Yacimientos Minerales

BLOQUE II. GÉNESIS DE YACIMIENTOS MINERALES

Yacimientos volcanogénicos

Yacimientos metamórficos

Gema Fernández Maroto

Departamento de Ciencias de la Tierra Y Física de La Materia Condensada

Este material se publica con licencia:
Creative Commons BY-NC-SA 4.0

Yacimientos Volcanogénicos

Yacimientos Volcanogénicos-Exhalativos sedimentarios

Relacionados con la actividad de soluciones hidrotermales y volcanismo submarinos en rocas encajantes volcánicas o sedimentarias, dando lugar a mineralizaciones estratiformes, masivas, lentejonares, tabulares…

Ocurren a profundidades del orden de 1000 a 6000m, bajo condiciones de presión hidrostática

Las soluciones hidrotermales son siempre salmueras, conteniendo sales disueltas tales como NaCl, KCl, $CaSO_4$ y $CaCl_2$

Sulfuros masivos formados a partir de exhalaciones volcánicas.

POLIMETÁLICOS

FUENTE DE: Cu, Zn, Pb, Au, y Ag

PRODUCTORES: Sn, Cd y Bi.

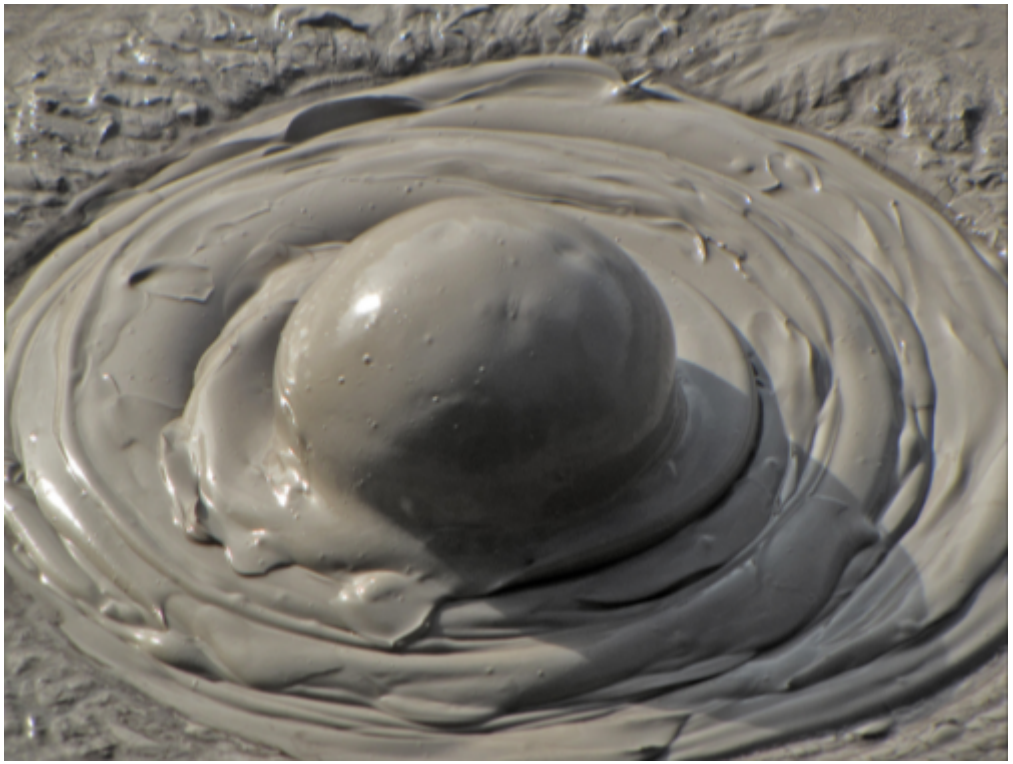
YACIMIENTOS VOLCANOGÉNICOS

Se denominan ***"yacimientos volcanogénicos"*** aquellos depósitos sedimentarios de sulfuros masivos formados a partir de exhalaciones volcánicas, masivos o semimasivos, concordantes con la estratificación, formados por la descarga de soluciones hidrotermales en el fondo del mar en una condiciones físico-químicas que permiten la precipitación de los sulfuros que contienen. Los yacimientos de sulfuros masivos de origen volcanogénico suelen ser polimetálicos, constituyendo la principal fuente mundial de minerales tales como la pirita, Cu, Zn, Pb, Au y Ag, teniendo gran importancia como productores de Sn, Cd y Bi.

