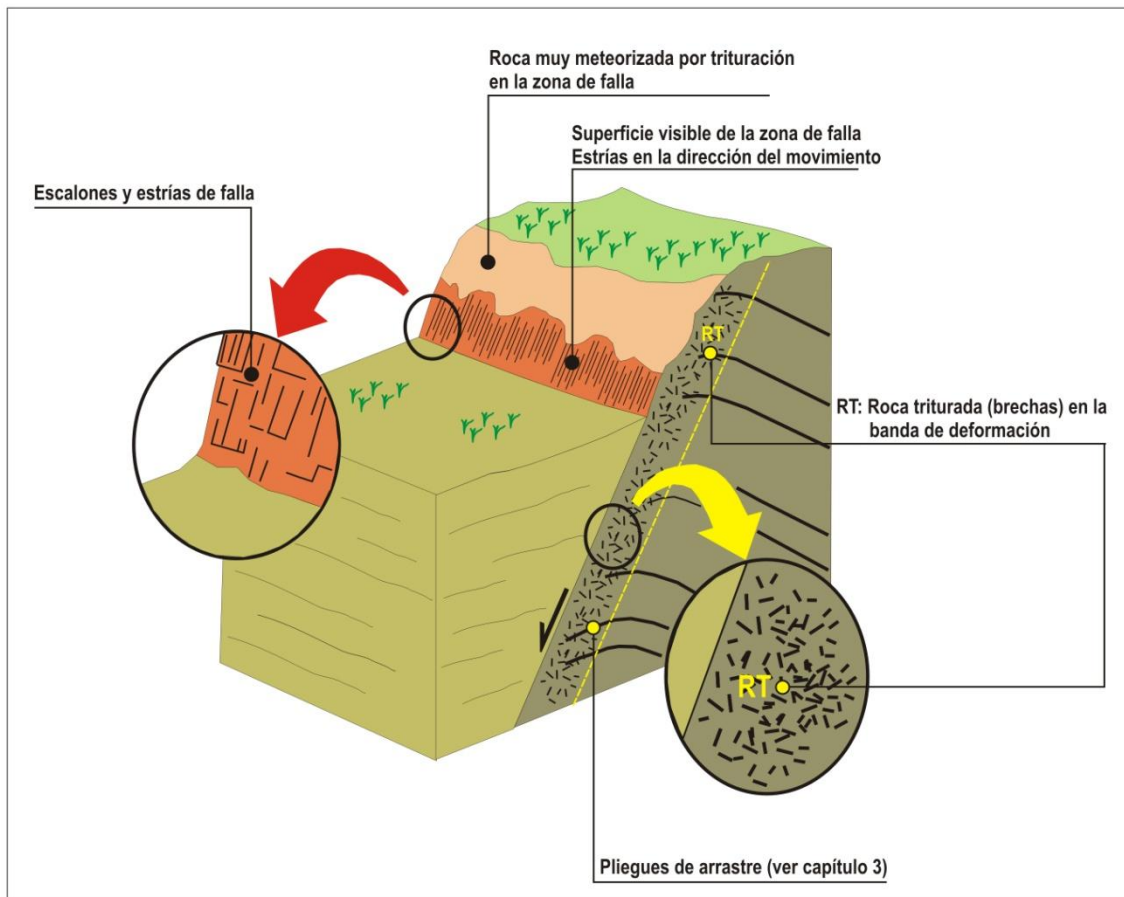
Caso relativamente fácil de resolver en el que los escalones de falla permiten determinar que el movimiento de la falla, a pesar de ser de bajo ángulo, es normal. Ver además figura anterior. BDD: parte visible de la banda de deformación.



En **A** una clásica situación a la que puede verse enfrentado un geólogo de mina al haber elementos contradictorios en una zona de falla. En **B** la solución: dos movimientos, uno antiguo y otro más reciente. Elegir siempre el plano de falla más nítido para realizar la interpretación.

Como muestra la figura anterior, las cosas pueden ser a veces algo complejas en el campo. Uno de los casos conflictivos típicos lo constituye la presencia de escalones de falla que indican movimientos contradictorios (escalones congruentes e incongruentes). Adicionalmente, aunque no suele mencionarse en los tratados sobre el tema, la geología, particularmente la geología estructural, tiene “horas” y “estaciones”. No es lo mismo analizar un afloramiento en verano y a las 8:00 que hacerlo las 14:00. Luces, sombras y la intensidad de la luz cambian mucho durante el día y a lo largo del año. Al respecto, un par de ideas sobre estos dos últimos temas tratados:

- ¿Cómo saber cuál es el plano de falla más reciente? El último movimiento siempre genera el plano de falla más nítido, que en ocasiones puede incluso presentar desarrollo de un espejo de falla.
- Si puede, visite el mismo afloramiento un par de veces a horas distintas (mañana y tarde). Si no luce el sol, esto puede ser inútil.

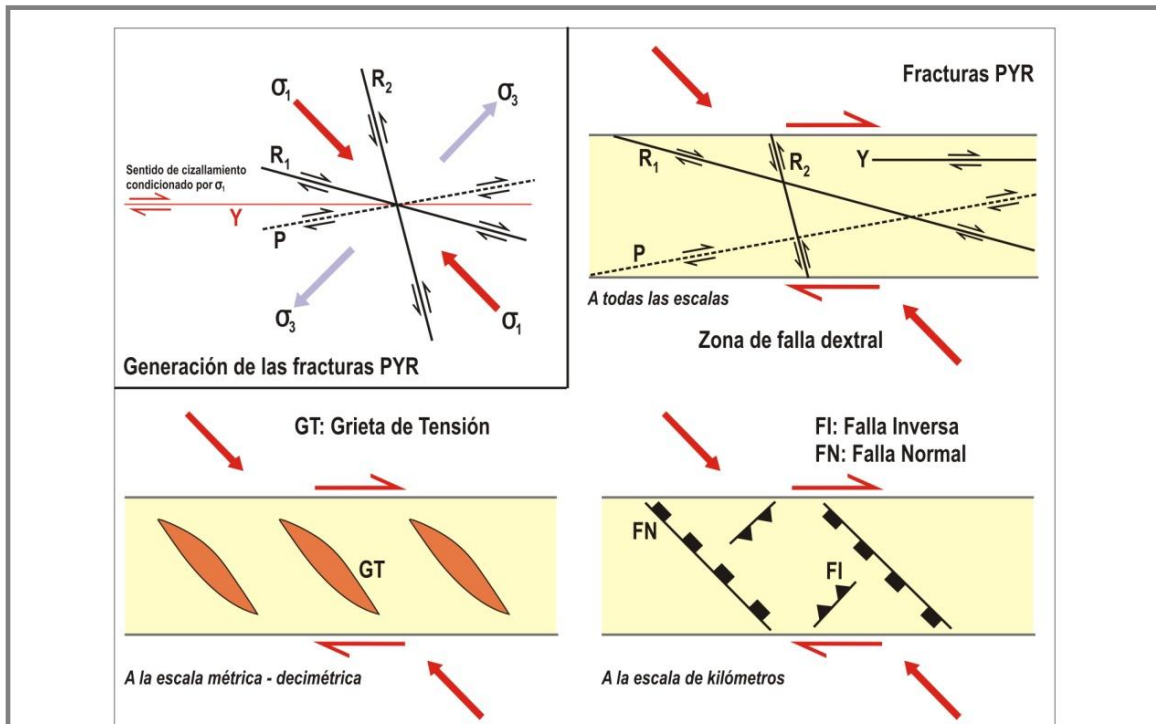


Cuadro resumen con diferentes indicadores cinemáticos que pueden encontrarse asociados a superficies de falla. Otro indicador cinemático (que aquí mostramos en relación con las capas sedimentarias del bloque diagrama) son los “pliegues de arrastre” (ver Capítulo 3), generados por el proceso mecánico del fallamiento. Adaptada de Davis y Reynolds (1996).

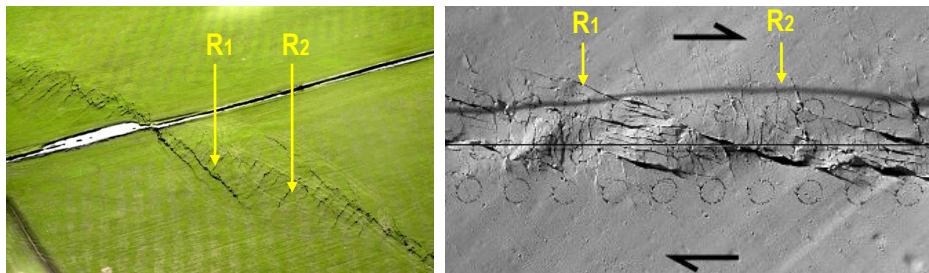
#### 4.2.3 Zonas de falla: principales características e indicadores cinemáticos (II)

Las zonas de falla, independientemente de su tamaño (desde la escala de afloramiento a la continental), son en muchos sentidos un mundo aparte pero con reglas muy precisas.

Existen tres sets de fracturas que pueden desarrollarse en una zona de falla. Estas son las denominadas fracturas de Riedel (R) 1 y 2, las fracturas Y y las fracturas P (fracturas PYR). Los planos sintéticos  $R_1$  se forman a un ángulo agudo ( $\sim 15^\circ$ ) con la envolvente general de la zona de falla. Su arreglo geométrico es *en échelon* (escalón), es decir, paralelas pero desfasadas entre ellas dentro de la zona de falla. Las fracturas antitéticas  $R_2$  son conjugadas con respecto a  $R_1$  y forman un ángulo de unos  $75^\circ$  con respecto a la envolvente de la zona de falla. También tenemos las fracturas Y, paralelas a la envolvente y condicionadas por el sentido de cizallamiento. Debido a la evolución dinámica de la zona de falla se producen ciertos fenómenos que pueden llevar a la rotación de los sets  $R_1$  y  $R_2$ . Por otra parte, durante esta evolución puede aparecer un tercer set de fracturas, esto es, los planos P, formando un ángulo agudo con la envolvente.

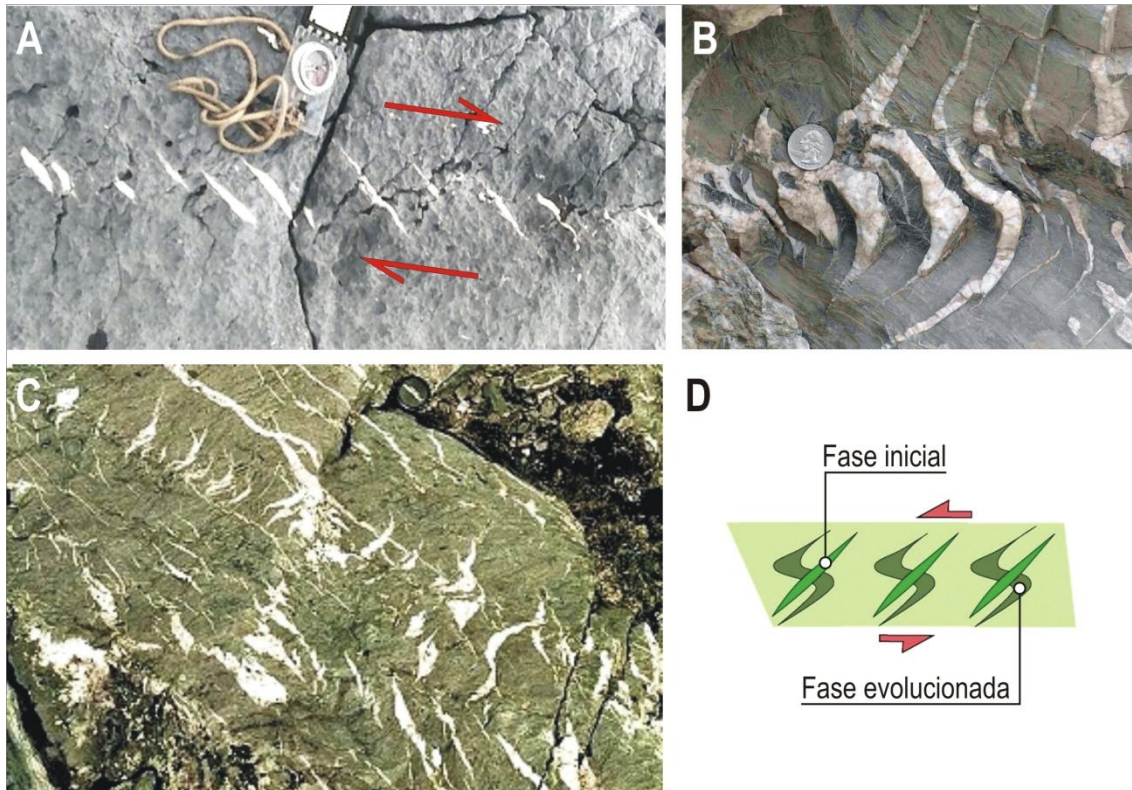


Cuadro resumen sobre las diferentes estructuras asociadas que podemos encontrar en una zona de falla a diferentes escalas. Recuadro: adaptada de Davis y Reynolds (1996).



Falla Greendale cerca de Christchurch (NZ), rotura de la corteza que ocasionó el destructor terremoto del 4 de Septiembre de 2010. En la imagen se pueden observar fracturas de Riedel conjugadas  $R_1$  y  $R_2$  (imagen<sup>5</sup>). Compare con el experimento de laboratorio de la derecha (adaptada de Schwarz y Kifitt, 2008).

Otras estructuras que se pueden formar en una zona de falla son las grietas de tensión *en échelon*, aunque estas últimas son más representativas de la transición frágil a dúctil.

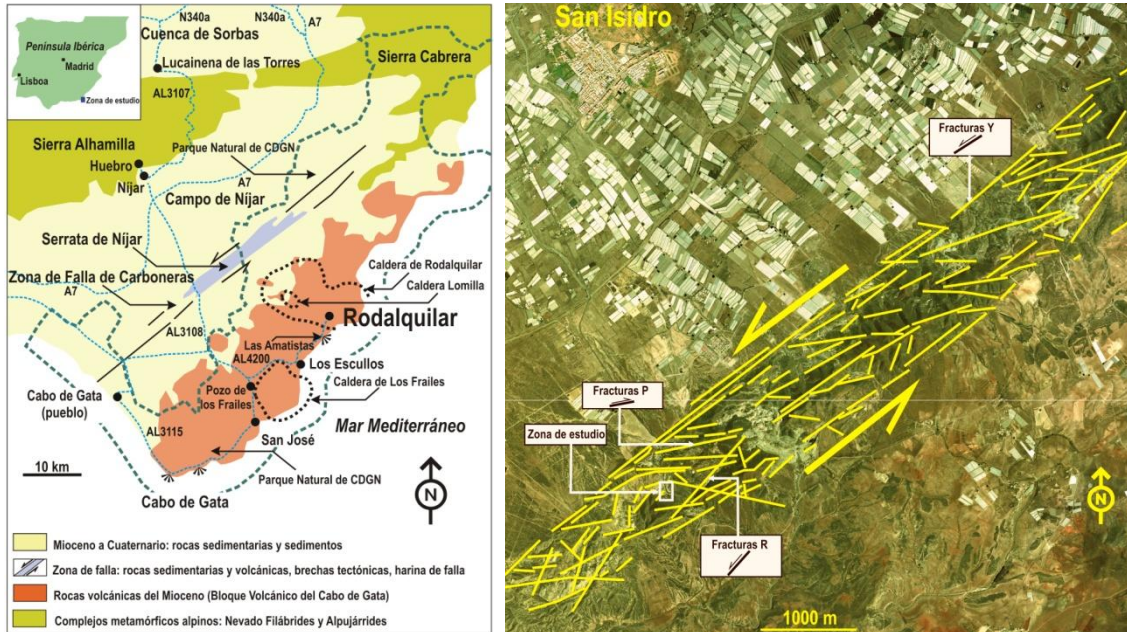


Grietas de tensión (imágenes<sup>14,16</sup>) formadas por movimiento de cizalla a lo largo de una banda de deformación. Típicas de la transición frágil a dúctil y por la misma razón se observa un pobre (o ningún) desarrollo de fracturas PYR (típicas del ambiente frágil). En A se observa una cizalla dextral con grietas de tensión poco desarrolladas (eje mayor sin deformar), mientras que en B y C la curvatura es notable. En D podemos observar la evolución de las grietas de tensión en una cizalla sinistral, mostrando ya indicios de ductilidad en los materiales (curvatura pronunciada de las grietas).

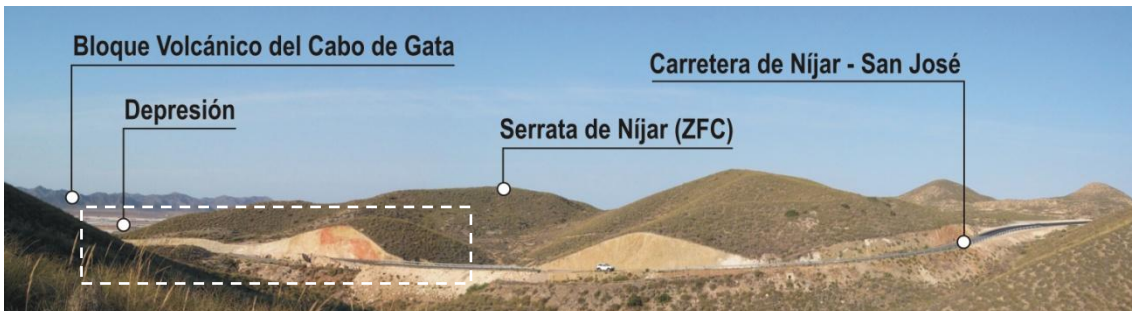
Las grietas de tensión tienen sus puntas orientadas de forma paralela a  $\sigma_1$  y suelen rellenarse de minerales que crecen en la dirección de  $\sigma_3$ . Si la escala es lo suficientemente grande también podemos encontrar fallas inversas (ortogonales a  $\sigma_1$ ) y normales (paralelas a  $\sigma_1$ ) dentro de una zona de falla.

Un ejemplo interesante de zona de falla lo constituye la de Carboneras (Almería, España) (Keller et al., 1997), que se formó hacia finales del Mioceno-comienzos del Plioceno. Es una estructura grande (+ 40 km) de carácter sinistral. Se trata de un dúplex en compresión (ver siguiente sección) cuya topografía positiva lo ha convertido en una sierra de escasa entidad (Serrata de Níjar). Dentro de la banda de deformación afloran rocas volcánicas y sedimentarias marinas del Mioceno fuertemente tectonizadas.

En la Zona de Falla de Carboneras predominan las fracturas P sobre las R (Keller et al., 1997), mientras que las Y definen la estructura general alargada. Las rocas de falla en este dominio frágil son brechas y harina de falla. Las brechas registran al menos dos grandes episodios de trituración.



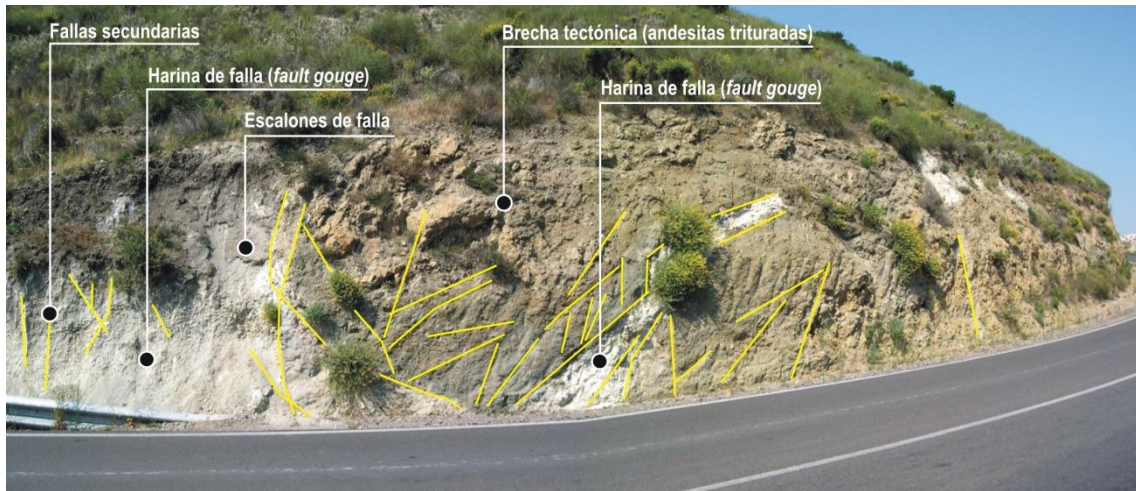
A la izquierda, geología de la zona del Parque Natural de Cabo de Gata - Níjar, ver línea de segmentos (Almería, España) (adaptada de Oyarzun et al., 2009); a la derecha la Serrata de Níjar (Zona de Falla de Carboneras) cerca de San Isidro. Aunque no se han representado “todas” las fallas, la densidad sigue siendo muy importante. Las estructuras blancas rectangulares son “campos” de invernaderos.



Panorámica del bloque tectónico de la Serrata de Níjar (ZFC: Zona de Falla de Carboneras), mostrando además el bloque volcánico y la depresión que les separa. El rectángulo de línea de segmentos corresponde a la zona de la figura inferior.



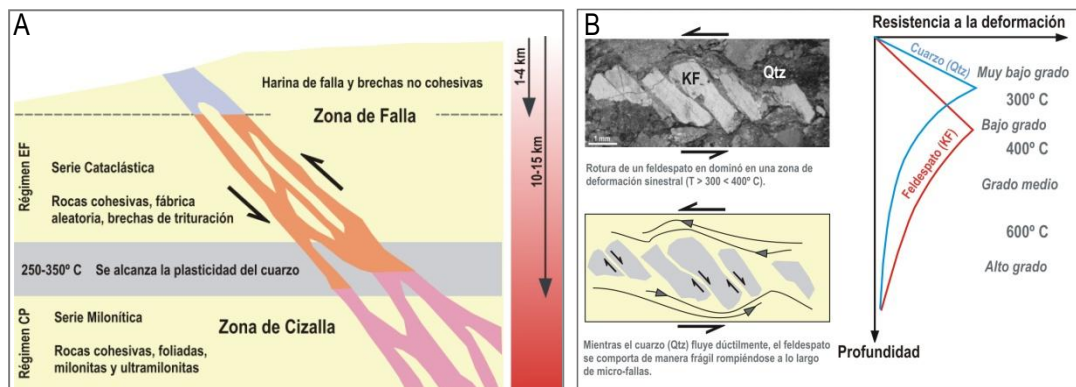
Detalle de la imagen anterior (ver rectángulo). Contacto entre brechas tectónicas andesíticas y rocas sedimentarias marinas (margas, yesos) contemporáneas (Mioceno).



Aspecto “de campo” de una zona de falla: la Zona de Falla de Carboneras a lo largo de la carretera de Nijar a San José. Las rocas sedimentarias marinas están plegadas y falladas mientras que las volcánicas andesíticas han sido brechificadas en varios episodios y falladas (sólo algunas fallas menores han sido dibujadas).

#### 4.2.4 Zonas de cizalla: principales características e indicadores cinemáticos (II)

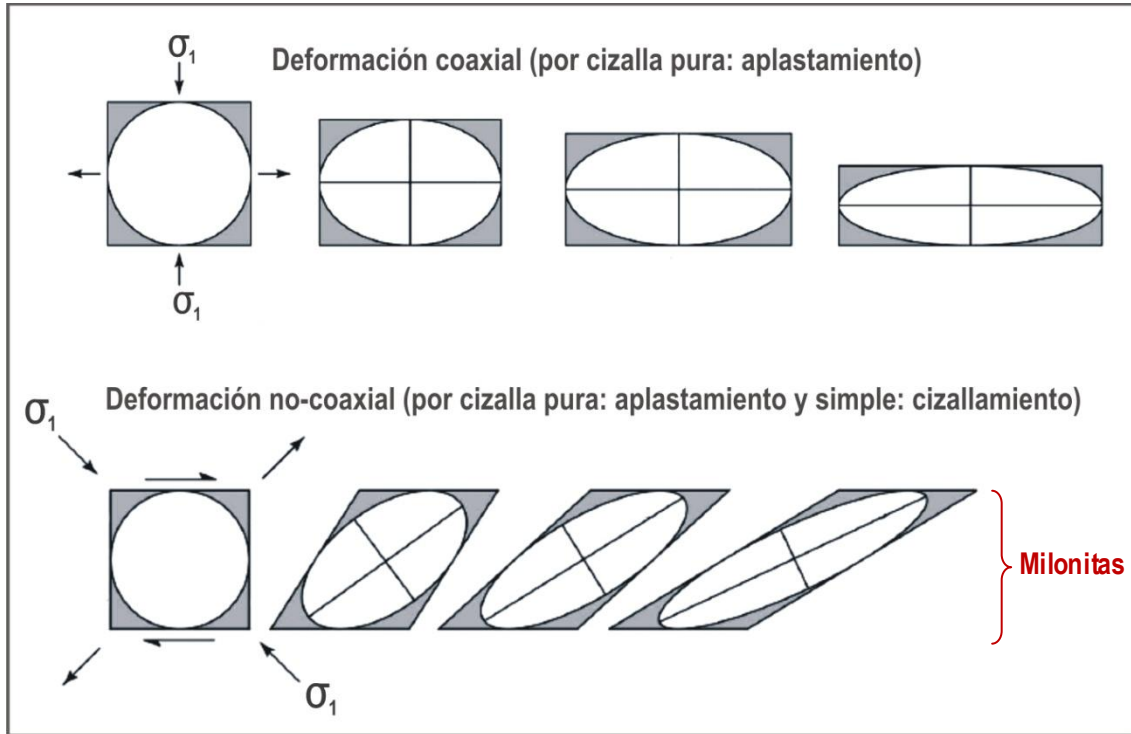
Las zonas de cizalla (continuación de la zona de falla en profundidad) se forman en las zonas más profundas de la corteza, allí donde las temperaturas permiten que los minerales, y por lo tanto las rocas, fluyan en vez de romperse. Como señalábamos al comienzo de este capítulo, en condiciones de gradiente geotérmico normal, esto sucede a unos 10-15 km de profundidad y 250-350° C, cuando el cuarzo alcanza su plasticidad. A unos 400°C el feldespato entrará a su vez en el campo dúctil.



A: Tipos de roca y régimen en una zona de falla (arriba) y cizalla (abajo) en función de la profundidad y por lo tanto, la temperatura. Adaptada de Sibson (1990). CP: cuasi-plástico; EF: elástico-friccional. B: Comportamiento reológico del cuarzo (Qtz) y feldespato (KF) en función de sus resistencias a la deformación y temperaturas en profundidad (gráfico: Passchier y Trouw, 2005).

Este es el dominio de la “familia” de las milonitas: protomilonitas, milonitas y ultramilonitas. Para entender cómo sucede la deformación en estas rocas debemos necesariamente remitirnos a los conceptos de deformación coaxial y no-coaxial.

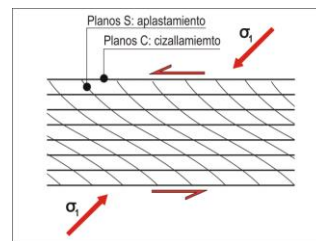
En realidad los términos “deformación coaxial” y “cizalla pura” son en la práctica sinónimos, de la misma manera que el de “deformación no-coaxial” lo es de “cizalla simple”. Las relaciones entre estos estilos los podemos apreciar en la siguiente figura.



Relaciones entre la deformación coaxial y no-coaxial. El primer caso no necesita explicación (aplastamiento sin más), pero el segundo es algo más complejo, ya que implica por una parte el cizallamiento (oblicuo, a  $\sim 45^\circ$  de  $\sigma_1$ ) y por otra el aplastamiento (a  $90^\circ$  de  $\sigma_1$ ). Base de la figura: van der Pluijm (2004).

Las milonitas son por tanto el resultado de la combinación de la deformación por cizalla simple y pura. Para entender este fenómeno nos referiremos aquí principalmente a las llamadas milonitas Tipo 1, esto es, aquellas desarrolladas como bandas discretas de deformación dúctil en granitoides (Lister y Snoke, 1984). Estas milonitas poseen lo que se denomina una fábrica tectónica S-C. Esta nomenclatura se deriva del trabajo clásico de Berthé et al. (1979), quienes describieron la evolución de milonitas en un ortogneis deformado de Bretaña (Francia):

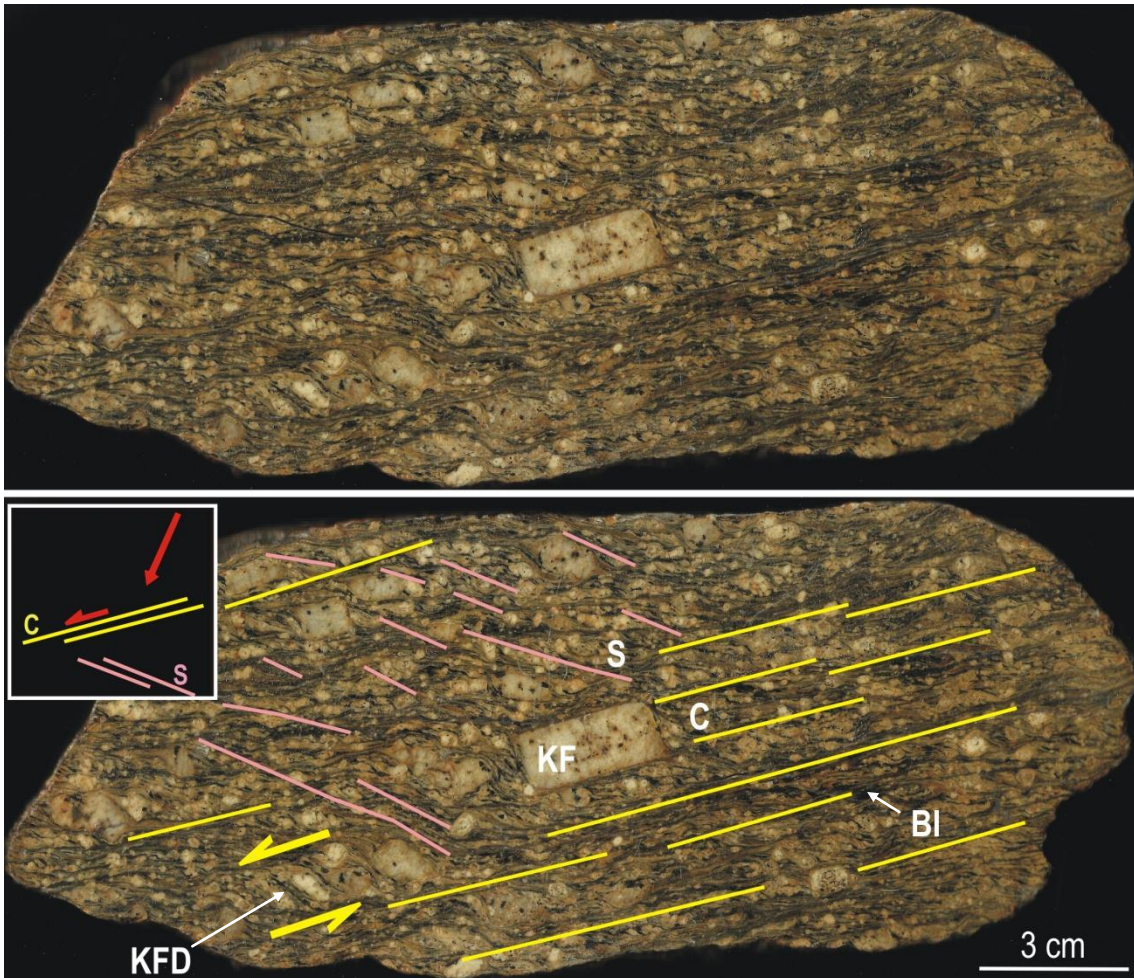
- S: *schistocité* (esquistosidad)
- C: *cisaillement* (cizallamiento)



Determinando el sentido de movimiento en una milonita con fábrica SC: movimiento sinistral.



Este es un punto importante, ya que si los planos S son el resultado de aplastamiento (cizalla pura), y por lo tanto ortogonales a  $\sigma_1$ , entonces podemos determinar el sentido de movimiento de la milonita.



Milonita perteneciente a un corredor extensional del Hercínico tardío en la Sierra de Gredos (Sistema Central, España) (Doblas, 1990). A lo largo de los planos C hay cizallamiento, mientras que los planos S resultan del aplastamiento (cizalla simple y pura respectivamente). También los feldspatos (KF) que han sobrellevado primero rotura (en dominó) (KFD) y luego un cierto grado de deformación plástica sirven como indicadores cinemáticos. BI: Biotita.

Sea cual sea la interpretación tectónica de estas rocas, todos los autores coinciden en reconocer su carácter “foliado”. Lo cual lleva a otra materia conflictiva ¿son contemporáneas las dos foliaciones? Aunque algunos autores mencionan que la fábrica S podría ser heredada en algunas ocasiones, en el caso de las milonitas Tipo 1 que aquí estamos revisando, S y C son “contemporáneas”. Esto es importante, porque el aspecto de una fábrica SC recuerda mucho en lo textural a la “crenulación”, pasa que en ese caso, hablamos de dos foliaciones:  $S_1$  y  $S_2$  (siendo  $S_2$  la que crenula  $S_1$ ). Un error en este sentido puede hacer pensar que estamos tratando con dos fases de deformación ( $D_1$  y  $D_2$ ), cuando en realidad sólo hay una, esto es, la que indujo la formación de la milonita y por lo tanto, el desarrollo de los planos SC.

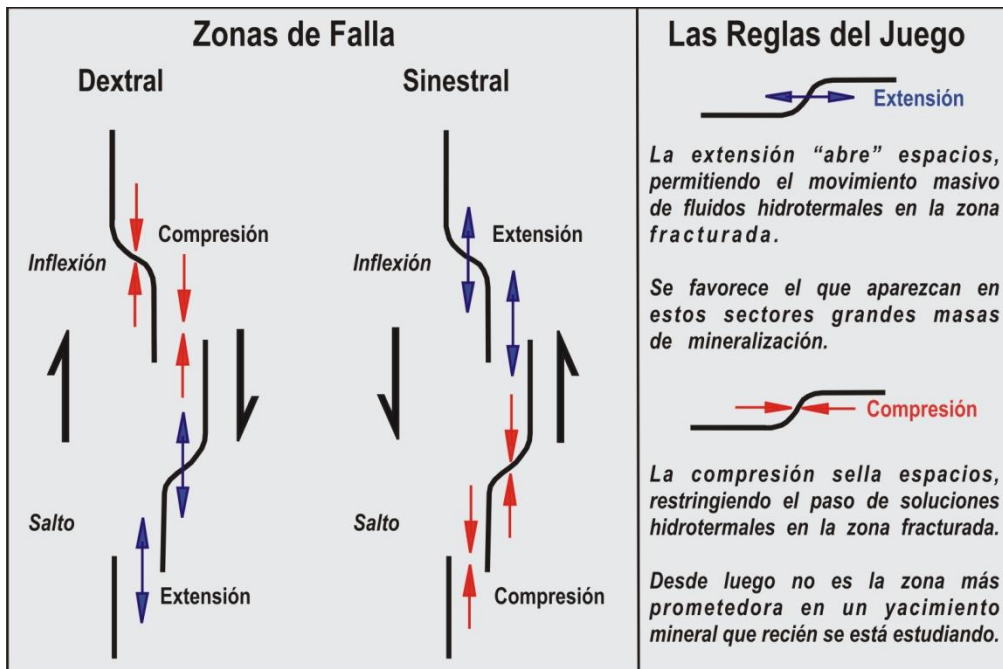
### 4.3 En busca de los “espacios” para las masas minerales

#### 4.3.1 Extensión y compresión en zonas de falla

Cuando hablamos de masas minerales necesitamos tratar el tema del “espacio disponible”, ya que mientras más grande este, mayor podrá ser el cuerpo mineral. Como indicábamos anteriormente las fallas se “curvan” en el espacio; puesto que el esfuerzo que las genera tiene una dirección específica, se desarrollarán entonces sectores que acumulen o liberen energía en el entorno de la falla. Allí donde se “libere energía” se generarán espacios y por lo tanto, existirá una mayor probabilidad de encontrar mineralizaciones importantes.

El movimiento de las fallas a lo largo de superficies planares perfectas (cosa poco común en la naturaleza) se desarrolla sin complicaciones, deslizándose una pared sobre la otra sin interferencias. Bajo estas condiciones la aparición de ramales a partir de la falla principal es de mínima a inexistente. Sin embargo, si una falla presenta una inflexión abrupta o gradual se producen situaciones complejas, que dan lugar a procesos de estiramiento o acortamiento.

La curvatura de las fallas puede ser descrita en términos de las inflexiones y saltos que se suceden a lo largo de las mismas (Davis y Reynolds, 1996).

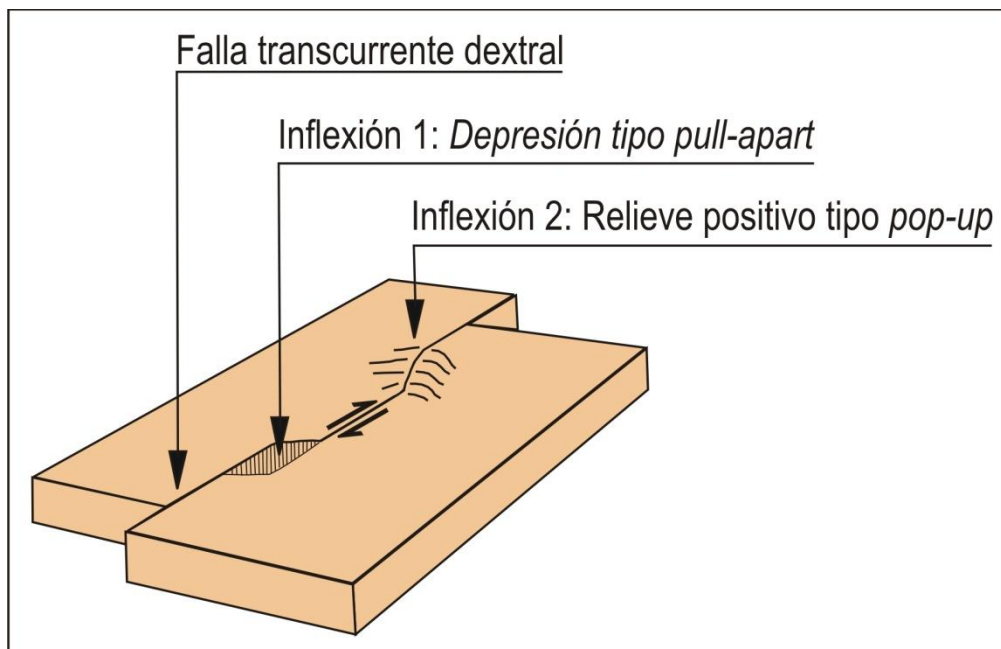


A la izquierda, cuadro resumen para las situaciones de compresión-extensión más típicas que pueden encontrarse en una zona de falla (adaptada de Davis y Reynolds, 1996). A la derecha, implicaciones para la probabilidad de encontrar grandes o pequeñas masas minerales.

Hablaremos de inflexiones en cierre cuando el movimiento de uno de los bloques a lo largo de la falla se realiza “contra” la curva. Por el contrario, si el movimiento “aleja” el bloque de la curva, diremos que se trata de una inflexión en apertura. Bajo el punto de vista de la exploración de yacimientos minerales, las inflexiones en apertura son las más interesantes, ya que es en esos lugares donde se generan espacios, y por ende, donde las soluciones hidrotermales pueden circular con mayor facilidad. Además, a escala regional, una inflexión en apertura es el lugar perfecto para el desarrollo de intrusiones menores bajo condiciones extensionales. Aparte de las inflexiones, otro rasgo típico de las zonas de falla son los “saltos”, que a diferencia de las inflexiones, no se conectan entre sí, aunque mantienen una dirección igual o parecida y el mismo sentido de movimiento. Al igual que las inflexiones, los saltos pueden generar zonas en apertura o en cierre.

#### 4.3.2 Cuando las inflexiones y saltos condicionan relieve y espacio

Las zonas en apertura y en cierre (en inflexiones y saltos) pueden dar lugar respectivamente a depresiones (*pull-apart*) susceptibles de ser rellenadas por materiales sedimentarios o volcánicos, o a alzamientos compresionales (*pop-up*).

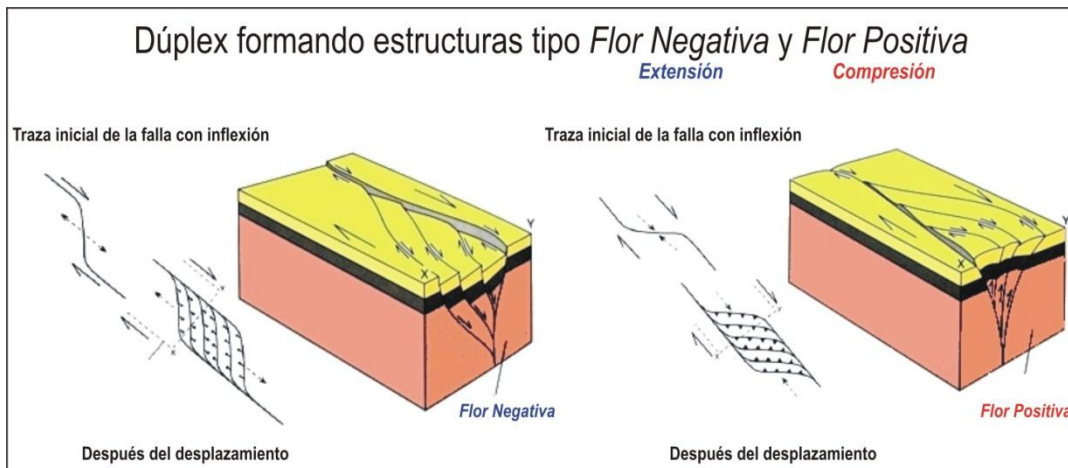


Relieves tipo *pull-apart* y *pop-up* (adaptada de Davis y Reynolds, 1996).

La presencia de inflexiones y saltos a lo largo de una falla promueve a su vez la formación de estructuras denominadas “dúplex” (Woodcox y Fischer, 1986). Las rocas que se encuentran dentro de la zona de influencia de una inflexión o salto se pueden fallar progresivamente (fallas menores paralelas a la dirección de la inflexión) generando sistemas imbricados en relación a la falla principal. Por otra

parte en el caso de fallas de traza recta, la formación de un dúplex puede originarse a través del desarrollo de fracturas de Riedel.

Así en los dúplex extensionales asociados a fallas transcurrentes se formarán hundimientos, y en los compresionales, levantamientos. Unas de las estructuras más notables derivadas son las denominadas “flores positivas” y “flores negativas” (Woodcock y Fischer, 1986), que a su vez se corresponden con los casos de dúplex compresional y extensional, respectivamente.



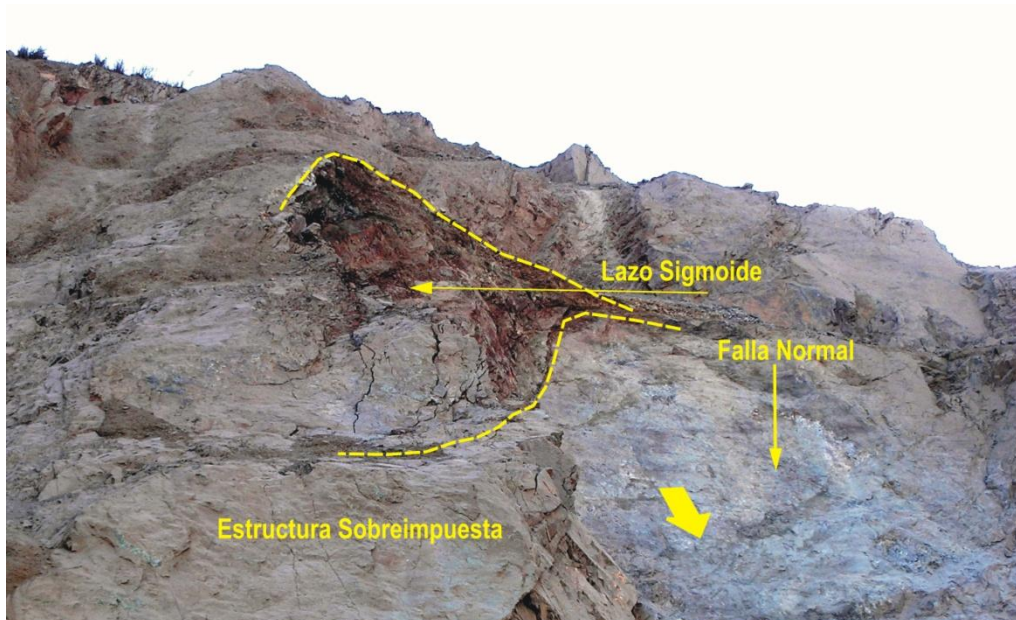
Desarrollo de un dúplex en extensión y compresión con estructuras tipo flor negativa y positiva (adaptada de Woodcock y Fischer, 1986) (imagen<sup>17</sup>).

La geometría interior de las fallas secundarias de un dúplex muestra que estas convergen en profundidad hacia una zona de falla única (sistema anastomosado):

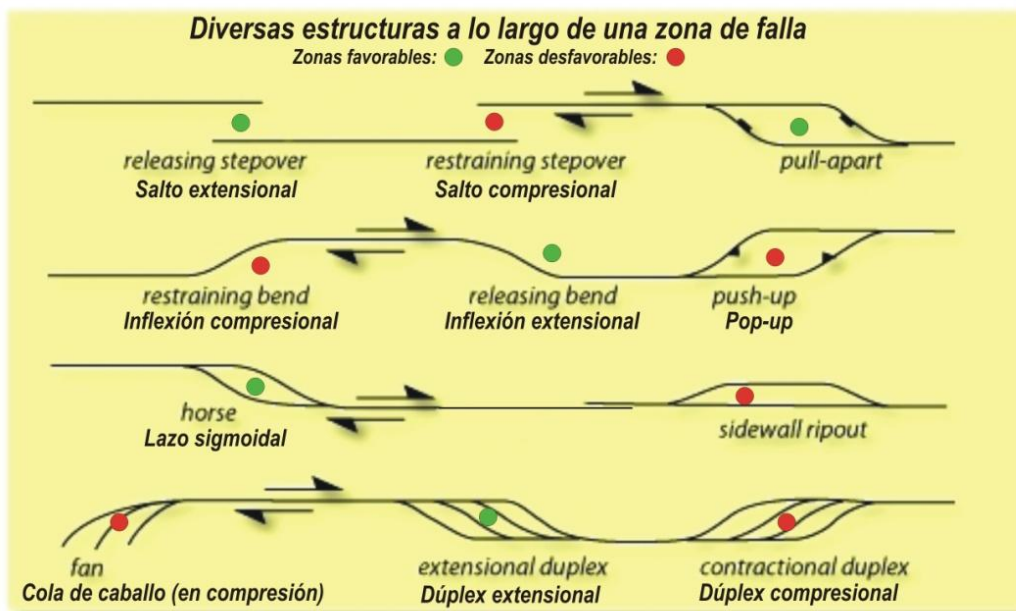
- En el caso de una estructura en flor negativa, las fallas secundarias dentro del dúplex tendrán un comportamiento mixto: transcurrente-normal, por lo cual decimos que la zona interior está en extensión y sometida a hundimiento.
- En el caso de una estructura tipo flor positiva, las fallas interiores se comportarán como transcurrentes-inversas, por lo cual decimos que la zona está en compresión y por lo tanto sometida a levantamiento.

Con estos elementos podemos ya configurar un cuadro más avanzado sobre las estructuras que podemos esperar en una zona de falla, pero más importante aún es el que podemos realizar “predicciones” sobre las zonas que serán más y menos favorables para albergar una mineralización. El siguiente cuadro nos muestra a manera de resumen la mayor parte de las estructuras que se pueden formar en una zona de falla, donde hemos marcado además los que hemos definido como sectores favorables y desfavorables.