YACIMIENTOS VOLCANOGÉNICOS

Formados por fumarolas o barros volcánicos, se dividen en:

- VOLCANOGÉNICOS
- EXHALATIVO - SEDIMENTARIOS



Fuente termal de barro (Waotapu, Nueva Zelanda).

Yacimientos Volcanogénicos-Exhalativos sedimentarios

Los yacimientos originados por fumarolas o barros volcánicos se dividen en:

- Volcanogénicos: Depósitos de sulfuros masivos asociados a rocas volcánicas, piroclásticas, lavas ácidas y básicas, próximos al foco volcánico, con alteraciones profundas en las rocas encajantes y zonas de brechación. Ejemplos: Kuroko, Riotinto, Chipre.
- Exhalativos-sedimentarios: Yacimientos de sulfuros masivos situados en rocas sedimentarias pelíticas, alejados del foco volcánico, tales como los de Broken Hill, Mount Isa, Ramelsberg.

YACIMIENTOS VOLCANOGÉNICOS

Los yacimientos volcanogénicos más importantes son depósitos originados en fondos marinos (erupciones en aguas someras), asociados directamente a rocas volcánicas (lavas básicas o ácidas, piroclásticas e ignimbritas) o indirectamente (volcanoclásticas), e incluso sedimentarias puras (grauvacas, pizarras y calizas).

Dentro de la tectónica de placas los yacimientos volcanogénicos se sitúan en:

- **Ambientes divergentes:** (asociados a ofiolitas) Chipre, Baie Verte.
- **Ambiente convergente:** (asociados a Arcos Isla) Kuroko, Faja Pirítica Ibérica.
- **Pizarras verdes precámbricas:** De origen actualmente desconocido.

Cuando los fluidos alcanzan el fondo marino, los sulfuros se depositan alrededor de las surgencias o en depresiones del fondo donde se acumulan (Vázquez Guzmán, 2012).

YACIMIENTOS VOLCANOGÉNICOS

- Una de las características de los yacimientos de sulfuros masivos de origen volcánico es su disposición en grupos o "racimos". Se sitúan preferentemente en alineaciones o zonas estrechas con gran número de depósitos de dimensiones muy variables. A estas zonas preferentes se les denomina "Franjas" o "Fajas", así se denomina Faja Pirítica Ibérica al conjunto de yacimientos de sulfuros masivos que comprende la zona de Sevilla y Huelva en España y la parte sur de Portugal.
- Un depósito volcanogénico típico de sulfuros masivos consiste, en una masa lenticular de sulfuros metálicos con más del 60% de minerales sulfurosos, debajo de la cual se presenta, discordante, un stockwork de sulfuros metálicos con las rocas encajantes alteradas hidrotermalmente que sugiere el paso ascendente de los fluidos.

MORFOLOGÍA Y TEXTURA DE LOS YACIMIENTOS VOLCANOGÉNICOS

- La morfología de los yacimientos volcanogénicos es muy variada, dependiendo de su situación respecto del foco de salida (próxima o alejada), de la paleografía del fondo marino en el momento de la deposición y de su posible desplazamiento posterior o redeposición, pero la forma más común es la lenticular deformada por los fenómenos tectónicos posteriores.

- Las texturas y estructuras son muy variables, el mineral masivo está formado por un mosaico de cristales de grano fino, concreciones framboidales, etc… con cristales mayores de origen metamórfico (removilizaciones).

MORFOLOGÍA Y TEXTURA DE LOS YACIMIENTOS VOLCANOGÉNICOS

- Algunas masas tienen una estructura bandeada, en la que se pueden ver fenómenos de deslizamiento y figuras de presión, que denotan su carácter sedimentario.

- Quizás la característica más importante de los yacimientos volcanogénicos sea su zonación, en casi todos los depósitos existen zonas, relacionadas con su distancia al foco de emisión, con más alto contenido en pirita, calcopirita, blenda o galena.

MINERALOGÍA

La mineralización de los yacimientos volcanogénicos está compuesta por numerosos sulfuros metálicos, especialmente pirita. La deposición en el fondo marino, con un brusco cambio de presión y temperatura, junto con las condiciones de oxidación-reducción existentes en la cuenca de deposición, produjeron la precipitación de las salmueras o barros mineralizantes en forma de sulfuros masivos. Texturas framboidales con microcristales de pirita sugieren la idea de una precipitación bacteriana de los sulfuros. Observaciones recientes del fondo del Mar Rojo nos muestran la existencia de vida próximas a las chimeneas volcánicas, (**"smokers"**). Son numerosísimos los minerales quese encuentran entre los sulfuros polimetálicos complejos masivos de los yacimientos exhalativo-sedimentarios, muy variables de una provincia metalogénica a otra.