Dado lo variadas que pueden ser las escalas a las que se desarrollan estas estructuras asociadas, conviene aquí aclarar que lo de sector favorable puede ser interpretado desde aquellos sectores que son susceptibles de favorecer intrusiones o el vulcanismo hasta aquellos donde la circulación de fluidos hidrotermales resulta más fácil.



Estructura tipo lazo sigmoidal sobreimpuesta a otro sistema de fallas. Ver cuadro inferior.



Cuadro resumen con las principales estructuras asociadas a una zona de falla (en este caso, dextral), indicando los sectores favorables y desfavorables para albergar cuerpos minerales. Hemos mantenido los términos en inglés y traducido al español o indicado otro término inglés sinónimo. En el caso de las estructuras tipo cola de caballo, también en español se puede usar el término *abanico imbricado*, que podrá ser extensional o compresional dependiendo su posición y carácter dextral o sinistral de la zona de falla. Imagen<sup>17</sup>.

Como veremos más adelante, la generación de espacios durante el régimen de circulación de fluidos favorece la descompresión y por lo tanto la precipitación de la carga mineral, por lo que en realidad hablamos de transporte y precipitación. Mientras mayor sea el régimen extensional, más grandes serán los espacios y por lo tanto también lo serán los cuerpos minerales resultantes.

#### 4.3.3 Otros casos estructurales favorables: permeabilidad estructural

Más allá de la extensión-compresión, todos visualizamos de manera intuitiva que un macizo de roca altamente fracturado permitirá el paso de fluidos más fácilmente que uno con escasa fracturación. Tripp y Veamcombe (2004) fueron aún más allá con esta idea y la perfeccionaron, desarrollando un procedimiento muy parecido al de trazar curvas de isoconcentración de polos en la red de Schmidt, sólo que en vez de polos lo que utilizaron fueron los puntos resultantes de la intersección entre fallas o fallas y determinadas litologías en la región aurífera de Ora Banda (Eastern Goldfields Province) en Australia.

Tripp y Vearncombe (2004) indican que hay tres formas principales por las cuales puede incrementarse la densidad de fracturas:

1. Cambios en la geometría de una falla.
2. Intersecciones falla-falla.
3. Intersecciones entre fallas y una anisotropía pre-existente.

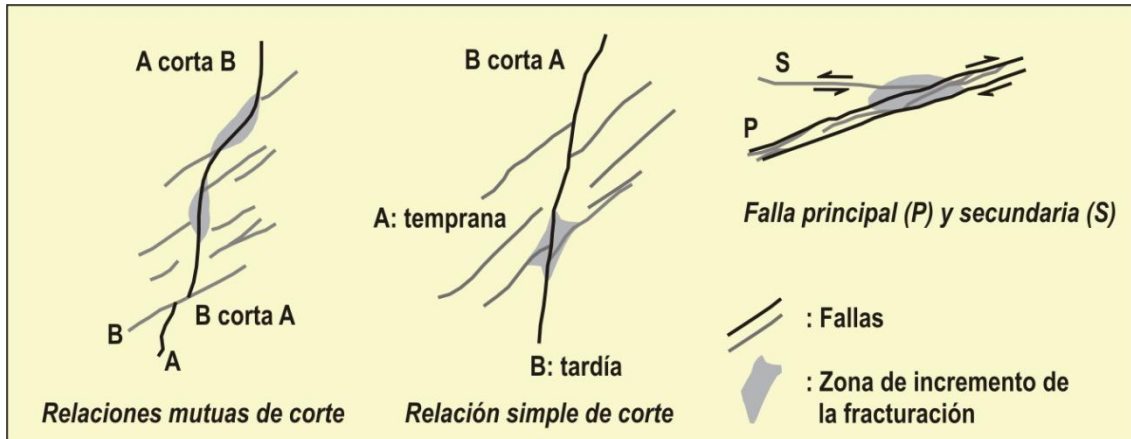
Es precisamente en aquellos sectores donde la falla cambia de dirección donde pueden surgir nuevas fallas (p.ej., estructuras tipo dúplex). En lo que se refiere a las intersecciones falla-falla, el resultado es evidente, mientras más fallas se corten entre sí más “permeabilidad estructural” existirá. El punto final hace mención a la intersección de fallas con anisotropías.

*The Ora Banda-Grants Patch Project comprises two groups of tenements centred on the highly endowed historical mining centres of Ora Banda and Grants Patch. Past production from both within and immediately surrounding the project area totals 1,068,872 oz of gold and within the project area there are estimated Mineral Resources totalling approximately 300,000 ounces of gold within three gold deposits (see the Independent Geologist's Report in Section 5 of this Prospectus for further details including the various categories of Mineral Resource).*

*Previous explorers have recognised six styles of mineralisation occurring in the project area. These mineralisation styles can be readily translated into targets based on lithostructural interpretation of aeromagnetic imagery. Most of these target areas have been subjected to shallow first-pass drilling. However the project areas are mostly covered by alluvial sheetwash and deep weathering, rendering shallow drilling an ineffective test of these target areas. This ineffectiveness has been demonstrated at the Backflip Prospect where follow-up drilling has produced high-grade gold intercepts beneath approximately 30 m of cover.*

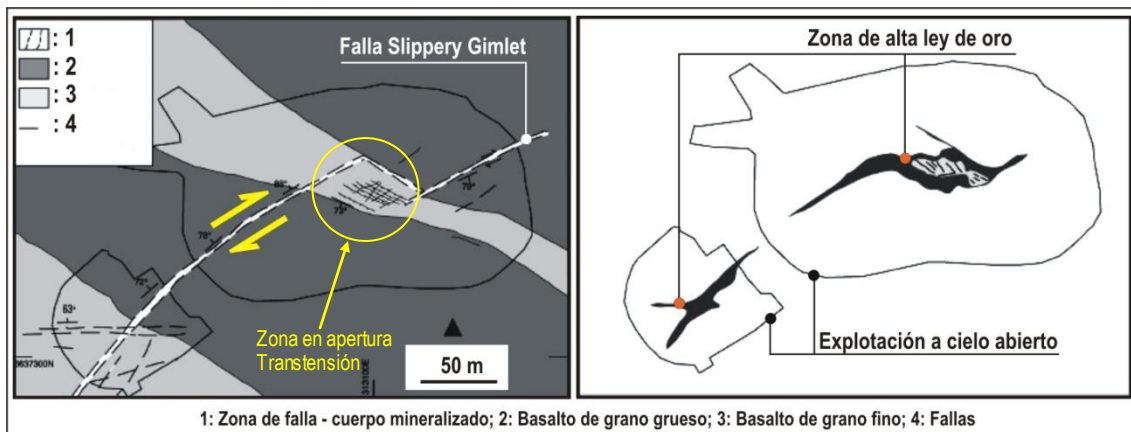
*MyShareTrading.com (2013)*

Estas anisotropías pueden corresponder a cambios litológicos, *layering* ígneos, contactos intrusivos, etc. Allí donde la falla encuentra estos cambios puede producirse un incremento en la fracturación.



Relaciones de corte entre fallas e incremento de la fracturación. Adaptada de Tripp y Veamcombe (2004).

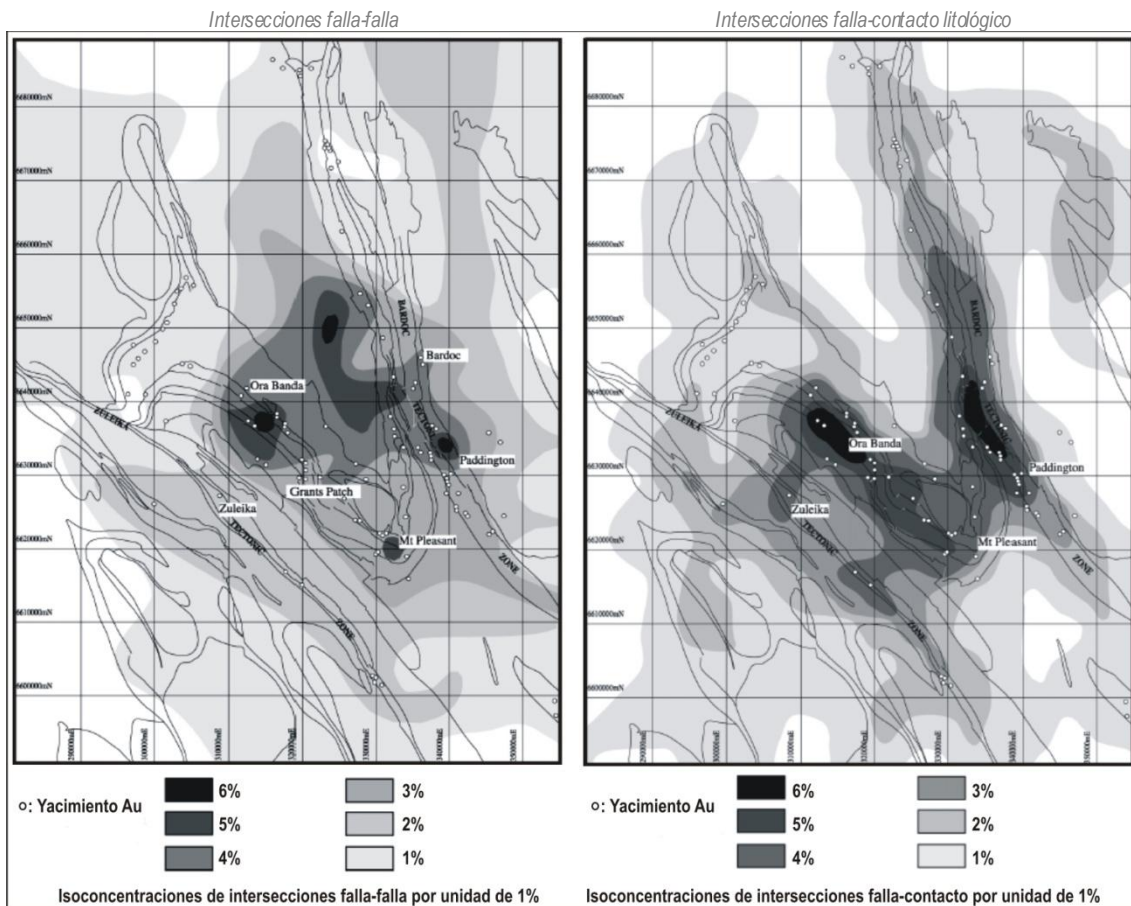
Por ejemplo, las relaciones cambio litológico – inflexiones – intensidad de la fracturación resultan espectaculares en la mina Slippery Gimlet del distrito de Ora Banda (Australia). Allí la falla Slippery Gimlet sufre una inflexión notable al pasar de una unidad de basaltos de grano grueso a otra de grano fino. Es justamente dentro de esta última unidad donde se desarrolla una de las zonas de más alta ley del yacimiento.



Relaciones litología – fracturación en la mina Slippery Gimlet (Ora Banda, Australia). Modificada de Tripp y Veamcombe (2004).

Como puede apreciarse en la figura de arriba, los cambios litológicos, o al menos texturales entre dos litologías equivalentes (basaltos de grano fino y grueso) pueden condicionar y mucho el resultado final de la interacción entre fallas y litologías. Si bien la densidad de fracturación condiciona *per se* los sitios más favorables para el movimiento de fluidos, es la intersección de fallas y contactos

litológicos la que parece predecir mejor la distribución real de cuerpos mineralizados en el espacio.



Curvas de isoconcentraciones de intersecciones falla-falla (izquierda) y falla-contacto (derecha) utilizando un elemento de 1% de área para contar dichas intersecciones (adaptada de Tripp y Veamcombe, 2004). El mapa de intersecciones falla-contacto (derecha) parece reflejar mejor la distribución de yacimientos de oro. Cuadrícula UTM = 10 km.

La idea de que los cambios litológicos pueden inducir incrementos en la fracturación y por lo tanto, mejorar las probabilidades de encontrar cuerpos mineralizados de origen hidrotermal resulta muy atractiva.

Por ejemplo, durante años se ha discutido de una manera u otra sobre el origen de los yacimientos de cobre del Distrito Minero de Talcuna (La Serena, Chile) (Boric, 1985; Oyarzun et al., 1998). Los yacimientos del distrito encajan tanto en fallas normales (formando filones) como en una unidad de tobas de lapilli (el Manto Talcuna) de la Formación

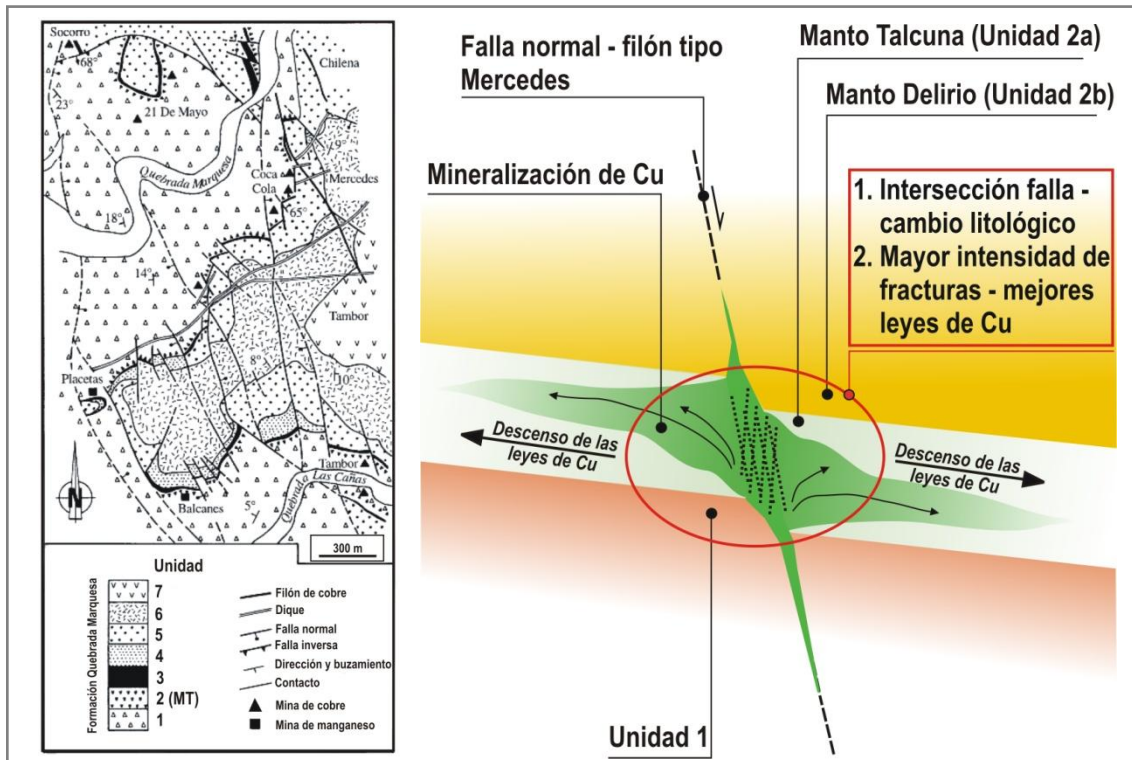
*Extensional faulting during Tertiary time resulted in block faulting and the unroofing of the oldest andesitic volcanics and marine sediments (Arqueros Formation). This episode was accompanied by magmatic and hydrothermal activity leading to vein formation in the Arqueros (Ag) and Talcuna (Cu) districts. The latter veins cross-cut the previous manto-type copper deposits. Ore mineralogy is similar in both styles of mineralization (manto- and vein-type) and consists mainly of chalcopyrite and bornite, with variable amounts of galena, tetrahedrite (vein-related), chalcocite, sphalerite, pyrite, hematite, digenite and covellite.*

Oyarzun et al. (1998)



Quebrada Marquesa (Cretácico Inferior). Esto ha llevado (y sigue llevando) a confusiones semánticas (y geológicas) sobre el segundo tipo de yacimientos, ya que parte del cobre está efectivamente en esa unidad piroclástica, por lo que a Talcuna se le considera del tipo “manto” (estratiforme).

Al respecto, Kamono y Boric (1982) indican que las leyes de cobre descienden fuertemente en unos pocos metros desde las fallas mineralizadas hacia el interior del Manto Talcuna (p.ej., de 2,5 a 0,5% Cu). En otras palabras, las mejores leyes se encuentran en el entorno de los filones ahí donde cortan el Manto Talcuna.



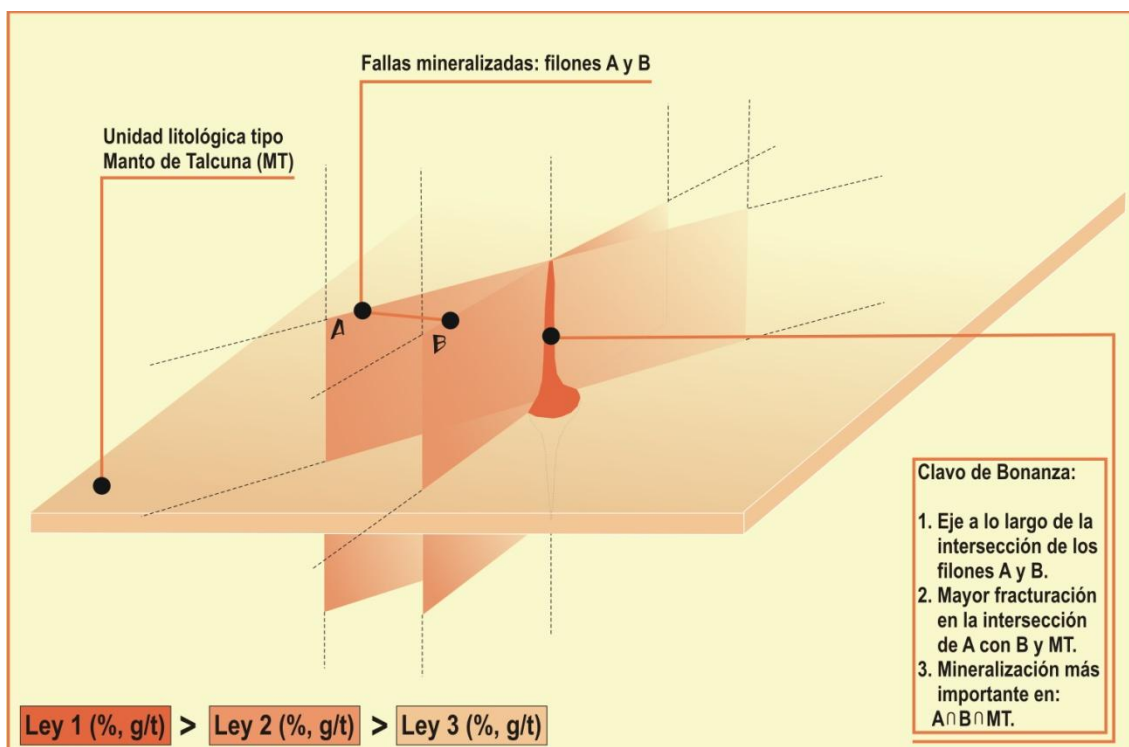
Izquierda, geología del Distrito Minero de Talcuna (adaptada de Oyarzun et al., 1998). A la derecha, modelo esquemático (no a escala) conceptual para el incremento de leyes de cobre a lo largo del Manto Talcuna, en el entorno de los filones. Este fenómeno podría estar controlado por la intersección de fallas-contacts → incremento de la fracturación como se muestra en la figura siguiente.

#### 4.3.4 Una breve reflexión sobre estos temas antes de seguir adelante

El geólogo estructural que trabaja en la resolución de problemas geológico-mineros tiene que ser alguien que ve más allá de las meras estructuras. Siendo esto válido para todo el mundo, lo es más en el caso de los especialistas. Se dice que un especialista es quien cada vez sabe más y más sobre menos y menos. Como veíamos anteriormente, las relaciones estructurales van más allá del simple entendimiento de cómo opera un sistema de fallas o como se relaciona dicho sistema con otros. En un caso así estaríamos olvidando un tema crítico para

entender el ambiente de las mineralizaciones: las rocas que encajan la mineralización. Por eso la geología de minas no puede plantearse como la unión de un conjunto de especialidades (más o menos relacionadas) sino como un todo unificado.

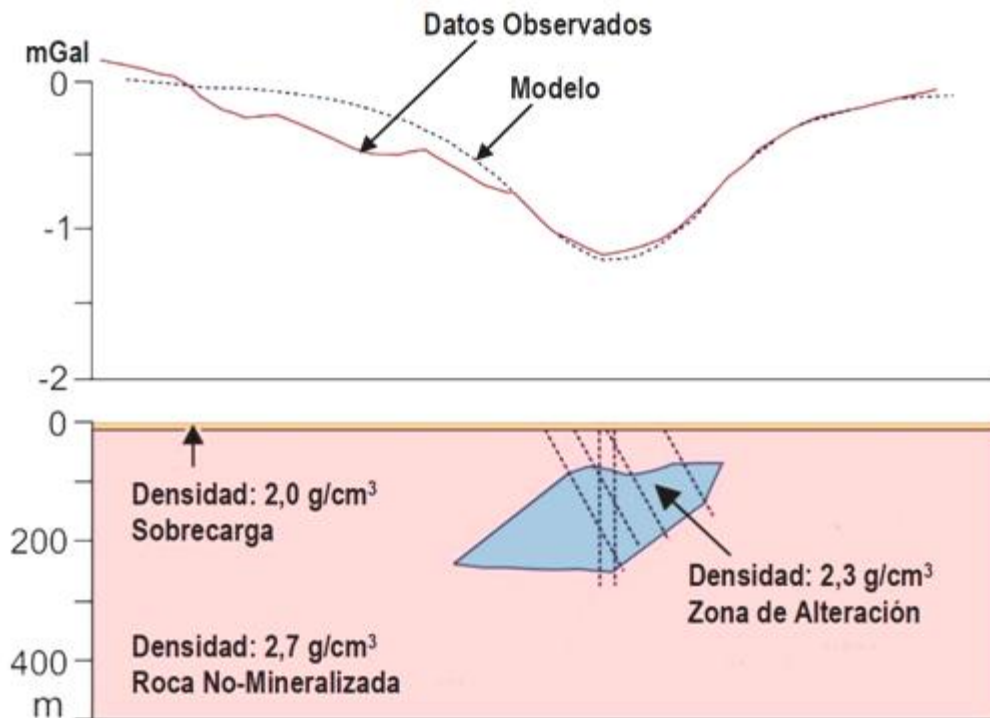
Como hemos podido ver, el tipo de roca, o las variaciones texturales de un grupo de rocas afines, puede inducir variaciones substanciales en el comportamiento de una falla o zona de falla. De ahí que tan importante como dilucidar la dinámica de un sistema de fallas, lo es entender las relaciones entre estas y las rocas fracturadas. La anisotropía reina en cualquier entorno geológico, y su comprensión, se exprese como variaciones litológicas marcadas o sutiles, puede ser crítica para entender la situación globalmente.



Esquema teórico para la combinación de intersecciones: falla-falla-contacto, resultando en un clavo de bonanza que se extiende en una capa favorable (tipo MT). Note como las leyes de mineral se harían progresivamente más altas hacia las intersecciones.

Mencionábamos en el caso de la mina Slippery Gimlet el cambio de textura en los basaltos (grano grueso – grano fino), pero los cambios también pueden ser posteriores a la formación de la roca, y originar también variaciones mecánicas en las rocas inducidas por la alteración hidrotermal o supergénica. Es obvio que si una andesita ha sido profundamente alterada a materiales arcillosos, su comportamiento ante el fallamiento será diferente al de la misma andesita alterada propilíticamente.

Así, una adecuada cartografía de las zonas de alteración en un yacimiento puede servir como método predictivo para el comportamiento de las fallas, cuando pasan de una zona a otra.



*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).*

Los cambios en las propiedades de la roca inducidos por la alteración hidrotermal pueden ser tan profundos que hasta pueden ser utilizados en prospección geofísica (ver figura superior). Los cambios de densidad pueden ser notables y dar origen a auténticas anomalías gravimétricas negativas.

Por lo tanto, quien ejerza la responsabilidad de estudiar la estructura de un yacimiento deberá entender además de manera forzosa la naturaleza litológica del yacimiento y los procesos de alteración que afectan a las diferentes unidades de rocas, mostrando el mismo interés por la litología y alteración que por las estructuras principales y secundarias.

## 4.4 Fluidos en fallas: dónde y por qué precipita la carga mineral

### 4.4.1 La importancia de llamarse Sibson

La geología estructural y económica que muchos estudiamos (varias décadas atrás) eran “mundos aparte”. En una mano conceptos tales como plano, pliegue, falla, esfuerzo, deformación, etc. En la otra, sulfuros, óxidos, filones, gossans, pórfidos cupríferos, soluciones hidrotermales, etc. Había que echarle imaginación para relacionar las fallas con filones y sobre todo había que cursar geología de minas para empezar a entender algunas relaciones.

Este cuadro empezó a cambiar progresivamente gracias a la visión de un geólogo neozelandés llamado Richard H. Sibson, quien entre los años 1970's y 1990's publicó una serie de trabajos que revolucionaron nuestra visión sobre el mundo de las fallas, sobre todo, en el cómo y por qué se mueven los fluidos dentro de ellas. Entre sus numerosos trabajos convendría destacar los siguientes títulos (ver detalles en las referencias):

#### 2011 Structural Geology & Tectonics Career Contribution Award

##### Presented to Richard H. Sibson

... Rick was born and raised in Auckland, New Zealand the son of R.B. Sibson (classics master at King's College, life-long birder, and inveterate island-hopper), and J.W. Fleming, sister of Sir Charles Fleming, Chief Paleontologist with the New Zealand Geological Survey. This auspicious birth led to his love of the outdoors, a career choice likely prejudiced by his uncle, and an ability to recite literature at any time and place. At the University of Auckland, he was strongly influenced by an inspirational class in structural geology taught by Professor Arnold Lillie. At the same time he took up caving and exploring old gold-silver mines east of Auckland, which likely led to his later diversification from pure structural geology into the structural controls on ore deposits, and processes of mineralization ...

John (2011)

N.de.A: En la actualidad Richard B. Sibson es Profesor Emerito en la Universidad de Otago (NZ).

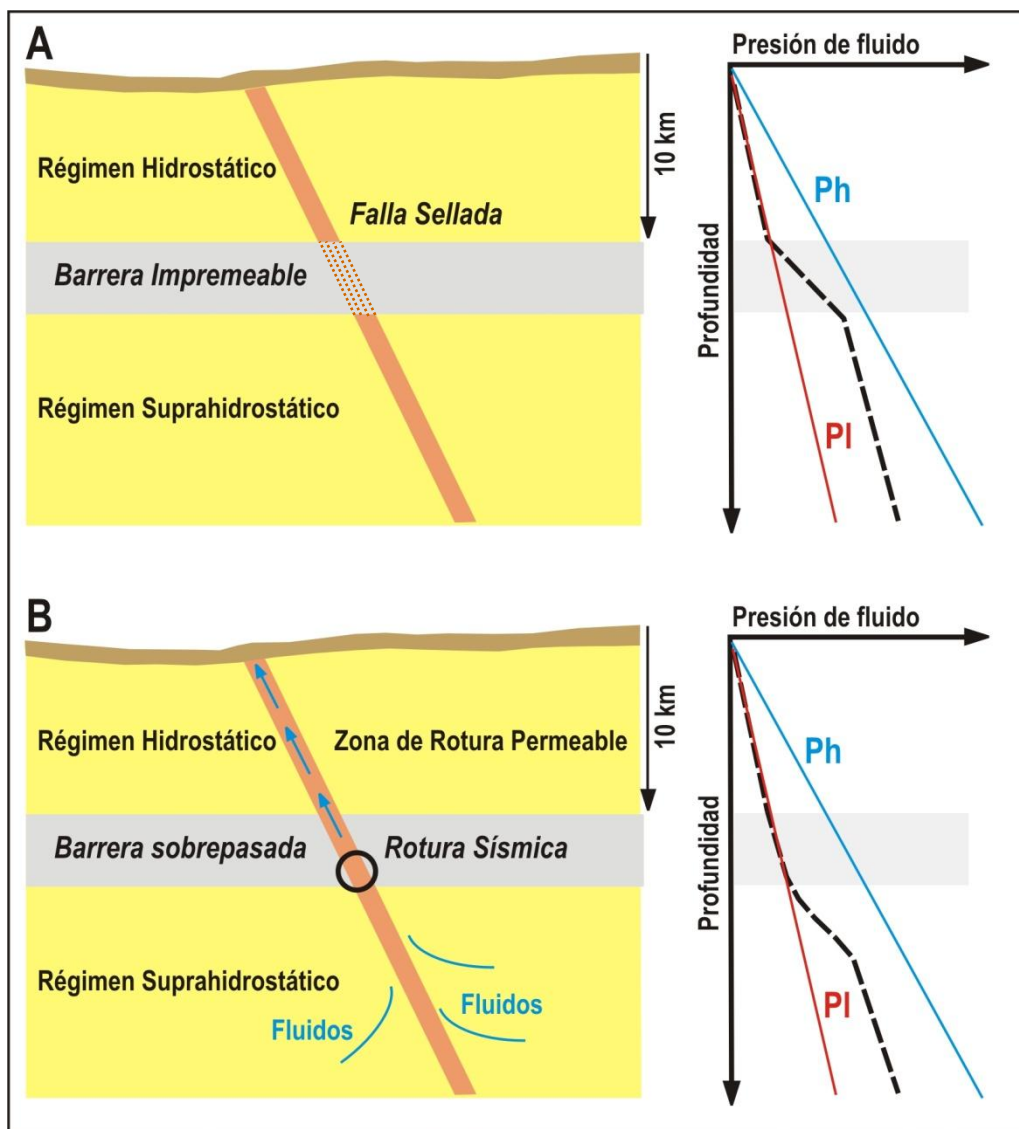


R.H. Sibson (imagen<sup>18</sup>)

- *Seismic pumping – a hydrothermal fluid transport mechanism* (1975)
- *Fault rocks and fault mechanisms* (1977)
- *Stopping of earthquake ruptures at dilational fault jogs* (1985)
- *Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems* (1987)
- *High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits* (1988)
- *Faulting and fluid flow* (1990)
- *Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes* (1996)

#### 4.4.2 Fallas, sismos, y movimientos de fluidos: generando yacimientos minerales

En un completo trabajo de síntesis, Sibson (1990) describió de manera muy detallada los condicionantes que llevan a la precipitación de las mineralizaciones hidrotermales en zonas profundas (mesotermales) y someras (epitermales). Mientras que en el ambiente somero epitermal el régimen se encuentra caracterizado por condiciones de presión hidrostática ( $P_h =$  columna de agua), los sectores profundos (varios kilómetros) presentan condiciones de presión litostática ( $P_l =$  columna de roca). Entre un ambiente y otro existe toda una zona transicional que se denomina de presión “suprahidrostática”.



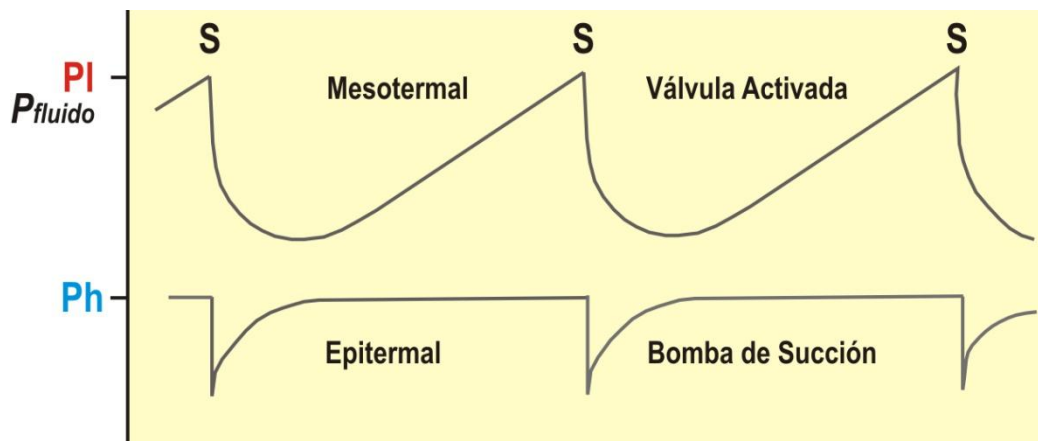
Ascenso de fluidos a lo largo de una falla activa (adaptada de Sibson et al., 1988 y Sibson, 1990). La figura muestra el régimen de presiones de fluidos a diferentes profundidades. En A la falla se encuentra sellada por una barrera impermeable; sube la presión de fluidos en la región inferior hasta que sucede una rotura sísmica en la base de la barrera. En B los fluidos ya pueden ascender libremente a lo largo de la falla. Observe a la derecha como se produce una caída en la presión de fluido en el sistema (ver línea de segmentos) como resultado de la expulsión de los mismos.  $P_h$ : presión hidrostática;  $P_l$ : presión litostática.

En el caso de los yacimientos auríferos, los epitermales formados a profundidades de 1 km o menos se han generado bajo condiciones netamente hidrostáticas. Por su parte, los grandes yacimientos auríferos mesotermales asociados a zonas de cizalla en régimen dúctil-frágil, corresponden a situaciones donde la presión ha sido suprahidrostática a litostática.

Una de las premisas fundamentales es que las mineralizaciones se generan en sistemas de falla activos, es decir, en relación con la actividad sísmica. La capacidad de rotura de un sismo induce abruptamente el movimiento de fluidos en una falla, y por lo tanto, la precipitación de su carga metálica en zonas estructuralmente favorables (en extensión) donde se crean las condiciones físicas adecuadas (p.ej., abruptas caídas de presión → ebullición).

Existen dos mecanismos principales que llevarían a la formación de mineralizaciones hidrotermales (Sibson et al., 1988; Sibson, 1990):

1. La bomba de succión (*suction-pump*).
2. La válvula activada (*fluid-activated valve*).

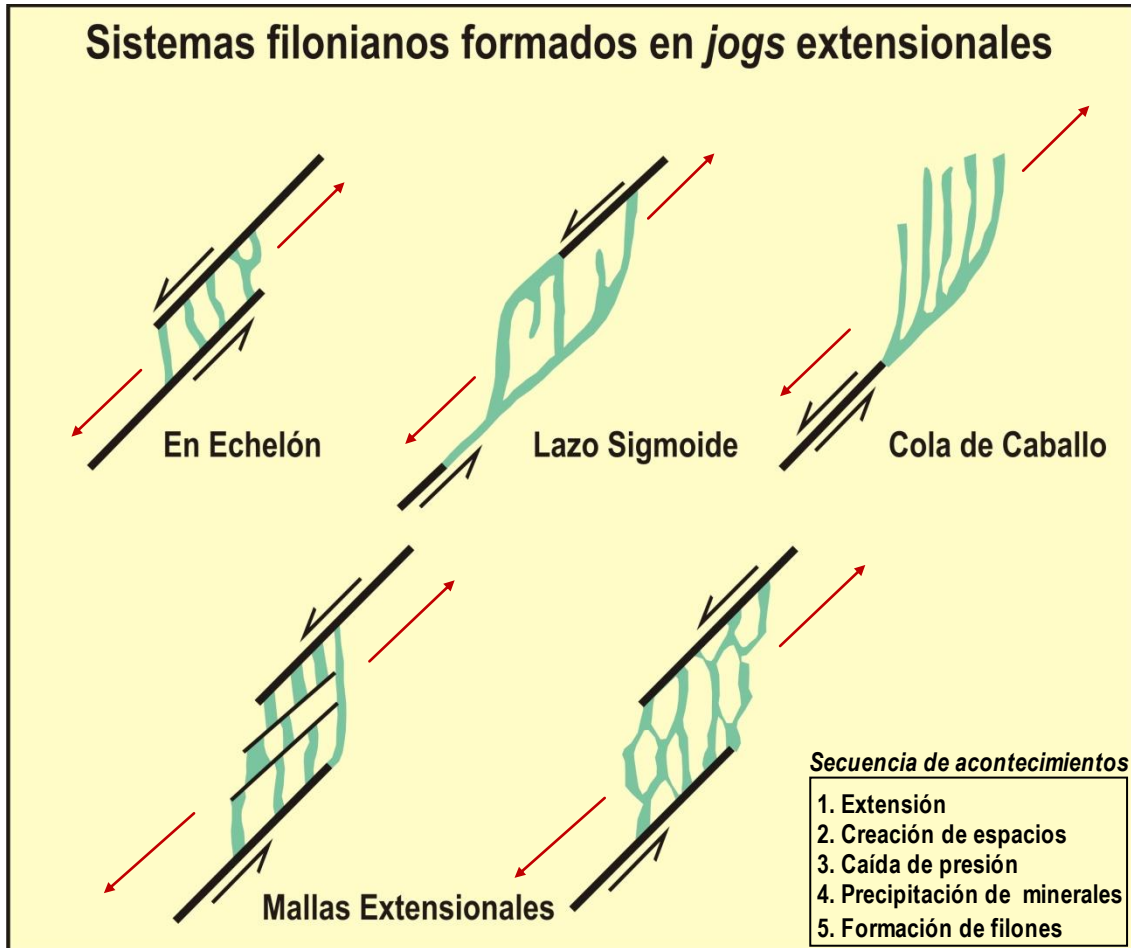


Las bombas de succión y de válvula activada, mostrando el régimen de caída de presiones que se genera cuando hay una ruptura sísmica, que conlleva el ascenso, y, por lo tanto, la pérdida del fluido en su lugar de origen (adaptada de Sibson et al., 1988),

El caso de la bomba de succión es aplicable a las mineralizaciones epitermales, donde las condiciones son básicamente hidrostáticas y activadas por rupturas sísmicas. Las estructuras a rellenar son típicamente extensionales y presentan morfologías variadas tales como en escalera, lazo sigmoide, y cola de caballo.

En la nomenclatura de Sibson éstas estructuras se denominan *jogs* y corresponden básicamente a las inflexiones, saltos, abanicos imbricados, y por supuesto, dúplex extensionales que vimos previamente.

A profundidades someras las estructuras en extensión se caracterizan por la presencia de texturas tipo crustificaciones y brechificaciones. Estas últimas consisten a menudo en brechas de implosión, caracterizadas por un arreglo en “mosaico” (Woodcock et al., 2006) de fragmentos angulares de la roca encajante, que se encuentran cementados por una matriz de origen hidrotermal.



Diferentes tipos de jogs extensionales, con formación de diferentes morfologías filonianas (adaptada de Sibson, 1990).

La apertura forzada (sísmicamente) de la malla de fracturas extensionales, a velocidades más rápidas a las que migran los fluidos, genera un desequilibrio de presión que produce una fuerza de succión. Dependiendo de las condiciones del sistema el proceso puede ocasionar el colapso interior (implosión) de las paredes de la fractura en expansión, lo que resulta en el desarrollo de una brecha de implosión cementada por la carga mineral de los fluidos que han sido “succionados” hacia ese entorno.

Es importante resaltar aquí la importancia de interpretar estas estructuras adecuadamente, como veremos más adelante, brechas hay muchas y muy variadas en un yacimiento mineral, pero la brechificación por implosión, por sus implicaciones dinámicas en sistemas filonianos, es clave para entender el

movimiento de las fallas. Entendiendo que las cavidades mineralizadas se formarán en zonas de apertura (extensión) podemos deducir el movimiento de una falla o zona de falla, y a partir de ahí, realizar predicciones espaciales.

**Pre-rotura**  
Inflexión

**Situación previa a la rotura sísmica. Falla dextral en echelón condicionada por inflexiones que luego darán lugar a la formación de jogs extensionales:**

**Rotura e ingresos de fluidos por succión**  
Jog 1 Jog 2

**Rotura: movimiento de fluidos a lo largo de la falla y relleno de las zonas en apertura: jogs extensionales.**

**Dado que  $P_f > P_h$  la presión del fluido no puede contener la presión ejercida por la roca encajante y se produce una "implosión".**

**Resultado: una brecha hidrotermal cuyos clastos pertenecen a la roca encajante, quedando estos cementados por minerales de mena y ganga.**

**A la izquierda: brecha de implosión cementada por goethita. La carga sulfurada fue oxidada. La roca es una riodacita porfírica de un complejo de domos mineralizados (Pb-Zn-Ag).**

**Colapso del jog**

Formación de jogs extensionales mineralizados en un sistema de falla en echelón. Los cuadros amarillos superiores están adaptados de Sibson (1990). Dada la alta proporción cemento/clastos, la brecha de las imágenes puede ser clasificada como brecha de implosión (o brecha mosaico) "cemento-soportada" (p.ej., Woodcock et al., 2006). Imágenes: Cabezo San Cristóbal, distrito minero de Mazarrón (Murcia, España).

El alumno de geología suele hacerse un lío con el tema de las presiones hidrostática y litostática. Aunque cualquier profesor de física o especialista en el tema geotécnico de los macizos de roca pondría cara de pocos amigos, digamos aquí (no obstante) que la forma de decidir qué presión es mayor que la otra en profundidad es fácil: se trata de decidir que preferiríamos tener sobre la cabeza, un cubo con agua u otro de roca. La respuesta es fácil.

Esta es la razón por la cual se produce una implosión en las cavidades extensionales, porque la presión del fluido no es suficiente como para compensar la presión ejercida por la roca encajante (presión litostática). Por eso que los submarinos sólo pueden operar hasta determinadas profundidades, porque



llegados a un punto, sus cascos no pueden resistir la presión exterior. Resultado, el submarino es aplastado como huevo, desde afuera hacia adentro.

Las brechas son un subproducto extremadamente común en el mundo de las fallas y mineralizaciones hidrotermales asociadas, sin embargo, su interpretación es compleja y en muchos casos resulta difícil reconciliar la teoría (de la brechificación) con las observaciones de campo (Jébrak, 1997).

No obstante, hay rasgos fácilmente reconocibles y los pequeños errores que podrían producirse (por ejemplo, confusión entre una brecha hidráulica y otra crítica; Jébrak, 1997) no serían graves. Jébrak (1992) en un brillante trabajo sentó las bases para la clasificación de brechas relacionadas con procesos tectónicos e hidrotermales en yacimientos minerales. Jébrak incluye los siguientes tipos principales de brechas:

- De aplastamiento: brecha tectónica, sin participación activa de fluidos.
- De trituración: brecha tectónica, sin participación activa de fluidos.
- Hidráulica: brecha hidrotermal de implosión.
- De explosión: brecha hidrotermal por explosión.
- De colapso: brecha tectónica por relajación, sin participación activa de fluidos.

En su clasificación de 1997 Jébrak divide las brechas hidráulicas en dos subtipos:

- La Hidráulica (s.s.), que se produciría por aumento de la presión de fluido dentro de una cavidad lo que llevaría a generar una fracturación inducida de la roca.
- La Crítica: equivalente a la brechificación por implosión que ya hemos analizado.

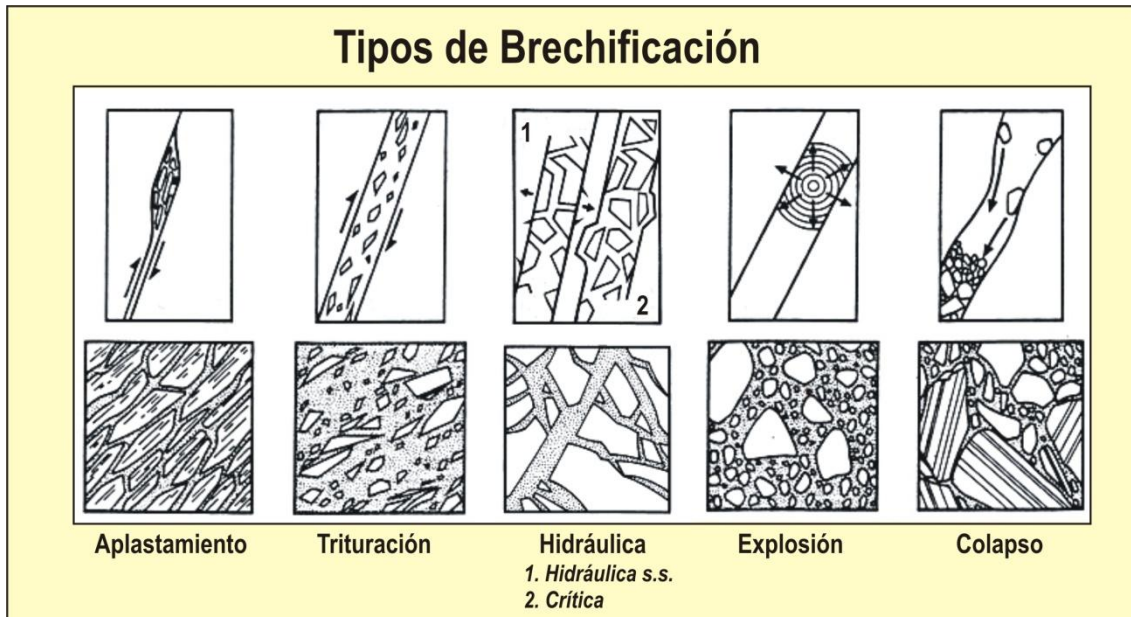
Como veremos en los diagramas que siguen, en la práctica ambas son brechas tipo mosaico y muy parecidas entre sí, por lo que no conviene darle muchas más vueltas al tema.

*1. The recognition of the type of brecciation process could lead to a better discrimination between deposit models. Numerous examples of this approach are given by Laznicka (1988) and Taylor and Pollard (1993).*

*2. Mapping quantitative geometric breccia parameters could be used as a new tool in exploration. For example, the transition from hydraulic to collapse breccia in fluorite-barite deposits coincides with the root of the ore shoot Jébrak, 1984b. This could be expressed by measuring the morphology of fragments in the veins.*

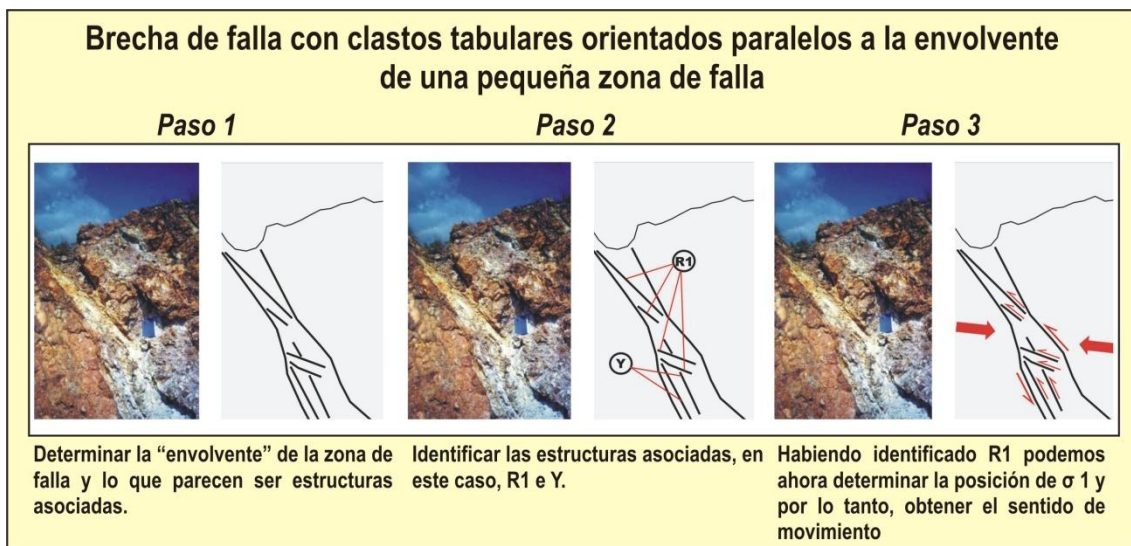
*3. Relationships between brecciation processes and mineral deposition may provide detailed information about the stages of ore deposit formation, possibly allowing reconstruction of the paleopermeability of the system during mineral deposition.*

*Jébrak (1997)*



Clasificación de las brechas asociadas a sistemas mineralizados hidrotermales en fallas y zonas de falla. Adaptada de Jébrak (1992, 1997).