En la "Faja Pirítica Ibérica" los minerales mas importantes son:

MINERALOGÍA

Primarios

Pirita .....FeS_2

Calcopirita ..... $CuFeS_2$

Bornita .....Cu_5FeS_4

Blenda .....ZnS

Galena .....PbS

Freibergita .... $Cu_{12}Sb_2As_2S_{13}$

Tetraedrita .....$Cu_{12}Sb4S_{13}$

Cobre nativo .... Cu

Bournonita ..... $CuSbPbS_3$

Arsenopirita..... FeAsS

Secundarios

Calcocita..... Cu_2S

Covellita..... CuS

Melanterita .....$FeSO_4+H_2O$

Azurita ..... $Cu_2(OH)_2CO_3$

Malaquita ..... $Cu_2(OH)_2CO_3$

Hematites ..... Fe_2O_3

Goethita ..... FeO OH

Limonita ..... $2Fe_2O_3+3H_2O$

Cuprita ..... CuO_2

Cerusita ..... $PbCO_3$

Pirita masiva

GÉNESIS DE LOS YACIMIENTOS VOLCANOGÉNICOS

En los últimos años se ha demostrado el carácter sindeposicional y origen volcánico ó hidrotermal convectivo, entre rocas de carácter volcánico, en diversas partes del mundo, especialmente en el Kuroko.

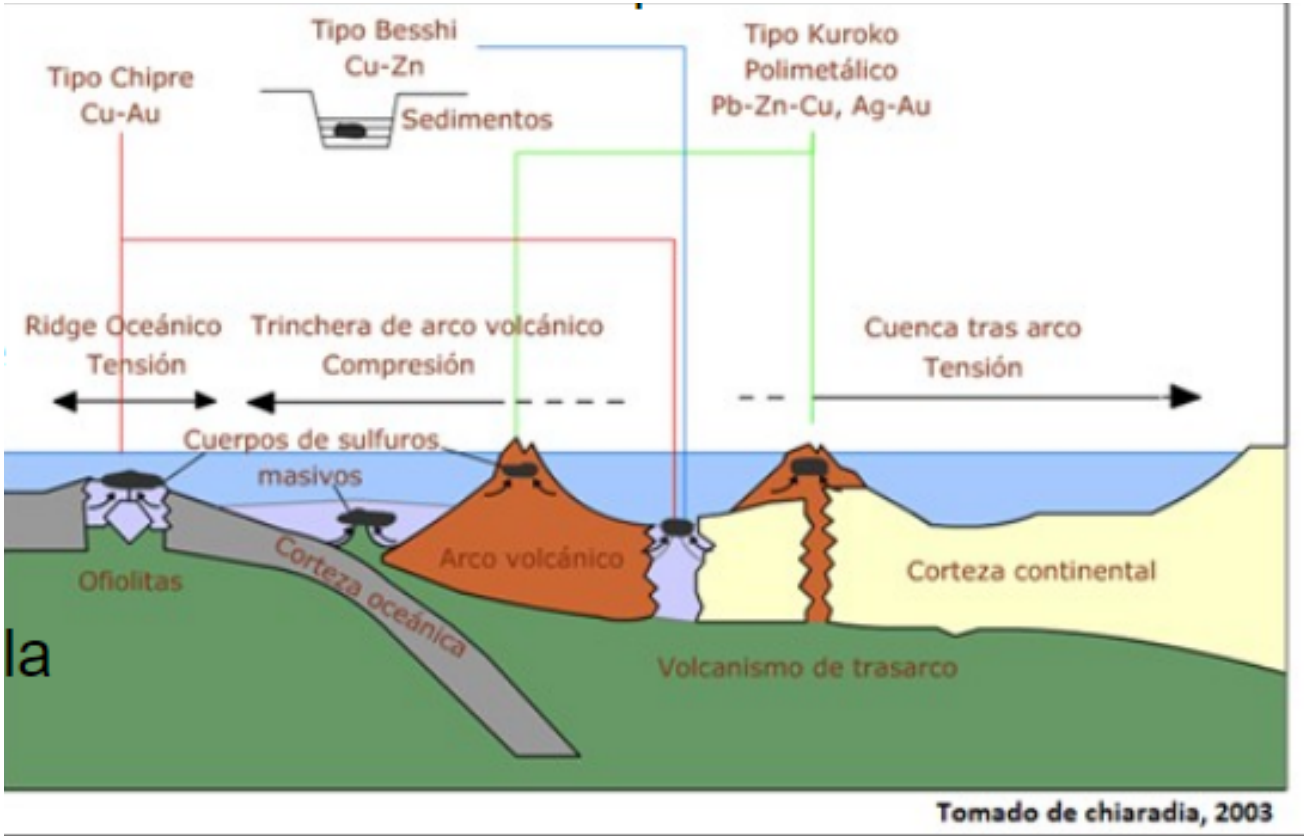
Posteriormente, cada tipo de yacimiento se ha relacionado, dentro del modelo de Placas Tectónicas, con su situación dentro del mismo. De acuerdo con su génesis, los yacimientos exhalativos pueden ser:

- **Volcanogénicos:** asociados a rocas volcánicas, lavas o piroclásticas:
  - **Félsicos:** asociado a vulcanismo ácido tipo Kuroko.
  - **Calcoalcalinos:** tipo Beshi.**Ofiolíticos:** tipo Chipre.
- **Exhalativo-Sedimentarios, SEDEX:** asociados a rocas detríticas:
  - **Detríticos:** tipo Sullivan.
  - **Carbonatados:** Tipo Alpino: singenéticos. Tipo Irlanda: sin y epigenéticos. Tipo Balmat**:** asociados a evaporitas.

RELACIÓN CON LA TECTÓNICA DE PLACAS

Los ambientes de formación de los yacimientos son:

- Dorsales oceánicas
- Centro de expansión en cuencas marginales
- Arcos Isla



Tomado de chiaradia, 2003

GÉNESIS

Según Horikoshi, la formación de un yacimiento volcanogénico tipo Kuroko pasa por una serie de etapas que se inicia con la emisión de lavas ácidas y básicas en medio submarino (lavas almohadilladas), seguida de una fase explosiva en la que se produce la expulsión de las rocas que taponan el volcán, con la emisión de brechas y rocas piroclásticas de diferentes tamaños que se depositan en el mar, clasificándose por tamaños y densidad, situándose las brechas heterométricas en las proximidades del foco volcánico y las cineritas más alejadas del mismo. A medida que se desarrolla el episodio volcánico y decae la intensidad, los piroclástos expulsados disminuyen de tamaño pasando de brechas volcánicas a tobas gradadas (hasta cineritas volcánicas), iniciándose posteriormente una etapa fumarólica con fuentes hidrotermales portadoras de los iones metálicos que se depositan en la cuenca de acuerdo con las condiciones físicoquímicas del medio. La secuencia anterior corresponde a la situación de un yacimiento en el mismo lugar de formación (próximal), pero existen yacimientos de origen exhalativo alejados de los focos volcánicos (distales).