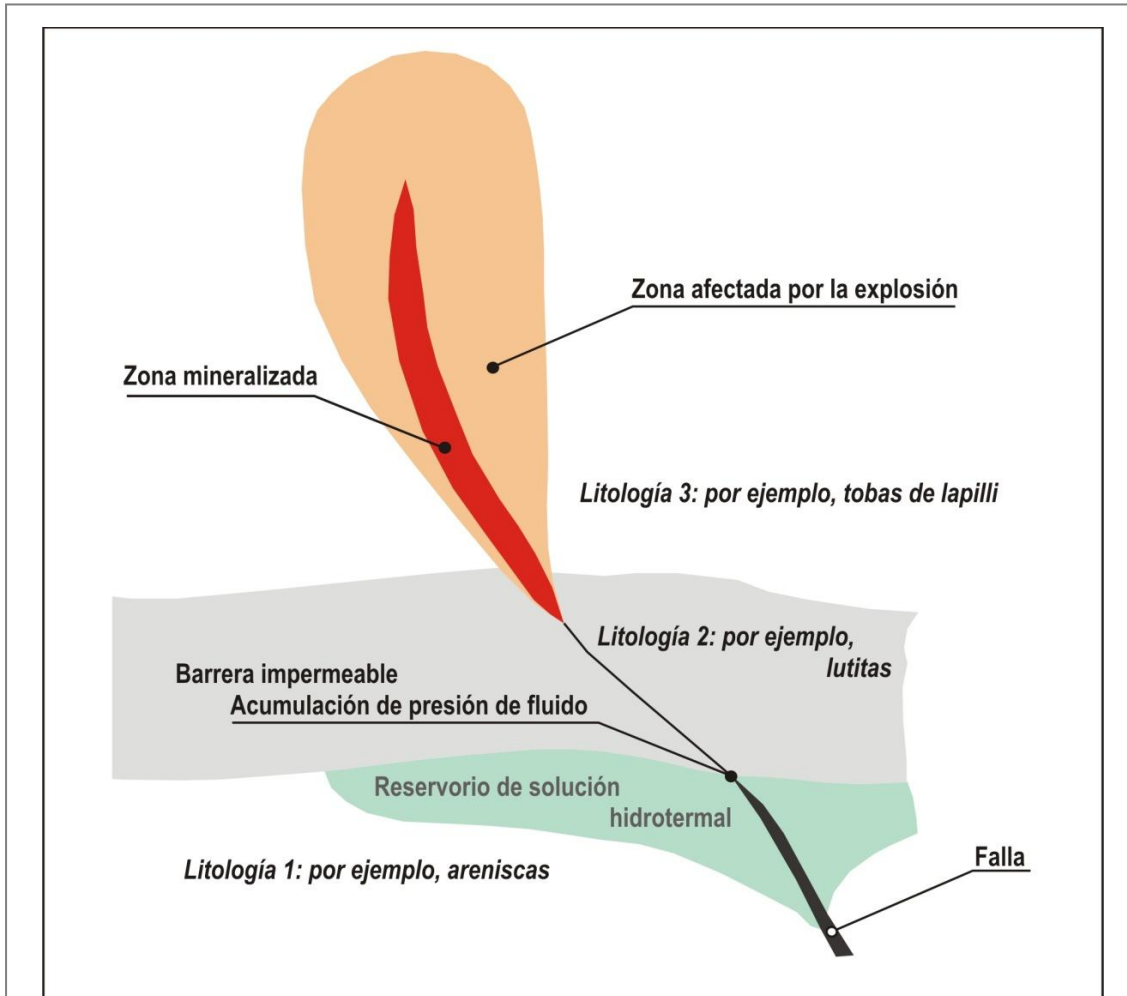
Las brechas de aplastamiento y trituración corresponden a lo que todos llamamos “brechas de falla”, las cuales también tienen su importancia llegado el momento de interpretar una falla o pequeña zona de falla si analizamos la situación integradamente. Ahora veremos porqué las estructuras PYR son importantes más allá de lo puramente académico:



Determinando el sentido de movimiento de una pequeña zona de falla con estructuras YR en la Caldera de Rodalquilar (Almería, España). La brecha se aproxima al tipo de “aplastamiento” de Jébrak (1992, 1997) (ver figura anterior). Note la decoloración de la roca de falla.

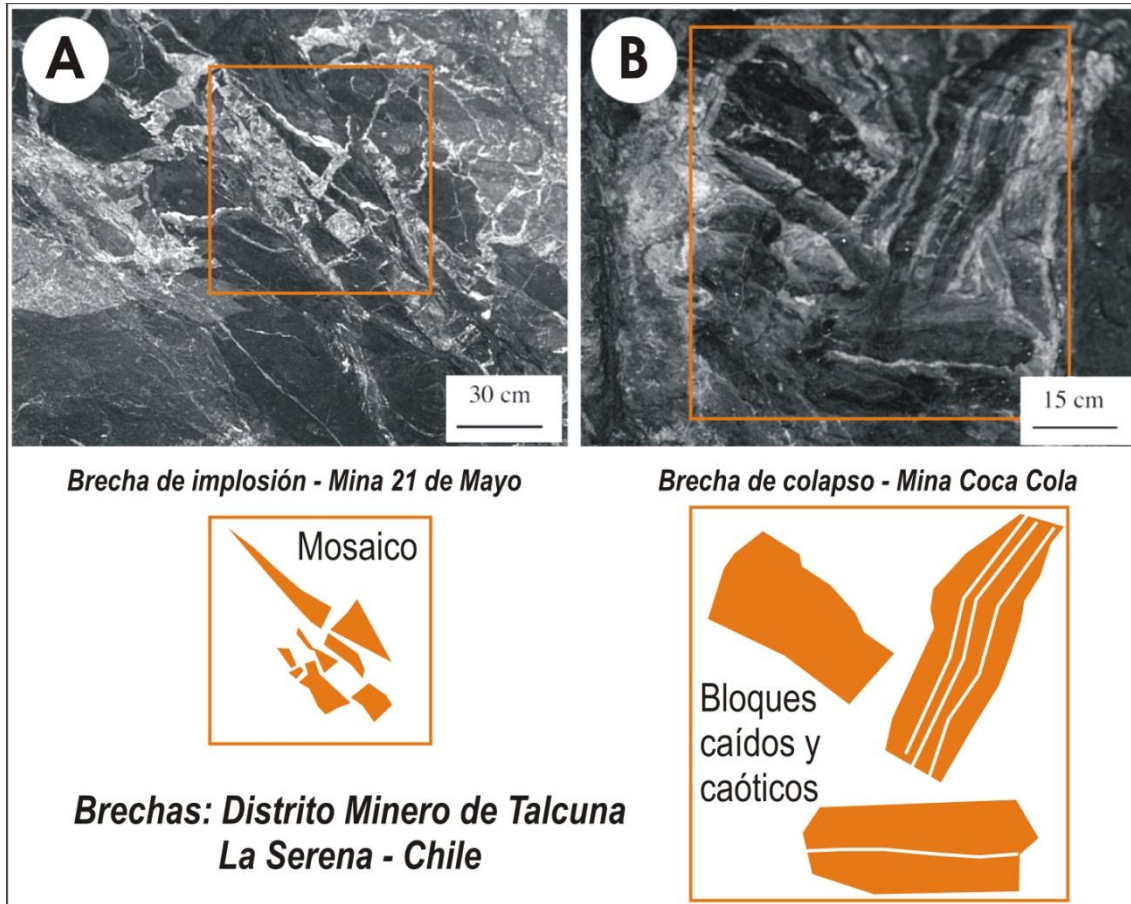
La brechificación hidráulica ha sido ya explicada en los párrafos anteriores, y como comentábamos, se trata básicamente un fenómeno de implosión debido a  $P_l \gg P_h$ . A destacar para su reconocimiento su morfología interna tipo “mosaico”. En lo que respecta a la brechificación por explosión, esta, dependiendo de su magnitud,

puede superar ampliamente el ámbito de la falla. Alternativamente, puede deberse a un proceso de explosión condicionado por la desgasificación violenta de un fluido o magma (por ejemplo, pérdida de CO<sub>2</sub>) generando diatremas como la Roca Frailesca del Distrito Minero de Almadén (Higueras et al., 2013); o puede simplemente corresponder a una explosión freática como suele ocurrir típicamente en el ambiente geotérmico-epitermal, por ejemplo en Rotokawa (NZ) (Krupp y Seward, 1987).



Arriba, explosión hidrotermal con brechificación asociada. Abajo, la Roca Frailesca, Almadén; a la derecha mineralizada con cinabrio (Mina Las Cuevas). Imágenes<sup>19,20</sup>.

Por su parte las brechas de colapso corresponden a fenómenos de relajación en las fallas (aperturas) que permiten el descenso libre de “trozos” de una mineralización previa. A su vez estos pueden ser cementados más abajo por un nuevo episodio de mineralización.



Tipos de brechas en minas del Distrito de Talcuna, La Serena, Chile. Oyarzun et al. (1998).

#### 4.4.3 Espacios, caídas de presión y formación de yacimientos: síntesis

Desde que se entendió el fenómeno de la ebullición de los fluidos hidrotermales como causa mayor de la precipitación de la carga sulfurada, el paso siguiente era entender dónde y por qué se podía producir dicha ebullición. Si bien se suele pensar en una subida de la temperatura como principal causa de la ebullición (p.ej., agua en una tetera), en los ambientes profundos donde se forman los yacimientos más importante la causa principal es la caída de la presión.

Así, si encontramos aquellos sectores en sistemas de falla donde se pueden haber generado rápidas aperturas (cavidades extensionales) en régimen sísmico (rotura-desplazamiento) podremos predecir los lugares donde puede haberse generado ebullición cuasi instantánea. Esos son los lugares más probables para que se haya formado una mineralización.

¿Dónde? Allí donde las fallas o sistemas de falla que estudiamos presenten saltos o inflexiones extensionales. ¿Cómo podremos saber si esos saltos o inflexiones “son” extensionales? Utilizando las herramientas que hemos estudiado en estas secciones: desde los escalones de falla hasta las estructuras PYR.

## 4.5 La transición dúctil-frágil: oro en las profundidades

### 4.5.1 El mundo de los yacimientos mesotermales y las grandes zonas de cizalla

A diferencia del mundo epitermal donde los tipos de yacimientos no varían demasiado y se asocian a litologías y procesos más o menos comunes, el término “mesotermal” es en realidad una categoría donde entra casi de todo. La Open-File Report 2003-77 del USGS los agrupa como “yacimientos de cuarzo-oro bajos en sulfuros” y los siguientes términos son considerados sinónimos (Drew, 2003):

- Oro mesotermal.
- Tipo Mother Lode
- Tipo Homestake
- Oro con cuarzo-carbonatos.
- Oro sinorogénico.
- Oro encajado en turbiditas (p.ej., los *saddle reef*, ver Capítulo 3)
- Sistemas filonianos en terrenos metamórficos.

En esta sección nos centraremos no obstante en uno de los tipos de yacimientos más importantes y las estructuras que los albergan: los yacimientos de oro asociados a zonas de cizalla en cinturones de rocas verdes del Arqueozoico.

Estos yacimientos son típicos del escudo canadiense pero también se encuentran en otras regiones del mundo como Australia. Desde luego no podemos descartar su presencia en terrenos jóvenes como el orógeno andino, caso que analizaremos más adelante.

Los principales rasgos diferenciadores de un yacimiento de oro asociado a zona de cizalla son los siguientes:

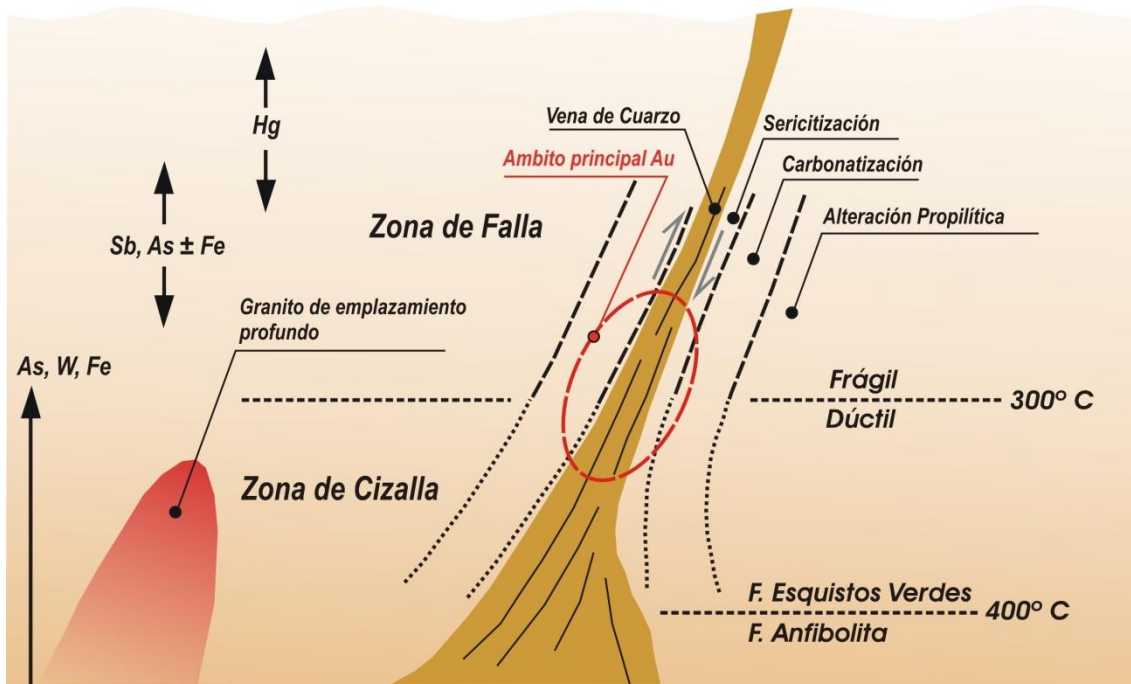
- Su relación directa con grandes zonas de cizalla subverticales transcurrentes con una componente de fallamiento inverso.
- El que estas zonas estén en terrenos del tipo cinturones de rocas verdes.

#### **Characteristics of Low-Sulfide Quartz Gold Deposits**

- Gold-only deposits hosted in granite-greenstone terranes (GGT) associated with major transcurrent strike-slip faults.
- Mineralization is sporadic along these faults, yet often continuous to great depth where it does occur.
- Ore shoots can have many forms that are related to the wide variety of second and third-order structures that can develop in (or be used by) strike-slip fault systems.
- The hydrothermal fluid is near neutral, rich in CO<sub>2</sub>, and produced by metamorphic reactions.
- Intense carbonate alteration is always present.
- Mineralization is often contemporaneous with spatially associated granitic intrusions, but not genetically related to them.
- Mineralogy of deposits is limited, in descending order, to quartz, carbonates, alkali feldspar (usually albite), sericite, pyrite, and minor amounts of tourmaline, arsenopyrite, scheelite, molybdenite. No significant base metals (copper, lead, zinc, etc.) occur.

Drew (2003)

- La presencia casi ubicua de granitos contemporáneos o ligeramente más jóvenes que la zona de cizalla.
- Un metamorfismo profundo en grado de anfibolitas gradando hacia arriba a facies de esquistos verdes.
- Una carbonatación del entorno.
- El oro asociado a cuarzo y/o carbonatos.
- El emplazarse en la transición dúctil-frágil.
- Cuerpos con una morfología filoniana (*lodes*)

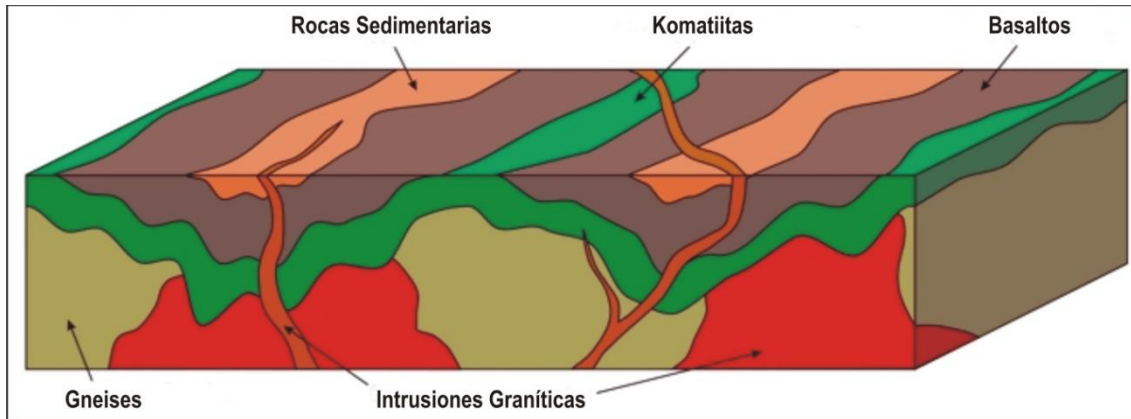


Relaciones entre la zona de cizalla, facies de alteración y metales en una zona de cizalla aurífera. Modelo basado en Sibson (1990), Goldfarb et al. (1995) y Drew (2003).

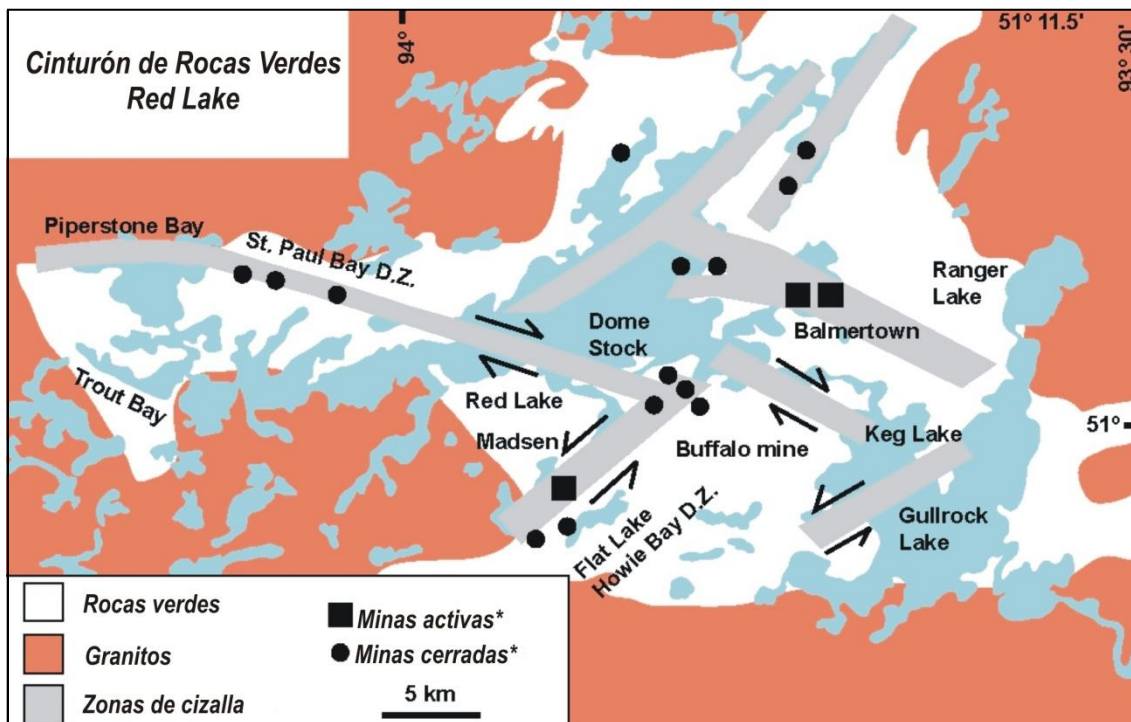
El que los yacimientos de este tipo se localicen principalmente en la transición dúctil-frágil obedece a que para formar filones hacen falta “espacios”, esto es, que la roca se rompa para generarlos. A su vez estos espacios cumplen un papel doble, por un lado permiten el movimiento de los fluidos y por otro acaban albergando la masa mineral una vez que las soluciones precipitan su carga metalífera. Huelga decir que en la zona dúctil las rocas fluyen, esto es, no se rompen.

El otro punto destacable para configurar cualquier modelo de exploración es el hecho de que casi siempre se asocian a regiones con cinturones de rocas verdes e intrusiones graníticas. Los cinturones de rocas verdes (*greenstone belts*) son una peculiaridad del Arqueozoico ya que contienen entre otras rocas las llamadas komatiitas, es decir, lavas ultramáficas, formadas en momentos en los que el gradiente geotérmico de la Tierra era mucho más alto, como para permitir la fusión-extrusión de material del manto. Otras rocas que se incluyen en un cinturón de

rocas verdes son los basaltos, riolitas y rocas sedimentarias, aunque el espectro de facies sedimentarias e ígneas puede ser mucho más amplio.



Esquema simplificado 3D de un cinturón de rocas verdes. Imagen<sup>21</sup>.



Relaciones regionales entre rocas verdes, zonas de cizalla, intrusiones graníticas y mineralizaciones auríferas en Ontario (Canadá). Tomada y modificada de Oyarzun et al. (2004).

\*: Marzo de 2000.

#### 4.5.2 Entendiendo las zonas de cizalla auríferas: en busca del oro (I)

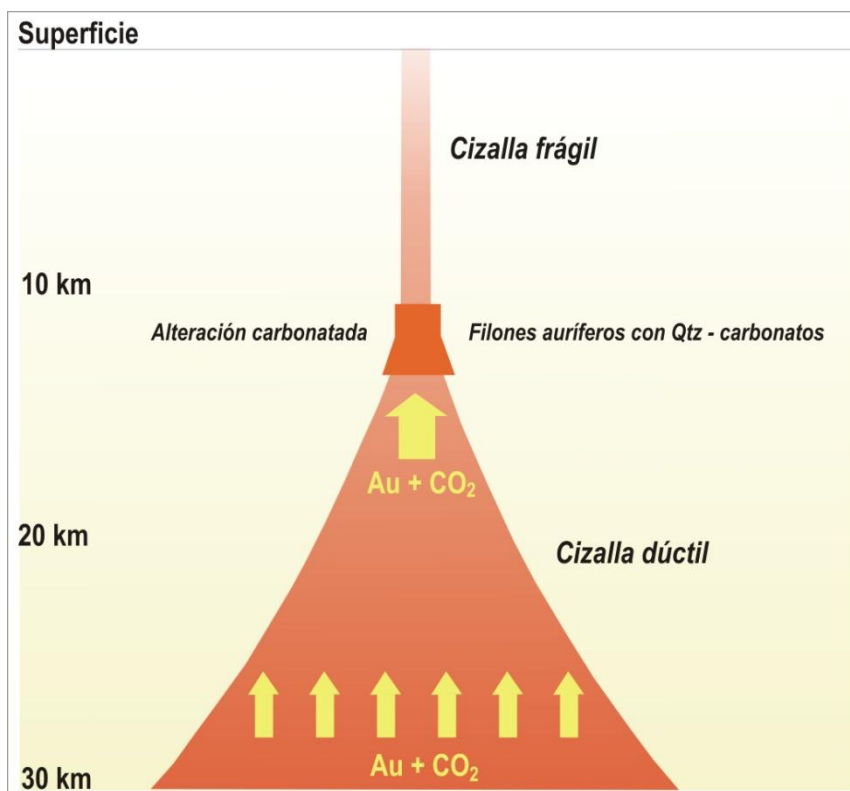
Si bien la relación de las zonas de cizalla con las mineralizaciones auríferas es ampliamente reconocida en países como Canadá y Australia, donde estas grandes estructuras son relativamente comunes, en el ámbito andino aun se desconoce el potencial de las grandes estructuras de este tipo, tema sobre el que volveremos más adelante.



Como ya hemos mencionado, la mayor parte de las mineralizaciones asociadas a zonas de cizalla se encuentran asociadas a la transición dúctil-frágil de las mismas, donde pueden generarse un mayor número de estructuras de apertura discreta para albergar las mineralizaciones.

Aunque el objetivo de esta obra no es el de entrar en “disquisiciones filosóficas” sobre el origen último de los metales, bien vale la pena aquí no obstante referirnos a ello brevemente. La razón para esta pequeña “desviación” de la línea principal de este trabajo radica en que, de alguna manera, podemos relacionar la presencia de mineralizaciones en la transición dúctil-frágil con la migración de fluidos en una gran zona de cizalla.

Una explicación interesante es la de Cameron (1989), quien propuso que los fluidos durante su migración hacia niveles estructurales superiores precipitan necesariamente su carga metalífera en la transición de dúctil a frágil. La razón sería la siguiente: las grandes zonas de cizalla presentan un fuerte estrechamiento hacia arriba (imaginemos un embudo invertido en sección), lo cual permite que los fluidos mineralizados (provenientes de vastas zonas de la corteza inferior) se “concentren” en corredores progresivamente más estrechos, coincidiendo (como no) con la zona transicional dúctil a frágil.



Modelo conceptual de Cameron (1989) para la formación de yacimientos de oro con importante carbonatación, en la transición dúctil a frágil de una zona de cizalla. El ancho inferior de la zona de cizalla ha sido fuertemente exagerado para explicar de una forma visual simple el proceso de concentración.

Las razones que avalan la idea de Cameron (1989) son entre otras:

- El hecho de que la zona dúctil de las zonas de cizalla (ahí donde se han podido observar) se encuentren notablemente empobrecidas en oro con respecto a su entorno.
- Que las mineralizaciones auríferas “sólo” se encuentren desde la transición dúctil-frágil hacia arriba.
- Que lo importante de la zona de transición es que es allí donde las rocas empiezan a dejar de “fluir” y por lo tanto comienzan a “romperse” si están sometidas a un esfuerzo deformativo.
- Es justamente a lo largo de esas “roturas” por donde los fluidos migrarán y precipitarán su carga mineral (generación de espacios → descompresión → ebullición → precipitación).
- Las primeras fracturas en formarse serán las típicas de la transición dúctil-frágil, esto es, las grietas de tensión, que pueden albergar la carga aurífera precipitada.

A estas observaciones habría que agregar el papel de las intrusiones graníticas contemporáneas, las cuales también pueden jugar un papel importante en los procesos mineralizadores. Al respecto, ¿no resulta al menos “curioso” que siempre haya granitos en el entorno de estas mineralizaciones auríferas? Nada como las intrusiones para que pasen cosas interesantes en la formación de yacimientos minerales.

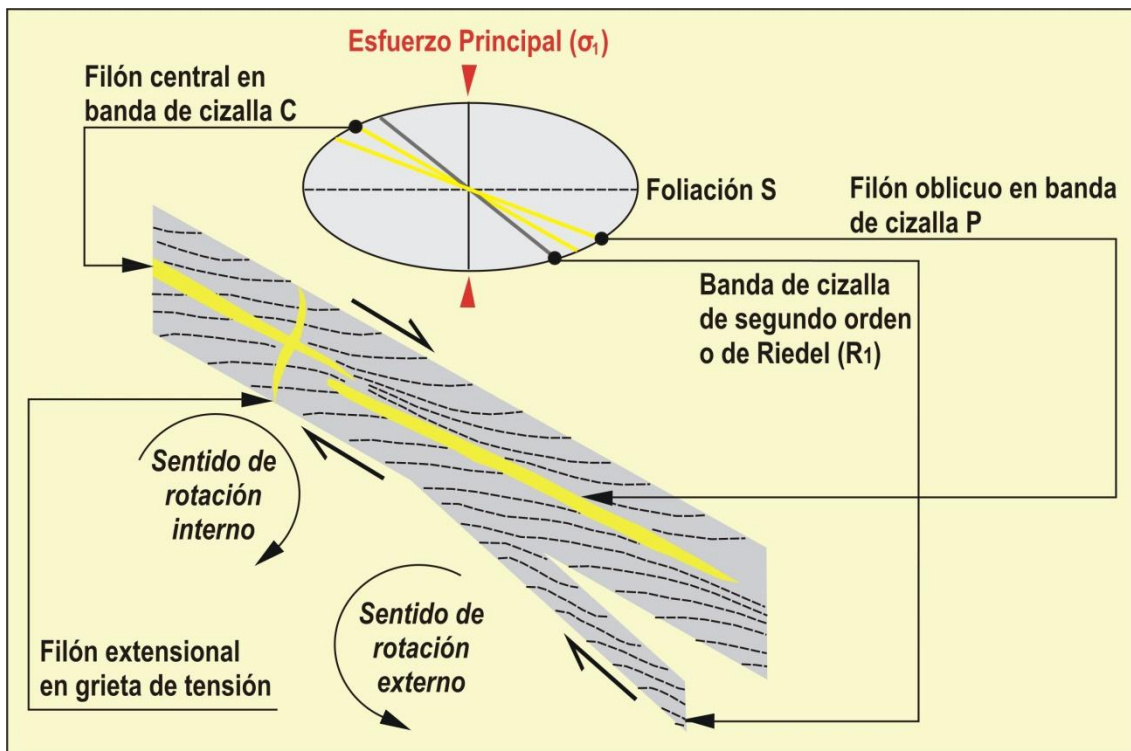
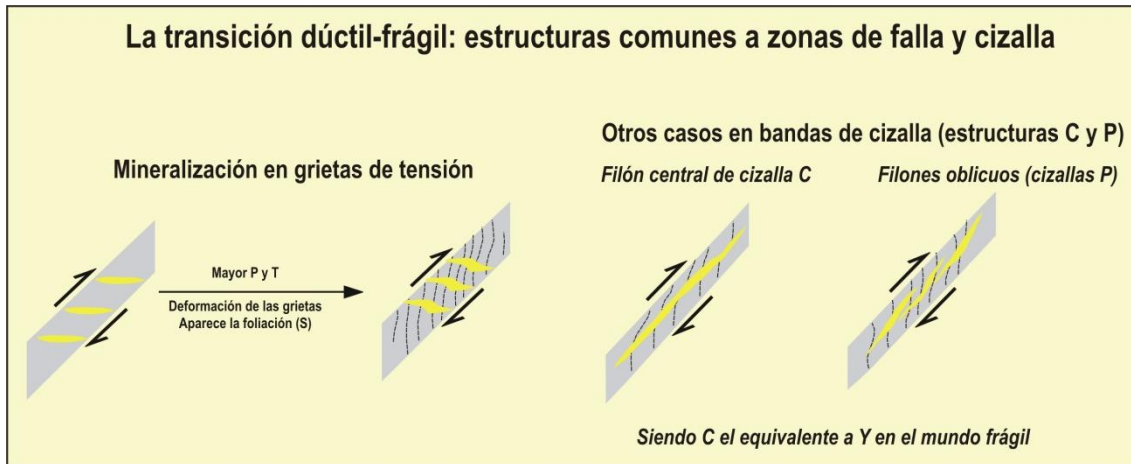
*The structure of vein-type gold deposits is defined by the shapes and geometrical relationships of mineralized bodies, the form of the mineralization making up these bodies, and the sequence of vein-forming events. Most mineralized zones occur within, or are spatially associated with shear zones, especially shear zones in larger systems of intersecting shear zone sets. They range in shape from tabular to linear, and in form from disseminated, to breccia, to stockwork or sheeted veinlet zones, to single veins. There typically is a complex history of mineral deposition which overlaps, and is genetically related to, the deformation that generated the host structural zone.*

Hodgson (1989)

#### 4.5.3 Estructuras típicas de las zonas de cizalla auríferas: en busca del oro (II)

Las estructuras más comunes en la transición dúctil-frágil tienen reminiscencias de aquellas que encontramos en las zonas de falla (mundo frágil: estructuras PYR) y zonas de cizalla (mundo dúctil: estructuras C-S). Entre estas podemos distinguir las siguientes (Hodgson, 1989):

- Filones centrales albergados en fracturas generadas por dilatación de cizallas C y oblicuas por dilatación de cizallas P.
- Venas extensionales albergadas en grietas de tensión.



La coexistencia de estructuras frágiles y dúctiles en zonas de cizalla auríferas. Adaptada y modificada de Hodgson (1989).

#### 4.5.4 Seguir las reglas del juego tiene sus ventajas: en busca del oro (III)

La prospección moderna de yacimientos auríferos asociados a zona de cizalla tiene sus reglas del juego, estas son 100 x 100 geológicas y no particularmente complejas. Llevados al absurdo hagámonos la siguiente pregunta: ¿podría alguien prospectar o evaluar las posibilidades de un yacimiento aurífero en Canadá sin ni tan siquiera acercarse a la mina? Aquí viene lo interesante, ya que la respuesta es un rotundo sí y se encuentra relatada con mayor detalle en un trabajo publicado hace unos años atrás (Oyarzun et al., 2004).

En Marzo de 2000 la compañía minera canadiense Goldcorp Inc. propuso una de las ideas más notables que ha habido en el mundo de la exploración de yacimientos metálicos. A través de Internet propuso un concurso de ideas de prospección aurífera para aumentar las reservas auríferas de su yacimiento Red Lake (Ontario, Canada). En este concurso (*The Challenge: El Desafío*), podían participar individuos, grupos, compañías, o instituciones.

A tal efecto, y he aquí una de las grandes ideas de la Goldcorp, la compañía puso a disposición de los participantes toda su base de datos geológicos del yacimiento Red Lake, así como una substancial información concerniente a la geología regional en la que se insertaban la mineralización de la Red Lake y otras del mismo tipo. Estas mineralizaciones son del tipo zona de cizalla aurífera, y están emplazadas en rocas del Arqueozoico incluyendo komatiitas, peridotitas, basaltos, andesitas, riolitas, BIF, metasedimentos, granitos, etc.

Hacia finales de Julio del 2000 la página web del Challenge había sido visitada más de 475.000 veces y en el concurso se registraron más de 1400 prospectores “on-line” representando a 51 países. Uno de esos equipos lo integraba un profesor de la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM y varios alumnos de doctorado que en ese momento cursaban la asignatura de “Exploración de Yacimientos Minerales: el Papel del Geólogo”.

Como resultado de su trabajo el equipo de la UCM consiguió uno de los premios de semifinalista del concurso, junto a geólogos de Australia, Canadá, Rusia, y USA. A continuación mostramos de manera sintética el modelo de exploración (Oyarzun et al., 2004) que se presentó a la compañía Goldcorp. Este informe se

### **Goldcorp The Challenge**

*Rob McEwen was sitting on a fortune; the trouble was he didn't know exactly where it was located.*

*It's the year 2000 and the CEO of Goldcorp Inc., a gold producer headquartered in Vancouver, Canada was concerned about an underperforming mine in Ontario. The company's Red Lake mine was only producing a relatively small 50,000 ounces of gold a year at a high cost of \$360 an ounce. The main deposits were deeper underground, but his company's geologists were not sure of the exact location of the precious metal.*

*McEwen wanted new ideas of where to dig and he figured that if his Red Lake employees couldn't find the gold then someone else would be able to.*

*So he triggered a new gold rush by issuing an extraordinary challenge. He put all his company's geological data (which went back as far as 1948) into a file and shared it with the whole world. McEwen hoped that outside experts would tell him where to find the next six million ounces of gold. In return he offered \$575,000 in prizes to the participants with the best methods ...*

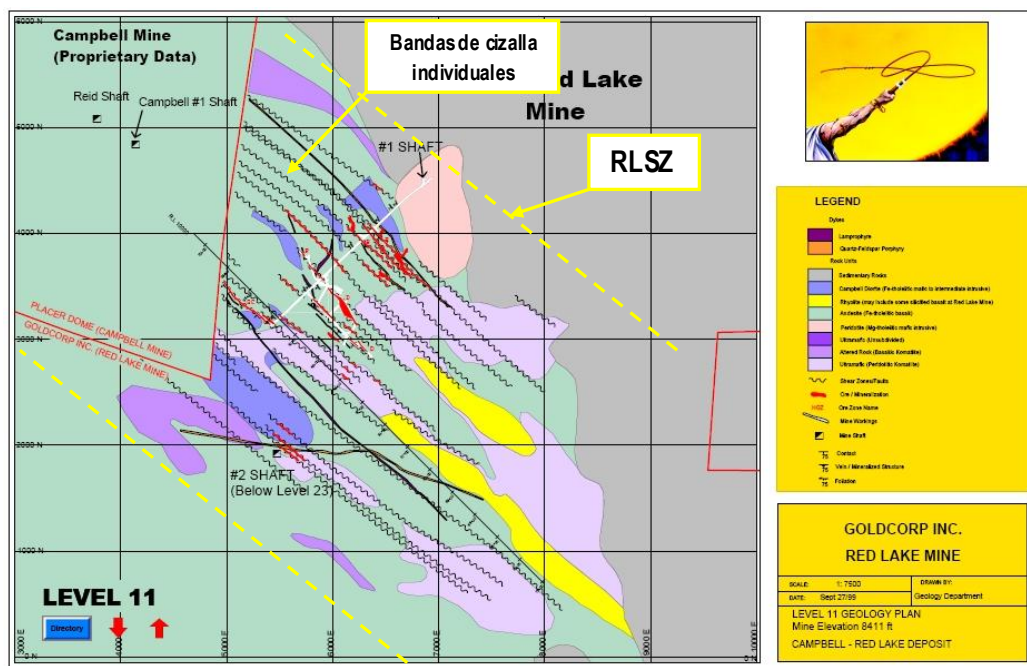
*... In all more than 110 sites were identified and 50% of these were previously unknown to the company. Of these new targets, more than 80 per cent yielded significant gold reserves. McEwen believes that this collaborative process cut two, maybe three years off the company's exploration time. And the worth of this gold has so far exceeded \$6 billion in value. The prize money was only a little over half a million dollars, so it was a fantastic value for money investment, and much cheaper than continuing with unproductive exploratory drilling.*

*By going outside his company's walls McEwen turned Goldcorp from a struggling enterprise into one of the most profitable in the industry.*

*Idea Connection (2013)*

basó en gran medida en ideas muy parecidas a las que hemos tratado en las secciones sobre zonas de falla y cizalla de este capítulo.

- El primer paso consistió en realizar un estudio pormenorizado de la geología regional y local. El análisis específico del entorno de la mina Red Lake permitió entender que la geología incluía una compleja sección de un cinturón de rocas verdes que había sido fuertemente plegado y cizallado. La inspección de las múltiples bandas de cizalla locales permitió a su vez determinar que estas eran parte de una gran zona de cizalla que fue denominada como Red Lake Shear Zone (RLSZ). La banda tiene una orientación general NW y un fuerte buzamiento al SW.



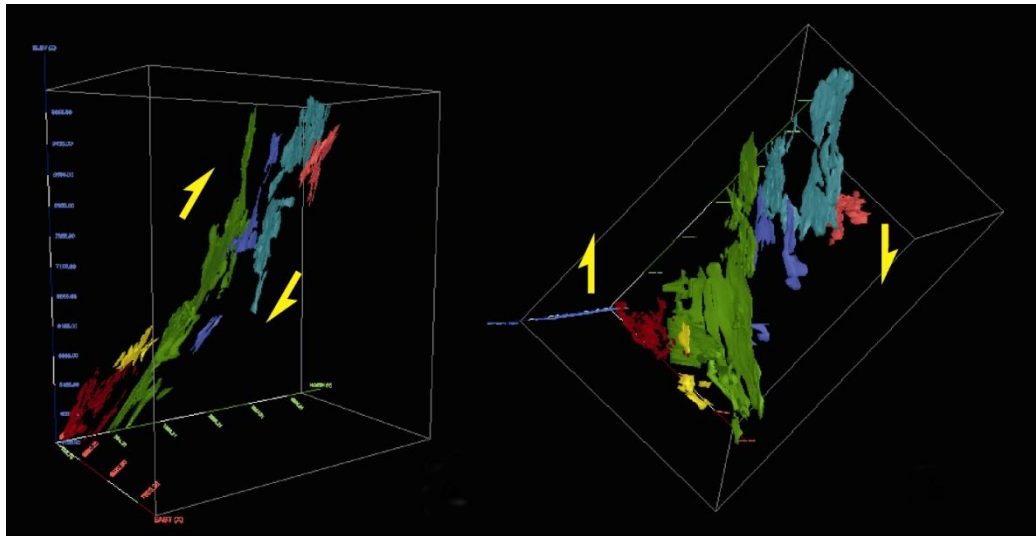
La Zona de Cizalla Red Lake (RLSZ) en el nivel 11 de la mina.

- Una vez aclarada la situación geológica se pasó a estudiar el tema de los cuerpos mineralizados, cuya morfología filoniana seguía la estructura general definida por la RLSZ. Aunque parezca obvio en muchos sentidos, dejemos aquí claro que cualquier trabajo de mina empieza por la geología, sin esta, difícilmente podremos entender nada. El análisis espacial de los cuerpos mineralizados se realizó utilizando un programa especial diseñado para la ocasión denominado *Gemcom Viewer Edition*. Esto permitió

Goldcorp announced the details of "the Challenge" at the Prospectors and Developers Association of Canada/(PDAC)/Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM) annual, international conference in Toronto. "Challenge" software designers Gemcom Software International, Inc. demonstrated a special configured system called the Gemcom Viewer Edition, which will be provided free to all participants to allow them to interactively view 2D and 3D geological and Red Lake Mine data provided by Goldcorp.

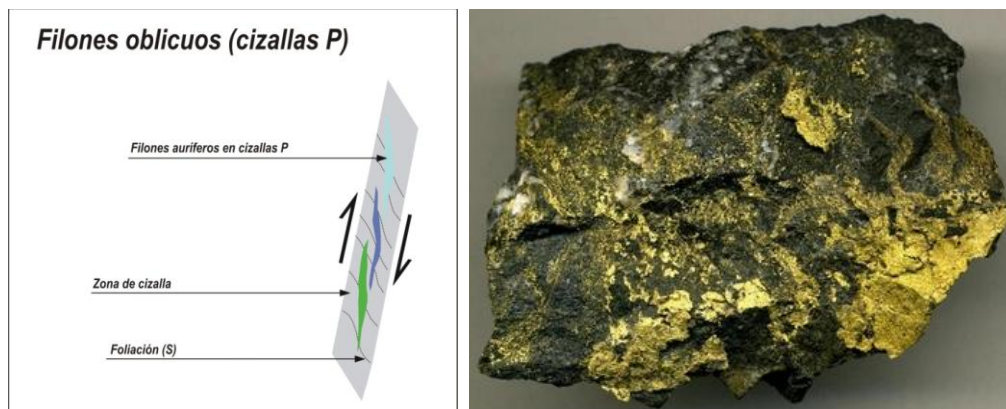
Infomine.com (2000)

visualizar en 3D tanto los cuerpos mineralizados como los sondeos de la empresa y su información litológica, estructural, de alteración, y geoquímica.



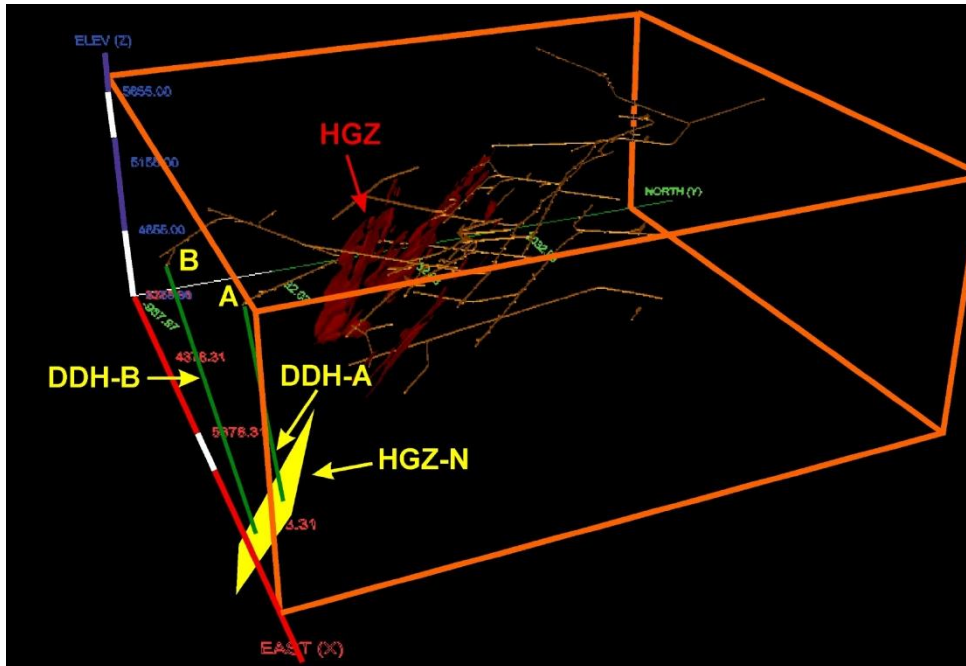
Proyección 3D de los cuerpos mineralizados (en distintos colores) en echelón y una interpretación del sentido de movimiento a lo largo de la RLSZ.

- Una cosa es proyectar cuerpos en el espacio y otra muy distinta entender el significado de esa distribución. Aplicando los conocimientos sobre distribución de cuerpos mineralizados potenciales en una zona de cizalla (Hodgson, 1989), se pudo constatar que la interpretación más aceptable para el movimiento de la RLSZ era el de una zona de falla con un componente lateral dextral y otro inverso (de gran ángulo), con desarrollo de cuerpos mineralizados ocupando cizallas de tipo P (ver figura abajo).



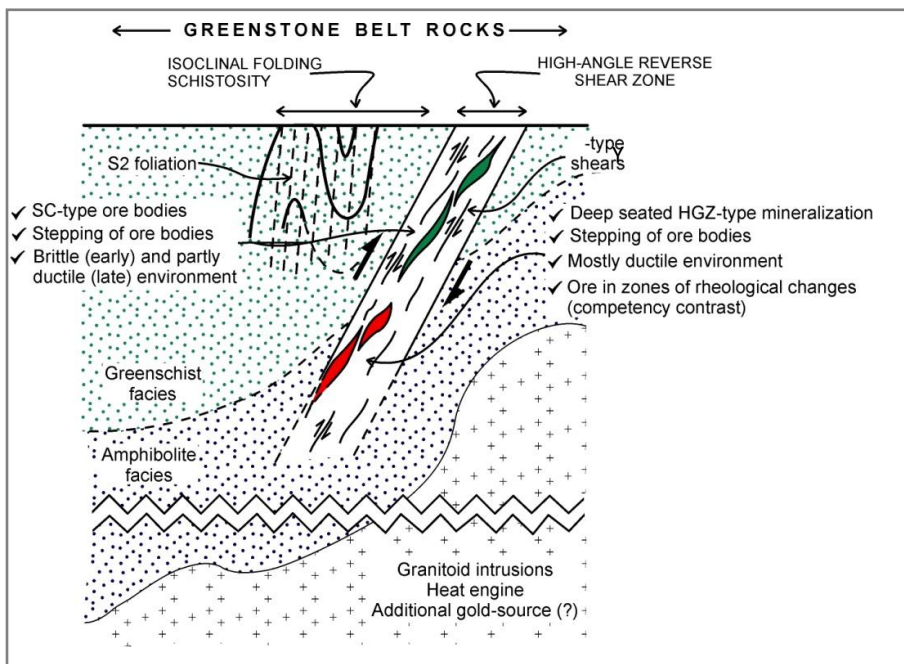
Filones auríferos en cizallas P dentro de una zona de cizalla (Hodgson, 1989). A la derecha, muestra de la mineralización aurífera de la Red Lake (imagen<sup>22</sup>).

- Con el movimiento de la RLSZ aclarado se pasó a elaborar un modelo predictivo 3D para la presencia de un cuerpo mineralizado profundo aún no detectado mediante el procedimiento intuitivo de “seguir la estructura en profundidad hacia abajo y hacia la izquierda”.



Propuesta de un blanco profundo (HGZ-N) y sondeos de exploración (DDH-A y DDH-B).

- Sabemos que se han encontrado más filones auríferos bajo la High Grade Zone (HGZ) aunque no su localización específica. Cualquiera sea el caso, el haber podido avanzar en *The Challenge* muestra claramente que la aplicación de las reglas de geología estructural permite plantear modelos adecuados de exploración. En este sentido, el equipo de la UCM fue más lejos, y utilizando el análisis de la historia deformativa y plutónica de la región propuso además un modelo regional de exploración:



Modelo regional conceptual de exploración para yacimientos tipo Red Lake en Ontario.