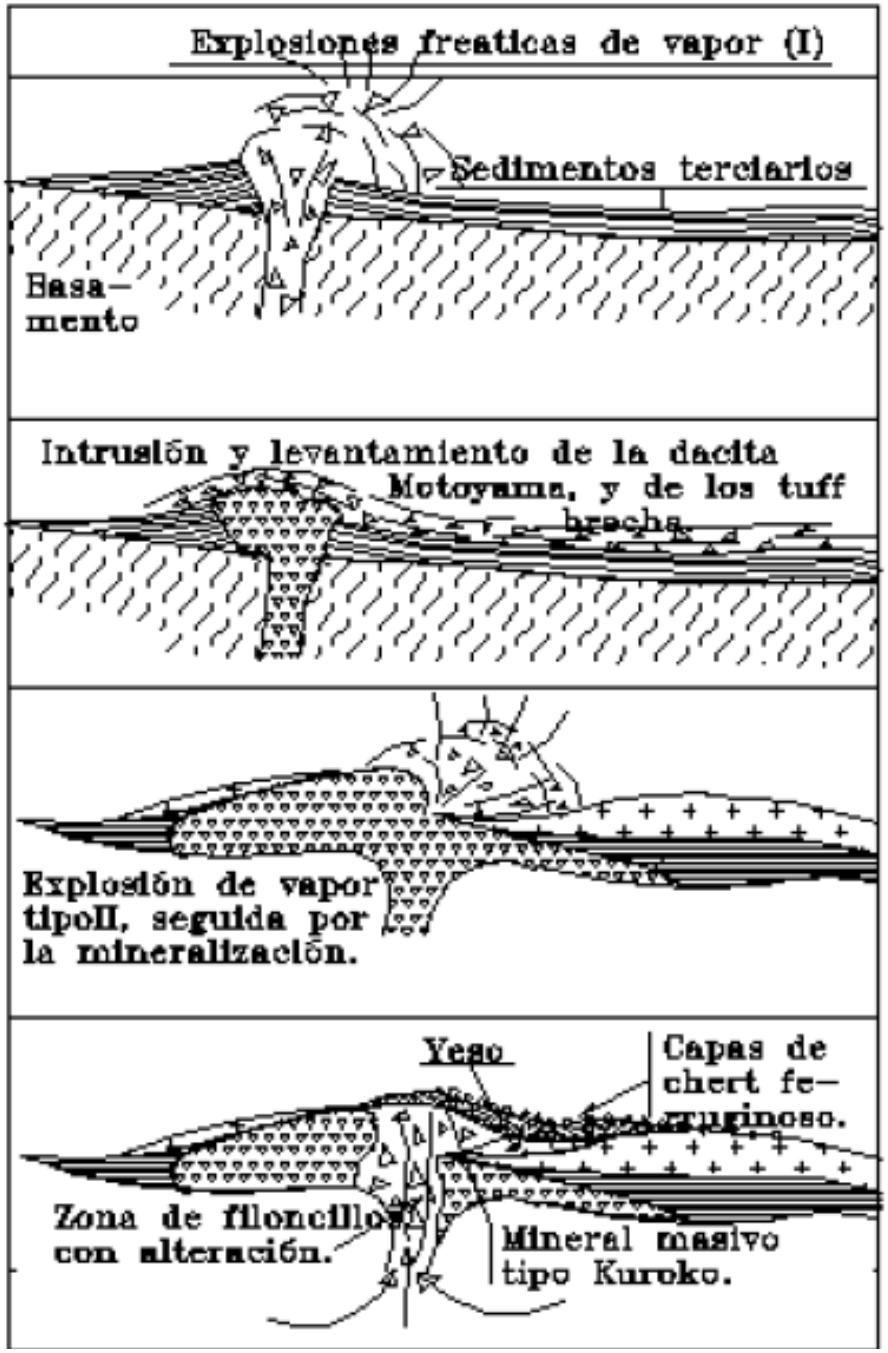
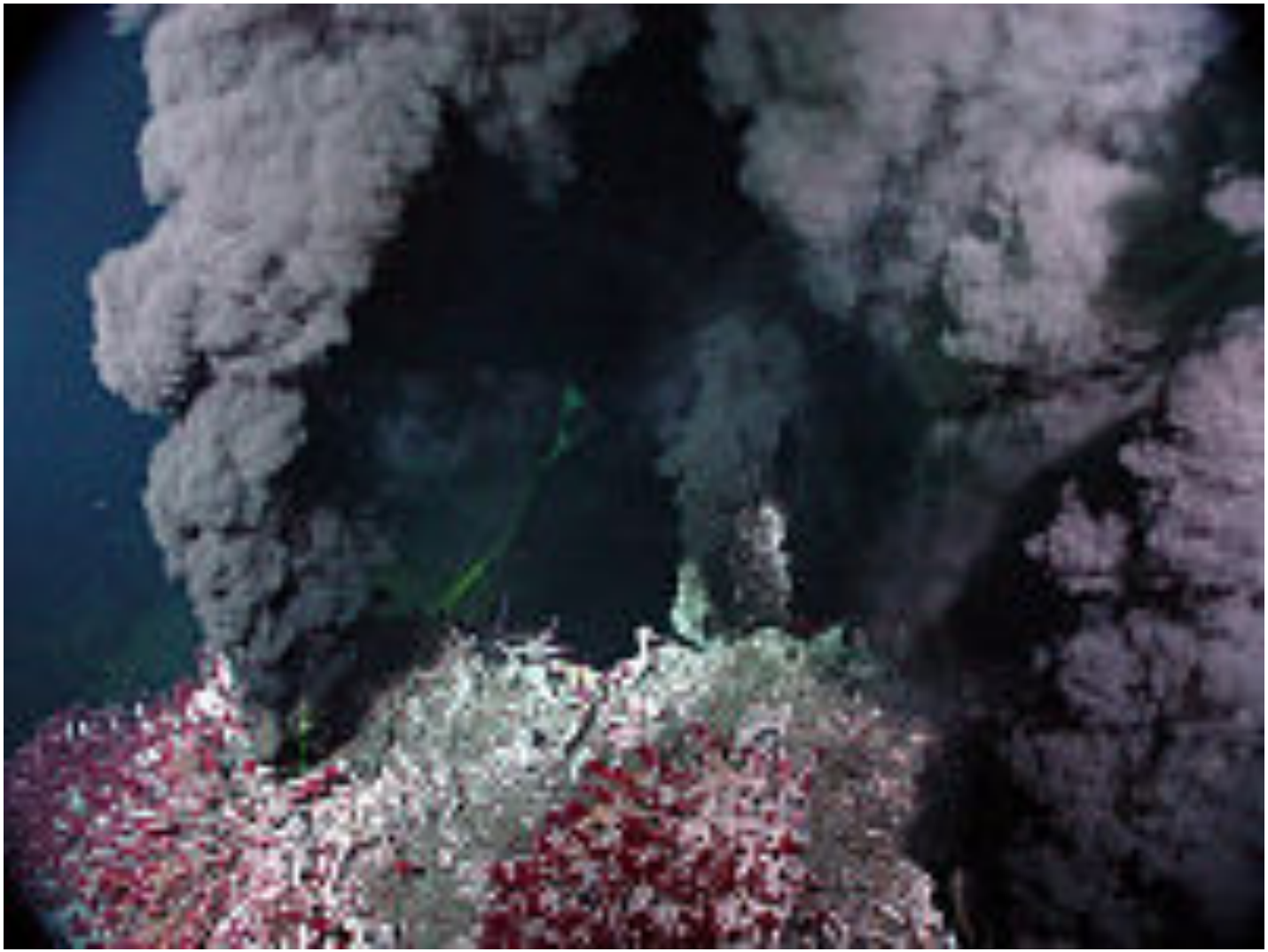


Fig.33.- Génesis de un yacimiento modelo Kuroko, (Kosaka, Japón). Se inicia con una emisión de lavas básicas, seguida de las primeras explosiones de vapor.

I.- Explosiones de vapor producidas por el contacto entre las rocas calientes y el agua fria del mar, seguidas de emisiones de lava ácida poco viscosa.

II.- Explosiones de vapor, seguidas de la mineralización, con dirección más lateral. Las explosiones producen gran cantidad de materiales sueltos, bombas, piroclastos y lapilli que se intercalan con los episodios mineralizantes. Las capas de yeso son comunes en los yacimientos de tipo Kuroko, y menos comunes en los depósitos antiguos. Estas capas de yeso pueden representar un alto Eh en los mares recientes. Horikoshi, 1969.



Fumarolas o “smokers”

En la actualidad está ocurriendo en el Mar Rojo

Los fondos del Mar Rojo poseen una diversidad biológica extraordinaria, propia de los arrecifes coralinos.

ROCAS ENCAJANTES

Dentro de los yacimientos de sulfuros masivos diferenciamos los volcanogénicos y los exhalativo-sedimentarios, según se encuentren directamente asociados a rocas volcánicas o a sedimentos sin relación con las rocas volcánicas, esto se debe a su situación respecto al foco volcánico .

a) Yacimientos proximales: situados en las proximidades de los focos volcánicos. Las rocas encajantes son lavas y piroclásticas contemporáneas con los sulfuros masivos, cuyo quimismo puede ser básico, intermedio o ácido.

b) Yacimientos distales próximos: las rocas concordantes con los sulfuros son sedimentos menos gruesos y lavas básicas (menos viscosas), o lavas ácidas (menos frecuentes) y predominio de piroclásticas de redeposición, junto con sedimentos terrígenos (pizarras y grauwacas), más abundantes que en el caso anterior.

c) Yacimientos distales alejados: este tipo de yacimientos se encuentran asociados a sedimentos pelíticos de origen volcánico, redepositados a partir de las cenizas volcánicas, y sedimentos terrígenos finos.