#### 4.5.5 ¿Zonas de cizalla aurífera en los Andes? en busca del oro (IV)

Si bien la relación de zonas de cizalla con mineralizaciones auríferas es ampliamente conocida en países como Canadá y Australia, en el ámbito andino aun dista mucho de establecerse el potencial real de las grandes estructuras de este tipo, por ejemplo, la Zona de Falla de Atacama (ZFA).

La ZFA podría considerarse en muchos aspectos como un “análogo moderno” de las grandes zonas de cizalla del escudo canadiense, eso sí, con su propias peculiaridades.

Por ejemplo, más allá de la zona de falla frágil más comúnmente conocida, en la ZFA se reconocen fábricas dúctiles típicas de las milonitas con estructuras SC. Es posible que la transición del mundo frágil al dúctil haya que buscarlo hacia el Cretácico Medio, cuando la desaparición paulatina del arco volcánico Neocomiense tiene que haber enfriado la corteza de tal manera que de un gradiente geotérmico anómalo se pasó a otro normal (Brown et al., 1993). Dado que la clave para la existencia de estructuras dúctiles depende de la temperatura del sistema, esta explicación parece más que razonable.

Bajo el punto de vista de la exploración de recursos minerales, el Cretácico Medio aparece como uno de los más interesantes en el norte de Chile, con la formación de yacimientos de hierro (tipo Kiruna) y cobre-hierro (tipo IOCG). Al respecto convendría puntualizar algunos hechos:

- Los yacimientos de hierro tipo Kiruna de la Faja Cretácica de Chile se emplazaron preferencialmente a lo largo de la ZFA.
- Yacimientos de Cu-Fe-(Au) tipo Candelaria se encuentran inmediatamente al este de la ZFA.
- El conjunto de rocas de la época está caracterizado por formaciones volcánicas andesíticas y plutónicas graníticas del arco magmático.
- Que al menos parte del magmatismo se verificó bajo condiciones extensionales de rifting.

*In the Cordillera de la Costa of the central Andes in northern Chile, Mesozoic arc complexes are cut by a trench-parallel strike-slip fault system: the Atacama fault system. Brittle faulting in the **Atacama fault system** is superposed on steeply dipping foliations in ductile shear belts. Between 25°S and 27°S, the western part of the fault system was active in Early Cretaceous time as an upper amphibolite facies, down-to-the-east, dip-slip ductile shear zone. In the eastern part of the fault system, ductile deformation is of similar Early Cretaceous age but occurred under lower-grade metamorphic conditions at the greenschist/lower amphibolite facies transition. The mylonites in the eastern part of the fault system were formed by sinistral strike-slip displacement ...*

*... Subhorizontal slickenlines, ripout asymmetry, and S-C-type fabrics in fault gouge indicate that brittle deformation involved sinistral strike-slip displacements. The transition from ductile to brittle sinistral strike-slip displacements may have occurred due to cooling, in mid-Cretaceous time, when the magmatic arc was abandoned.*

*Brown et al. (1993)*

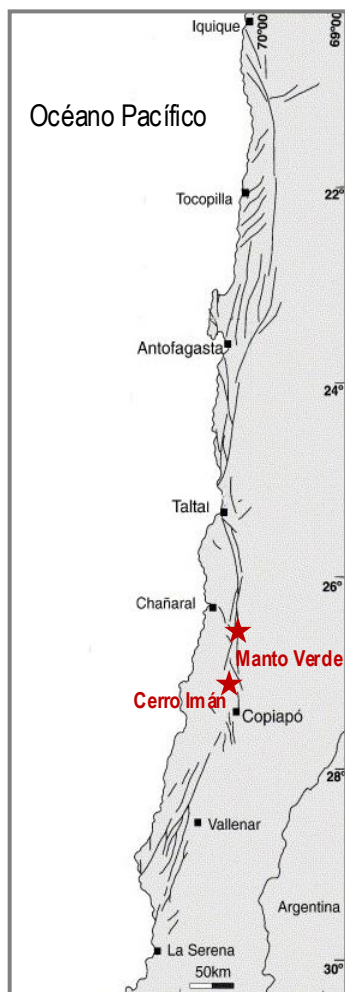


Puede que resulte temerario proponer un análogo entre los cinturones de rocas verdes (con komatiitas, basaltos, sedimentos) y las formaciones volcano-sedimentarias del norte de Chile, como Bandurrias en la Región de Copiapó. Qué duda cabe que ni litológica ni tectónicamente coinciden demasiado, pero tienen elementos en común, siendo el más obvio el vulcanismo y el segundo, las condiciones de rifting, como se ha podido constatar en los cinturones de rocas verdes de Australia (Blake y Groves, 1987).

... This completely changed the tectonic setting of Chile ending the Early Cretaceous extensional period (aborted rifting in the back-arc basin), and increasing stress at a crustal scale. As a consequence, overpressurized dioritic magmas were pushed up mainly along the best possible structural path in northern Chile, i.e., the Atacama Fault Zone, eventually forming a +500-km-long belt of Kiruna-type iron deposits with reserves of 2,000 Mt (60% Fe), a unique case in Chile's geological history.

Oyarzun et al. (2003)

Así pues, no habría que descartar del todo la ZFZ como posible blanco regional para unas mineralizaciones auríferas, que de existir, igual no serían demasiado diferentes a las de Canadá o Australia. De hecho, como señalan Vivallo et al. (1994), el oro también se asocia a algunas de estas mineralizaciones de hierro, como en el caso del yacimiento de Cerro Imán (ver figuras de esta y la siguiente página).



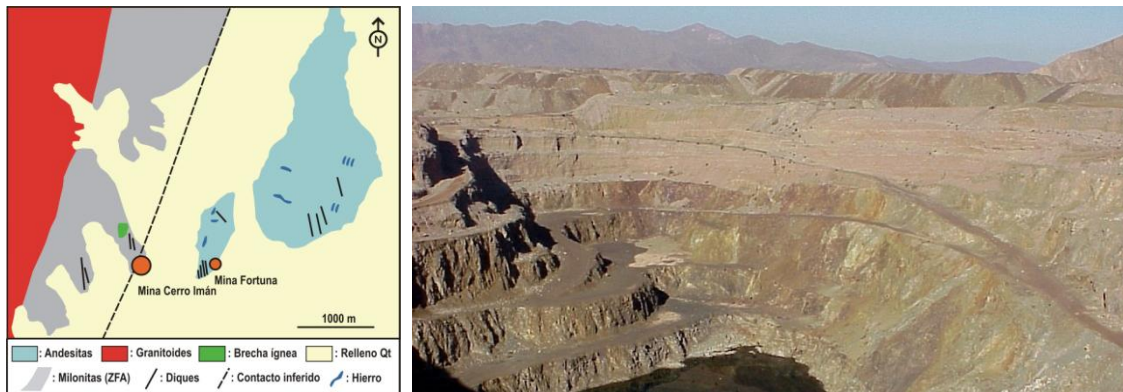
La ZFA (Norte de Chile) y los yacimientos Manto Verde y Cerro Imán.

Así, puede que de alguna manera los yacimientos que han sido catalogados como IOCG (*Iron Ore Copper Gold*) en esta región de Chile sean en el fondo parte de una historia que se relaciona directa o indirectamente con la evolución de ZFA en su tránsito dúctil-frágil durante el Cretácico Medio; por ejemplo yacimientos como Manto Verde (Benavides et al., 2007).

Al respecto, da la impresión que el término IOCG, se va progresivamente transformando en una auténtica "burbuja conceptual", que no hace más que crecer y crecer, alejándose al mismo tiempo y de manera rápida de la idea original definida por las características geológicas y metalogénicas del yacimiento de Cu-Fe-Cu-U de Olympic Dam en Australia.

En este sentido, cabe preguntarse ¿dónde está el uranio de la mayoría de los IOCGs? Por otro lado, que un yacimiento tenga cobre, hierro y oro tampoco es algo tan excepcional como para hacer

una categoría propia a partir de una asociación relativamente común y corriente.



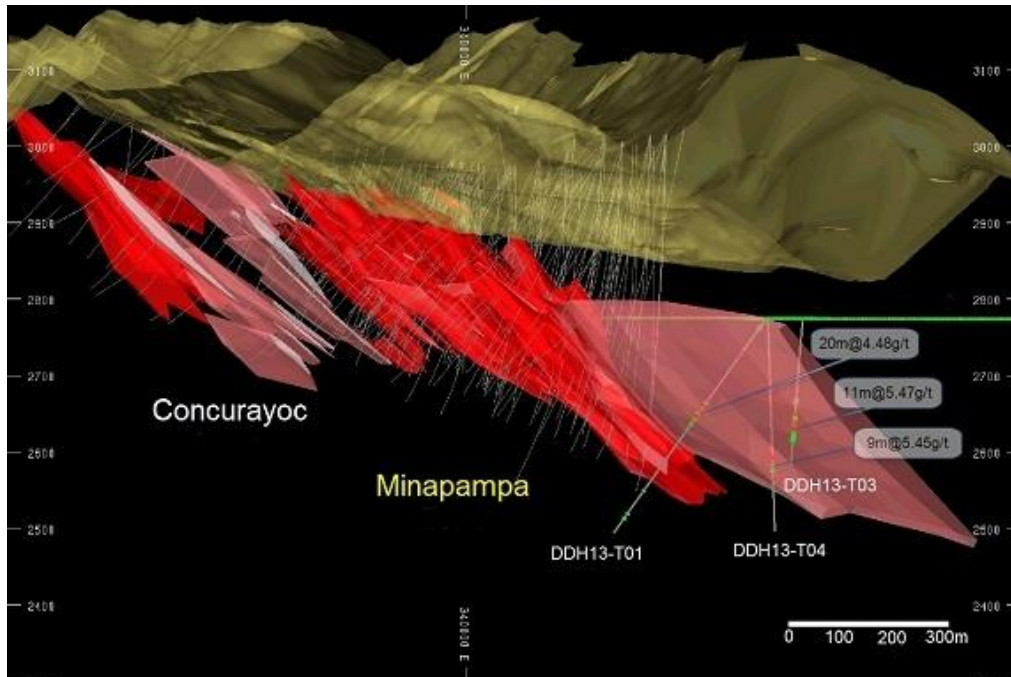
A la izquierda, geología de la mina de hierro Cerro Imán (Faja Cretácica del Hierro de Chile) y su estrecha asociación con milonitas de la ZFA. Adaptada y simplificada de Vivallo et al. (1994). A la derecha, la Mina Cerro Imán (imagen<sup>23</sup>).

Ya para terminar, si hablamos de los yacimientos de la ZFA, no perdamos de vista lo más obvio y evidente, que si la idea es “canalizar” magmas y fluidos, no hay nada mejor que una megazona de falla.

Dejando ya de lado el tema de los IOCGs, recordemos que como discutimos anteriormente, las “zonas de cizalla” gradan en altura hacia “zonas de falla” y en este ambiente también podemos encontrar yacimientos auríferos del tipo mesotermal. En este sentido, como comentábamos en el Capítulo 3, también se ha sugerido (Groves et al., 1998) que los yacimientos “mesotermales” deberían ser catalogados como “yacimientos orogénicos de oro” (*orogenic gold deposits*). En la opinión de Groves et al. (1998), la característica más constante de estos yacimientos sería su asociación con terrenos metamórficos deformados “de todas las edades y tipos”, incluyendo los cinturones de rocas verdes del Arqueozoico y fajas metamórficas del Fanerozoico.

Por ejemplo, en la Región de Puno (Perú) se han definido una serie de yacimientos/prospectos auríferos clasificados genéricamente como del tipo “oro orogénico” en la faja paleozoica La Rinconada-Ollaechea (Valdivieso, 2011). De acuerdo a este mismo autor estos yacimientos encajan en pizarras negras con disseminación de pirita y sulfuros removilizados.

Los yacimientos de oro de esta región se asociarían al emplazamiento de intrusivos de composición intermedia de edad Paleozoica. La mineralización aurífera y sulfuros de Fe-As aparece disseminada en los bordes y fracturas de venas y venillas de cuarzo deformadas, lenticulares y paralelas a la estratificación.



La mineralización de Ollaeschea. Adaptada de Minera IRL (2010).

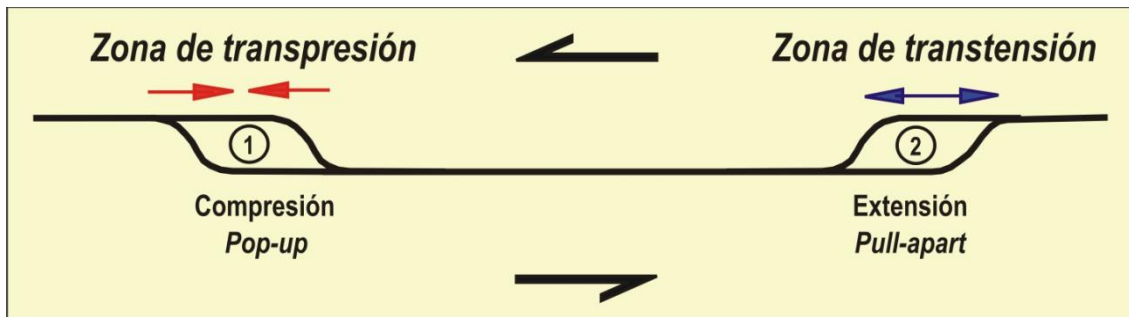
Con este ejemplo queremos mostrar que, efectivamente, estos yacimientos de oro pueden encontrarse en los más diversos ambientes, teniendo sin embargo siempre (en común) un fuerte control estructural.

## 4.6 Más allá de los fluidos: vulcanismo, plutonismo y sistemas de fallas

### 4.6.1 Emplazando rocas volcánicas y sub-volcánicas

¿Por qué el vulcanismo se concentra en ocasiones en lugares específicos? La respuesta a esta pregunta hay que buscarla en las condiciones tectónicas de una región. El vulcanismo, siendo la expresión superficial del magmatismo profundo, necesita espacios para ascender. Si bien el mecanismo último de una erupción se corresponde a las particulares condiciones de la cámara magmática (incluyendo la acumulación de volátiles en ésta), su expresión regional requiere de condiciones principalmente extensionales. Estas condiciones no tienen porqué ser “globales” en una determinada región, y pueden estar restringidas a los lugares donde, a pesar de la existencia de un régimen de compresión, se han creado condiciones locales de extensión.

Aquí es donde las zonas de falla pueden también jugar un papel decisivo porque, como hemos podido apreciar a través de este capítulo, crean condiciones locales de compresión (*transpresión*) y extensión (*transtensión*) en función de sus inflexiones, saltos y la posición de  $\sigma_1$ .



Desarrollo de un pop-up (1) en un lazo sigmoidal sujeto a compresión, mientras que en (2) las condiciones de esfuerzo generan en el sigmoide una cuenca tipo pull-apart en régimen de transtensión.

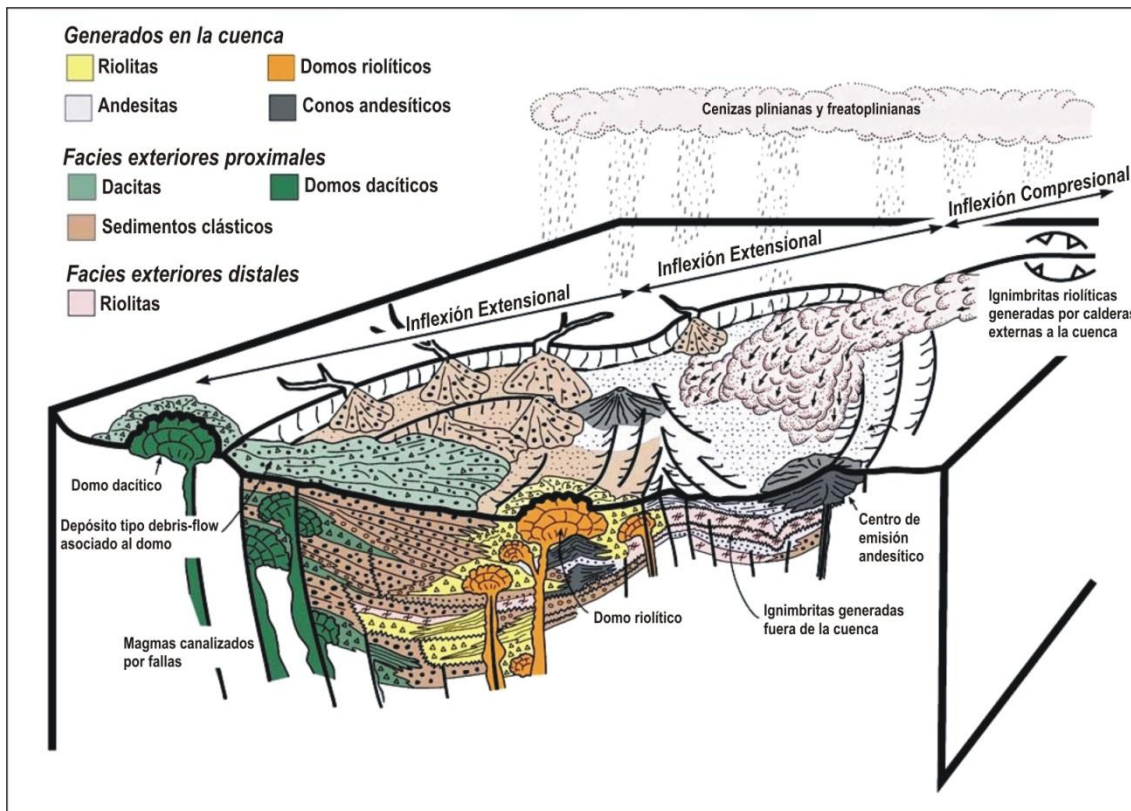
En este sentido, si un sistema de fallas es lo suficientemente grande y profundo, las cuencas tipo *pull-apart* pueden constituir los sitios preferenciales para la manifestación de fenómenos volcánicos y sub-volcánicos (emplazamientos de domos), aún si el régimen tectónico general es compresivo.

La siguiente figura ilustra de manera magistral las múltiples relaciones entre cuencas *pull-apart* generadas por inflexiones extensionales en un sistema de fallas. La geología de la

*The three-dimensional arrangement of volcanic deposits in strike-slip basins is not only the product of volcanic processes, but also of tectonic processes. We use a strike-slip basin within the Jurassic arc of southern Arizona (Santa Rita Glance Conglomerate) to construct a facies model for a strike-slip basin dominated by volcanism. This model is applicable to releasing-bend strike-slip basins, bounded on one side by a curved and dipping strike-slip fault, and on the other by curved normal faults.*

*Busby y Bassett (2007)*

zona (Busby y Bassett, 2007) está ligada a desgarres del Jurásico Inferior – Medio en Arizona (USA) que generaron cuencas en las que se desarrolló un importante vulcanismo acompañado del emplazamiento de domos.



Distribución de facies volcánicas y sedimentarias en dos cuencas extensionales tipo pull-apart en Arizona. El modelo es aplicable a los sistemas de fallas con inflexiones extensionales limitadas por un lado por la falla principal de desgarre y por el otro por fallas normales líticas. Adaptada de Busby y Bassett (2007).

Al respecto, alguien podría decir que todo esto es interesante pero de escaso valor práctico. Sería un error realizar un comentario de este tipo por varias razones importantes:

- Primero, porque los orógenos de tipo andino (márgenes activos) han estado sujetos en más de una ocasión a subducciones fuertemente oblicuas, con importante desarrollo de zonas de falla asociadas a la compresión tangencial. Entre otros ejemplos en Chile está la Zona de Falla de Atacama o el Sistema de Domeyko (Falla Oeste).

*A spectrum of precious and base metal, and lithophile element deposits is genetically, spatially, and temporally related to four types of high-level magmatic systems, each characterized at the surface by a distinct volcanic landform: stratovolcano, flow dome complex, caldera, and maar ...*

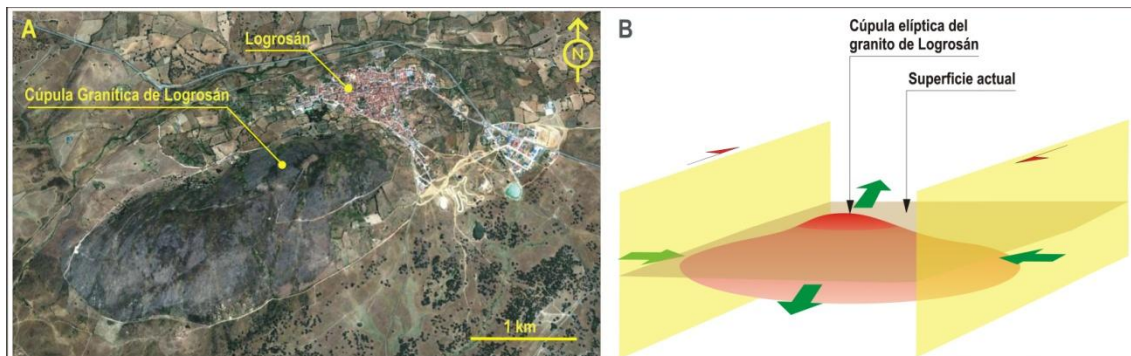
Sillitoe y Bonham (1984)

- Segundo, porque existe una marcada relación entre el vulcanismo, el emplazamiento de domos, y la formación de yacimientos minerales. Al

respecto, y de manera específica, recomendamos aquí la lectura del excelente trabajo de Sillitoe y Bonham (1984) sobre formas volcánicas, domos y yacimientos minerales.

#### 4.6.2 El control de la morfología y el emplazamiento de granitos

Los grandes sistemas de fallas pueden incluso influir en la morfología de los cuerpos plutónicos. Por ejemplo, el desarrollo de cúpulas graníticas alargadas (elipsoidales), puede perfectamente explicarse por el campo de esfuerzos generado por  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ , de una manera similar a la que utilizamos para explicar la formación de grietas de tensión, salvo que a una escala muy superior. Así tendríamos  $\sigma_1$  en el eje mayor de la elipse y  $\sigma_3$  en el eje menor.



Modelo simple para el emplazamiento del granito de Logrosán (Cáceres, España) donde la elongación de su cúpula es paralela a  $\sigma_1$ ; esto implica apertura progresiva en la dirección de  $\sigma_3$ .

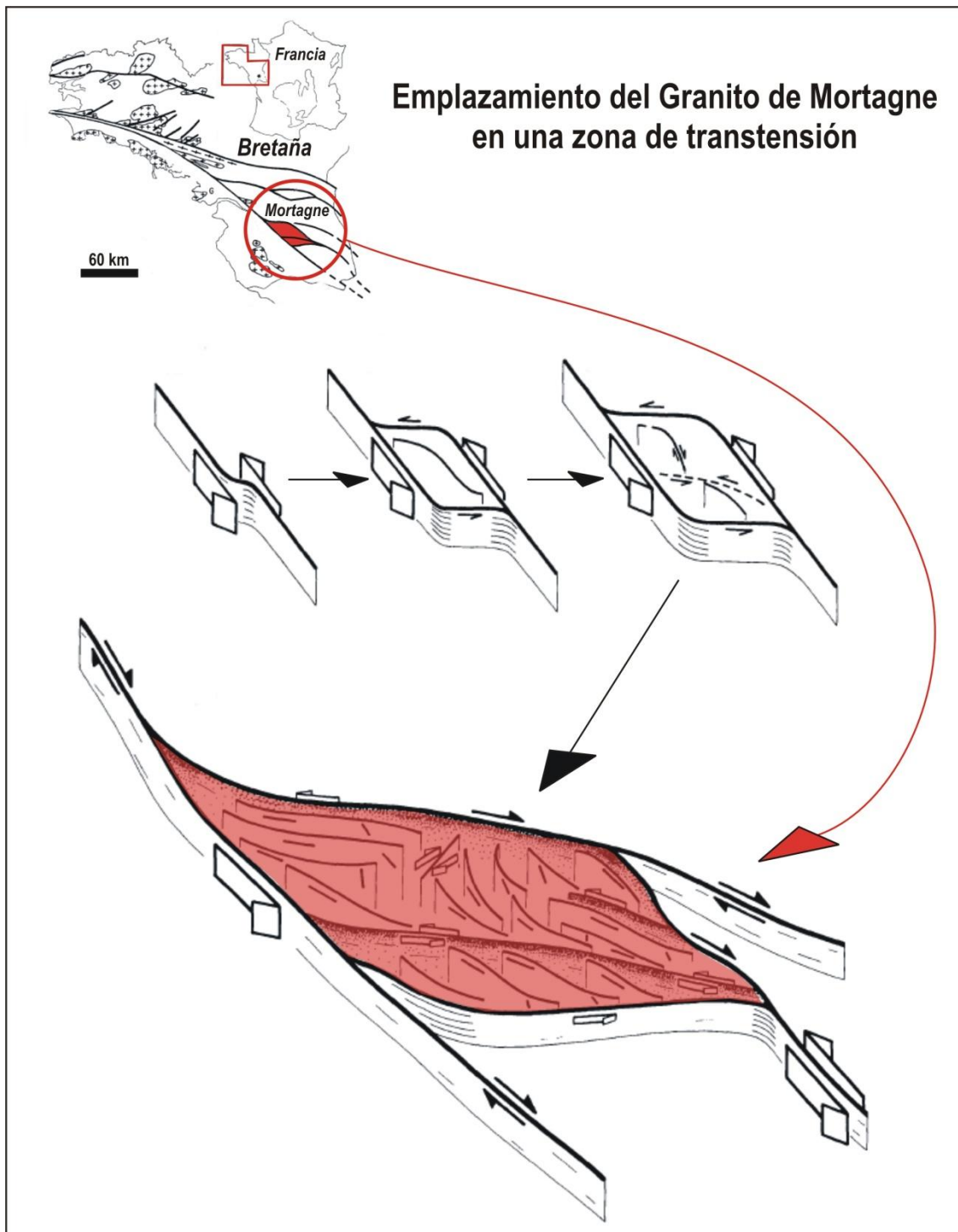
Arriba mostramos un modelo muy simple para el emplazamiento del granito paleozoico de Logrosán (Cáceres, España). Su forma tipo “disco volador” o “huevo frito” se ha deducido a partir de su aureola de metamorfismo en rocas del Complejo Esquisto-Grauváquico, la que es inusualmente grande para un granito de contacto “verticales”.

Un granito que se ajusta de manera notable al emplazamiento en una zona de zona de transtensión asociada a zona de cizalla es el de Mortagne en Bretaña (Francia). En la siguiente figura se ilustra su emplazamiento en función de la formación progresiva de un lazo sigmoidal extensional en una de las zonas de cizalla sinestrales de Bretaña.

*The emplacement mechanism and kinematics and the 3-D geometry of the Variscan granite pluton of Mortagne are interpreted, using systematic measurements of the granite structure allied with microstructural observations, from a detailed gravimetric study. It is proposed that magma infilled a pull-apart structure which formed along a jog of a northwest-southeast-trending sinistral zone of shear.*

*A second episode of shearing, under a dextral regime and independent of emplacement, was responsible for perigranitic tectonites. These successive transcurrent opposite movements, already documented for Variscan times in western France, are discussed concerning the age of the Mortagne pluton ( $313 \pm 15$  m.y.).*

**Guineberteau et al. (1987)**



Modelo de emplazamiento en una zona sigmoidal (pull-apart) de una zona de cizalla en Bretaña (Francia). Las flechas blancas indican el movimiento durante el emplazamiento del granito; las negras corresponden a un movimiento posterior. Adaptada de Guineberteau et al. (1987).

Resumiendo, las zonas de falla controlan mucho más que el movimiento de fluidos a lo largo de planos discretos de falla. Su importancia va más allá, pudiendo determinar entre otras cosas:

- La presencia o ausencia de vulcanismo en una determinada región sujeta a fallamiento regional.
- La morfología de cúpulas graníticas.
- El emplazamiento de cuerpos graníticos.



## 4.7 Imágenes y análisis de fallas: Cerro Negro Norte (Chile)

### 4.7.1 Una breve reseña geológica y minera de Cerro Negro Norte

Vivallo et al. (1995) señalan que el distrito ferrífero consiste en una serie de cuerpos masivos y diseminados de magnetita. El encajante de la mineralización corresponde a andesitas alteradas (principalmente actinolita) que se disponen subhorizontalmente. Estas rocas han sido intruídas por plutones de composición monzonítica a granodiorítica. A diferencia de Cerro Imán la fracturación es frágil y muy desarrollada, denotando varias etapas de fallamiento.

El yacimiento (o grupo de yacimientos) están cerca de comenzar su andadura como explotación minera moderna dentro del contexto de lo que se ha denominado el “Proyecto Cerro Negro Norte”. Al respecto, Minería Chilena (2011) ha publicado que el cuerpo mineralizado corresponde a estructuras lenticulares y cuerpos masivos de alta ley que están dispuestos sub-verticalmente en filones, venillas y diseminaciones. La zona de mineralización tiene una extensión aproximada de 5 km, y un ancho medio de 200 m, con una profundidad pronunciada de más o menos 500 m. La ley media, es del orden de 34%, en tanto que la de corte está fijada en un 30%.

#### INVERSIÓN DE US\$574 MILLONES

CAP Minería elevará 40% producción de hierro

Desde 2013 Cerro Negro Norte adicionará 4.000.000 ton con la puesta en marcha de un nuevo proyecto en Atacama.

Actualmente CAP Minería tiene una producción en torno a los 10 millones de toneladas anuales de hierro. El año pasado produjo 10.500.000 ton y con un nuevo proyecto de pellets feed, Cerro Negro Norte (CNN), aumentará su producción en un 40%. Así lo afirma Pierino Venturini, gerente de proyectos mineros del Grupo CAP.

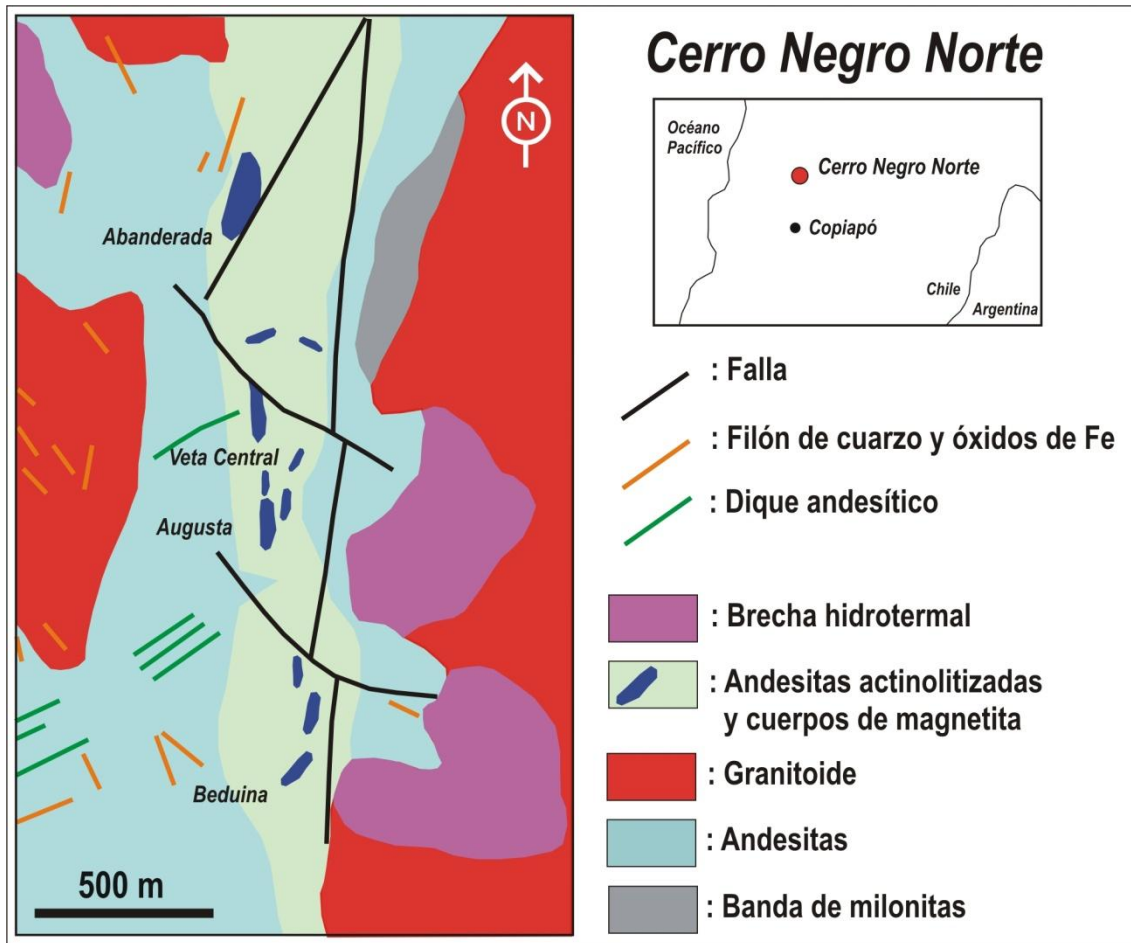
“Estamos hablando de que Cerro Negro Norte va a producir cuatro millones de toneladas al año de concentrado de hierro en calidad de pellets feed. Para la empresa uno de los impactos de este proyecto vendrá por el aumento esperado en los resultados de la compañía, considerando los actuales precios del hierro en el mercado mundial. Tiene un gran significado desde el punto de vista del negocio”, manifiesta el ejecutivo.

Minería Chilena (2011)

A



A: Una imagen de la zona del Proyecto Cerro Negro Norte (Minería Chilena, 2011). B: Mena de magnetita (Mgt), con algo de pirita (Py) y clorita ± actinolita (ChIA).



Geología del Yacimiento Cerro Negro Norte. Simplificada de Vivallo et al. (1995).



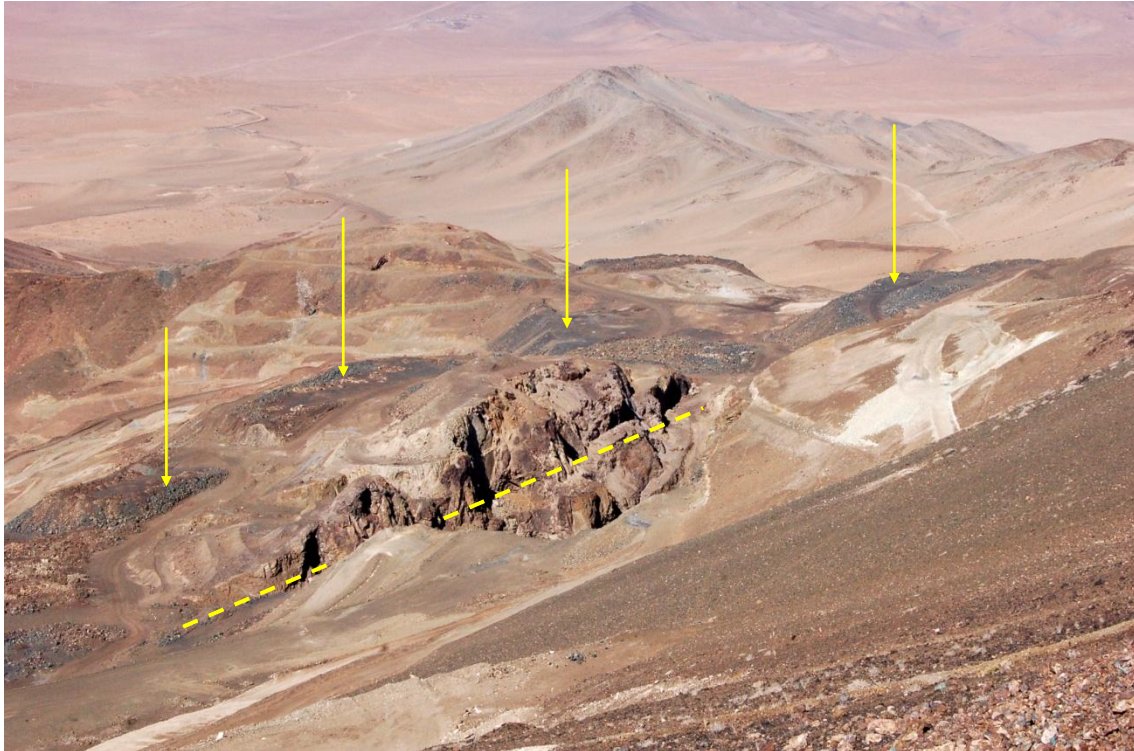
El yacimiento de magnetita de Cerro Negro Norte: antiguas labores mineras. 5 de Agosto de 2013. Imagen: P. Cubas.

#### 4.7.2 Imágenes de fallas en Cerro Negro Norte: un ejercicio práctico

Las siguientes imágenes (P. Cubas, 2008) fueron captadas durante una rápida visita geológica al yacimiento el 5 de Agosto de 2008, razón por la cual no todas las estructuras recibirán una explicación detallada. Digamos no obstante que el sitio es espectacular, y que si no fuera a transformarse en una operación minera, bien valdría como sitio de entrenamiento para geólogos en el estudio aplicado de fallas.



Aspecto general mostrando una antigua labor minera alargada. Este detalle es importante, porque significa que el cuerpo mineral probablemente presentaba un fuerte control estructural por falla(s).



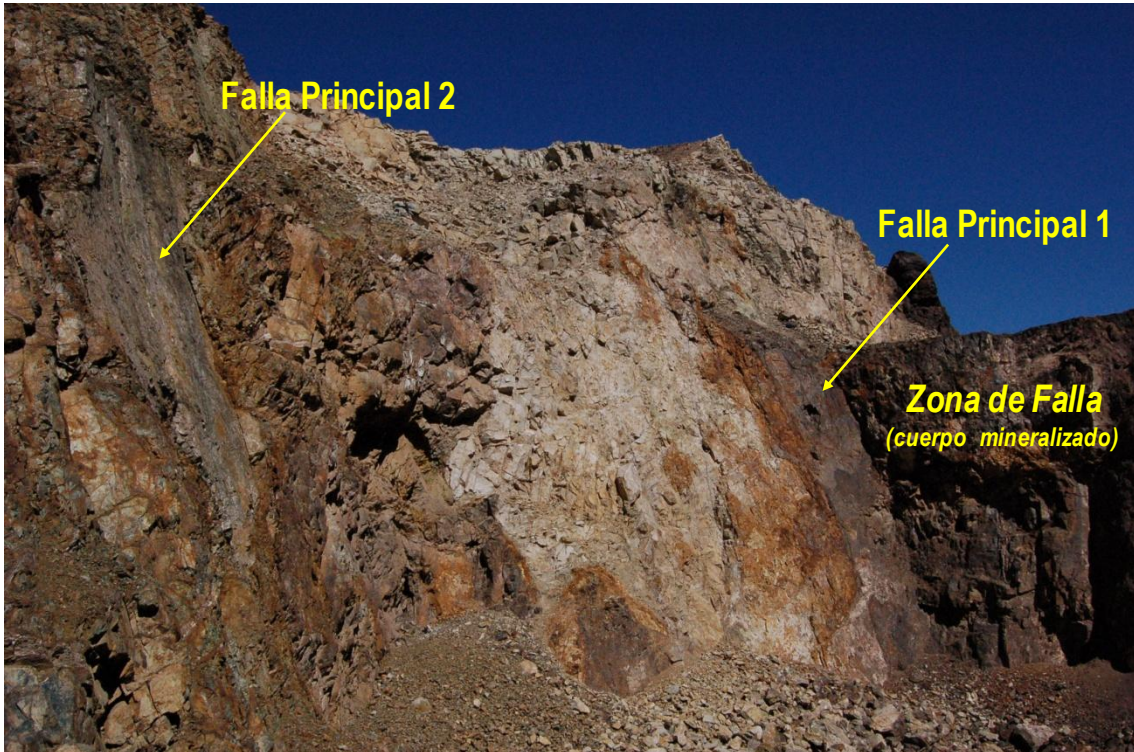
Detalle de la anterior. El carácter alargado de las labores mineras (línea amarilla discontinua) constituye una primera pista cara a estudiar el tema estructural del yacimiento. Lo más probable es que se trate de cuerpos mineralizados elongados, controlados estructuralmente por fallas. Las flechas amarillas indican antiguas escombreras (desmontes/botaderos) de mineral descartado.



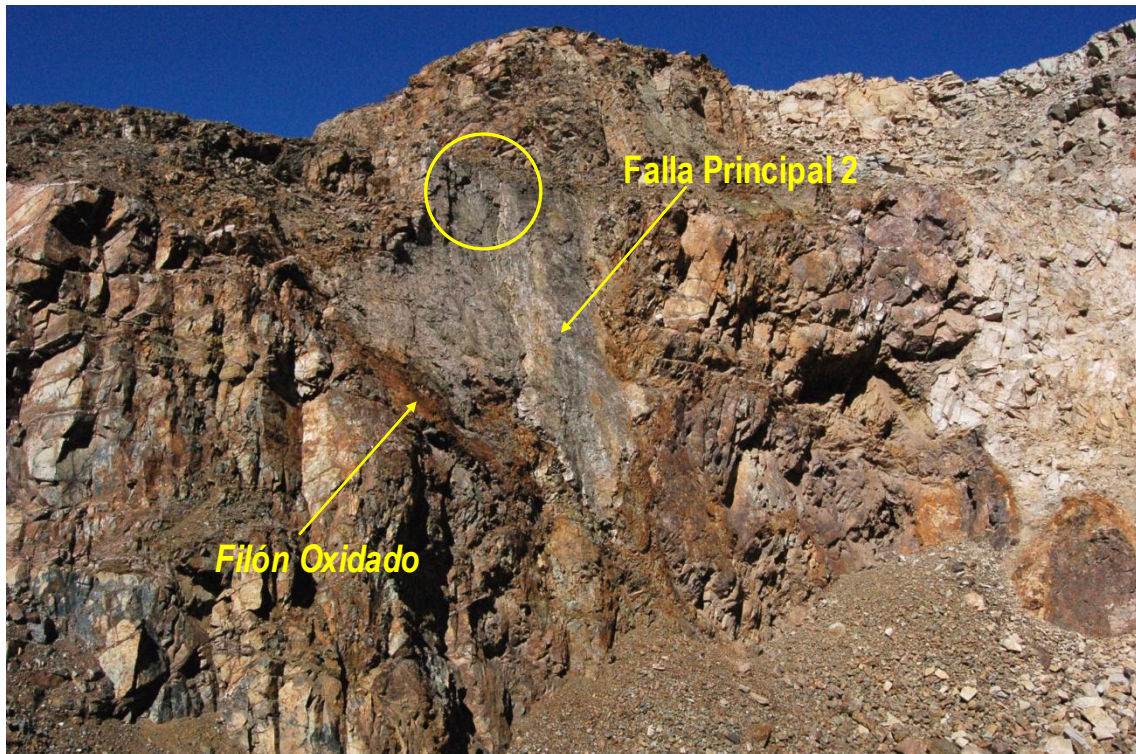
Empecemos nuestro particular ejercicio con una imagen del yacimiento y labores mineras como la de arriba. ¿Se distingue alguna falla? ¿Se podría determinar el sentido de movimiento de éstas? La respuesta abajo:



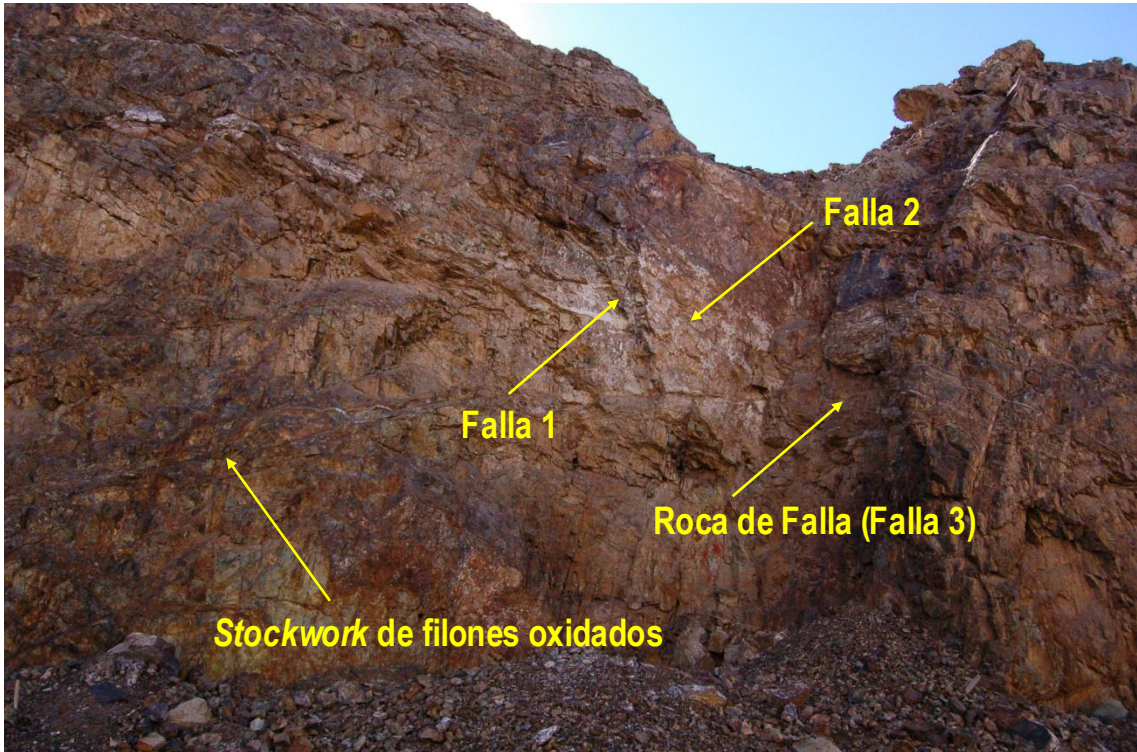
Hay al menos dos fallas muy evidentes que saltan a la vista desde la distancia (1 y 2). Las flechas amarillas muestran el movimiento de las dos fallas normales. Los escalones congruentes se muestran con flechas de color naranja. Todo el muro de color ocre limita una compleja zona de falla que albergaba parte de la mineralización oxidada (martita-goethita).



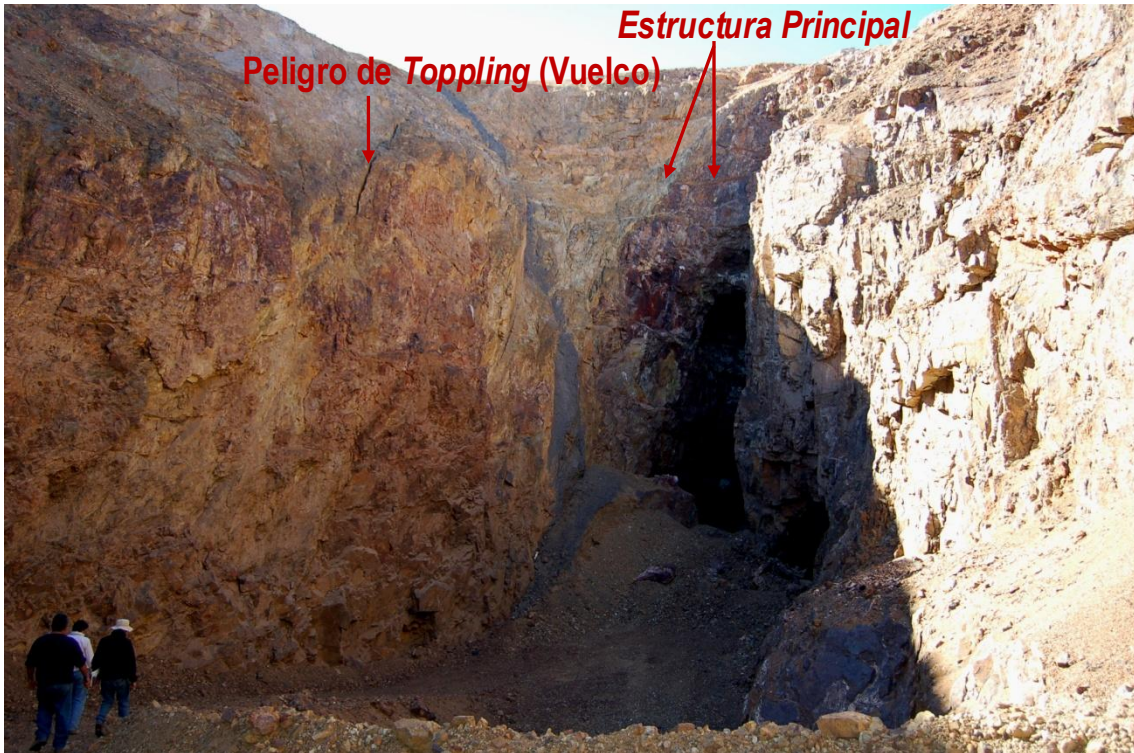
Compleja situación en una de las antiguas labores mineras. Se reconocen al menos dos estructuras principales, donde 2 corta a 1. La Falla 1 es sólo la envolvente oriental de una zona de falla muy oxidada; probablemente se trate de un antiguo cuerpo muy fracturado de magnetita transformado a martita y goethita. La roca de falla corresponde a una brecha. A mayor fracturación-trituración mayor paso de aguas meteóricas ricas en oxígeno, lo que implica un paso de la magnetita a martita y finalmente a goethita (colores ocres). De ahí que los colores también sean una ayuda importante llegado el momento de analizar la fracturación en un yacimiento. El color normal (gris acero) de la mena de magnetita se muestra en el recuadro.