ALTERACIÓN DE LAS ROCAS ENCAJANTES

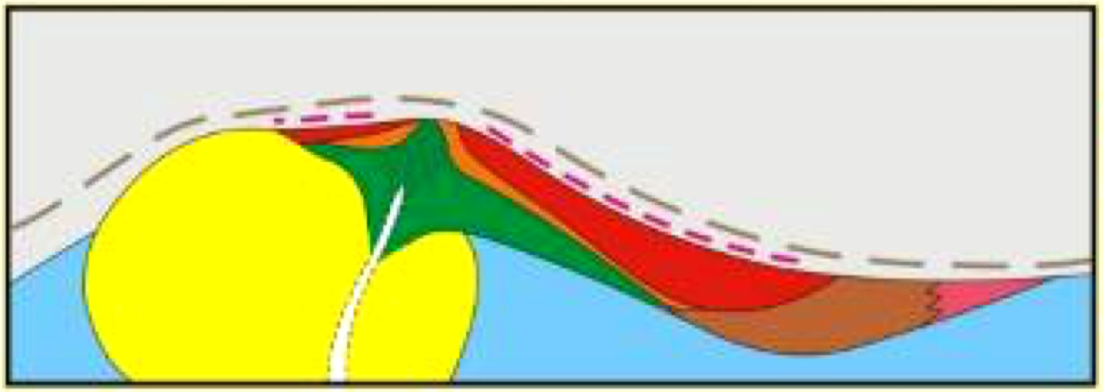
- Los yacimientos de sulfuros volcanogénicos tienen dos tipos de alteración:
  - La hidrotermal por contacto con los fluidos calientes
  - Y la supergénica debida al contacto con el oxígeno y los fluidos externos (agua, CO_2, etc.).
- La alteración de las rocas encajantes tiene una zonación característica en el contacto inmediato a la mineralización con un alto contenido en sílice. La inmediata superior contiene, sericita, montmorillonita y clorita. Sobre ella encontramos otra zona en la que predomina la sericita-montmorillonita-clorita y albita.
- Finalmente, la zona menos alterada se caracteriza por su menor contenido en montmorillonita, con silicatos hidratados (ceolitas) y sílice de baja temperatura (cristobalita).

CARACTERÍSTICAS DE LOS YAC. VOLC

•Disposición en grupos: “racimos”

•Situados en alineaciones, o zonas estrechas con gran nº de depósitos de dimensiones variables: FRANJAS ó FAJAS.

Tipo Kuroko



Sulfuros masivos estratiformes

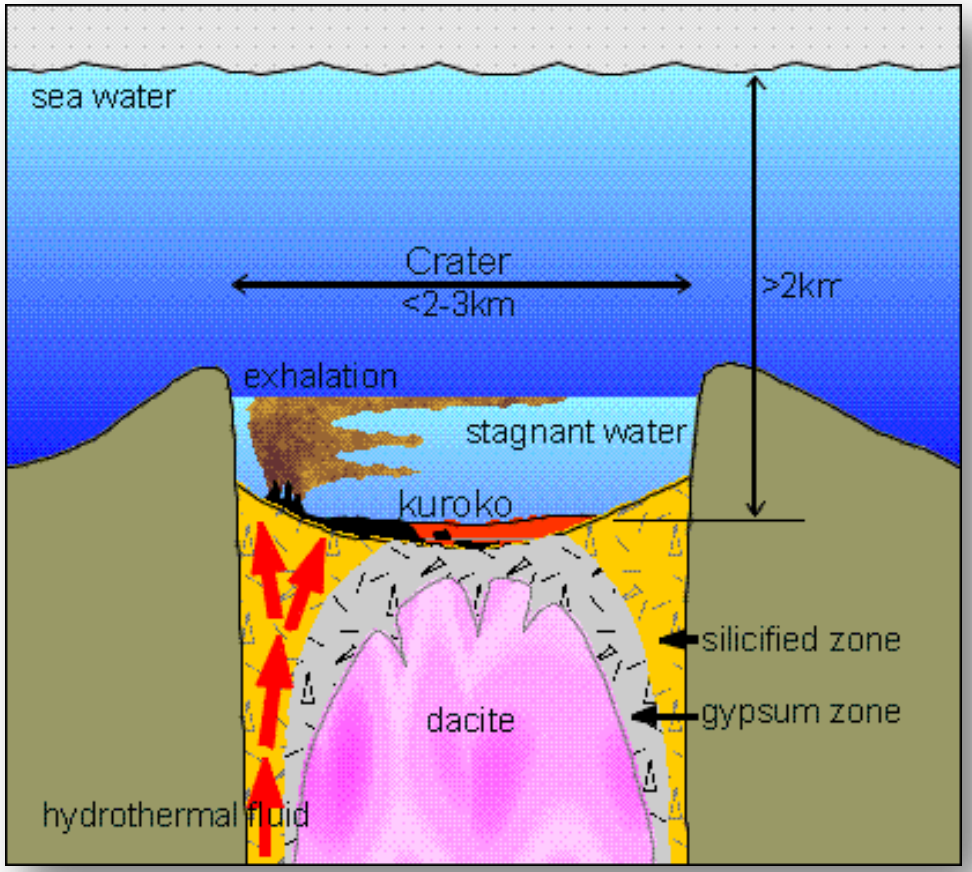
Pirita, calcopirita, esfalerita, galena

Por encima de un domo riolítico.