Analizando la Falla Principal 2 Si nos fijamos en la pequeña estructura asociada marcada por el círculo superior notaremos que hay unos escalones de falla muy marcados que indican nítidamente un movimiento de tipo normal (flecha naranja). La Falla Principal 2 engloba una antigua masa mineral, que porta mineralización, oxidada y de menos entidad. Un consejo, lleve prismáticos al campo, a veces hay detalles que no se alcanzan a ver a simple vista en un afloramiento.



Situación compleja de planos de falla pero relativamente fácil de “leer” en la mina. Sentido de movimiento: flecha de color naranja.

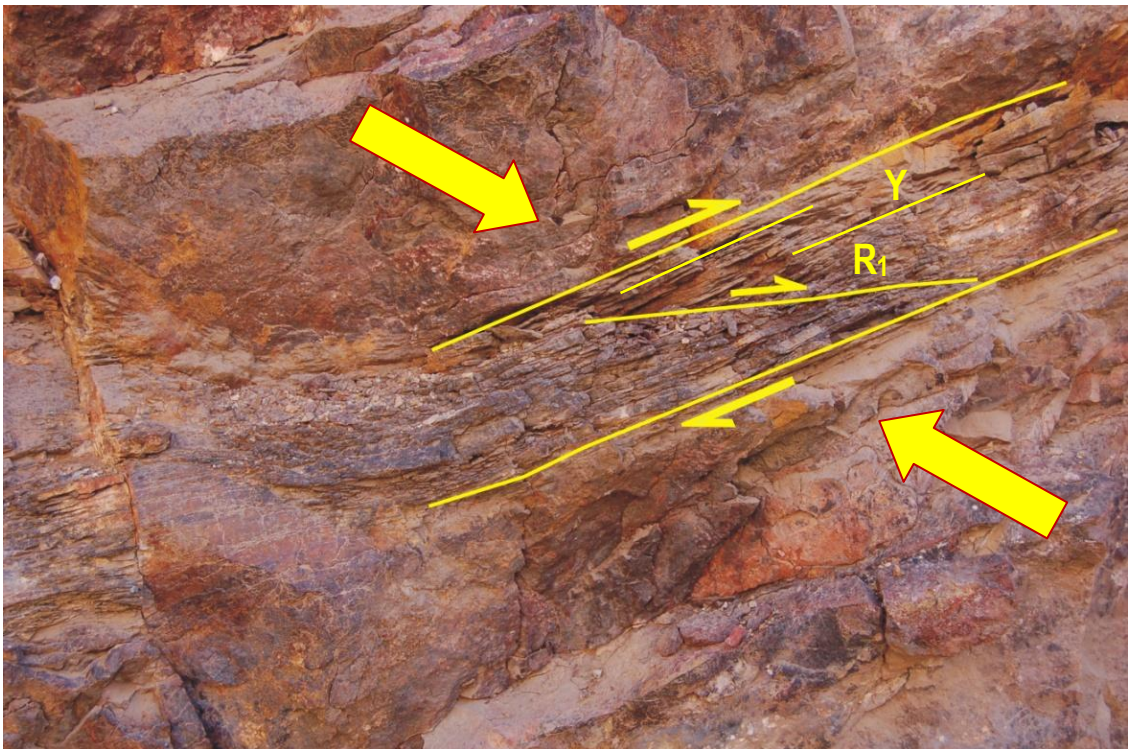


*Cerro Negro depara sorpresas por todas partes. La falla 1 a la cual se asocia la masa filoniana oxidada se divide en dos ramales formando un pequeño dúplex. Ver siguiente figura.*

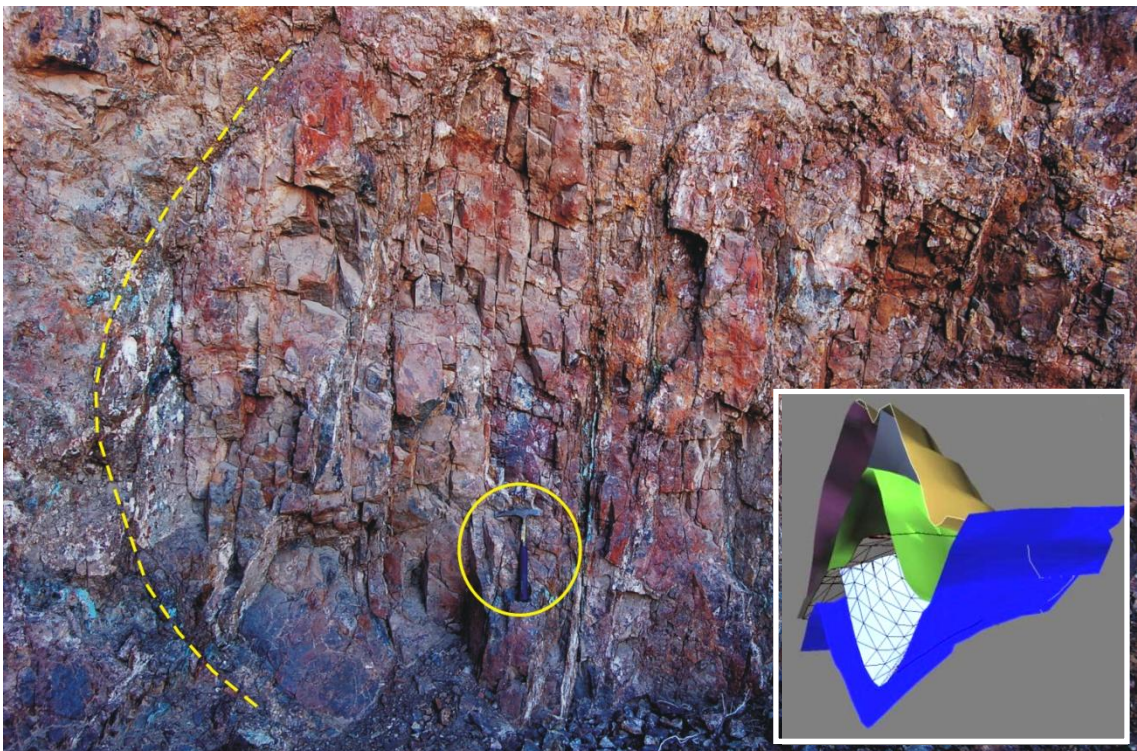




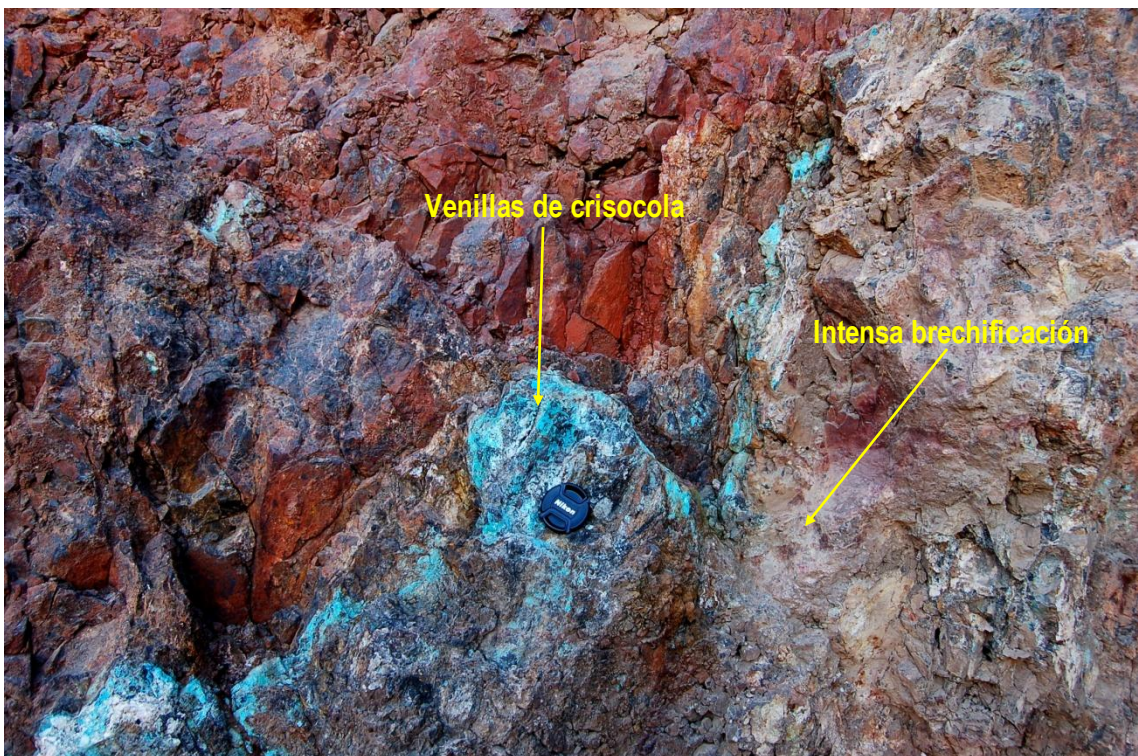
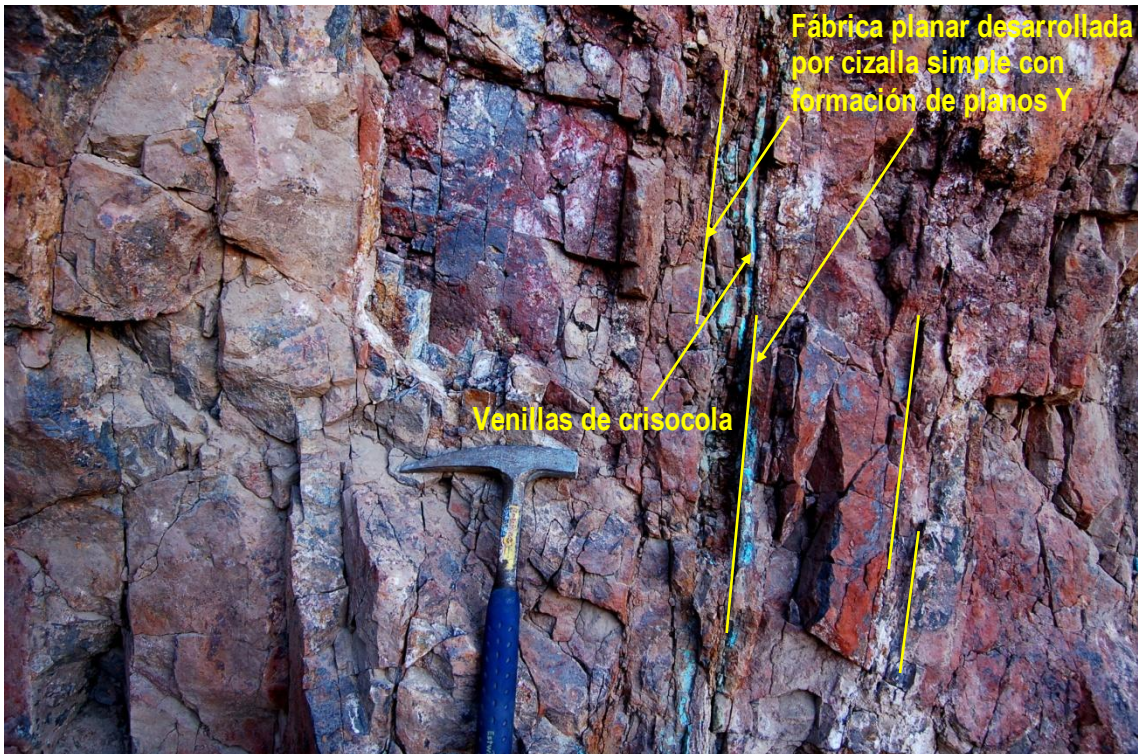
*Análisis de la estructura interna de la estructura generada por las fallas 1 (principal) y 2 (ramal).*



*Desarrollo de una fábrica incipiente planar en una de las estructura de bajo ángulo. Cizalla simple con desarrollo de Riedel 1 y planos Y.*



Situación muy compleja, con una fracturación que define una estructura sub-circular fuertemente fracturada. Escala: martillo (óvalo amarillo). Una interpretación para el caso consiste en el desarrollo de un sistema de fallas anastomosado. En el recuadro se puede observar una construcción 3D de un sistema de fallas con estas características (adaptada de Kearsey, 2001).



Continuamos con el caso anterior, sólo que a mayor detalle. La situación aquí analizada no es de menor importancia, ya que como se puede apreciar, las estructuras menores portan mineralización oxidada de cobre (crisocola). Esto implica que originalmente había sulfuros (normal en este tipo de yacimientos), pero si la explotación es por hierro, los sulfuros son un problema, siendo considerados una impureza que debe ser removida o evitada durante la explotación. De ahí que si los sulfuros se asocian a estructuras específicas, entonces se pueda establecer más correctamente que sectores deberían ser evitados en la explotación. Note la intensa brechificación de la roca en el contacto.



*Para terminar, algo más simple que recordar. Independientemente de la complejidad de las estructuras en un yacimiento, las características de una familia de fallas son persistentes. Las flechas amarillas indican la misma estructura desplazada por fallas menores.*

#### 4.7.3 Una breve reflexión final

La geología estructural no es fácil, pero tampoco es particularmente compleja si se siguen las reglas del juego. Las rocas no se pliegan o rompen aleatoriamente y esa es la gran ventaja con que cuenta el geólogo, existen “reglas”. Si aprendemos dichas reglas y las practicamos adecuadamente acabaremos (necesariamente) siendo competentes en el tema. ¿Podemos equivocarnos? Pues claro que sí, en geología no “describimos” la realidad, la “interpretamos”. De ahí que la visión de dos geólogos puede ser discrepante, parcialmente discrepante o coincidir sus visiones. Lo último tampoco es garantía de nada, también “dos” pueden estar equivocados. Sin embargo, a lo que sí podemos aspirar es a tener un “conocimiento” y una “práctica” (que dan los años, no nos engañemos en esto) al menos satisfactorios, y el resto de ahí para arriba.

*A los jóvenes les decimos lo siguiente, sobre los años de práctica no se puede hacer nada, salvo esperar y trabajar duro mientras tanto. Sobre todo, aprovechar ese tiempo para ver mucho (la geología es una profesión “visual”). El conocimiento es otra cosa, y aquí la cosa es simple, se posee o no. A quien no prestó la suficiente atención en las clases de geología estructural también le decimos, sin*

*estructural: a ninguna parte. Pero en fin, eso al menos tiene remedio, ya que nunca es demasiado tarde para aprender algunos trucos nuevos.*



*Alumnos del Máster de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense (Recursos Minerales), tomando notas en la estructura principal del domo mineralizado (Pb-Zn) Cabezo Rajao. Distrito Minero de La Unión (Murcia, España).*

*... All my faults are normal - except some, which are strike-slip ...*

*... San Andreas Protect Us From Our Faults ...*

## Bibliografía

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

- Anderson, E.M., 1905. The dynamics of faulting. Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8, 387-402.
- Benavides, J., Kyser, T.K., Clark, A.H., Oates, Ch.J., Zamora, R., Tarnovschi, R. y Castillo, B., 2007. The Mantoverde iron oxide-copper-gold district, III Región, Chile: The role of regionally derived, nonmagmatic fluids in chalcopyrite mineralization. Economic Geology, 102, 415-440.
- Berthé, D., Choukroune, P. y Jegouzo, P., 1979. Orthogneiss, mylonite and non coaxial deformation of granites: the example of the South American Shear-Zone. Journal of Structural Geology, 1, 31-42.
- Blake, T.S. y Groves, D.I., 1987. Continental rifting and the Archean-Proterozoic transition. Geology, 15, 229-232.
- Boric, R., 1985. Geología y yacimientos del distrito Talcuna, IV Región de Coquimbo. Revista Geológica de Chile 25-26, 57-75.
- Brown, M., Díaz, F. y Groscoff, J., 1993. Displacement history of the Atacama fault system 25°00'S-27°00'S, northern Chile. Geological Society of America Bulletin, 105, 1165-1174.
- Busby, C.J. y Bassett, K.N., 2007. Volcanic facies architecture of an intra-arc strike-slip basin, Santa Rita Mountains, Southern Arizona. Bulletin of Volcanology, 70:85-103.
- Cameron, E.M., 1989. Scouring of gold from the lower crust. Geology, 17, 26-29.
- Davis, G.H. y Reynolds, S.J., 1996. Structural Geology of Rocks and Regions, John Wiley & Sons, NY, 776 pp.
- Doblas, M., 1990. Estudio de las deformaciones tardihercínicas de los granitoides de un sector del Sistema Central Español (zona central de Gredos y áreas adyacentes). Colección Tesis Doctorales, 59/90, UCM, Madrid.
- Doblas, M., 1998. Slickenside kinematic indicators. Tectonophysics, 295, 187-197.
- Drew, L.J., 2003. Low-sulfide quartz gold deposit model. USGS Open-File Report 2003-77, <http://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-077/>
- 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.
- Goldfarb, R.J., Berger, B.R., Klein, T.L., Pickthorn, W.J. y Klein, D.P., 1995. Low Sulfide Au Quartz Veins (model 36a; Berger, 1986). Mineral Deposits Models, USGS, <http://pubs.usgs.gov/of/1995/ofr-95-0831/CHAP34.pdf>
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G. y Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. Ore Geology Review, 13, 7-27.
- Guineberteau, B., Bouchez, J.L. y Vigneresse, J.L., 1987. The Mortagne granite pluton (France) emplaced by pull-apart along a shear zone: Structural and gravimetric arguments and regional implication. Geological Society of America Bulletin, 99, 763-770.
- Healy, D., Sibson, R.H., Shipton, Z. y Butler, R., 2012. Stress, faulting, fracturing and seismicity: the legacy of Ernest Masson Anderson. Geological Society of London, Special Publications, 367, 1-6.
- Higueras, P., Oyarzun, R., Lillo, J. y Morata, D., 2013. Intraplate mafic magmatism, degasification, and deposition of mercury: The giant Almadén mercury deposit (Spain) revisited. Ore Geology Reviews, 51, 93-102.
- Hodgson, C.J., 1989. The structure of shear-related, vein-type gold deposits. A review. Ore Geology Reviews, 4, 231-273.
- Idea Connection, 2013. Open Innovation: Goldcorp Challenge. Global Collaboration - Connected Innovation, <http://www.ideaconnection.com/open-innovation-success/Open-Innovation-Goldcorp-Challenge-00031.html>
- Infomine.com, 2000. "The Challenge" - Goldcorp online geological exploration sparks six million ounce internet goldrush. <http://www.infomine.com/index/pr/Pa038035.PDF>
- John, B.E., 2011. Structural Geology and Tectonics Career Contribution Award: Presented to Richard H. Sibson. The Geological Society of America, <http://www.geosociety.org/awards/11speeches/sgt.htm>
- Jébrak, M., 1992. Les textures intra-filoniennes, marqueurs des conditions hydrauliques et tectoniques. Chronique de la Recherche Minière, 506, 55-65.
- Jébrak, M., 1997. Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits: A review of mechanisms, morphology and size distribution. Ore Geology Reviews, 12, 111-134.
- Kamono, H. y Boric, R., 1982. Inventario polimetálicos y estudio geológico, distrito minero Talcuna. Informe Interno, SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago de Chile), 144 pp.
- Kearsey, T., 2011. Creating anastomosing fault structures in 3D: A combined GSI3D, GOCAD approach. GSI 3D Research Consortium, 2011 Workshop, 1st and 2nd March 2011, BGS Keyworth, England, <http://www.gsi3d.org/conference.html>
- Keller, J.V.A., Hall, S.H. y McClay, K.R., 1997. Shear fracture pattern and microstructural evolution in transpressional fault zones from field and laboratory studies. Journal of Structural Geology, 19, 1173-1187.

- Krupp, R.E. y Seward, T.M., 1987. The Rotokawa Geothermal System, New Zealand: An Active Epithermal Gold-Depositing Environment. *Economic Geology*, 82, 1108-1129.
- Lister, G.S. y Snoke, A.W., 1984. S-C Mylonites. *Journal of Structural Geology*, 6, 617-638.
- McClay, K.R., 1987. *The Mapping of Geological Structures*. Open University Press, Milton Keynes, 161 pp.
- Minera IRL, 2010. Ollachea Gold Project. <http://www.minera-irl.com/english/Exploration/Peru/Ollachea/tabid/137/Default.aspx>
- Minería Chilena, 2011. CAP Minería elevará 40% producción de hierro. Revista no. 358 Abril de 2011, [http://www.mch.cl/revistas/index\\_neo.php?id=1626](http://www.mch.cl/revistas/index_neo.php?id=1626)
- MyShareTrading.com, 2013. Phoenix Gold (PXG): Ora Banda-Grants Patch Project. <http://www.mysharetrading.com/phoenix-gold-pxg.htm>
- 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., Oyarzún, J., Ménard, J.J. y Lillo, J., 2003. The Cretaceous iron belt of northern Chile: role of oceanic plates, a superplume event, and a major shear zone. *Mineralium Deposita*, 38: 640-646.
- 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.
- 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.
- Passchier, C.W. y Trouw, R.A.J., 2005. *Microtectonics*. Springer. Berlin, 366 pp.
- Schwarz, H.U. y Kilfitt, F.W., 2008. Confluence and intersection of interacting conjugate faults: A new concept based on analogue experiments. *Journal of Structural Geology*, 30, 1126-1137.
- Sibson, R.H., Moore, J.McM. y Rankin, A.H. 1975. Seismic pumping – a hydrothermal fluid transport mechanism. *Journal of the Geological Society of London*, 131, 653-659.
- Sibson, R.H. 1977. Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society of London*, 133, 191-213.
- Sibson, R.H. 1985. Stopping of earthquake ruptures at dilational fault jogs. *Nature*, 316, 248-251.
- Sibson, R.H., 1987. Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems. *Geology*, 15, 701-704.
- Sibson, R.H., Robert, F. y Poulsen, K.H., 1988. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, 16, 551-555.
- Sibson, R.H., 1990. Faulting and fluid flow. En: *Fluids in Tectonically Active Regimes of the Continental Crust*, Nesbitt, B.E. (Ed.), Short Course, Mineralogical Association of Canada, Vancouver, 93-132.
- Sibson, R.H., 1996. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. *Journal of Structural Geology*, 18, 1031-1042.
- Sillitoe, R.H. y Bonham, H.F., 1984. Volcanic landforms and ore deposits. *Economic Geology*, 79, 1286-1298.
- Tripp, G.I. y Vearncombe, J.R., 2004. Fault/fracture density and mineralization: a contouring method for targeting in gold exploration. *Journal of Structural Geology*, 26, 1087-1108.
- Valdivieso, Y., 2011. Exploración de yacimientos de oro orogénico en la franja paleozoica inferior La Rinconada-Ollachea, Región Puno. Pro Explo 2011, <http://www.proexplo.com.pe/programa.htm>
- van der Pluijm, B., 2004. *Deformation and Strain*. Earth Structure (2ª Edición), WW Norton, NY, [http://www.globalchange.umich.edu/Ben/earthstructure2/ppts/4\\_DeformationStrain.pdf](http://www.globalchange.umich.edu/Ben/earthstructure2/ppts/4_DeformationStrain.pdf)
- Vivallo, W., Espinoza, S. y Henríquez, F., 1994. Geología y mineralización del distrito ferrífero Cerro Imán, Copiapó, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 21, 197-212.
- Vivallo, W., Espinoza, S. y Henríquez, F., 1995. Metasomatismo y alteración hidrotermal en el Distrito Ferrífero Cerro Negro Norte, Copiapó, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 22, 75-88.
- Wise, D.U., Dunn, D.E., Engelder, J.T., Geiser, P.A., Hatcher, R.D., Kish, S.A., Odom, A.L. y Schamel, S., 1984. Fault-related rocks: Suggestions for terminology. *Geology*, 12, 391-394.
- Woodcock, N.H., y Fischer, M., 1986. Strike-slip duplexes. *Journal of Structural Geology*, 25, 725-735.
- Woodcock, N.H., Omma, J.E. y Dickson, J.A.D., 2006. Chaotic breccia along the Dent Fault NW England: implosion or collapse of a fault void? *Journal of the Geological Society of London*, 163, 431-446.



**Fuente de las imágenes** (a Mayo-Junio de 2013)

1. <http://www.victoria.ac.nz/sgees/research/research-groups/tectonics/research-projects>
2. <http://lifeasageologist.wordpress.com/2011/06/22/my-favourite-geology-word-aw35/>
3. <http://www.uib.no/project/tectonics/about-us/gallery/gea>
4. <http://www.geol.ucsb.edu/faculty/hacker/geo102C/lectures/part2.html>
5. <http://gre-jerushah.blogspot.com.es/2011/04/my-field-trip-to-almeria-province.html>
6. [http://www.aulados.net/GEMM/Geoguias/index\\_geoguias.html](http://www.aulados.net/GEMM/Geoguias/index_geoguias.html)
7. <http://earthsci.org/processes/structure/quake1/EQCaseHistories.html>
8. <http://www.williamsclass.com/SixthScienceWork/FoldFault/FoldFaultGeologyNotes.htm>
9. <http://phys.org/news170672915.html>
10. [http://faculty.kutztown.edu/friehauf/classphotos/structural\\_photos.html](http://faculty.kutztown.edu/friehauf/classphotos/structural_photos.html)
11. <http://blogs.agu.org/mountainbeltway/2011/05/18/some-cool-rocks-from-dgms-rock-garden/>
12. [http://www.redes-cepalcala.org/ciencias1/geologia/geologia\\_estructural/fallas\\_total.htm](http://www.redes-cepalcala.org/ciencias1/geologia/geologia_estructural/fallas_total.htm)
13. <http://elblogdemifamiliayotrosanimales.blogspot.com.es/2012/04/fallas-y-fracturas-faults-and-fractures.html>
14. <http://www.see.leeds.ac.uk/structure/minor/tensiongash/tgash.htm>
15. <http://www2.gsu.edu/~geohab/Babaie/pages/geo4013/2013/geo4013.htm>
16. <http://www.see.leeds.ac.uk/structure/minor/tensiongash/>
17. <http://www.geosci.usyd.edu.au/users/prey/ACSGT/Module2/Mod2Lectures/Sld036.htm>
18. <http://www.geosociety.org/awards/11speeches/sgt.htm>
19. <http://www.uclm.es/users/higueras/tema/almaden/lcc2.htm>
20. <http://www.uclm.es/users/higueras/tema/almaden/Almaden.htm>
21. <http://geofrik.wordpress.com/2013/04/23/greenstone-belts/>
22. <http://www.biv.com/article/20120426/BIV0108/120429966/0/BIV>

## 5.1. ¿Dónde buscamos yacimientos minerales y por qué?

### 5.1.1 Más allá de la geología y la tectónica: el mundo de las percepciones

Nasreddin, o Nasrudín, es un personaje mítico de la tradición popular sufí (una corriente filosófico-religiosa del Islam), cuyas historias sirven para ilustrar o introducir las enseñanzas sufíes. Se supone que vivió en Anatolia (Turquía) en una época indeterminada entre los siglos XIII y XV (Wikipedia, 2013a). Una de estas historias tiene especial relevancia en el mundo de la exploración.

*Muy tarde por la noche Nasrudín se encuentra dando vueltas alrededor de una farola, mirando hacia abajo. Pasa por allí un vecino.*

*- ¿Qué estás haciendo Nasrudín, has perdido alguna cosa? le pregunta.*

*- Sí, estoy buscando mi llave.*

*El vecino se queda con él para ayudarlo a buscar. Después de un rato, pasa una vecina.*

*-¿Qué estáis haciendo? - les pregunta.*

*- Estamos buscando la llave de Nasrudín.*

*Ella también quiere ayudarlos y se pone a buscar.*

*Luego, otro vecino se une a ellos. Juntos buscan y buscan y buscan. Habiendo buscado durante un largo rato acaban por cansarse. Un vecino pregunta:*

*- Nasrudín ¿estás seguro de haberla perdido en este lugar?*

*- No, dice Nasrudín*

*- ¿Dónde la perdiste, entonces?*

*- Allí, en mi casa.*

*- Entonces ¿por qué la estamos buscando aquí?*

*- Pues porque aquí hay luz y mi casa está muy oscura.*

A lo largo de los capítulos 3 y 4 hemos revisado todas aquellas herramientas estructurales de aplicación directa en la exploración de yacimientos minerales. En este nos centraremos en los aspectos menos obvios, y como introducción a lo que queremos decir y hacer, la historia de Nasrudín es perfecta. Nada atrae tanto a los geólogos de exploración como los colores y los relieves positivos. No es de extrañar, estamos programados como especie (*Homo sapiens*) para fijarnos en

esos rasgos del entorno. En nuestra pequeña historia y contra toda lógica Nasrudín es atraído por la luz.



*A todos nos atraerá más la figura de la izquierda, con sus colores. De ahí que también prefiramos los días con sol a los nublados, o el verano al invierno; no es tan sólo un tema de temperaturas, sino que de luz.*

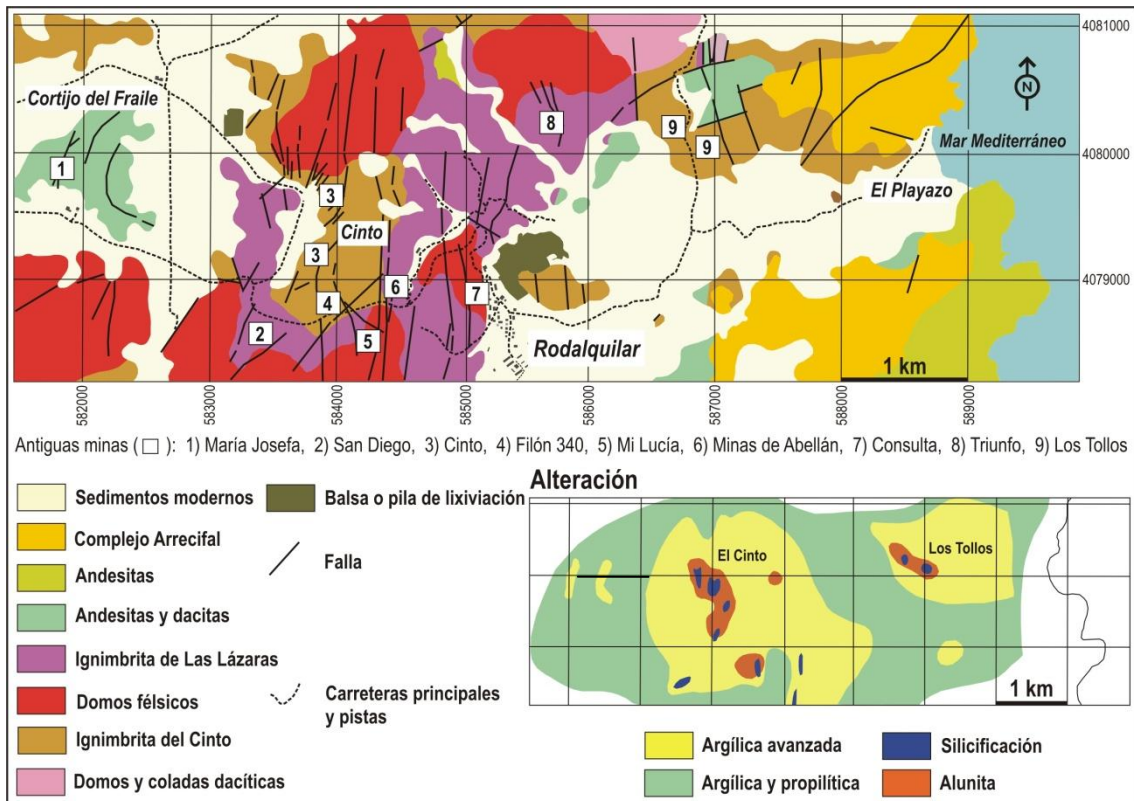


*Cuando se muestra la figura de la izquierda a un grupo de personas todo el mundo reconoce que hay un árbol. Cuando se retira este elemento visual, de color verde e importante verticalidad, la gente suele decir que ahora no hay “nada”. No hay un árbol, pero que no haya “nada” es una cosa muy distinta. Verticalidad y colores. También deberíamos añadir (y es muy importante), la idea de “presencia” y “ausencia”.*

Como podemos apreciar en las figuras superiores queda claro que los colores, la verticalidad y la presencia (versus ausencia) llaman vivamente nuestra atención. No estamos bien programados para detectar la ausencia y al respecto un clásico en la enseñanza de la geología de campo. Si caminamos por una carretera con los alumnos y de pronto el muro de rocas que llevamos a la derecha o izquierda desaparece progresivamente, estando la roca cada vez más triturada y meteorizada hasta que desaparece del todo, nadie dirá nada al respecto. Los alumnos prestan atención a los afloramientos, no al “vacío”. Pero he aquí que “el vacío” (la “nada”) puede ser crítico para entender la geología. Seguimos caminando y de pronto la litología y estructura han cambiado radicalmente. Los

alumnos perplejos y el profesor que tiene que hacer un alto para explicar que no han “visto” una falla. Sí, porque mientras más importante una falla, menos se ve. Lógico, la roca se tritura y la meteorización acaba destruyendo el afloramiento. Así empiezan muchos valles y cursos de ríos. Al respecto, puestos a dirigir nuestra mirada ¿Qué elegiremos? ¿Una montaña o un valle?

El Distrito Minero de Rodalquilar en el sureste de España constituye un magnífico ejemplo de lo que queremos contar, y el famoso Cerro del Cinto se parece en muchos aspectos a la “farola” de Nasrudín.



Geología del Distrito Minero de Rodalquilar, yacimientos epitermales de alta (p.ej., Cinto) y baja (p.ej., María Josefa) sulfuración del Mioceno. Adaptada de Arribas (1993), Arribas et al. (1995) y Oyarzun et al. (2009).



El cerro y minas del Cinto (ver también figura anterior). Note los intensos colores rojizos producto de la alteración argílica avanzada y la intensa formación de limonitas. Verticalidad y colores.

### 5.1.2 ¿Tropezamos dos veces con la misma piedra? Categóricamente sí.

La minería en el Distrito Minero de Rodalquilar es una historia plagada de decepciones, pero no de falta de ánimos, ya que a cada fallo, le seguiría otro en el tiempo (Oyarzun et al., 2009):

- La minería en el distrito de Rodalquilar se inició hacia 1825, para Pb, Zn y Cu, y no fue hasta 1864 que los mineros se dieron cuenta de que el mineral contenía también un poco de oro. Las operaciones mineras que pertenecen a este período son las de Consulta, María Josefa, San Diego y Triunfo. Estas fueron operaciones de pequeña escala y el mineral se enviaba a Murcia para su fundición y la producción de plomo rico en oro, un producto que al final se enviaba a Amberes (Bélgica) para separar el oro. A comienzos de la Primera Guerra Mundial la mayoría de las minas habían cerrado.
- En 1925 se estableció una operación metalúrgica de amalgamación de oro con mercurio en la mina María Josefa, sin embargo, un año después una serie de problemas técnicos provocaron el cierre de la operación. Otra incursión fallida en la amalgamación industrial de oro se llevó a cabo entre 1929-1930 en las llamadas Minas de Abellán.
- La minería “moderna” en Rodalquilar se inicia en 1931 con la puesta en marcha de la primera operación metalúrgica de lixiviación con cianuro cerca del pueblo de Rodalquilar (Planta Dorr). La planta recibía mineral de las minas Consulta, Triunfo y Mi Lucía.
- En 1956 la empresa minera ADARO (empresa estatal) inauguró una nueva operación de cianuro en la llamada planta Denver, que en su momento fue la planta de lixiviación más grande de Europa. Esta operación duró hasta 1966 y se trató el mineral de las minas a cielo abierto del Cinto. Entre 1943 y 1966 ADARO extrajo unos 1,6 Mt de mineral con ley de 3,5 g t<sup>-1</sup> Au (unas 180.000 oz Au).
- Una nueva operación de minería y metalurgia en el sector del Cinto comenzó en 1989. Esta vez la empresa era extranjera (Cluff Resources – Antofagasta Holdings JV) y el procedimiento metalúrgico elegido fue la lixiviación en pila. La intención era extraer unas 750.000 toneladas métricas de mineral de 2,3 g Au t<sup>-1</sup>, aunque en 1990 se abandonó la operación. Como resultado de esta operación fallida, unos 120.000 m<sup>3</sup> de ripios (pila abandonada) aún permanecen allí.

Si bien el espíritu de aventura nunca desfalleció del todo en Rodalquilar, las leyes y tonelajes sí lo hicieron. En realidad en Rodalquilar nunca existió un yacimiento de esos que hacen historia, y su explotación moderna por ADARO tuvo más que ver con la situación político-económica de España (era de la *autarquía*) que con una operación rentable y eficiente como entenderíamos hoy en día. Hasta la planta

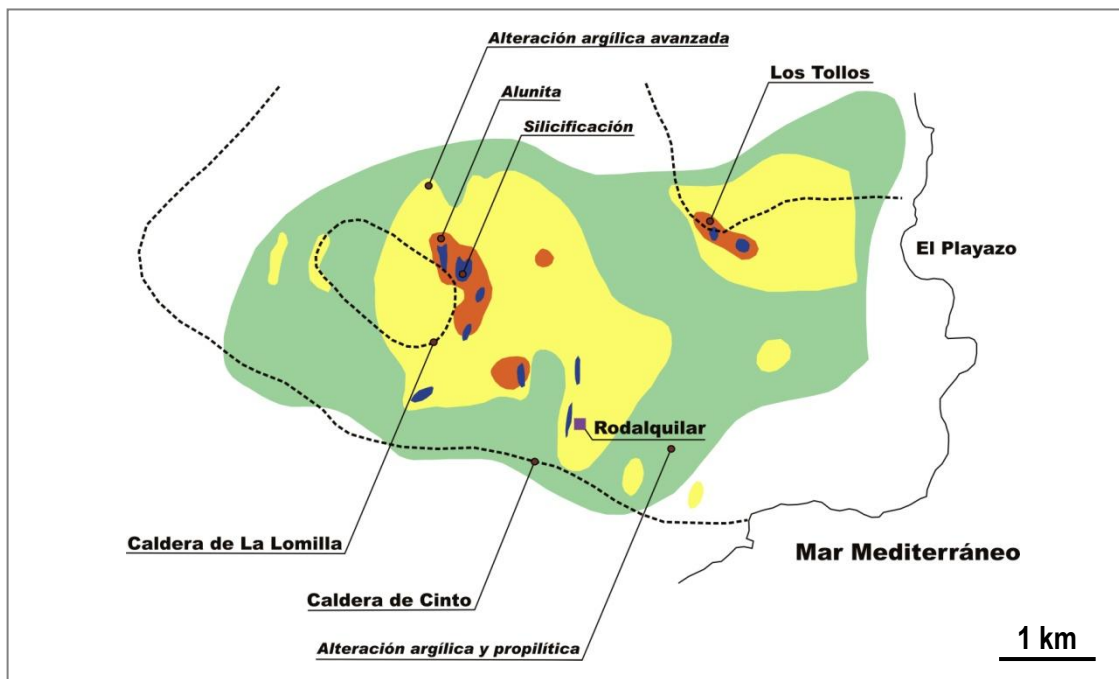
Denver marca una época de errores, una planta desmesurada para lo que en realidad había. Llegados a este punto deberíamos realizar una doble reflexión, por una parte respecto a los aspectos geológicos que caracterizan a la mineralización y por otra, sobre el empecinamiento con el Cinto.

### 5.1.3 Calderas, fuegos artificiales y la pérdida de volátiles

Empecemos por el comienzo, la geología de Rodalquilar (Arribas et al., 1995). El marco geológico del distrito incluye domos félsicos, ignimbritas, depósitos de caída, rocas volcánicas masivas (Mioceno Superior) y un complejo arrecifal del Messiniense. La actividad magmática comenzó hace unos 11 Ma con el emplazamiento de domos y flujos de dacita, un episodio que fue seguido poco después por la actividad volcánica explosiva que llevó a la formación de calderas:

- La gran caldera del Cinto, orientada E-W
- La pequeña de La Lomilla, orientada WNW-ESE.

El episodio del Cinto está datado en 10,8 Ma, y dio lugar a la emisión de la Ignimbrita del Cinto. Inmediatamente después se emplazaron domos anulares riolíticos siguiendo el borde de la gran caldera. Por último se forma la caldera de La Lomilla a la que se asocia la emisión de la Ignimbrita de las Lázaras.



Calderas y facies de alteración hidrotermal en el Distrito Minero de Rodalquilar. Adaptada de Arribas et al. (1995). Ver además el mapa geológico anterior.

La mineralización de alta sulfurización está datada en 10,4 Ma y dio lugar a la formación de sistemas filonianos con oro nativo, pirita, enargita, tennantita, tetraedrita, cinabrio, bismutina, casiterita, galena y esfalerita.

La mineralogía de los yacimientos periféricos al Cinto consistió en oro nativo, esfalerita, galena, y calcopirita. La mineralización principal estuvo acompañada de una fuerte alteración hidrotermal con silicificación, alunitización, y propilitización.

Hasta aquí, todos estos pueden ser considerados como rasgos normales en un típico epitermal. Entonces ¿qué hizo que Rodalquilar se transformara en un yacimiento mediocre (en tonelaje y leyes) por decir lo menos?

Hace algunos años atrás Jill D. Pasteris (1996) escribió un brillante trabajo sobre volcanes y pórfidos cupríferos, utilizando la erupción del volcán Pinatubo (Filipinas) en 1991 como telón de fondo. En ese trabajo Pasteris explica como la desgasificación masiva en grandes erupciones plinianas puede inducir pérdidas de volátiles que disminuyan el potencial magmático en profundidad como para formar yacimientos minerales, llegando a utilizar el término “*negative*” *porphyry copper deposits* y planteando la pregunta: *are some volcanoes failed porphyry-copper deposits, and vice versa?*

El vulcanismo félsico, a pesar de su menor riqueza en azufre, también puede emitir a la atmósfera grandes cantidades de azufre, compensando la baja concentración de este en el magma original con el volumen de magma extruido. Así, las cifras para el vulcanismo félsico, con fuerte carácter explosivo, van desde la emisión de 20 millones de toneladas de SO<sub>2</sub> en relación con la erupción del volcán Pinatubo hasta las gigantescas cifras asociadas a la mega erupción del súper-volcán Toba (Indonesia; 74.000 años atrás), del orden de los 3000 millones de toneladas de SO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>S (Rampino y Self, 1992).

Nada más espectacular que una erupción pliniana (como la del Pinatubo) o una súper caldera como la que quedó del Toba, pero aquí es cuando hay que recordar que más allá de los “fuegos artificiales” de una erupción, lo que se está arrojando a la atmósfera (aparte de piroclastos) son “volátiles”. Entre estos hay que destacar el SO<sub>2</sub> como fase crítica para formar mineralizaciones sulfuradas en el ambiente epitermal o más profundamente en los pórfidos cupríferos (ya llegaremos a estos).

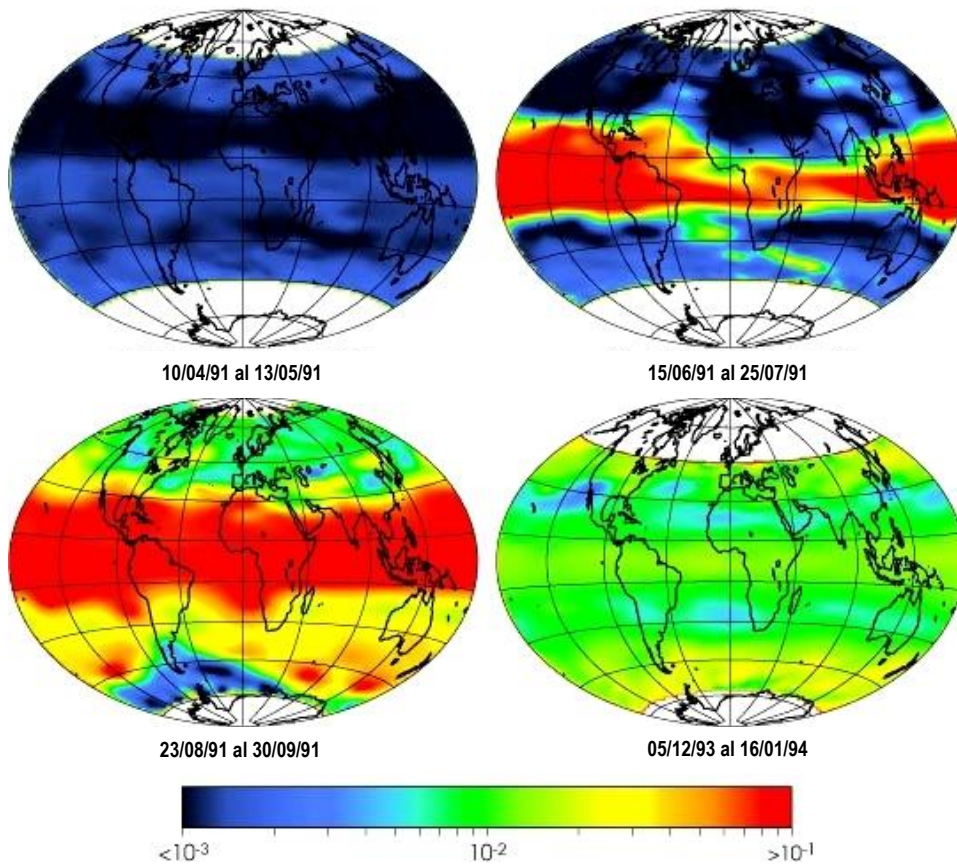
*Petrologic approaches are essential to evaluating sulfur release by volcanoes. The above discussion highlights the application to volcanic systems of element partitioning models that were derived for understanding ore deposits, i.e., optimized for the consideration of how a specific element can be extracted most efficiently from a magmatic system. It indicates how the initiation of fluid saturation before anhydrite precipitation might cause the release of larger than expected proportions of magmatic sulfur into the atmosphere.*

*While the volcanologists consider the catastrophic explosivity of eruptions like that at Mount Pinatubo, and the environmental scientists contemplate the atmospheric contamination caused by almost 20 Mt of SO<sub>2</sub>, the economic geologists shake their heads that yet one more potential porphyry-copper deposit has “gone up the tubes.”*

*Pasteris (1996)*



Erupción del volcán Pinatubo en Junio de 1991. Obsérvese la gran pluma volcánica de materiales piroclásticos y gases (imagen<sup>1</sup>).



Propagación mundial de los aerosoles del Pinatubo (principalmente gotas de  $\text{SO}_2$ ): SAGE II Mount Pinatubo Eruption Optical Depth Comparison (NASA, 2009). Erupción: Junio de 1991.



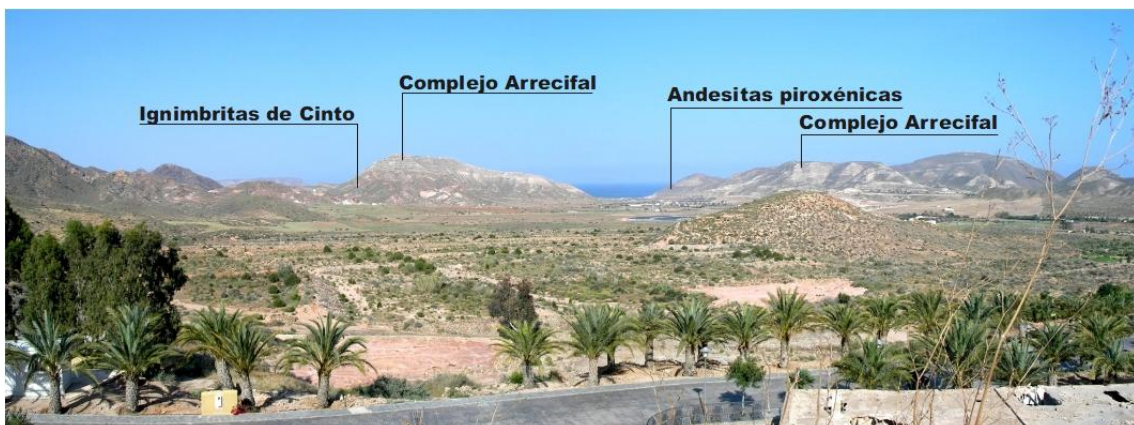
Hay que destacar que el vulcanismo calco-alcalino, los pórfidos cupríferos y los epitermales auríferos comparten un mismo “nicho tectonomagmático”, y que todo el azufre que se pierda en erupciones ya no podrá ser empleado en formar mineralizaciones en profundidad.

Esto nos retrotrae al tema de Rodalquilar. La gran caldera es francamente espectacular, extendiéndose más de 8 km en dirección E-W. Bien para los vulcanólogos, petrólogos y alumnos de geología de campo y yacimientos minerales. El sitio no podría ser más espectacular. Digamos que si hubiera que buscar un sitio de entrenamiento de geólogos de mina y exploración ese debería ser Rodalquilar. Ahí está todo lo que un geólogo debería saber sobre epitermales auríferos.

Todo esto está muy bien bajo un punto de vista académico y didáctico, pero ¿y la parte económica del distrito? Queda claro que entre una caldera y la otra (Cinto y La Lomilla) la emisión de volátiles debió ser portentosa, dejando poco margen para generar mineralizaciones sulfuradas importantes. No nos dejemos engañar por las ubicuas limonitas en el distrito. A poca pirita que exista, los derrames de hidróxidos férricos serán muy intensos durante la alteración supergénica.

#### 5.1.4 Volviendo a lo básico

Nada ha suscitado más atención bajo el punto de vista de la exploración y evaluación que el sector del Cinto. Normal podría uno decir, el sector es espectacular con sus filones subverticales lixiviados y oxidados. Pero ¿era el Cinto el “mejor” sitio para explorar en el distrito? ¿o era el “único” sitio para explorar-evaluar? En la otra punta de la caldera, frente al mar está el valle de Rodalquilar, y en su periferia afloran gran parte de las rocas que también lo hacen en el Cinto.



Vista del Valle de Rodalquilar desde la carretera que lleva al pueblo.

Pero claro, los valles resultan poco atractivos en exploración, son sectores deprimidos y carentes de una coloración llamativa. Peor aún, arrojan pocas claves

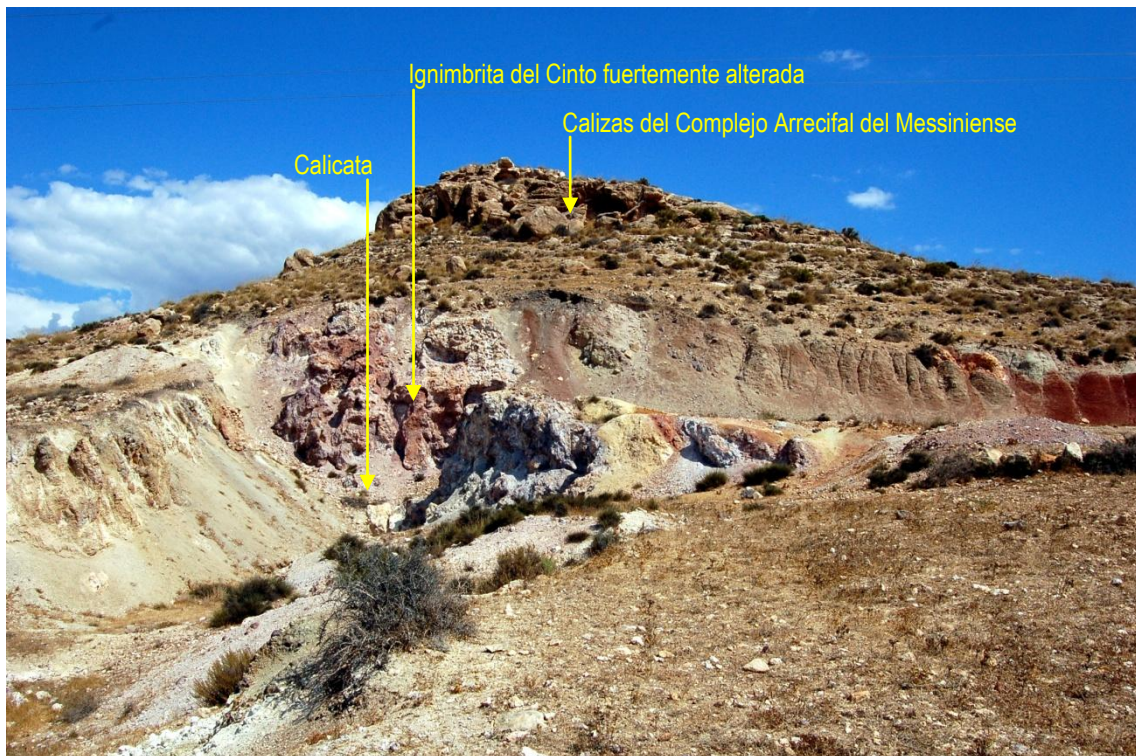
sobre lo que pueda haber debajo de los sedimentos del relleno. Al respecto hay una famosa frase del célebre astrofísico norteamericano Carl Sagan (1934-1996):

*La ausencia de evidencia no es evidencia de ausencia ...*

Las zonas morfológicamente deprimidas se pueden originar por dos mecanismos principales (o una combinación de ambos), bien por el papel erosivo subsecuente que inducen las fallas; bien porque las rocas de ese determinado sector sean particularmente meteorizables. En este último sentido ¿cómo conseguir que las rocas volcánicas sean particularmente meteorizables? De manera rápida se nos vienen a la mente dos posibilidades:

- Porque han sido sujetas a alteración argílica avanzada, con abundante formación de caolinita.
- Porque ha habido emplazamiento de una diatrema, con su anillo estructural correspondiente y en su interior hay rocas volcánicas deleznales.

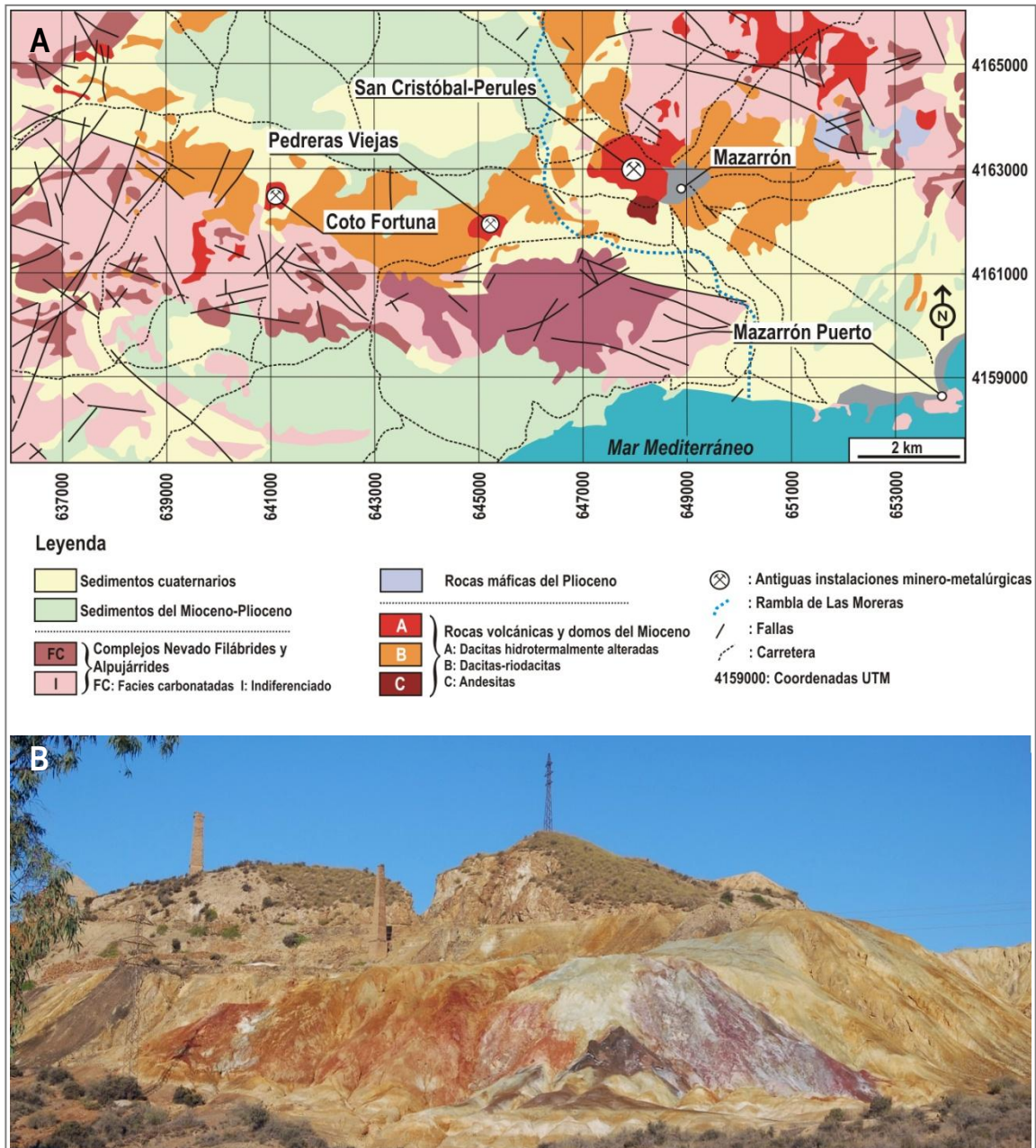
Cualquiera de las dos posibilidades resulta una propuesta de exploración atractiva, pero hasta donde sabemos, pocos trabajos exploratorios se llevaron a cabo en este entorno y los que se hicieron consistieron fundamentalmente en el desarrollo de calicatas (trincheras) en afloramientos de la periferia.



*Calicata de exploración en el borde sureste del Valle de Rodalquilar.*

Por otra parte, el sector del Cinto hay que entenderlo como aquel sitio donde la desgasificación no fue masiva “una” vez sino “dos”, con la formación de la caldera de La Lomilla. Es decir, algo malo *per se* ocurrió dos veces. Sin embargo, la Cluff Resources – Antofagasta Holdings JV, en una actitud muy parecida a la de la mítica historia de Nasrudín, sus llaves y la farola, decidió insistir con el Cinto.

Otro tanto podría decirse de Navan Resources Plc en Mazarrón (a lo largo de la misma provincia metalogénica que alberga Rodalquilar). El Distrito Minero de Mazarrón es también de edad miocena y en este caso, se trata de filones de Pb-Zn-(Ag) que encajan en domos félsicos periféricos a una gran cuenca del Mioceno-Plioceno.



Distrito de Mazarrón. A: geología del distrito (tomada de Oyarzun et al. 2011). B: Sector de San Cristóbal - Perules; los antiguos residuos mineros dan gran vistosidad al lugar.

Navan Resources Plc realizó sus trabajos de evaluación del antiguo distrito en los años 1990's y encontró que existía un potencial claro en reservas para explotar nuevamente los yacimientos, principalmente la zona de San Cristóbal - Perules. El problema de este cabezo (como son llamadas en España estas estructuras volcánicas prominentes) es que está “al lado” del pueblo de Mazarrón, y la gente se negó a que hubiera una explotación minera.

¿Se podría haber planteado la exploración de otra manera? Claro que sí, habría sido más costosa y con mayores riesgos implicados, pero lo cierto es que nada se hizo en relación a la cuenca de Mazarrón (Mioceno-Plioceno), donde sondeos geotérmicos muestran la existencia en profundidad de las mismas rocas volcánicas de la periferia (Crespo et al., 2013).

Al respecto, una cosa es llevar a cabo una exploración del tipo *brownfields* y otra no moverse ni un centenar de metros de los cuerpos conocidos.

*Exploration is termed either Greenfields or Brownfields depending on the extent to which previous exploration has been conducted on the tenements in question. Greenfields alludes to unspoilt grass, and brownfields to that which has been trodden on repeatedly. While loosely defined, the general meaning of brownfields exploration is that which is conducted within geological terrain within close proximity to known ore deposits. Greenfields are the remainder.*

*Greenfields exploration is highly conceptual, relying on the predictive power of ore genesis models to search for mineralisation in unexplored virgin ground. This may be territory which has been drilled for other commodities, but with a new exploration concept is considered prospective for commodities not sought there before.*

*Wikipedia (2013b)*

### 5.1.5 Sobre colores, montañas, valles y el régimen tectónico

Comenzamos este capítulo llamando la atención sobre algunas características de la percepción visual que puede tener el geólogo en el campo. Al respecto destacamos tres aspectos, la importancia del color, la verticalidad y el efecto de presencia-ausencia sobre nuestra vista. A estos, deberíamos agregar un cuarto factor que a secas llamaremos “geológico”.

Sobre los primeros queda poco por decir, salvo insistir que si las montañas y los colores llaman más la atención que las zonas deprimidas de escasa coloración, podemos perder importantes blancos de exploración antes de que estos hayan sido estudiados. No se puede tener una opinión sobre lo que ni siquiera consideramos.

Sobre la geología tenemos mucho que decir, y lo primero que deberíamos pensar es qué hizo diferente el pobre Rodalquilar del rico epitermal aurífero de El Indio en Chile. Podríamos haber elegido cualquier otro yacimiento andino, pero El Indio es lo suficientemente conocido (aunque solo sea de nombre), como para que nos sirva de ejemplo.

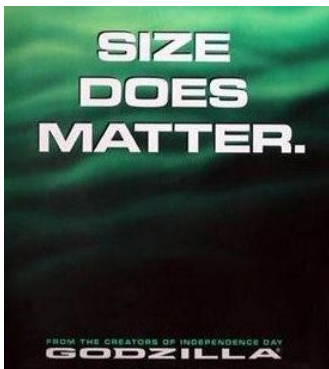
Tanto Rodalquilar como El Indio son del Mioceno y ambos son de alta sulfuración. Desgraciadamente aquí acaban los puntos en común. Veamos cuales son las discrepancias:

- Régimen tectónico: mientras Rodalquilar se forma bajo condiciones generalizadas de extensión (colapso gravitación del orógeno Bético) (Doblas y Oyarzun, 1989; Oyarzun et al., 1995), El Indio lo hace en un régimen de acortamiento cortical horizontal (30-40 km) con desarrollo de fallas inversas de gran ángulo (Davidson y Mpodozis, 1991).
- Magmatismo: mientras Rodalquilar se asocia a estructuras tipo caldera, El Indio empezaba a formarse en un régimen más bien compresivo, durante el emplazamiento de la Unidad Infiernillo (cuerpos intrusivos de emplazamiento somero) (Davidson y Mpodozis, 1991), lo que permite inferir que la pérdida de volátiles fue mínima.



La mina de El Indio antes de su cierre en 2002 (imágenes<sup>2,3</sup>).

Es decir, hablamos de dos mundos aparte, uno caracterizado por desgasificación masiva (Rodalquilar) y otro por la retención de volátiles durante una etapa de compresión (El Indio). Volveremos más adelante sobre esta temática, porque el régimen tectónico puede ser decisivo en el momento de reservar o permitir la pérdida masiva de volátiles.



En el cine fantástico y la minería el tamaño “si” importa (imágenes<sup>4,5</sup>).

Buscar “lagartijas” puede ser interesante y entretenido, pero el gran premio en exploración se consigue cuando alguien encuentra un yacimiento tipo “Godzilla” ...

Esta no es una problemática “academicista” (volátiles en magmas) carente de todo valor práctico; de hecho ¿qué más práctico y contingente podría ser que el

dilucidar si los intrusivos que buscamos perdieron o no parte de su carga de volátiles? En la siguiente sección (5.2) analizaremos como el régimen tectónico puede ser decisivo para que se formen grandes o pequeños yacimientos.

### 5.1.6 Cuando apostar fuerte en zonas “hundidas” paga dividendos

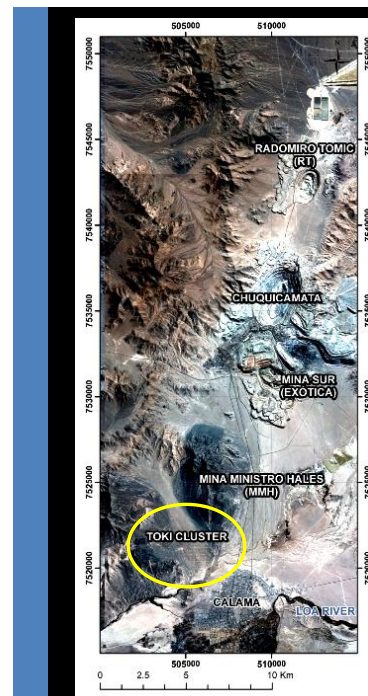
Ya solo para terminar la sección, un llamado de atención final sobre las grises y deprimidas zonas de valles o cuencas. Vale la pena dedicarles un tiempo, y si alguien puede albergar dudas al respecto, sólo recordar la exitosa campaña de exploración que dio como resultado el hallazgo del *cluster* de pórfidos Toki, en el Distrito Minero de Chuquicamata (Rivera et al., 2009).



Donde muchos solo vieron una aburrida y desolada planicie (Pampa Toki) algunos geólogos de exploración vieron riquezas. Esto es Pampa Toki, en el Distrito Minero de Chuquicamata, sector que alberga un cluster de pórfidos cupríferos cubiertos por potentes gravas.

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 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. El problema era que, 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



El cluster Toki y el Distrito de Chuquicamata.

Rivera et al. (2012)

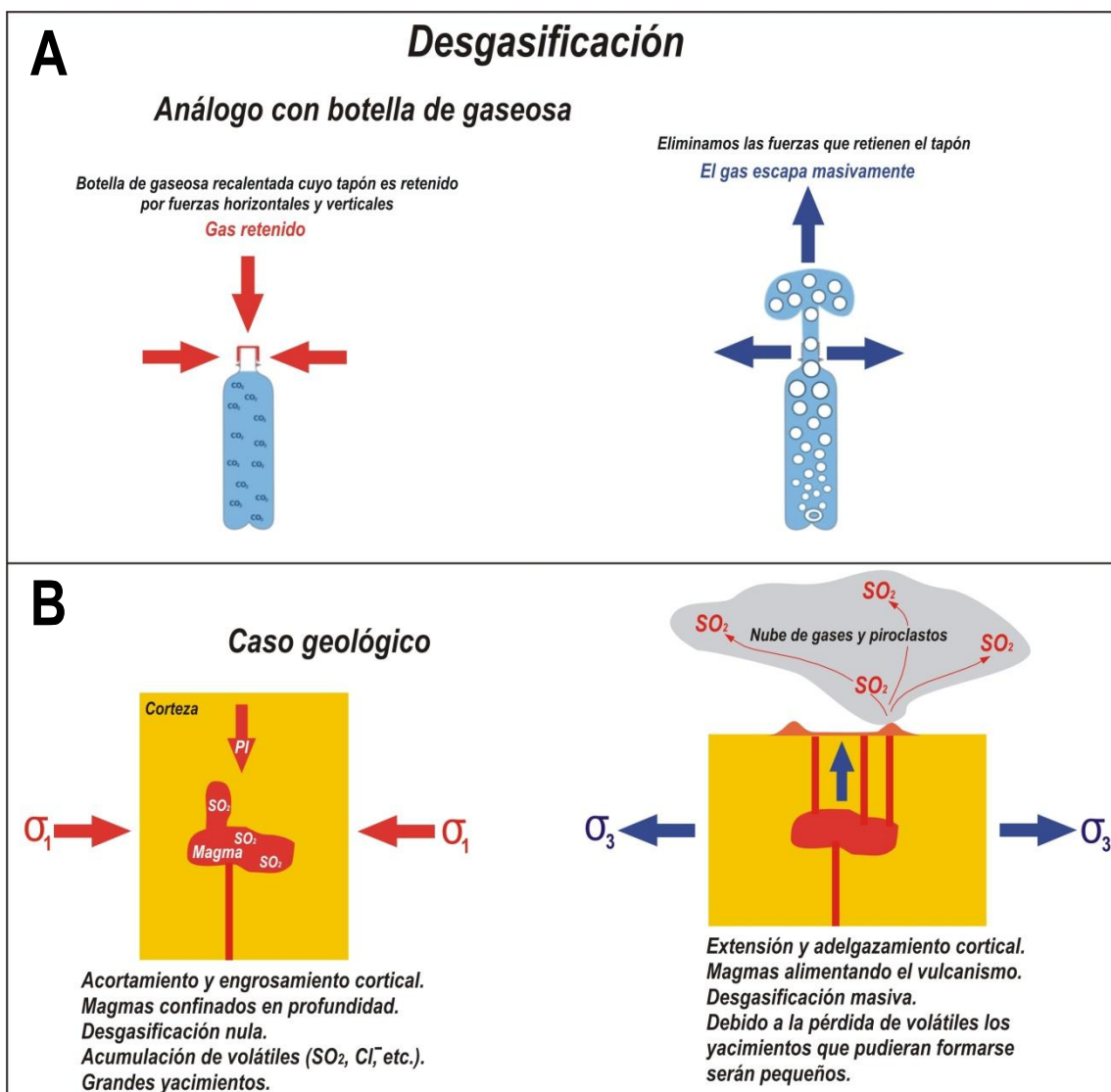
“inteligencia”, primero se realizaron sondeos *scout* (preliminares), en una malla de 1000 x 1000 m atravesando las gravas y entrando solo unos pocos metros en la rocas inferiores. Esto permitió obtener información de primera línea y a bajo coste. Así se pudo tener una primera visión geológica del sector, recabar datos geoquímicos y mineralógicos (limonitas, sulfuros relictos).

Con este trabajo completado con éxito, 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 una vez más tributo al excelente grupo de geólogos de Exploraciones Mineras (EM) basado en Calama, cuyo trabajo debe ser calificado como excelente.

## 5.2. Cuando extensión y compresión intercambian papeles de bueno y malo

### 5.2.1 Dependiendo de la escala la compresión puede ser buena

Durante casi todo el Capítulo 4 pusimos un fuerte énfasis en lo importante que son las estructuras extensionales. Dijimos que la extensión abre espacios y eso permite el tránsito de fluidos y la deposición de minerales. ¿Algo que objetar? Nada aparentemente ¿O sí? En la primera sección de este capítulo (5.1) nos introducimos en el tema de los volátiles, y en la importancia capital que tiene su retención en las cámaras magmáticas. El razonamiento es simple, si no hay volátiles como el  $\text{SO}_2$  (porque han sido expulsados a la atmósfera) no se formarán sulfuros de cobre. Más claro no se puede ser en esta materia.

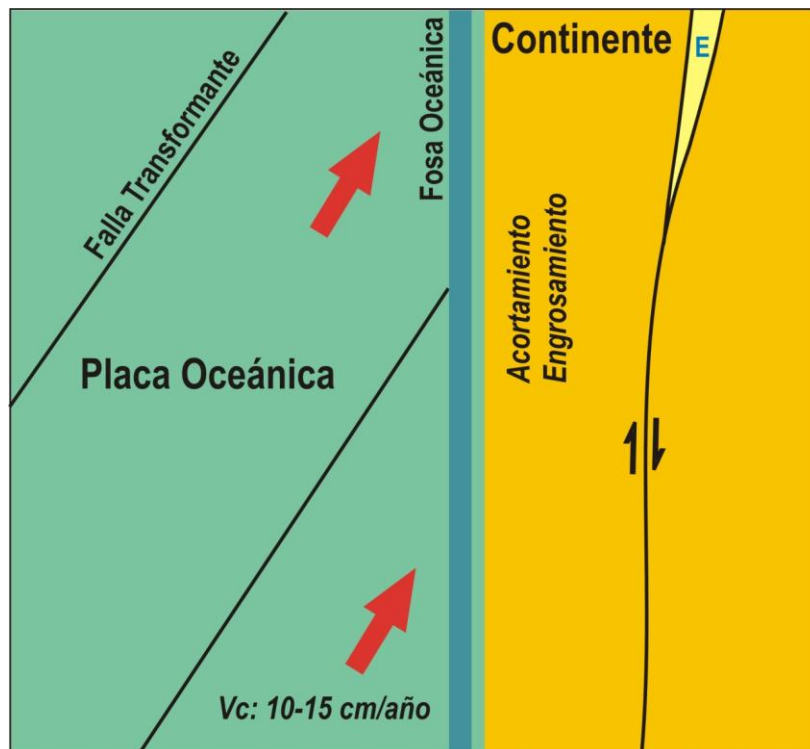


Modelo simplificado sobre retención/pérdida de volátiles. A: análogo de la botella de gaseosa con  $\text{CO}_2$ . B: Caso geológico, con volátiles como  $\text{SO}_2$  o  $\text{Cl}^-$  que pueden o no ser retenidos dependiendo del régimen tectónico (imagen botella<sup>6</sup>). PI: Presión litostática.



Del razonamiento anterior parece evidente que un régimen tectónico compresivo es clave para que puedan formarse mineralizaciones importantes. La pregunta es ¿cómo juntamos compresión y extensión en un mismo escenario? A pesar que la intuición nos indica que compresión y extensión son conceptos mutuamente excluyentes, veremos que al final todo es un tema de escalas y niveles corticales.

De hecho, a la gran escala, la extensión puede ser acomodada durante el acortamiento cortical de un orógeno (p.ej., Vissers et al., 2010). Por otra parte, como vimos en el análisis de sistemas de fallas en el capítulo anterior, siempre podremos encontrar zonas en régimen transtensivo aún cuando toda una región continental esté siendo sujeta a subducción rápida tangencial.



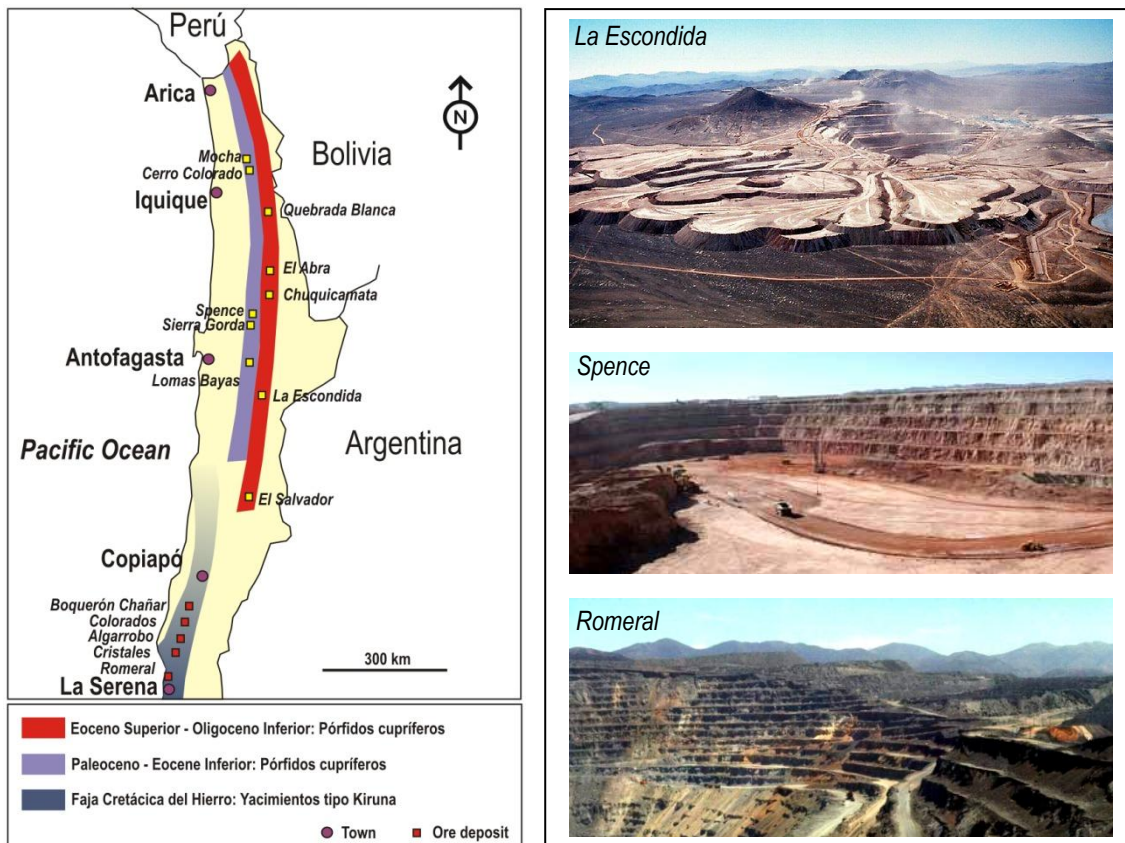
*Extensión local (régimen transtensivo) asociado a un desgarre dextral a la escala regional-continental inducido por la subducción oblicua a gran velocidad de una placa oceánica. La zona continental está siendo sometida a fuerte compresión lo que no impide que se formen zonas donde domina la extensión. E: Extensión; Vc: Velocidad de convergencia.*

Así, si lo favorable es que los cuerpos magmáticos permanezcan en profundidad (media o somera), la corteza continental deberá estar sujeta a un régimen compresivo. Solo de esta manera retendrán su carga de volátiles. La extensión por su parte permite el ascenso fácil de los magmas a niveles superiores, lo que culmina con un vulcanismo que no es más que la expresión superficial del magmatismo profundo. En el momento que comienza la actividad volcánica se abren canales para la desgasificación.

### 5.2.2 Provincias metalogénicas contrastadas en el norte de Chile

El norte de Chile está caracterizado principalmente por la presencia masiva de rocas plutónicas y volcánicas. Estas a su vez se disponen en fajas N-S con edades decrecientes de oeste a este. Esta disposición de fajas magmáticas tiene su contrapartida en términos de una faja de hierro y cobre a lo largo de la franja costera (Cretácico Inferior a Medio) y dos fajas de pórfidos cupríferos (en una posición central) (Oyarzun et al., 2001, 2003).

- Paleoceno Superior – Eoceno Inferior, inmediatamente al oeste de la Cordillera de Domeyko.
- Eoceno Superior – Oligoceno Inferior, a lo largo de la Cordillera de Domeyko.



Fajas metalogénicas del norte de Chile en las que centraremos nuestra discusión (Oyarzun et al., 2001, 2003). A la derecha, algunos yacimientos de estas fajas. Imágenes<sup>7,8</sup>.

La mayoría de los yacimientos de hierro de la faja cretácica son del tipo Kiruna y afloran a lo largo de una faja de más de 500 km entre los 25° y 30°S. El marco geológico está caracterizado por la presencia de andesitas del Cretácico Inferior y dioritas-granodioritas del Cretácico Medio. Bajo un punto de vista estructural se relacionan directamente con la Zona de Falla de Atacama. Esta provincia metalogénica abarca grandes y pequeños yacimientos de hierro. Los “gigantes” se localizan al sur de Copiapó y los pequeños al norte de esta localidad.

En lo que respecta a los pórfidos cupríferos, la actividad magmática cenozoica condujo a la formación de dos fajas contrastadas de pórfidos. La más antigua contiene los pórfidos más pequeños, que se relacionan con rocas calco-alcalinas normales (volcánicas y plutónicas); por su parte la segunda faja contiene los gigantes mundiales como Chuquicamata o La Escondida y se asocia a rocas exclusivamente plutónicas de tendencia adakítica (Oyarzun et al., 2001).

### 5.2.3 Magmas y volátiles: extrayendo metales

Hay dos aspectos clave en relación con la formación de yacimientos minerales: la fuente de los metales y las especies volátiles que transportan y depositan esos metales. Dado que ni el hierro ni el cobre requieren fuentes particularmente enriquecidas en esos elementos, la variable realmente importante son las especies volátiles. En el caso del hierro, el metal es lixiviado desde la roca encajante, es subsecuentemente transportado como  $\text{FeCl}_2$  y finalmente depositado como  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a profundidades relativamente someras (~ 4 km) y temperaturas de 450-550° C (Ménard, 1995).

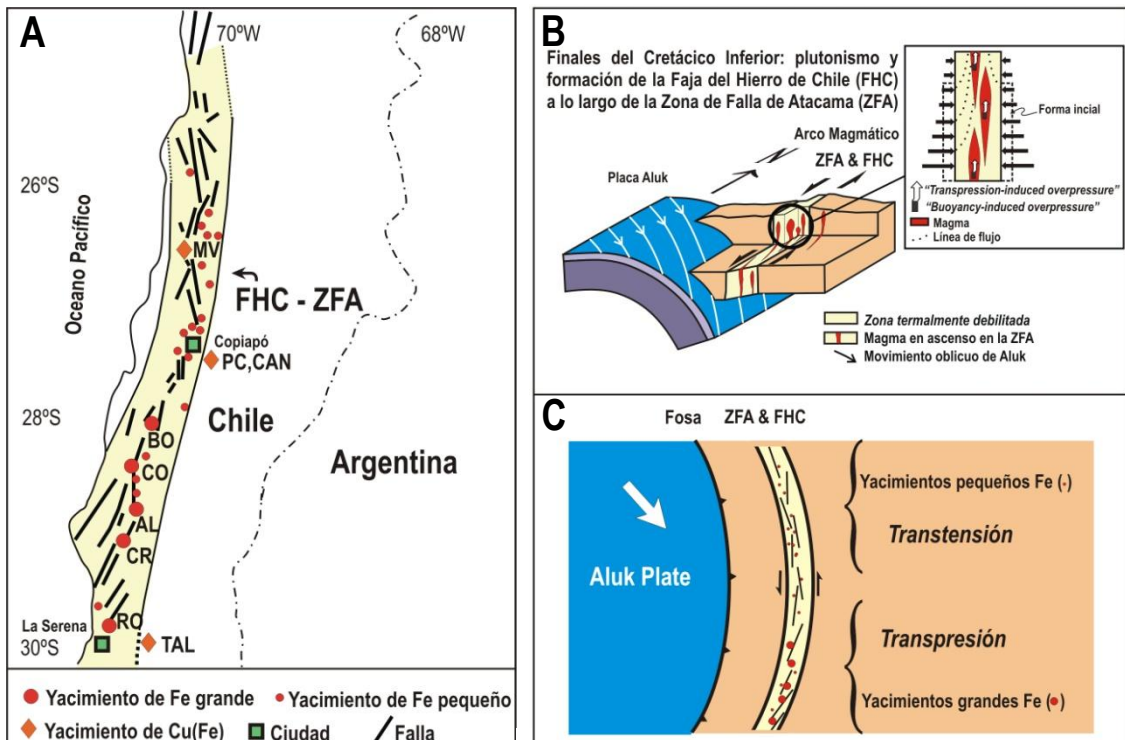
Por su parte, los pórfidos cupríferos se derivan de sistemas magmáticos ricos en azufre, altamente oxidados, con una fugacidad de oxígeno alta. A su vez, una alta fugacidad de oxígeno y altos contenidos de agua se relacionan a través de la reacción de equilibrio:  $\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ . Dada la alta difusividad de  $\text{H}_2$ , la fugacidad de oxígeno aumenta para mantener el equilibrio, y concomitantemente con este aumento, la razón  $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$  aumenta unas mil veces o más, lo que finalmente resulta en la extracción casi completa de azufre a partir del fundido (Burnham, 1979). Por lo tanto, cloro y sulfato son las palabras clave en relación con la formación de yacimientos de hierro y cobre.

### 5.2.4 El régimen tectónico y la retención de volátiles

La faja del hierro se formó hacia finales del Cretácico Inferior, y para entonces la corteza continental había acumulado la suficiente energía como para inducir la canalización y emplazamiento de magmas a lo largo de la Zona de Falla de Atacama (ZFA). Al respecto debemos destacar la curvatura de la ZFA (cóncava hacia al mar) y la subducción oblicua desde el norte de la placa oceánica Aluk, lo que creó condiciones de transtensión al norte y transpresión al sur.

Es precisamente a lo largo del segmento sur de ZFA que se emplazaron los cinco gigantes de la faja cretácica del hierro: Boquerón Chañar, Colorados, Algarrobo, Cristales, and Romeral. Dado que el cloro se pierde a bajas presiones

(Lowenstern, 1994) la zona sur de ZFA era la perfecta para que este volátil permaneciera y pudiera lixiviar y movilizar el hierro.



La Faja Cretácica del Hierro de Chile (FHC). A: Distribución de yacimientos (grandes y pequeños) de Fe en la FHC; B: Emplazamiento a lo largo de la Zona de Falla de Atacama (ZFA) de los cuerpos intrusivos de la FHC. C: Modelo tectónico (con curvatura exagerada) para la formación de grandes y pequeños yacimientos de Fe. Adaptadas de Oyarzun et al. (2003).

En lo que se refiere a los pórfidos cupríferos, la pregunta inicial que tiene uno que hacerse es por qué los gigantes del cobre se concentraron en la segunda faja. Entre estos destacan Chuquicamata (5,8 Gt con ley 0,55% Cu), La Escondida (2,3 Gt con ley 1.15% Cu), o El Abra (1,45 Gt con ley 0.55% Cu). Por su parte, la faja más joven contiene yacimientos de menor tonelaje como Lomas Bayas (130 Mt con ley 0,53% Cu) o Spence (400 Mt con ley 1% Cu) (Oyarzun et al., 2001).

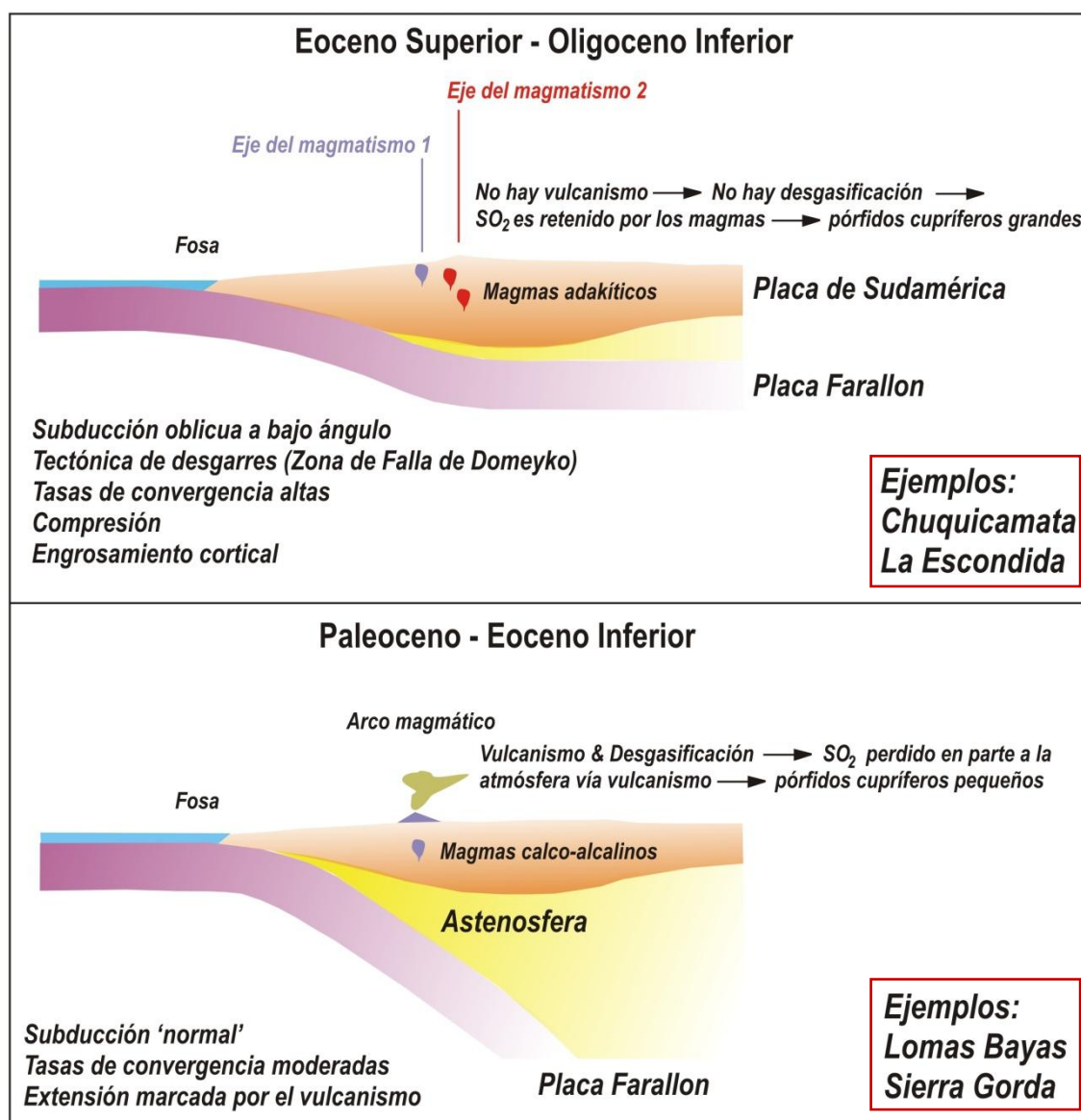
Al respecto, mientras la primera faja se desarrolló conjuntamente con un vulcanismo andesítico alimentado por magmas típicamente calco-alcalinos, la

The term adakite comes from the island of Adak (Aleutian Islands, Alaska) and was originally defined to describe Cenozoic (<25 Ma) arc-related volcanic rocks with a number of geochemical characteristics, including  $\text{SiO}_2 \geq 56 \text{ wt\%}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 5 \text{ wt\%}$ ,  $3 \text{ wt\%} \leq \text{MgO} \leq 6 \text{ wt\%}$ ,  $\text{Y} \leq 18 \text{ ppm}$ ,  $\text{Sr} \geq 400 \text{ ppm}$  (Defant and Drummond, 1990). Contrary to normal, arc-related tholeiitic and calc-alkaline rocks that originate in the mantle wedge and later evolve by crystal fractionation or other processes, the adakitic rocks are derived from direct partial melting of a subducting slab (Defant and Drummond, 1990). These authors related the magma generation to the melting of hot, young (<25 Ma) subducting lithosphere. Numerical and petrological models (Peacock et al., 1994) restrict the process to even younger subducting lithosphere (<5 Ma) at typically 60-80 km depth. However, this would leave unexplained the important adakitic magmatism recorded in many places around the world, including the Andean chain (e.g., Maury et al., 1996; Thiéblemont et al., 1997; Gutscher et al., 2000; BRGM, 2001).

Oyarzun et al. (2001)

segunda no tiene vulcanismo contemporáneo y el magmatismo es de tendencia adakítica. A esto tenemos que agregarle un aspecto crítico, la primera se desarrolló durante una subducción a relativamente gran ángulo bajo condiciones corticales extensionales, mientras que la segunda, la de los gigantes cupríferos se desarrolla durante un episodio de fuerte convergencia oblicua a gran velocidad que generó condiciones compresivas. No hubo “conexión volcánica” entre los magmas que dieron origen a yacimientos como Chuquicamata y la superficie.

En otras palabras, en un caso (la primera faja) parte de los volátiles se perdieron a la atmósfera vía vulcanismo, mientras que en la segunda el sistema fue cerrado en profundidad (fase compresiva).



Evolución en el magmatismo, condiciones tectónicas y tamaño en pórfidos cupríferos desde el Eoceno al Oligoceno Inferior. Adaptada de Oyarzun et al. (2001).

### 5.2.5 Sobre lo que es “bueno” y lo que es “malo”

Como hemos podido apreciar a lo largo de esta sección hay mucho que matizar cuando se habla de buenas y malas condiciones para la formación de yacimientos minerales. Al respecto dos comentarios:

- Que el régimen tectónico y por lo tanto las estructuras sean positivas o negativas para albergar yacimientos minerales depende mucho de la escala de los fenómenos. Si bien a escala de yacimiento necesitamos los espacios, es decir, de condiciones extensionales que los generen, a la escala de emplazamiento de cuerpos magmáticos la realidad cambia substancialmente → Necesitamos compresión para que el magmatismo no se manifieste en superficie como vulcanismo y comience la desgasificación profunda.

- Aunque la tectónica y la geología estructural sean magníficas herramientas para entender un yacimiento o una provincia metalogénica, también la petrología juega un papel muy importante. Normal, las ciencias geológicas no son mundos (o mundillos) cerrados, y quién trabaja en algo relativamente específico no puede encerrarse en esa temática porque corre el riesgo de no entender correctamente una situación geológica

compleja (aunque por otra parte ¿hay alguna que no lo sea?). Se reverencia la especialización, pero en el fondo lo que se hace es glorificar la ignorancia. Digámoslo una vez más, “un especialista es aquel que sabe más y más de menos y menos”. Nadie puede ser un experto “en todo”, pero eso no es óbice para que nuestro control sobre otras disciplinas geológicas sea escaso. En minería no se puede renunciar al conocimiento.

Visión del especialista ...

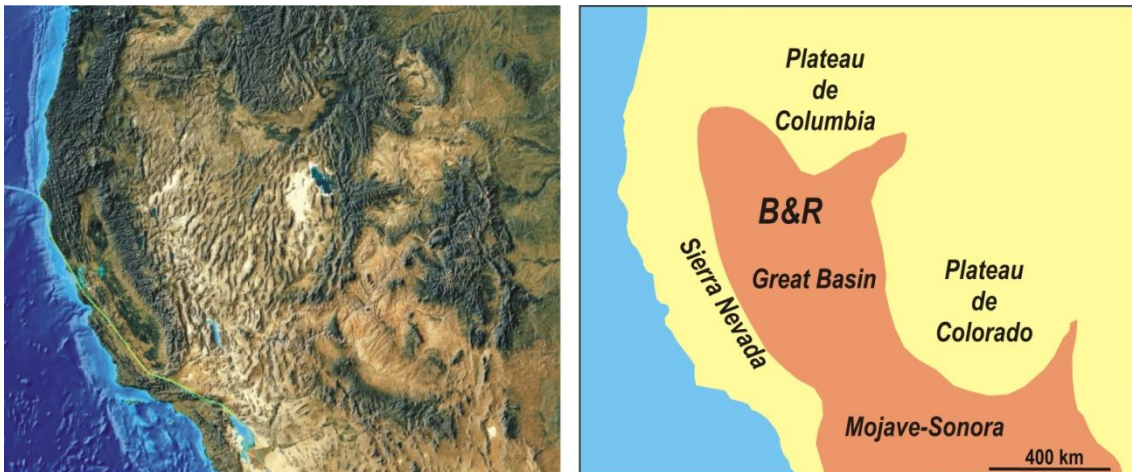


Tomada de Oyarzun (2007)

## 5.3 Formación de cuencas, vulcanismo y un planteamiento estratégico

### 5.3.1 Cuando la extensión domina el escenario geológico

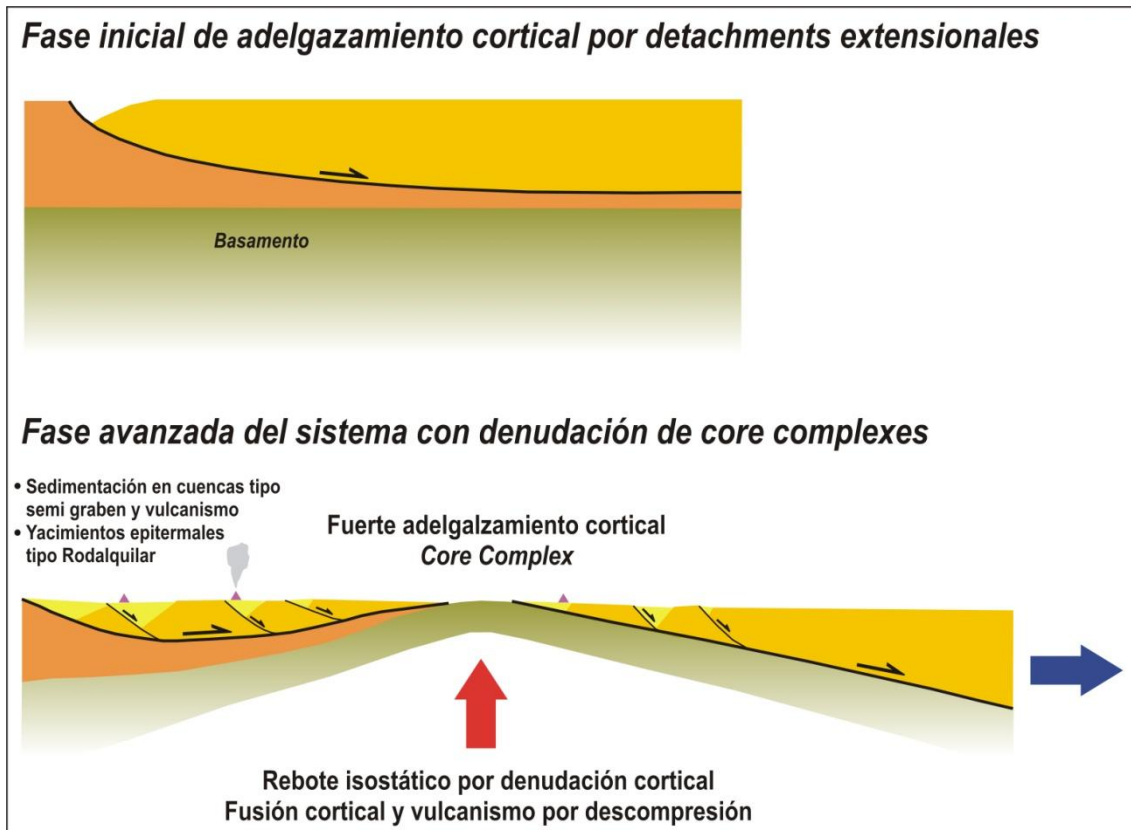
Probablemente no exista una provincia extensional más documentada que la del US Basin and Range (B&R) en el SW de Norte América. En su sector más amplio alcanza una anchura (E-W) de unos 1000 km. La provincia tectónica debe su nombre a un conjunto de sierras y valles orientados NNE y NNW espaciados entre cresta y cresta unos 25-35 km.



La provincia tectónica extensional del Basin and Range (B&R) en el SW de los Estados Unidos y otras unidades geológicas importantes. Imagen<sup>9</sup>.

La provincia se caracteriza por un desarrollo muy importante de fallas normales incluyendo grandes *detachments* extensionales con rebote isostático y denudación de rocas antiguas (*core complexes*) a lo largo de ventanas tectónicas, sismicidad, alto flujo de calor ( $90 \text{ mWm}^{-2}$ ), y una alta elevación regional. La región es geológicamente famosa además por su vulcanismo cenozoico y fenómenos de rotación de bloques en sistemas de fallas lístricas que acaban teniendo buzamiento nulo en su etapa más evolucionada.

La historia del B&R hay que entenderla en un contexto amplio, que se inicia en el Mesozoico con el advenimiento de la orogénesis Larámica (Cretácico Superior – Terciario Inferior) (Park, 1988), que llevara el SW de los Estados Unidos a una situación de sobre-engrosamiento cortical. Bajo estas condiciones, un orógeno además termalmente debilitado, colapsará bajo su propio peso (Wernicke, 1981). Este colapso se verificó a través de grandes *detachments* extensionales, fallamiento extensional local y regional, y vulcanismo asociado. La extensión en la Great Basin no comenzó hasta el Eoceno Superior u Oligoceno Inferior (~38 Ma), y fue acompañada de vulcanismo félsico e intermedio; hacia el Mioceno medio, el vulcanismo se había hecho predominantemente basáltico (Wernicke et al., 1987).



*Evolución de un detachment extensional en el tiempo. Note como el adelgazamiento cortical conlleva finalmente un “rebote isostático” y el ascenso de rocas antiguas hasta la superficie. Observe además a la izquierda la importancia de las cuencas para la presencia de mineralizaciones someras de tipo epitermal.*

Como comentábamos arriba, el desarrollo de *detachments* extensionales y fallamiento normal lístrico fueron rasgos típicos del escenario tectónico del B&R. Al respecto convendría aclarar que la principal diferencia entre un sistema lístrico de fallas normales y un detachment extensional es de escala. Así mientras las fallas normales suelen operar en un rango de orden “kilométrico” los grandes detachments superan fácilmente los 100 km en sección y pueden cortar a través de toda la corteza.

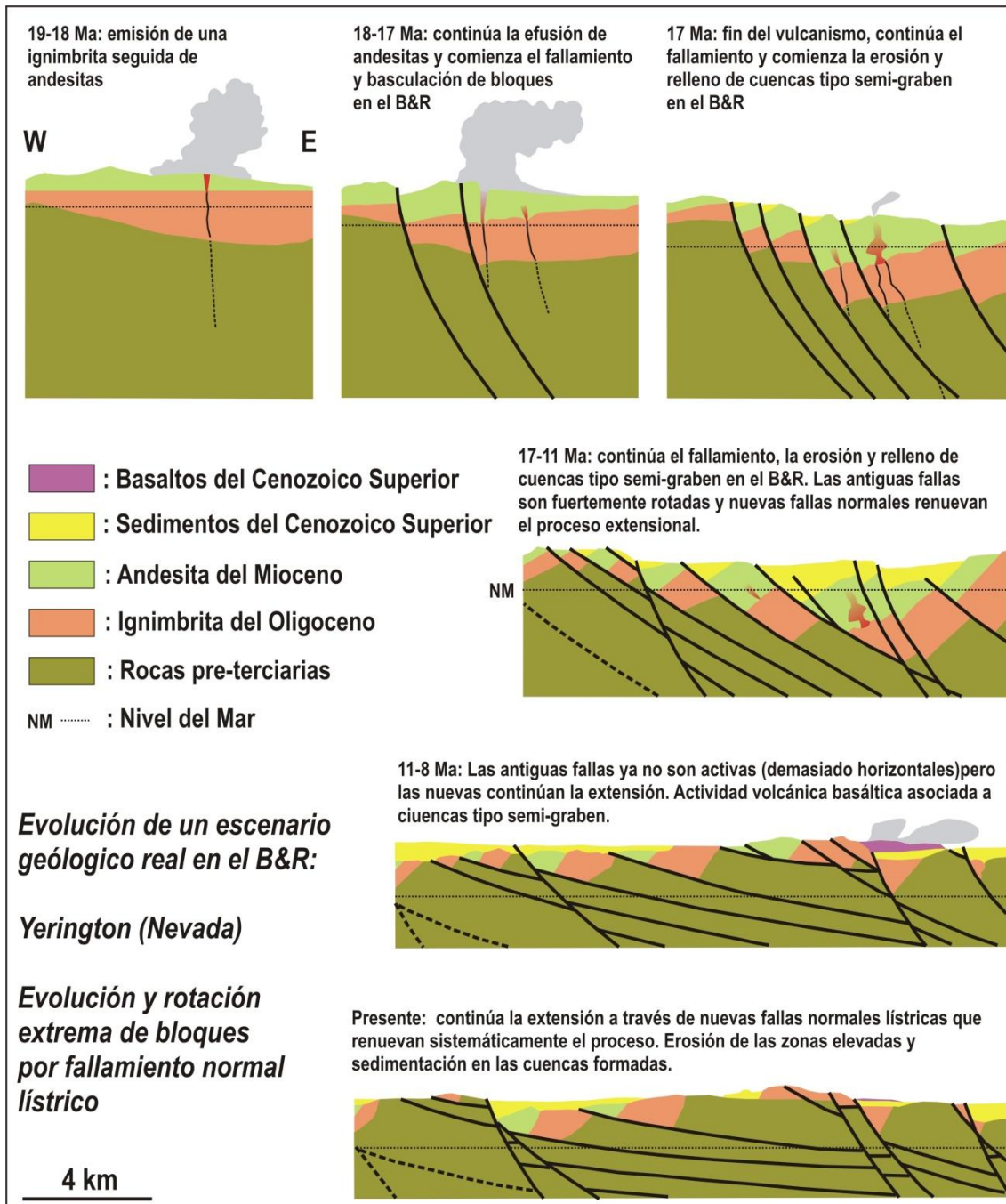
Bajo el punto de vista de la exploración tanto los sistemas lístricos de fallas normales como los grandes detachments extensionales pueden jugar un papel importante en la búsqueda de yacimientos epitermales de metales preciosos. Así por ejemplo en España existen al menos dos distritos relacionados de una manera u otra con etapas extensionales que siguieron a otras de compresión y

*The northeastern sector of the Spanish Central System hosts important Stephanian-Permian silver-base metal epithermal mineralizations defining the so-called Hiendelaencina District. The overall geotectonic evolution of this region indicates a major late Variscan extensional period involving the unroofing of dome-shaped metamorphic core complexes, which ultimately led to the radial brittle disruption of these bodies allowing the ascent of andesitic magmas and high-level hydrothermal activity. The deposits are hosted by high-grade metamorphic rocks belonging to these complexes.*

Concha et al. (1992)



finalmente colapso de los orógenos. Son los casos de Rodalquilar (ya revisado en este capítulo) y Hiendelaencina (Concha et al., 1992), un distrito epitermal de plata emplazado en un *core complex*.

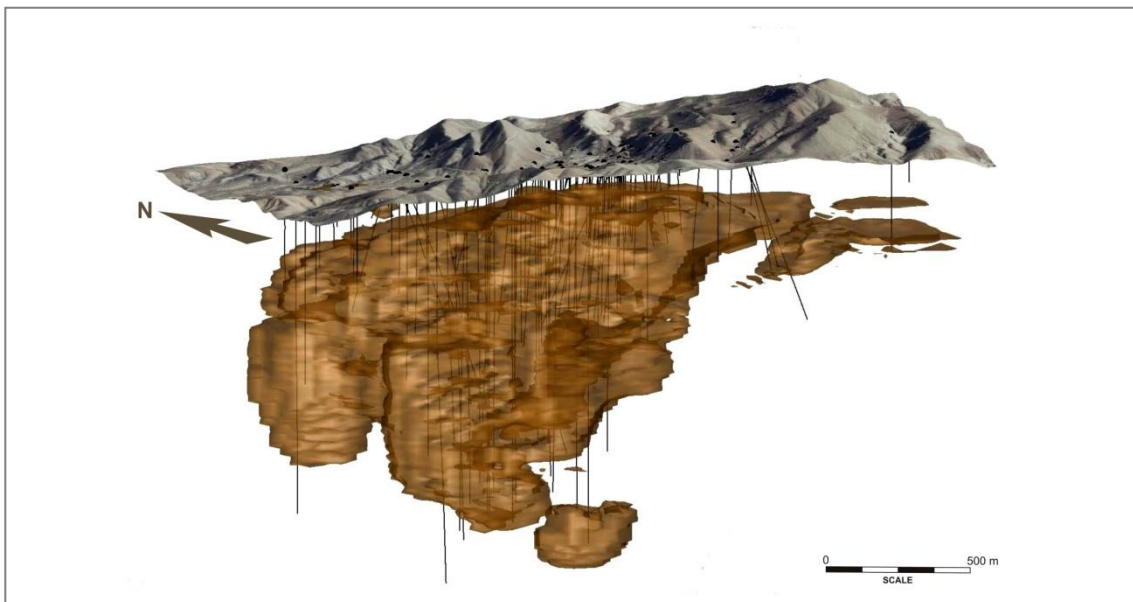


Evolución tectónica de la zona de Distrito de Yerington Nevada. Note la importante rotación (contra el sentido de las agujas del reloj) de las fallas lístricas normales, conducente a un desmantelamiento del edificio volcánico, el afloramiento de rocas más antiguas, y a la pérdida total de una estratigrafía "normal". Puede que las rocas volcánicas no se plieguen bien, pero fallarse lo hacen estupendamente, y si la extensión es importante, la situación final puede ser más compleja (incluso) que la que corrientemente se encuentra en un cinturón de plegamiento de tipo alpino. Adaptada de Proffett (1977).

El Distrito de Yerington (Nevada) ilustra como ninguno las complejas relaciones estructurales que se pueden plantear en provincias tectónicas extensionales del tipo B&R. Los yacimientos cupríferos del distrito (Dilles et al., 1992) se asocian al batolito del Jurásico medio de Yerington, el cual intruye rocas volcánicas, andesíticas y dacíticas. Este plutón varía en composición de monzodiorita cuarcífera a granito. La intrusión más antigua es una cuarzomonzodiorita, que a su vez está cortada por otro intrusivo que varía composicionalmente de cuarzomonzonita a granito.

La fase final del emplazamiento del batolito dio lugar al desarrollo de pórfidos cupríferos. Ahí se reconoce el pórfido de Ann Mason, que consiste en un granito porfírico y diques porfíricos graníticos cogenéticos. Un enjambre de diques graníticos porfíricos surge de la cúpula y se extiende hasta la superficie terciaria. La alteración hidrotermal y mineralización se centran en el enjambre de diques. Edades radiométricas (U-Pb) en zircones para la cuarzomonzodiorita y el enjambre de diques dan valores de 169.4 y 168.5 Ma.

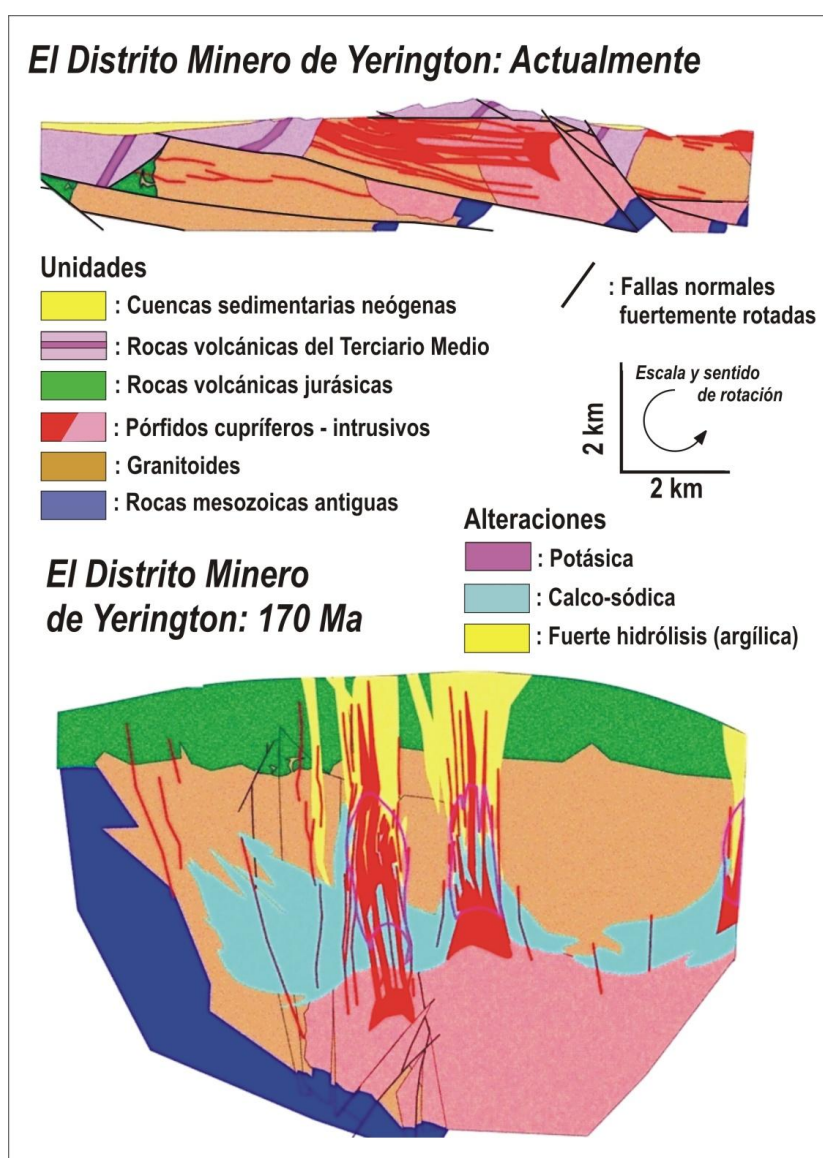
El tonelaje de Ann Mason (con una ley de corte de 0,4%) es de 315 Mt con una ley media de 0,5% Cu, o de 1410 Mt y una ley media de 0,34% Cu para una ley de corte de 0,2% Cu. En lo que respecta a molibdeno se estiman unos 166 Mt con una ley media de 0,01% Mo para una ley de corte de 0,3% Cu (Entree Gold Inc., 2011).



Envolvente del cuerpo mineralizado del pórfido Ann Mason para una ley de corte de 0,2% Cu. Adaptada de Entree Gold Inc. (2011).

Observando la envolvente de 0,2% de la figura de arriba debería sorprender de alguna manera su carácter “aplastado”. En vez de la verticalidad que uno esperaría para la mineralización de un pórfido cuprífero (p.ej., Lowell y Guilbert, 1970; Gustafson y Hunt, 1975) nos encontramos con que la “horizontalidad” domina el

escenario. Aquí es cuando interviene el comprender a fondo la geología de una región antes de empezar a planificar campañas de exploración. Mucho hay que agradecer al brillante trabajo de John M. Proffett (1977), quien por aquel entonces era geólogo de la empresa Anaconda. Esta empresa tenía vocación por la cartografía seria y su metodología de detalle para bancos o galerías en minas aún se utiliza, siendo conocida universalmente como el “Método Anaconda”. Por otra parte, siguiendo el camino abierto por Proffett (1977), la geología del entorno del pórfido de Ann Mason se pudo comprender de una manera adecuada (ver siguiente figura). Pensamos que cualquier que esté leyendo estas líneas comprenderá ahora la importancia “crucial” de comprender la evolución tectónica de una región si queremos explorar. Solo hay que pensar en los sondeos, no es lo mismo intentar cortar un cuerpo vertical que otro horizontal.



*El Distrito Minero de Yerington (pórfido Ann Mason) después de los procesos mineralizadores (abajo) pero antes del fallamiento y basculación de bloques del Terciario (arriba). Adaptada de Barton (2013).*

### 5.3.2 Estrategia y táctica en el Siglo XXI

Dice Soler (2012) que la estrategia tiene que ver con lo que queremos conseguir; son las grandes líneas maestras que nos llevarán a alcanzar un objetivo definido. La táctica por su parte es el detalle de cómo vamos a poner la estrategia a trabajar, que herramientas usaremos y cómo. La estrategia es de largo plazo mientras la táctica se centra en el corto plazo.

La exploración minera no dista mucho de este modelo, así que conviene definir claramente cuál es nuestra estrategia y cuales las tácticas. Si nuestra estrategia como empresa consiste descubrir pórfidos cupríferos (para satisfacer la demanda mundial de un metal cuyo precio se percibe al alza) en una provincia extensional volcano-sedimentaria, entonces convendrá definir claramente cuáles serán las tácticas. Como ejemplo muy simple de tácticas:

- Aunque parezca absurdo decirlo así, determinar si “efectivamente” ha habido extensión en dicha región. El primer enfoque será a través de informes geológicos o trabajos científicos, y unos y otros pueden estar equivocados. ¿Cómo determinamos que ha habido extensión? Fallamiento normal + rocas volcánicas + cuencas sedimentarias asociadas al fallamiento normal. Un régimen extensional favorece el vulcanismo porque genera espacios a escala cortical.
- Determinar si hay fallamiento normal lístrico y cuáles serían las tasas de extensión. Si la extensión ha sido escasa entonces la rotación de bloques será pequeña, con lo cual, cualquier yacimiento que pudiera existir presentará una componente vertical importante. El caso opuesto, estilo B&R lo hemos analizado arriba con el ejemplo de Yerington y el pórfido Ann Mason, donde la extensión ha sido tal que las fallas normales acabaron siendo subhorizontales y por supuesto los cuerpos minerales, originalmente verticales. Aunque sea de Perogrullo decirlo: Si un bloque rota, todo su contenido lo hará también; y mientras mayor la extensión, más grande será la rotación.
- Aún si la extensión no ha sido grande, habría que revisar las cuencas tipo graben o semi-graben generadas por las fallas normales. El relleno sedimentario y/o volcánico puede ocultar a la vista una mineralización que ha sido “fossilizada” por dichas facies (p.ej., Oyarzun et al., 1998).

La exploración tipo *greenfields*, esto es, alejada de los sitios conocidos, requerirá de geólogos con conocimientos cada vez más importantes en análisis tectónico y geología estructural, esto sin mencionar que dicho profesional deberá ser capaz de cartografiar e interpretar facies volcánicas y sedimentarias presentes en cuencas continentales. La época “dorada” de las anomalías de color, que hacía que cualquier empresa con acceso a imágenes satelitales tuviera una gran ventaja

sobre el resto ha pasado. Lo que había por ver está visto, y el futuro pasa por las cuencas, las zonas deprimidas, aquellas con cubiertas sedimentarias y/o volcánicas. Allí debajo se encontrarán los nuevos gigantes cupríferos o auríferos. Las malas noticias son que la exploración de estos nuevos escenarios no es fácil y el riesgo es alto. Las buenas noticias son que se ha hecho tan poco al respecto y las zonas cubiertas son tan grandes, que se trata de un inmenso terreno virgen para quien se arriesgue a asumir dichos riesgos.



*¿Y si hubiera “otro” Chañarcillo\* unos centenares de metros por debajo de la camioneta? La geología no acaba al pie de las montañas. \*: famoso antiguo distrito de plata emplazado en calizas del Neocomiense, Copiapó (Chile).*

Durante el Siglo XX los geólogos de exploración “subieron” a las montañas. Quizás sea este el momento de empezar a bajar de estas y revisar lo que hay entre unas y otras. La estrategia (encontrar yacimientos de un metal u otro) no va a cambiar, pero las tácticas hasta ahora utilizadas tienen que ser revisadas.

## Bibliografía

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

- Arribas, A., 1993. Mapa Geológico del Distrito de Rodalquilar (1: 25.000). Instituto Tecnológico Geominero de España (IGME), Madrid.
- Arribas, A., Cunningham, C.G., Rytuba, J.J., Rye, R.O., Kelly, W.C., Podwysoki, M.H., McKee, E.H. y Tosdal, R.M., 1995. Geology, geochronology, fluid inclusions, and isotope geochemistry of the Rodalquilar gold alunite deposit, Spain. *Economic Geology*, 90, 795-822.
- Barton, M.D., 2013. An animation – volcanoes, magmas and the formation of copper deposits, then faulting, preservation and exposure – Yerington district, western Nevada. Institute for Mineral Resources, Mineral Resources Research in Geosciences, Lowell Program in Economic Geology, Department of Geosciences, University of Arizona, <http://www.geo.arizona.edu/~mdbarton/WhyAZistheCopperState.html>
- BRGM, 2001. GIS Andes: the geological information system. CD-ROM, Beta version April 2001, BRGM-France.
- Burnham, C.W., 1979. Magmas and hydrothermal fluids. En: *Geochemistry of hydrothermal deposits* (H.L. Barnes, ed.), N.Y., J. Wiley and Sons, 71-136.
- Concha, A., Oyarzun, R., Lunar, R., Sierra, J., Doblas, M. y Lillo, J., 1992. The Hiedelaencina epithermal silver-base metal district, Central Spain: Tectonic and mineralizing processes. *Mineralium Deposita*, 27, 83-89.
- Crespo, E., Lillo, J., Oyarzun, R., Cubas, P. & Leal, M. 2013. The Mazarrón basin, SE Spain: a study of mineralization processes, evolving magmatic series, and geothermal activity. *International Geology Review*, on-line, <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2013.810379>.
- Davison, J. y Mpodozis, C., 1991. Regional geologic setting of epithermal gold deposits, Chile. *Economic Geology*, 86, 1174-1186.
- Defant, M.J. y Drummond, M.S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347, 662-665.
- Dilles, J.H., Solomon, G.C., Taylor, H.P. y Einaudi, M.T., 1992. Oxygen and hydrogen isotope characteristics of hydrothermal alteration at the Ann-Mason porphyry copper deposit, Yerington, Nevada. *Economic Geology*, 87, 44-63.
- Doblas, M. y Oyarzun, R., 1989. Neogene extensional collapse in the western Mediterranean (Betic-Rif Alpine orogenic belt): implications for the genesis of the Gibraltar Arc and magmatic activity. *Geology*, 17, 430-433.
- Entree Gold Inc., 2011. Ann Mason Deposit (Cu-Mo). [http://www.entreegold.com/projects/united\\_states/ann\\_mason/index.php?content\\_id=266&page\\_number=1&mode=print](http://www.entreegold.com/projects/united_states/ann_mason/index.php?content_id=266&page_number=1&mode=print)
- Gustafson, L.B. y Hunt, J.P., 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, 70, 857-912.
- Gutscher, M.A., Maury, R., Eissen, J.P. y Bourdon, E., 2000. Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology*, 28, 535-538.
- Lowell, J.D. y Guilbert, J.M., 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65, 373-408.
- Lowenstern, J.B., 1994. Chlorine, fluid immiscibility, and degassing in peralkaline magmas from Pantelleria, Italy. *American Mineralogist*, 79: 353-369.
- Maury, R.C., Sajona, F.G., Pubellier, M., Bellon, H. y Defant, M.J., 1996. Fusion de croûte océanique dans les zones de subduction/collision récentes: l'exemple de Mindanao (Philippines). *Bull Soc Géol France* 167: 579-595
- Ménard, J.J., 1995. Relationships between altered pyroxene diorite and the magnetite mineralization in the Chilean Iron Belt, with emphasis on the El Algarrobo iron ore deposits (Atacama Region, Chile). *Mineralium Deposita*, 30, 268-274.
- NASA, 2009. SAGE II: Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II. National Aeronautics and Space Administration. <http://www-sage2.larc.nasa.gov/Introduction.html>
- Oyarzun, R., Márquez, A., Ortega, L., Lunar, R. y Oyarzún, J., 1995. A late Miocene metallogenic province in southeast Spain: atypical Andean-type processes on a smaller scale. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Sect. B: Appl. earth sci.)*, 104, 197-202.
- Oyarzun, R., Doblas, M. y Lunar, R., 1998. Exploration concepts based on contrasting settings of epithermal precious- and base metal deposits: some Chilean and Spanish examples. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Sect. B: Appl. earth sci.)*, 107, 99-107.
- Oyarzun, R., Márquez, A., Lillo, J., López, I. y Rivera, S., 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. *Mineralium Deposita*, 36, 794-798.
- Oyarzun, R., Oyarzún, J., Ménard, J.J. y Lillo, J., 2003. The Cretaceous iron belt of northern Chile: role of oceanic plates, a superplume event, and a major shear zone. *Mineralium Deposita*, 38, 640-646.

- Oyarzun, R., 2007. Ciencia, revistas científicas y el Science Citation Index: o cómo volvemos locos a golpe de números. Aula2puntonet, Ciencia y Sociedad, [http://www.aulados.net/Ciencia\\_Sociedad/Ciencia\\_Sociedad\\_Index/Ciencia\\_Sociedad.html](http://www.aulados.net/Ciencia_Sociedad/Ciencia_Sociedad_Index/Ciencia_Sociedad.html)
- 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., Lillo, J., López García, J.A., Esbrí, J.M., Cubas, P., Llanos, W. e Higuera, P., 2011. 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.
- Park, R.G., 1988. *Geological Structures and Moving Plates*. Blackie, NY, 337 pp.
- Pasteris, J.D., 1996. Mount Pinatubo volcano and “negative” porphyry copper deposits. *Geology*, 24, 1075-1078.
- Peacock, S.M., Rushmer, T. y Thompson, A.B., 1994. Partial melting of subducting oceanic crust: Earth and Planetary Sciences Letters, 121, 227-244.
- Proffett, J.M., 1977. Cenozoic geology of the Yerington district, Nevada, and implications for the nature and origin of Basin and Range faulting. *Geological Society of America Bulletin*, 88, 247-266-
- Rampino, M.R. y Self, S., 1992. Volcanic winter and accelerated glaciation following the Toba super-eruption. *Nature*, 359, 50-52.
- 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 14*, 1-14.
- Rivera, S.L., Alcota, H., Proffett, J., Díaz, J., Leiva, G. y Vergara, M., 2012. update of the geologic setting and porphyry cu-mo deposits of the Chuquicamata district, northern Chile. *Society of Economic Geologists, Special Publication 16*, 19-54.
- Soler, D., 2012. Estrategia y táctica. El Blog de David Soler, <http://www.davidsoler.es/estrategia-y-tactica/>
- Thiéblemont, D., Stein, G. y Lescuyer, J.L., 1997. Gisements épithermaux et porphyriques: la connexion adakite. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 325, 103-109.
- Vissers, R.L.M., Platt, J.P. y van der Wal, D., 2010. Late orogenic extension of the Betic Cordillera and the Alboran Domain: A lithospheric view. *Tectonics*, 14, 786-803.
- Wernicke, B., 1981. Low-angle normal faults in the Basin and Range province: nappe tectonics in an extending orogen. *Nature*, 645-648.
- Wernicke, B., Christiansen, R.L., England, P.C., and Sonder, L.J., 1987. Tectonomagmatic evolution of Cenozoic extension in the North American Cordillera, *Geological Society Special Publication*, 28, 203-221.
- Wikipedia, 2013a. Nasreddin. <http://es.wikipedia.org/wiki/Nasreddin>
- Wikipedia, 2013b. Mineral exploration. [http://en.wikipedia.org/wiki/Mineral\\_exploration#Greenfields\\_and\\_brownfields](http://en.wikipedia.org/wiki/Mineral_exploration#Greenfields_and_brownfields)

**Fuente de las imágenes** (a Julio de 2013)

1. [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1f/Pinatubo\\_ash\\_plume\\_910612.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1f/Pinatubo_ash_plume_910612.jpg)
2. <https://almacosta.wordpress.com/2011/03/18/cierre-modelo-para-la-mayor-mina-de-oro-del-mundo/>
3. [http://www.editec.cl/sustentare/sust\\_feb04/articulos/actualidad.htm](http://www.editec.cl/sustentare/sust_feb04/articulos/actualidad.htm)
4. [http://www.impawards.com/1998/godzilla\\_ver3.html](http://www.impawards.com/1998/godzilla_ver3.html)
5. <http://www.toledoblade.com/local/2008/05/27/Gigantic-wheels-turning-Titan-Tire-factory-into-a-hub-of-new-activity.html>
6. <http://www.thenakedscientists.com/HTML/content/kitchenscience/exp/lemonade-volcano/>
7. <http://www.womp-int.com/story/2007vol3/story003.htm>
8. <http://www.heraldsun.com.au/businessold/bhp-billiton-expands-chiles-escondida-mine-in-311million-investment/story-e6frfh4f-1226031328674>
9. [http://www.cliffshade.com/colorado/images/basin\\_range.gif](http://www.cliffshade.com/colorado/images/basin_range.gif)



### 6.1 Introducción: la importancia de las estructuras preexistentes

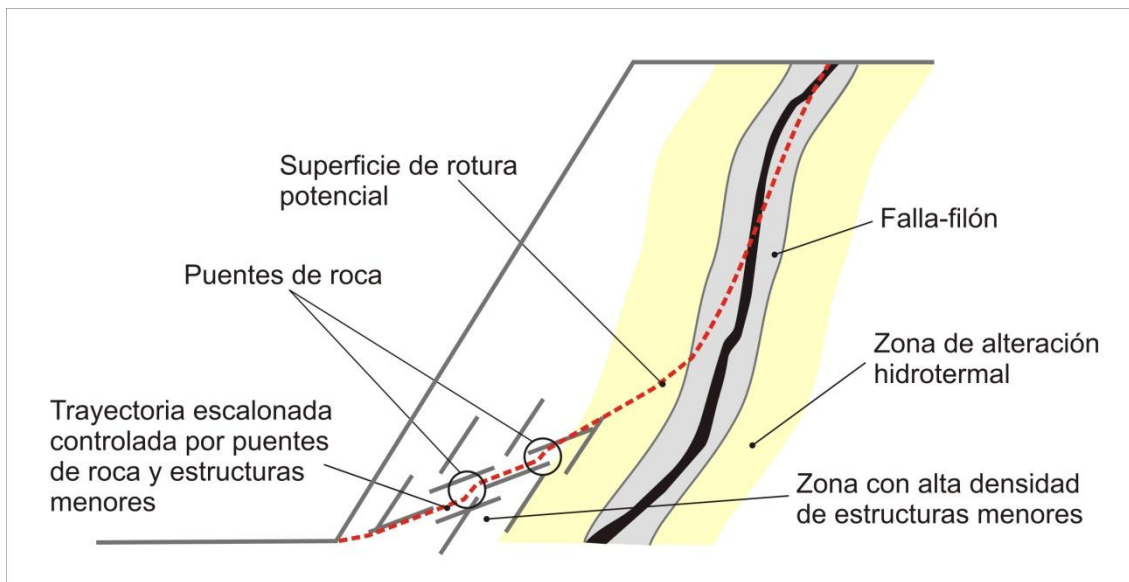
No podemos pretender aquí contar “todo” lo que existe en la literatura especializada sobre un tema tan relevante como la estabilidad de macizos de roca. No obstante, hemos decidido seleccionar aquellos aspectos que puedan ser de mayor interés para aquellos que se inician en este mundo en la minería.

Las estructuras de deformación de los macizos rocosos van a condicionar la estabilidad geomecánica de estos frente a las posibles modificaciones de su estado tensorial derivadas de la actividad minera, tanto las asociadas a excavaciones como a sobrecargas. En la mayor parte de los casos, las estructuras de deformación suponen discontinuidades o la existencia de zonas de debilidad, donde será más probable que se produzcan los fenómenos de desestabilización. Así, la existencia de estructuras previas de deformación confiere al macizo rocoso un carácter discontinuo y anisótropo, definiendo zonas de debilidad mecánica, que pueden además facilitar el flujo de agua. Los factores que van a condicionar el papel de las estructuras de deformación preexistentes en la estabilidad geomecánica del macizo van a ser, fundamentalmente, sus características geométricas y las propias propiedades geomecánicas de esas estructuras, entre ellas, su resistencia, y sobre todo, su orientación.



A la izquierda, plano de falla en el bloque inferior de una falla-filón de la mina Standard (Condado de Gunnison, Colorado, EEUU). Nótese que la galería lleva la misma dirección que el filón-falla y ocupa prácticamente la anchura del filón, lo que a priori compromete la estabilidad geomecánica de la galería (imagen<sup>1</sup>). A la derecha, galería fuertemente fracturada (fallas subverticales) incluyendo filones brechificados de apatito (FB) y brechas de falla (BF) (mina Costanaza; Logrosán, España) (imagen: J.A. López García). El sector ofrece pobres condiciones de estabilidad.

El mero hecho de la existencia de estructuras que representen discontinuidades no implica que el macizo vaya a ser mucho más inestable que si no las hubiera, como tampoco todas las estructuras presentes van a suponer planos o zonas donde se producirán las inestabilidades (roturas, aperturas o desplazamientos). Como ya analizábamos en capítulos precedentes cuando hablábamos de la reactivación de estructuras, el factor clave para que una estructura se “reactive” será la orientación de la estructura con respecto al tensor de esfuerzos local que se genere con la excavación o sobrecarga, de forma que la orientación de la estructura sea compatible con desplazamientos o aperturas de la misma en ese tensor. La importancia de la orientación relativa de las estructuras puede verse amplificada en aquellos casos que se combinen con otras características (p.ej., persistencia de la discontinuidad, aumento en el número o densidad de discontinuidades preexistentes, disminución del espaciado entre discontinuidades de una misma familia, etc.) u otros factores (p.ej., alteración hidrotermal y/o supergénica, condiciones hidrogeológicas, etc.)



*Inestabilidad en un talud de una corta (rajo) minero, provocada por varios factores concurrentes: proximidad de una falla-filón —y la alteración hidrotermal asociada— con cierta orientación, y la existencia de una zona de discontinuidades menores que, aunque poco persistentes, aparecen con alta densidad (Reinterpretado de Hoek et al., 2000).*

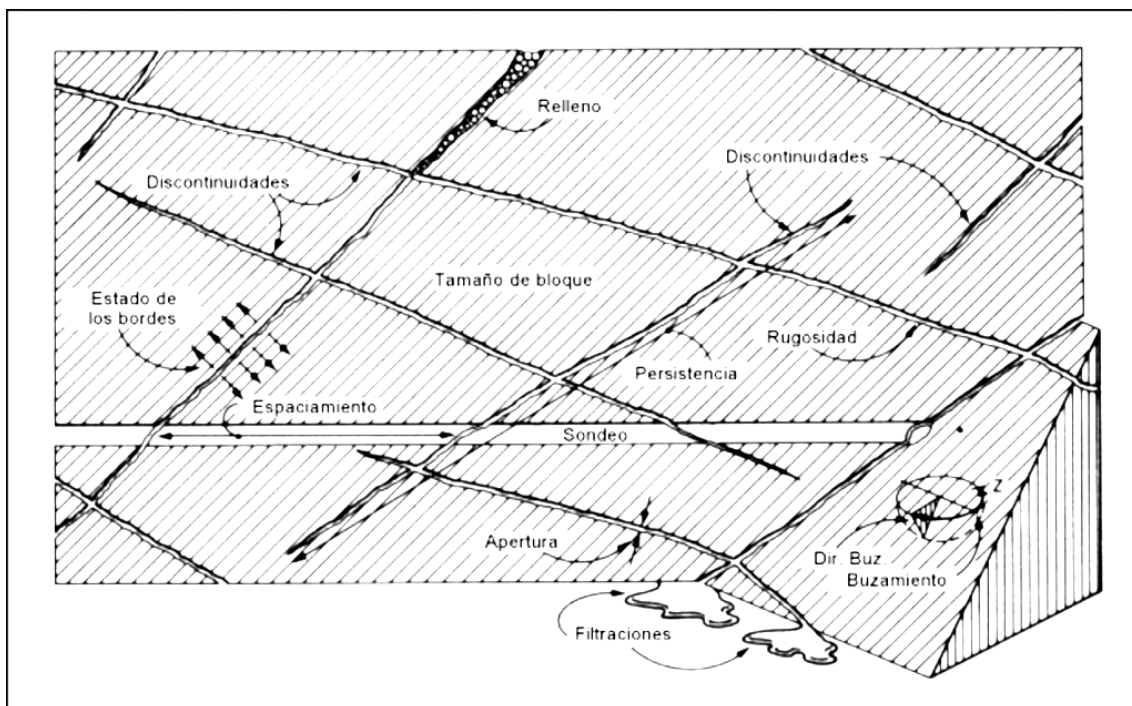
Aunque desde el punto de vista del comportamiento geomecánico, en el macizo rocoso se pueden encontrar discontinuidades geológicas de distinta naturaleza, en el análisis que presentamos en este capítulo consideraremos solo aquellas de origen tectónico (fracturas o fallas, diaclasas, esquistosidad, charnelas de pliegues), sin considerar aquellas de origen sedimentario (p.ej., planos de estratificación) o litológico (contactos entre formaciones). Por otra parte, los halos de alteración hidrotermal asociados a estructuras cobran una relevancia especial, ya que generalmente suponen zonas de debilidad geomecánica como consecuencia de la abundancia de filosilicatos de neoformación.

## 6.2 Discontinuidades estructurales y estabilidad de macizos rocosos

Como indicábamos en el apartado anterior, la estabilidad del macizo rocoso para una situación tensorial dada dependerá sobre todo de las características geométricas (fundamentalmente de la orientación) y de la resistencia de las discontinuidades.

Desde el punto de vista del comportamiento geomecánico, las características geométricas incluyen, además de la orientación, otras como el espaciado, la densidad, la continuidad o persistencia, la apertura, y la rugosidad. La resistencia está influenciada por el estado (alteración) de las paredes o bordes, el relleno, y la presencia de agua en la discontinuidad.

Las discontinuidades se pueden presentar de forma discreta o única (p.ej., un plano de falla) o como conjuntos o familias, que incluyen discontinuidades con orientación y características similares (p.ej., un diaclasado de fractura). La orientación relativa (dirección y buzamiento) y el espaciado de las diferentes familias definen la forma y el tamaño de los bloques que conforman el macizo.



Esquema de las características de las discontinuidades. Aparecen dos familias bien definidas, una de las cuales presenta, localmente, rellenos. Adaptada de Hudson (1989).

Cuando hablamos de orientación relativa, lo hacemos porque la inestabilidad dependerá de la orientación que tengan las discontinuidades con respecto al tensor de esfuerzos que se genere con la obra o actividad que llevemos a cabo. Por ejemplo, dependiendo del ángulo de pendiente y la dirección del talud en una corta o rajo, para las mismas familias de discontinuidades, el talud puede ser

estable o inestable. Igualmente ocurrirá en el caso de galerías, cuya estabilidad dependerá de su orientación en relación con las estructuras principales y discontinuidades. Por ello es fundamental hacer un análisis de estabilidad basado en las relaciones de orientación, como veremos más adelante. La premisa de partida es que en ambos casos (taludes y galerías) podrán existir discontinuidades, sean planos o zonas de debilidad, a favor de las cuales se producirán los desplazamientos de la masa rocosa.

En general, y salvo casos excepcionales, a menor espaciado entre las discontinuidades y mayor densidad, mayor será la inestabilidad. Aunque relacionados, los parámetros de espaciado y densidad no son equivalentes. El espaciado es la distancia más pequeña (ortogonal) entre dos discontinuidades de la misma familia, mientras que la densidad se refiere al número de discontinuidades por unidad de área, o mejor, por unidad de volumen. Es decir, mientras el espaciado se refiere a una familia, la densidad de discontinuidades incluye todas las familias que puedan aparecer en ese volumen o área, y da una idea más precisa del grado de fracturación del macizo rocoso. Si la densidad es muy alta, y más si a ello se le suma la existencia de una alteración intensa, el comportamiento geomecánico de la roca puede ser similar al de un material granular sin cohesión o un suelo, y el análisis de estabilidad se ha de hacer de acuerdo a ello.

Por otra parte, la densidad de discontinuidades está relacionada con otro parámetro que es la persistencia, es decir, la continuidad en dos direcciones ortogonales del espacio, que coinciden con la dirección del plano de discontinuidad y la dirección del buzamiento de la misma. En muchos casos, zonas con una intensa deformación frágil caracterizadas por una densidad muy alta de discontinuidades, presentan una persistencia en las familias principales muy baja.

En aquellas zonas del macizo rocoso poco afectadas por estructuras tectónicas, podremos encontrar pocas familias de diaclasas como discontinuidades dominantes, con una distribución (un espaciado) más o menos regular en la roca; es decir esta mostrará una deformación relativamente homogénea, y el análisis de estabilidad será relativamente sencillo de modelar. Por el contrario, si el macizo rocoso está afectado por estructuras tectónicas, estas introducen una heterogeneidad que habrá de ser tenida en cuenta en el análisis de estabilidad, que será más complejo de llevar a cabo.



*Afloramiento de margas mostrando una familia dominante de discontinuidades subverticales con un espaciado regular decimétrico, desarrolladas en materiales margosos. Algunas de estas discontinuidades presentan evidencias de desplazamientos relativos, mientras que otras no. La existencia de este sistema de fracturas y diaclasas se relaciona con la proximidad de una falla de escala regional (Cuenca de Mazarrón, SE de España).*

Cuando un plano de discontinuidad actúa como un plano de cizalla, es decir un plano sobre el cual se produce el desplazamiento de un bloque de roca, hay características que son determinantes en cuanto a la resistencia que puede ofrecer a tal desplazamiento (lo que se conoce como *resistencia al corte*), al condicionar parámetros como el ángulo de rozamiento y la cohesión. Algunas de estas características son la rugosidad de la superficie de discontinuidad (ya que a mayor rugosidad mayor resistencia) y los rellenos, ya que en algunos casos la presencia de estos pueden provocar una disminución importante en la resistencia (p.ej., los rellenos arcillosos). En este sentido, las propiedades mecánicas del relleno condicionarán el comportamiento mecánico de la discontinuidad.

La existencia de alteraciones en las paredes de la discontinuidad, ya que en aquellos casos donde la alteración implique disgregación y/o formación de arcillas y filosilicatos, la resistencia al corte disminuirá; y la presencia o circulación de agua, que puede tener un efecto lubricante.



*Macizo rocoso con un fuerte control estructural, definido por un sistema de fracturas subverticales (marcadas por línea discontinua en rojo) cuya dirección prácticamente es ortogonal al talud principal (El Cinto, minas de Rodalquilar, SE de España). Cuando el talud tiene una orientación más o menos paralela a la dirección de las estructuras, como ocurre en las zonas laterales de la excavación, el talud presenta zonas muy inestables (zonas señaladas con flechas).*

### 6.3 Estado del macizo rocoso: una visión general de los problemas

El análisis de la estabilidad geomecánica del macizo rocoso en excavaciones mineras puede ser abordado desde diferentes aproximaciones, algunas de las cuales permiten obtener una visión general del estado del macizo y obtener una estimación de algunos parámetros que intervienen en la resistencia como la cohesión y el rozamiento. Así, se evalúa la resistencia de la roca a través de diferentes escalas de valoración, siendo dos de las más utilizadas la clasificación RMR (*Rock Mass Rating System*) de Bieniawski (1989) y la clasificación GSI (*Geological Strength Index*) de Hoek y Brown (1997). Mientras que la clasificación RMR es aplicable a los macizos donde la estabilidad está condicionada por la presencia de estructuras, la utilización de la clasificación GSI parece más adecuada cuando se trata de masas de roca muy debilitadas o poco resistentes, donde la estabilidad está controlada sobre todo por la resistencia de la matriz rocosa.

La clasificación RMR se basa en las siguientes características geomecánicas del macizo rocoso:

- Resistencia de la roca intacta (compresión uniaxial)
- Parámetro RQD (*Rock Quality Designation*)
- Espaciado de las discontinuidades
- Condición de las discontinuidades
- Condiciones hidrogeológicas
- Orientación de las discontinuidades con respecto al corte o talud.

El parámetro RQD es el porcentaje de recuperación de trozos de testigo de un sondeo de longitud superior o igual a 10 cm comparado con el total del tramo o del sondeo (Deere, 1963), tal y como establece la siguiente expresión:

$$RQD\% = \frac{\sum(\text{longitud fragmentos} \geq 10 \text{ cm})}{\text{Longitud total sondeo}} \cdot 100$$

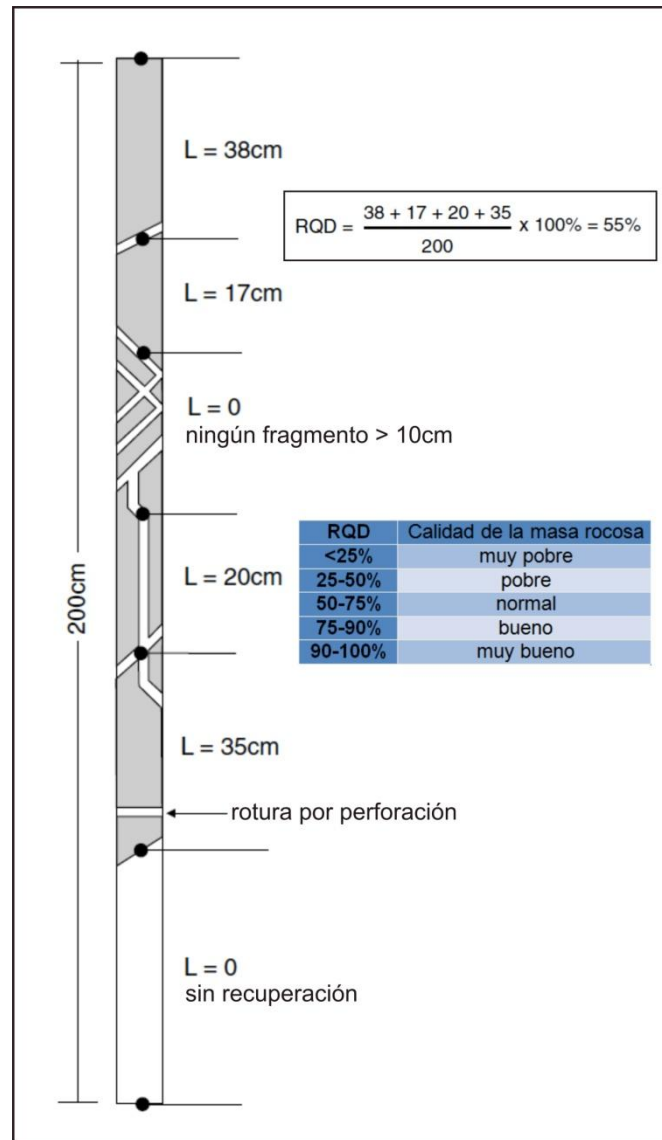
En aquellos casos donde no se disponga de testigos de sondeos, se puede hacer una estimación del RQD en superficie según el método propuesto por Planström (1975), basado en el parámetro  $J_v$ , número total de discontinuidades por metro cúbico o volumen de roca seleccionado:

$$RQD\% = 115 - 3,3J_v \quad \text{para } J_v > 4,5$$

$$\text{ya que el RQD no puede ser mayor a } 100 \rightarrow RQD\% = 100 \quad \text{para } J_v \leq 4,5$$

Dado que el RQD es un parámetro dependiente de la dirección considerada, y por ello su valor puede variar considerablemente dependiendo de la dirección del

sondeo, se considera más preciso aplicar el método volumétrico de Planström (1975), siendo necesario para hacer la determinación en campo la existencia de un corte que permita contar las discontinuidades existentes en una longitud de 1 metro en las tres direcciones del espacio x, y, z.



*Determinación del RQD en el testigo de un sondeo. Adaptada de Deere (1963).*

Para aplicar la clasificación RMR, el macizo rocoso es dividido en varios dominios estructurales, y cada dominio (que en toda su extensión muestra unas características geomecánicas similares) es clasificado separadamente. Generalmente, los límites de los dominios suelen coincidir con una estructura (falla) o discontinuidad litológica (diferente tipo de roca, zona de alteración supergénica o hidrotermal, etc). El valor RMR que se asignará a cada región será la suma de las valoraciones de los seis parámetros considerados (ver tabla).



A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS								
Parameter		Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred	
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa		5 - 25 MPa
	Rating	15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality RQD	90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating	20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities	> 2 m	0.6 - 2. m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating	20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)	Very rough surfaces	Slightly rough surfaces	Slightly rough surfaces	Sticksided surfaces	Soft gouge >5 mm thick		
		Not continuous	Separation < 1 mm	Separation < 1 mm	or Gouge < 5 mm thick	or Separation > 5 mm		
5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125	
		(Joint water press)/(Major principal $\sigma$ )	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5	
6	General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
		Rating	15	10	7	4	0	
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)								
Strike and dip orientations		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines	0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes	0	-5	-25	-50			

Sistema de clasificación RMR (Bieniawski, 1989). *Nota:* Se ha incluido aquí el original no traducido al español para evitar posibles confusiones semánticas derivadas de la utilización de determinados términos en diferentes países.

La clasificación RMR, inicialmente desarrollada para ingeniería civil, ha sido considerada por las compañías mineras como muy restrictiva, por lo que se han propuesto diversas modificaciones, recogidas y sintetizadas por Bieniawski (1989). En la práctica, la clasificación RMR se encontró muy difícil de aplicar a macizos rocosos de pobre o mala calidad, lo que llevó a plantear la clasificación GSI, como un sistema de caracterización basado más en observaciones geológicas y menos en “números” (Hoek et al., 1995).

Posteriormente, la clasificación fue refinada, siendo revisada por Marinós et al. (2005).

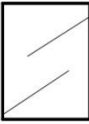



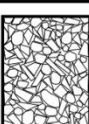

La clasificación GSI se fundamenta en una cuidadosa observación del macizo rocoso, esencialmente cualitativa, donde se tienen en cuenta características como litología, estructura y condición de las superficies de discontinuidad, tanto en afloramientos como en cortes de excavación y testigos de sondeos. Así, considera

**The need of a geological view in the rock-mass evaluation for geomechanics**

“Since RQD in most of the weak rock masses is essentially zero or meaningless, it became necessary to consider an alternative classification system. The required system would not include RQD, would place greater emphasis on basic geological observations of rock-mass characteristics, reflect the material, its structure and its geological history and would be developed specifically for the estimation of the rock mass properties rather than for tunnel reinforcement and support” This new classification, now called GSI...”

Marinos et al. (2005)

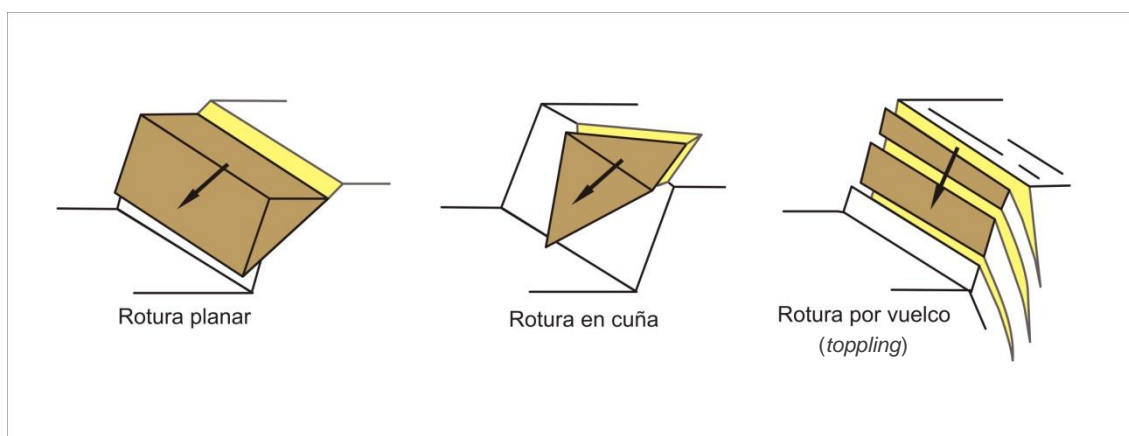
dos aspectos fundamentales que son el grado y tipo de fragmentación y las condiciones de las superficies de discontinuidad (ver figura).

<p><b>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS</b></p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced is water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
		<p>VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces</p>	<p>GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p>	<p>FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces</p>	<p>POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments</p>	<p>VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p>
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
 <p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90			N/A	N/A	
 <p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>	80	70				
 <p>VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>		60				
 <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>			50			
 <p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>			40	30		
 <p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>				20	10	
					N/A	
					N/A	

Sistema de clasificación GSI (Marinos y Hoek, 2000). *Nota:* Se ha incluido aquí el original no traducido al español para evitar posibles confusiones semánticas derivadas de la utilización de determinados términos en diferentes países.

## 6.4 Análisis cinemático: una aproximación sencilla a la evaluación de la estabilidad de macizos rocosos en excavaciones

Una aproximación que permite una rápida evaluación de condiciones de estabilidad en el diseño de las excavaciones en macizos rocosos, con un fuerte control estructural y una distribución de discontinuidades no homogénea o isótropa, es el análisis cinemático. Este está basado fundamentalmente en las orientaciones de las discontinuidades principales y en el ángulo de rozamiento o fricción de estas (Hoek y Bray, 1981). El análisis cinemático permite analizar la estabilidad de los tipos de roturas básicas: planar, cuña y vuelco, descritos por Hoek y Bray (1981).



*Tipos básicos de roturas o desplazamientos de bloque en macizos rocosos a favor de planos de discontinuidad. Adaptada de Hoek y Bray (1981).*

El método de Hoek y Bray (1981) está basado en el test de Markland (1972), según el cual el desplazamiento o “rotura planar” se producirá cuando el plano de discontinuidad tenga un buzamiento (es decir, se incline) en la misma dirección (con un margen de  $\pm 20^\circ$ ) que el corte o talud, con un ángulo inferior al del talud pero superior al ángulo de rozamiento en el plano de discontinuidad.

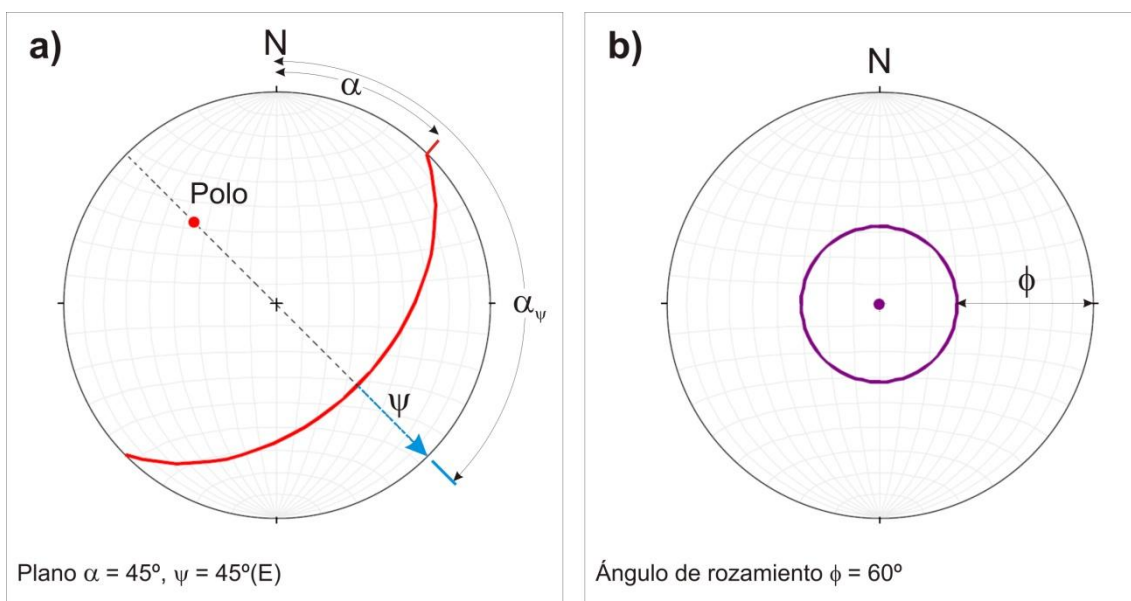
La “rotura en cuña” puede ocurrir cuando la intersección de las dos discontinuidades que forman la cuña se inclina en la misma dirección que el corte o talud (con un margen de  $\pm 30^\circ$ ), y el ángulo de inclinación (o inmersión) sea menor que el ángulo del corte pero mayor que el ángulo de rozamiento en los planos de la discontinuidad<sup>1</sup> (Hoek y Bray, 1981).

La “rotura por vuelco” (*toppling*) implica deslizamientos interbloques (Goodman, 1989), y la condición para que ello se produzca es que la suma del ángulo

<sup>1</sup> Esto supone una simplificación, ya que se está considerando que no hay cohesión entre las paredes del bloque, y que el rozamiento es igual en las superficies que definen la cuña. Así, el factor de seguridad vendrá dado por  $FS = \tan \phi / \tan \psi$ , donde  $\psi$  es el ángulo de buzamiento de la discontinuidad y  $\phi$  es el ángulo de rozamiento.

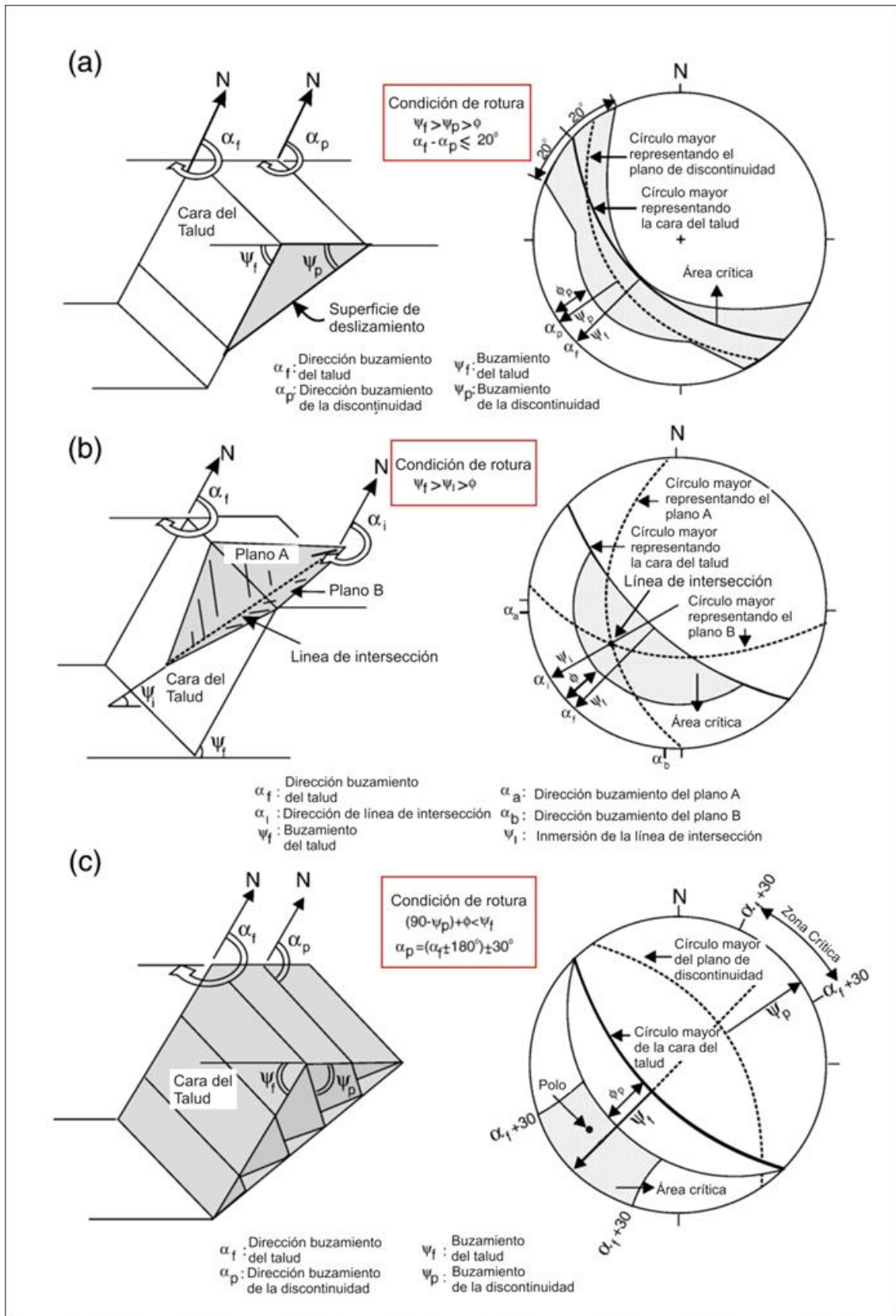
complementario al buzamiento de las discontinuidades más el ángulo de rozamiento sea inferior al ángulo de buzamiento del corte o talud.

Dado que trata de ver las relaciones geométricas relativas de los planos de discontinuidad y el ángulo de rozamiento, el análisis cinemático se puede llevar a cabo mediante la proyección estereográfica en la falsilla de Schmidt (equiareal). El estereograma permite la representación de la orientación de planos de discontinuidad en términos de dirección del plano o dirección del buzamiento ( $\alpha$ ) con respecto al Norte, y el buzamiento ( $\psi$ , ángulo con respecto a la horizontal). Así, los planos pueden ser representados en el estereograma como círculos mayores, polos o vectores de buzamiento (p.ej., Lisle y Leyshon, 2004).



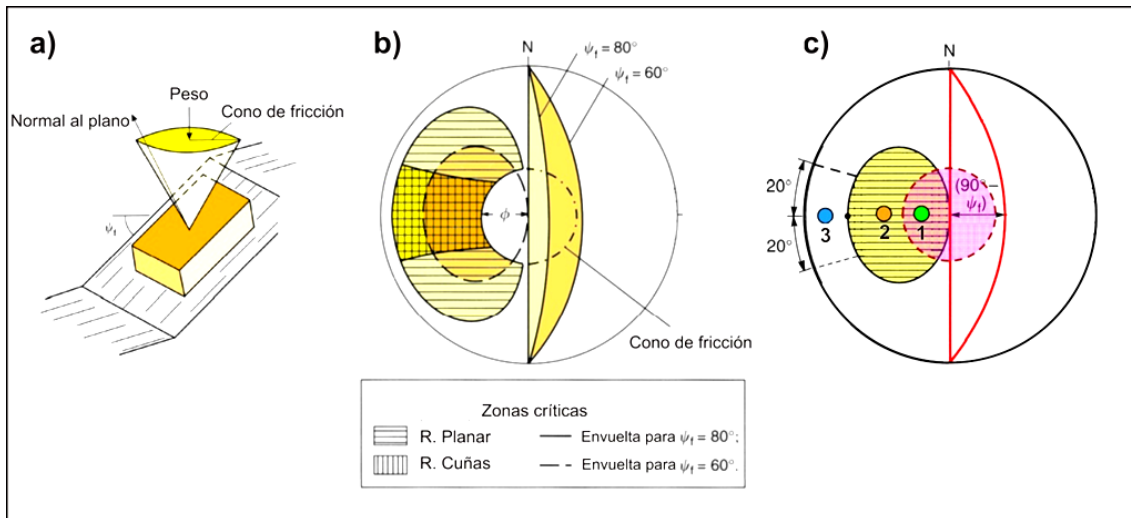
*Proyección estereográfica de planos de discontinuidad y ángulo de rozamiento. a) Estereograma de un plano de dirección o azimuth ( $\alpha$ )  $N45^\circ$  y buzamiento ( $\psi$ )  $45^\circ\text{E}$ . El plano se puede representar como un círculo mayor (rojo), como el polo del plano (punto rojo que representa la línea ortogonal al plano), o como su vector de buzamiento (flecha azul, cuya magnitud es  $\psi$  y cuya dirección  $\alpha_\psi$  es igual a  $\alpha+90^\circ$ ). b) Estereograma de un ángulo de rozamiento  $\phi = 60^\circ$ .*

De forma similar, podemos representar el ángulo de rozamiento o fricción ( $\phi$ ) como un círculo menor (el rozamiento actúa en todas las direcciones) que se separa de la circunferencia exterior (que representa la horizontal) con un ángulo que es precisamente el ángulo de rozamiento (p.ej., Lisle y Leyshon, 2004). El ángulo de rozamiento de los planos de discontinuidad es un parámetro que se puede determinar mediante ensayos relativamente sencillos, aunque se ha de poner extremo cuidado en su representatividad (Alejano et al., 2012), especialmente en lo que se refiere a reproducir las condiciones reales del plano de discontinuidad (Hencher, 2012).



Representaciones estereográficas de las condiciones cinemáticas (en los recuadros rojos) para la inestabilidad en cortes y taludes por a) rotura planar, b) rotura en cuña y c) rotura por vuelco (Norrish y Wyllie, 1996). Nótese como en los tres casos se cumplen las condiciones de inestabilidad cinemática, lo que se pone gráficamente en evidencia ya que el plano (a), la intersección (b) o el polo del plano de discontinuidad (c) caen dentro de la zona crítica.

Si bien el análisis cinemático se aplica a la evaluación de la estabilidad de bloques discretos, también es posible realizarlo en familias de discontinuidades. En ese caso, el método utiliza la proyección de polos de los planos de discontinuidad, las intersecciones de las cuñas y el cono de fricción (definido por los polos de los infinitos planos con un ángulo de buzamiento igual o inferior a  $\phi$ , y que por tanto no cumplirían las condiciones de rotura con respecto a  $\phi$ ), lo que permite identificar aquellas familias de discontinuidades cinemáticamente inestables.



Análisis cinemático de estabilidad mediante cono de fricción y envoltas (basado en Wyllie y Mah, 2004). a) Representación conceptual del cono de fricción; nótese que en este caso  $\phi$  se mide desde el centro de la plantilla de Schmidt y no desde la circunferencia perimetral. b) Representación de dos cortes o taludes de dirección N180° y buzamientos 80°E y 60° E y sus correspondientes envoltas, las cuales definen aquellas zonas donde los planos de discontinuidad, o intersecciones de ellos en el caso de cuñas, cumplen con la condición de inestabilidad de tener un buzamiento inferior al talud y “aflorar” en este; nótese como un talud con mayor buzamiento genera una envuelta mayor. c) Análisis de estabilidad de tres planos representados por sus polos, para el talud de buzamiento 60°E, en situaciones muy diferentes: el plano 1 es estable, el ángulo de buzamiento es menor que el ángulo  $\phi$ ; el plano 2 es inestable, buza más que el ángulo  $\phi$  y se incluye en el área crítica para ese talud; el punto 3 es estable para ese talud, pero pasaría a ser inestable si el talud tuviera un buzamiento de 80°.

## Bibliografía

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

- Alejano, L.R., González, J. y Muralha, J., 2012. Comparison of Different Techniques of Tilt Testing and Basic Friction Angle Variability Assessment. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45, 1023-1035.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons, New York, 251 pp
- Deere, D.U., 1963. Technical description of rock cores for engineering purposes. *Felsmechanik und Ingenieurgeologie* 1, 16-22.
- Goodman, R.E., 1989. *Introduction to Rock Mechanics*: John Wiley & Sons, New York, 562 pp.
- Hencher, S.R., 2012. Discussion of Alejano, Gonzalez and Muralha (2012). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45, 1137-1139.
- Hoek, E. y Bray, J.W., 1981. *Rock Slope Engineering*. The Institute of Mining and Metallurgy, London, 358 pp.
- Hoek, E. y Brown, E.T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 34, 1165-1186.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. y Bawden, W.F., 1995. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Balkema, Rotterdam, 215 pp.
- Hoek, E., Read, J., Karzulovic, A. y Chen, Z.Y., 2000. Rock slopes in civil and mining engineering. *Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, GeoEng2000*, 19-24 November, 2000, Melbourne, 16 pp.
- Hudson, J.A., 1989. *Rock Mechanics Principles in Engineering Practice*, Butterworths, London, 72 pp.
- Lisle, R. J. y Leyshon, P.R., 2004. *Stereographic Projection Techniques for Geologists and Civil Engineers*, 2nd Ed. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne, 112 pp.
- Marinos, P. y Hoek, E., 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. En: *Proceedings of GeoEng 2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering (Melbourne, Victoria, Australia)*. Lancaster, PA: Technomic Publishers, 1422-1446.
- Marinos, V, Marinos, P. y Hoek, E., 2005. The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64, 55-65.
- Markland, J.T. 1972. A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected. *Imperial College Rock Mechanics Research Report* 19, 10 pp.
- Norrish, N.L. y Wyllie, D.C., 1996. Rock slope stability analysis. En: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board National Research Council. Special Report 247 Washington DC, USA, National Academy Press.
- Planstrom, A., 1975. Karakterisering av oppsprekningsgrad og fjellmassers kvaliid. Internal Report, Ing. A.B. Berdal A/S, Oslo, Norway, 1-26.
- Wyllie, D.C. y Mah, C., 2004. *Rock Slope Engineering, Civil and Mining*, 4th. Ed., Spon Press, New York, Taylor & Francis Group, 431 pp.

**Fuente de las imágenes** (a Mayo-Julio de 2013)

1. <http://minerals.usgs.gov/performance/images/fig11.jpg>



### 1. Sobre anacronismo y modernidad

La marinas de Chile y España (entre otras muchas) tienen veleros que sirven como “buque-escuela” para la formación de sus futuros oficiales y marinería. Algunos pensarán que se trata de un anacronismo que solo puede ser entendido en términos de una cierta nostalgia por lo que fue otra época.



Los buques-escuela Esmeralda y Juan Sebastián El Cano de las marinas de Chile y España respectivamente. Imágenes<sup>1,2</sup>.

Quienes piensen así, también deberían preguntarse (absurdamente) que para qué caminar si podemos ir en coche casi a cualquier lugar. También podríamos preguntarnos que para qué aprender a calcular una media o una desviación estándar en estadística si hay programas especializados que lo hacen.

Desde hace ya bastantes años se ha podido constatar en las aulas universitarias como las matemáticas más simples no pueden ser desarrolladas en clase por los alumnos si no tienen a) una calculadora o b) un móvil (*celular*). No estamos hablando de integración o derivación, sino de, por ejemplo, cuánto es  $8 \times 7 = (?)$ . Hay quienes aún lo saben (56), pero si llegamos a las divisiones, por ejemplo 56 dividido por 3 la situación es aún más desmoralizante. La pregunta es ¿y qué pasa si la calculadora o el teléfono (cosa normal) se han quedado sin batería?

Volviendo hacia atrás y haciéndonos una pregunta parecida ¿Qué pasaría si una nave mercante o de la armada se

**Un sextante** es un instrumento óptico de navegación que se utiliza para establecer la posición mediante la medida de la altura de las estrellas desde el horizonte. Sirve para medir la distancia angular entre dos objetos, tales como dos puntos de la costa o un astro y el horizonte. Al determinar la altura angular del sol o de cualquier otro astro por encima del horizonte se puede, mediante cálculos matemáticos, determinar la situación en la que se encuentra el observador. También con un sextante podemos calcular la distancia a la que nos encontramos de una baliza o un punto fijo de la costa.

Pérez (2012)

queda sin su sistema NAVSTAR-GPS (*Navigation System and Ranging - Global Position System*)? ¿Se perderían los marinos en el océano? Por supuesto que no, por eso entre otras cosas, un oficial de la armada aprende a navegar en un buque-escuela a vela, por eso un oficial de la armada aprende a usar el sextante (ver cuadro de texto anterior): para ser un marino de verdad.

Al respecto, todos o muchos usamos algún sistema GPS en los coches, pero “además” llevamos mapas de carreteras como *back-up*, claro está, asumiendo que nadie se haya olvidado de (o simplemente no sepa) cómo leer un mapa.



El sextante, instrumento de posicionamiento. Imágenes<sup>3</sup>.

La modernidad, si implica olvidar el pasado y sus metodologías, no es más que una ruta para suicidas y las razones son simples (entre otras): 1) todo mecanismo acaba fallando y mientras más sofisticado sea, más propenso a los fallos será; y 2) casi todas las civilizaciones, por sofisticadas que sean, desaparecen llegado el momento, pasándose de la luz más brillante a la penumbra (p.ej., Roma). Quién albergue dudas sobre esta materia debería leer “Colapso” (Diamond, 2005).

Por razones que entran más en el campo de la psiquiatría o la sociología de masas, la tecnología “atrapa” a la gente, haciéndola llegar al frenesí más absoluto como cuando por ejemplo, Apple anuncia que sacará al mercado (un día específico) su último mp3, móvil, *pad*, o lo que sea. Se formarán colas gigantescas, que empezarán días antes. ¿Tecnología o devoción casi religiosa? Resulta preocupante, porque la mayor parte de esa gente son jóvenes, el segmento de la sociedad más afectado por el fenómeno.

Sorprende la rapidez con que los alumnos pulsan las teclas de un ordenador (*computadora*) cuando utilizan, un determinado programa de estadística (o geoestadística). Sin embargo, cuando preguntas por qué se ha elegido una variante versus otra en la metodología, rara vez te saben responder (o la respuesta roza el absurdo). Muchas veces llegas a la conclusión de que el objeto en sí es más importante que su razón de ser.

En este sentido ¿cómo puede competir una humilde lupa o brújula con cualquier cacharro electrónico con pantallas táctiles y de colores? Uno de los iPhone trae una aplicación que es una brújula que mide dirección y buzamiento. ¿Será ese el futuro de las mediciones de campo? Aún si lo fuera, ¿cómo solucionamos lo de la lupa? En lo que respecta a los cuadernos (*libretas*) y mapas de campo ha habido serios intentos para substituirlos por ordenadores tipo *tablet* reforzado (*rugged tablet*) (p.ej., Whitmeyer et al., 2010) ¿Pero qué pasa si se borra (como no) la información del *tablet*? Estas cosas pasan ¿o no?



Gente haciendo cola frente a una tienda de Apple para ser los primeros en tener (...). Imagen<sup>4</sup>.

Uno puede preguntarse ¿entrega mejores datos una aplicación para el iPhone que una brújula Brunton? ¿Y qué hacemos si se nos ha agotado la batería? O ya si nos cabreamos un poco ¿por qué no dejamos los cachivaches electrónicos para jugar a los marcianitos y en geología nos ponemos serios con el conocimiento sólido que necesitamos para poder trabajar correctamente en el campo?

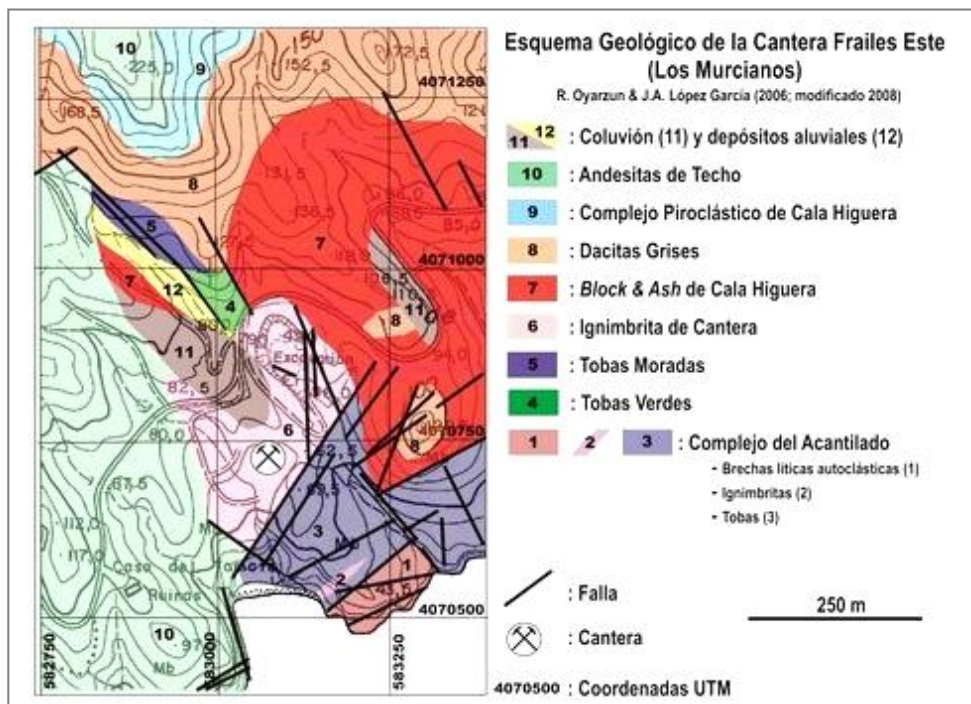
## 2. Viejos tiempos – Nuevos tiempos

La tecnología no es ni buena ni mala *per se*, es lo que nosotros queramos que sea. Por ejemplo, un típico debate absurdo en docencia pasaba hace años atrás por preguntarse qué era mejor, si dar clases con PowerPoint o con tiza. Algunos decían que con una tiza, los “modernos” que con PowerPoint. Digámoslo así, es un falso debate, lo que importa no es la tiza, sino “quien” tiene la tiza entre sus dedos. Lo mismo podemos decir con respecto a una clase con PowerPoint.

Así, en geología lo relevante no pasa por el programa informático (*software*) que utilicemos sino por “quién” utiliza ese programa. A quién crea que puede “especializarse” en procedimientos informáticos aplicados a la geología digámosle que primero debe especializarse en “geología”. Quien no entienda la naturaleza

geológica de un cuerpo mineralizado o un macizo de roca poco podrá hacer con su ordenador, da igual cuan sofisticado sea el programa que esté utilizando.

Todo esto nos lleva a la naturaleza más íntima de qué es la geología y el ser geólogo. Centrémonos en esto último. Geólogo es todo aquel que puede ir al campo y regresar con un mapa geológico. Ese mapa deberá contener unidades geológicas, los contactos entre estas, y las estructuras que controlan la disposición espacial de las unidades. Aquel que trabaje además en minería debería ser capaz de enriquecer ese mapa con las alteraciones (hidrotermales y supergénicas), el trazado de los cuerpos minerales, las estructuras que los albergan, etc.



*Geología de la Cantera Frailes Este (Almería). Ejemplo de mapa geológico realizado originalmente con la cartografía de un día de trabajo (time's money 😊).*

Con esto en mano podemos dedicarnos ahora a lo que queramos, recordando eso sí, que la geología, toda la geología, pasa por entender la naturaleza de los macizos de roca. En esto no hay atajos y el camino siempre discurre por temas tan importantes como la petrografía, estratigrafía, geología estructural y la geología de campo. Agreguemos geología económica y geoquímica para quienes vayan a trabajar en el mundo de la minería.

*Geologic mapping has been used extensively for exploration for more than 100 years and we predict it will continue to be essential although the tools for recording, compiling, and synthesizing data are evolving rapidly and improve data integration in the office and most recently in the field. Both traditional and future methods rely on field identification skills of the geologist to record salient new geologic data.*

*Brimhall et al. (2006)*

Podemos “adornar” estas asignaturas con medios informáticos, pero su naturaleza última, siempre pasará por lo más simple, saber identificar (sobre todo en el campo) una roca, entender su estructura, y poder pasar esa información a un mapa y/o sección. En esta materia, los viejos tiempos y los nuevos tiempos son sólo uno. Puede que muchas cosas hayan cambiado pero aún necesitamos (y seguiremos necesitando) ir al campo, coger muestras, hacer mapas. Por cierto, una muestra de campo sin respaldo geológico sirve de poco o nada.

### 3. De Anderson a Sibson

Anderson abrió a comienzos del Siglo XX un camino sin el cual no existiría la geología estructural; explicó cómo y porqué se rompían las rocas. Explicó además porqué esas roturas no eran aleatorias sino que existían patrones geométricos basados en la distribución de esfuerzos.

En lo que se refiere a Sibson, no podemos decir aquí que fue el único que se preocupó del tema de los fluidos en zonas de falla, pero sí quien le dio una difusión tal, a través de sus brillantes publicaciones, que haría que un tema de escaso a nulo interés previamente se transformara en una materia de primera importancia para quienes estudian los yacimientos minerales. Sibson fue además quien unió los mundos de la geología estructural y el de los yacimientos minerales, a lo que deberíamos añadir que lo mejor de sus trabajos (aunque lleven una fuerte fundamentación física y matemática) radica en lo “intuitivos” que son, esto es, inmediatamente se capta la esencia de los mismos.

Hemos repetido muchas veces que la mayoría de los yacimientos hidrotermales se relacionan directa o indirectamente con sistemas de falla. En el caso de los filones está claro, pero otros yacimientos como los pórfidos cupríferos también pueden estar ligados a fallas, aunque en ocasiones solo sea porque han sido retocados por estas (p.ej., Ann Mason - Distrito de Yerington) o se asocien (por las razones que sean) a grandes zonas de falla (p.ej., yacimientos tipo Kiruna de Chile). De cualquier manera, cualquiera sea la lectura que queramos darle a los Capítulos 4 y 5, lo que está claro es que comprender como funciona una falla allana mucho el camino hacia la comprensión del yacimiento.

### 4. Lo que nos espera como colectivo

Dicen que “la experiencia es la madre de la ciencia”. El problema es que para lo que nos aguarda en exploración no habrá mucha “experiencia” de la que tirar. Obviamente hablamos de la exploración tipo *greenfields*. El mundo *brownfields*

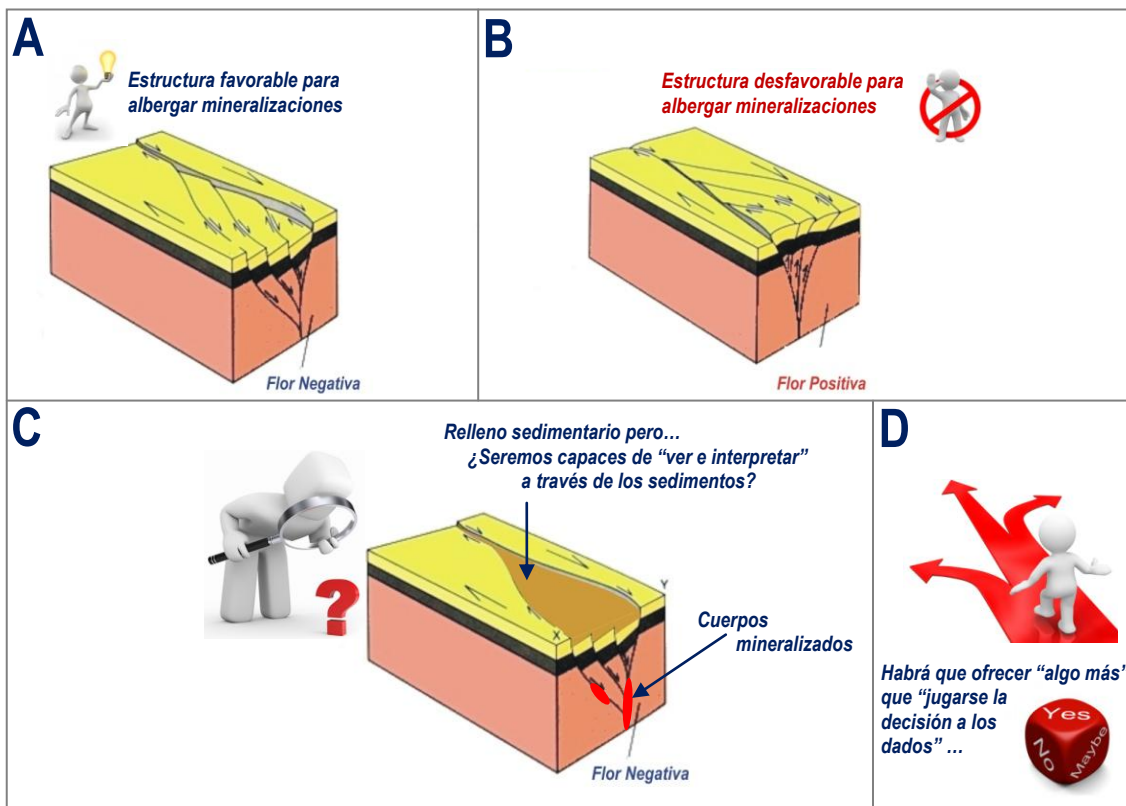
seguirá más o menos como hasta ahora, necesitando de gente cada vez más preparada, pero jugando más o menos con las mismas cartas.

Sin embargo, en el mundo *greenfields* el futuro de la exploración pasa por las zonas cubiertas, en otras palabras, nos adentramos en territorio desconocido. Habrá que pensar y actuar de otra manera. Esta exploración pasará necesariamente por una comprensión 3D de la geología de una región, tanta como para poder proponer “bloques de exploración” en los que llevar a cabo la fase final de una campaña.

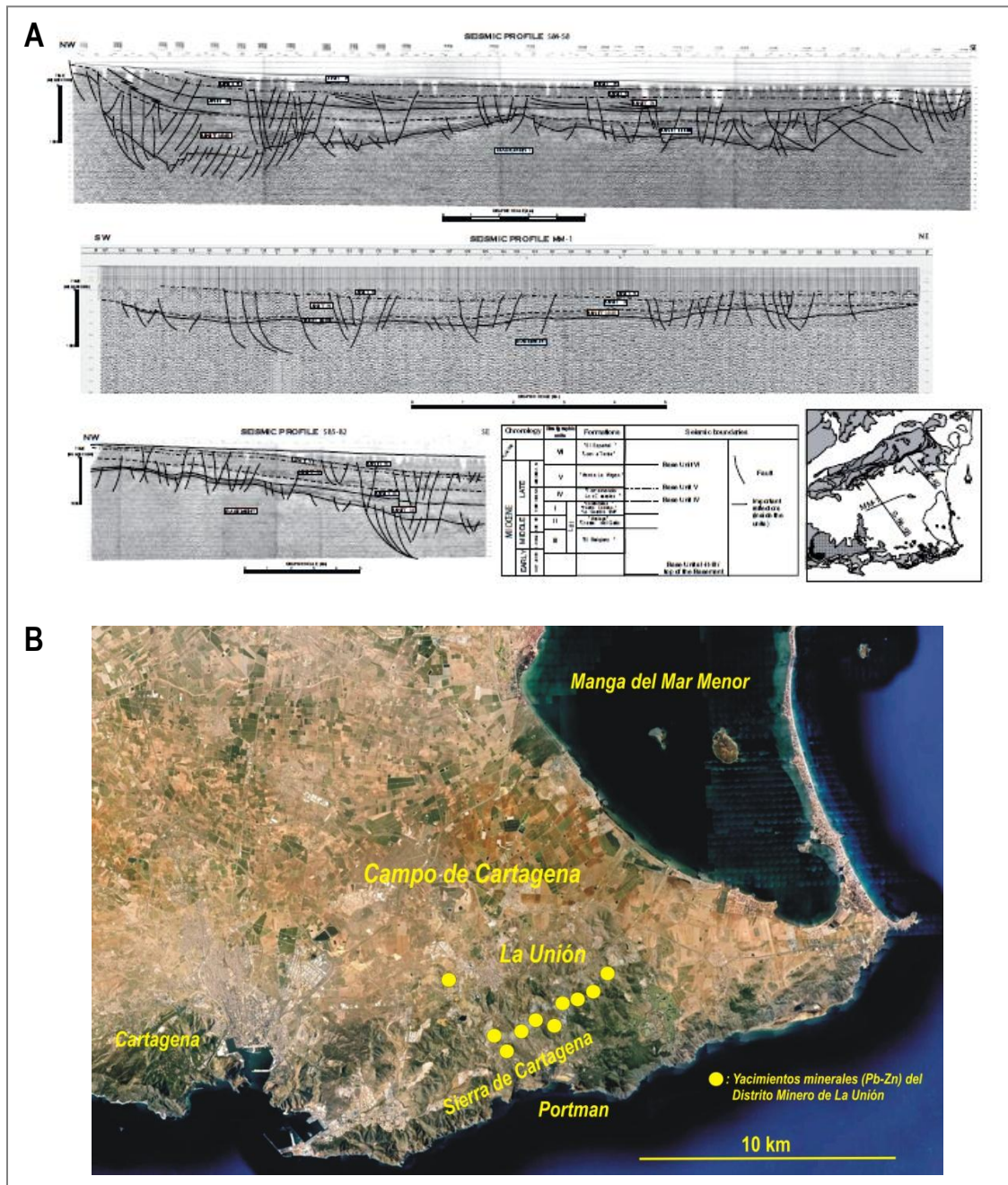


*Sailing away to enter unknown territory (...). Imagen<sup>5</sup>. En gran medida lo que le espera a la exploración de las “tierras cubiertas”.*

Por descontado que además habrá que adaptar las técnicas de exploración como la geoquímica o geofísica a esta nueva realidad. La geofísica está especialmente dotada para escenarios cubiertos, y una técnica prácticamente sin utilidad en yacimientos minerales, la sísmica de reflexión, puede ser particularmente útil para determinar estructuras favorables como las de las figuras siguientes.



Los desafíos que plantea la toma de decisiones sobre estructuras favorables (A) y desfavorables (B) para albergar mineralización. Una cobertura sedimentaria no hará más que complicar aún más el proceso (C,D). Imágenes<sup>6-11</sup>.



A) Perfiles sísmicos en el Campo de Cartagena (Murcia, España) (Jiménez-Martínez et al., 2012), mostrando “al menos” que las estructuras extensionales que han participado en la estructuración del Distrito Minero de La Unión persisten más allá de la sierra que lo alberga; toda una zona inexplorada. B) Imagen Google Earth del Distrito Minero de la Unión y el Campo de Cartagena, un interesante bloque de exploración como los que habrá que concebir en un futuro no muy distante.

## 5. Una despedida

En fin, que a falta de un instrumento que permita ver “a través” de las rocas y sedimentos y “reconstruir” secuencialmente los episodios deformativos y magmáticos, el geólogo de a pié de afloramiento, aquel que toma notas en una

remota galería de mina, el que identifica unidades de roca, estudia la estructura principal y nos presenta un mapa y una sección interpretativa, ese geólogo seguirá siendo un profesional insustituible.



Geólogos en la mina de hierro del Complejo Mariana (Vale) en el Cuadrilátero Ferrífero. Iron 2010: Major Iron Deposits of South Africa & Brazil. Imágenes<sup>12</sup>.

Esperamos que esta obra pueda ser de ayuda en los aspectos estructurales a todos aquellos que trabajan o deseen incorporarse al mundo de la minería. Pensamos que este material les será útil para comprender algo mejor las estructuras en un yacimiento, su proyección en el espacio para predecir la existencia de nuevos cuerpos mineralizados o cuidar la estabilidad de taludes o galerías en una mina. Todo esto en la minería del día a día, porque por supuesto, también (y con mucho interés) dirigimos este trabajo a quienes trabajan o trabajarán en la exploración regional.

Ya sólo una reflexión final, seamos todo lo tecnológicos que necesitemos ser (faltaría más), pero no construyamos la casa empezando por el tejado. Primero seamos geólogos y luego veamos como la tecnología digital puede ayudarnos en nuestro quehacer diario.

A todos vosotros un saludo y hasta siempre,

*Javier Lillo y Roberto Oyarzun*

*Madrid, Julio de 2013*



## Bibliografía

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

- Brimhall, G.H., Dilles, J.H. y Proffett, J.M., 2006. The role of geologic mapping in mineral exploration. Society of Economic Geologists, Special Publication 12, 221-241.
- Diamond, J., 2005. Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed. Viking Books, 575 pp.
- Jiménez-Martínez, J., Candela, L., García-Aróstegui, J.L. y Aragón, R., 2012. A 3D geological model of Campo de Cartagena, SE Spain: Hydrogeological implications. *Geologica Acta*, 10, 49-62.
- Pérez, I., 2012. El sextante y la navegación astronómica. <http://www.ojocientifico.com/3656/el-sextante-y-la-navegacion-astronomica>
- Whitmeyer, S.J., Nicoletti, J. y De Paor, D.G., 2010. The digital revolution in geologic mapping. *GSA Today*, 20, 4-10.

**Fuente de las imágenes** (a Julio de 2013)

1. <http://www.taringa.net/posts/imagenes/7927029/La-Esmeralda-el-buque-escuela-de-Chile.html>
2. [http://www.defensa.gob.es/gl/gabinete/multimedia/fototeca/2005/01/notaPrensa\\_imagen\\_216\\_1.html](http://www.defensa.gob.es/gl/gabinete/multimedia/fototeca/2005/01/notaPrensa_imagen_216_1.html)
3. <http://www.ojocientifico.com/3656/el-sextante-y-la-navegacion-astronomica>
4. <http://www.siliconbeachtraining.co.uk/blog/sales-marketing-working-together/>
5. [http://www.flickr.com/groups/textures\\_only/discuss/72157612454228601/](http://www.flickr.com/groups/textures_only/discuss/72157612454228601/)
6. <http://www.geosci.usyd.edu.au/users/prey/ACSGT/Module2/Mod2Lectures/Sld036.htm>
7. [http://www.irunoninsulin.com/?attachment\\_id=5021](http://www.irunoninsulin.com/?attachment_id=5021)
8. <http://thatliterarylady.com/2013/01/22/dont-do-that/>
9. <http://www.filosofiaesoterica.com/ler.php?id=1635>
10. <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=tough-choices-how-making>
11. <http://cbspeerblog.wordpress.com/category/decision-making/>
12. <http://www.portergeo.com.au/tours/iron2010/album/iron2010photo13.asp>