Halos de alteración hidrotermal: montmorillonita, sericita…

Tipo Kuroko

- Frecuente que contengan ciertos valores de metales preciosos (Au, Ag).
- Formaciones de potencia y extensión variable intercaladas en secuencias marinas detríticas con abundantes intercalaciones volcánicas.
- Recristalización metamórfica, aumento tamaño de grano, favoreciendo la explotación minera y, la concentración mineral.



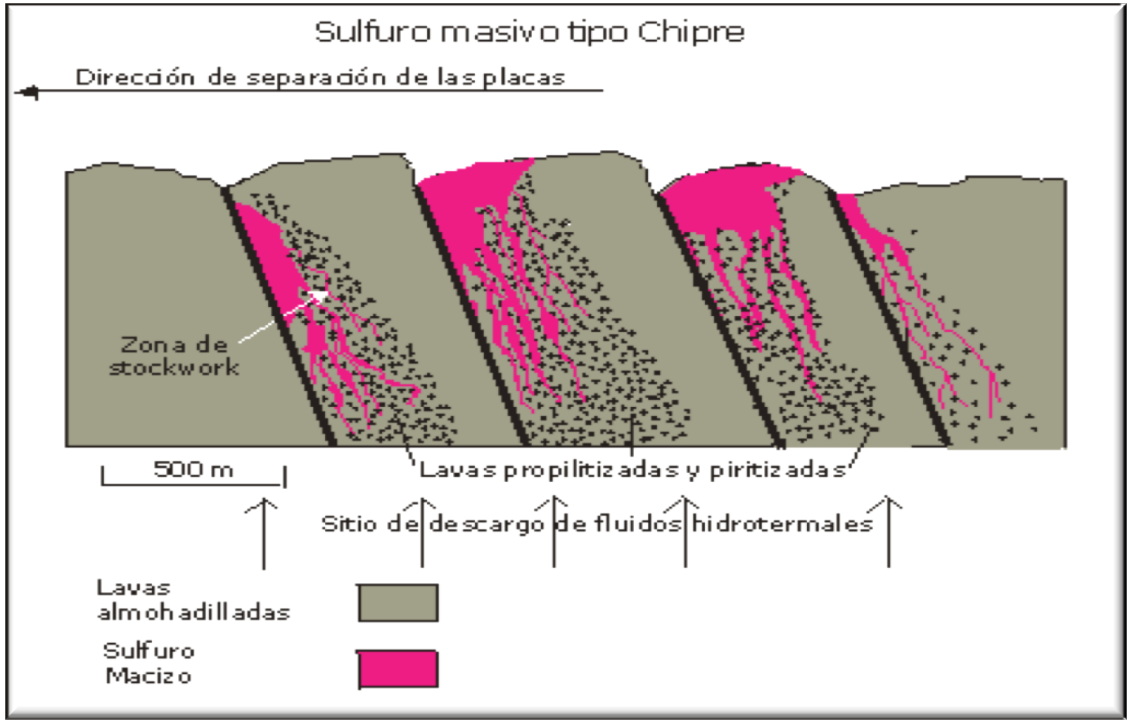
YACIMIENTOS DE SULFUROS MASIVOS TIPO CHIPRE

Formados en fondos oceánicos profundos con volcanismo basáltico.

La isla de Chipre en el mar Mediterráneo se formó en un centro de expansión submarina, desarrollado durante el Cretácico superior.

Presenta una zonación vertical:

- Sedimentos pelágicos
- Zona masiva de pirita, marcasita, calcopirita y esfalerita
- Zona silícea en la parte basal



Relación entre la mineralización y las zonas de falla de mat. volcánicos.

YACIMIENTOS DE SULFUROS MASIVOS TIPO CHIPRE

Las lentes de sulfuros se encuentran en basaltos toleíticos, almohadillados, cerca de una transición con sedimentos arcillosos suprayacentes.

Tipos de rocas: flujos de basaltos o lavas almohadilladas toleíticas o calcoalcalinas, tobas basálticas, chert y argilita.

LEYES: 1,7%Cu, Ag, Au y Zn

MINERALES DE MENA: pirita, calcopirita, magnetita, esfalerita, en menor cantidad marcasita, galena, pirrotina, hematites y a veces por alteración de la zona superior, goethita.

MINERALES DE GANGA: talco, chert, clorita.

Yacimientos Exhalativos

SEDEX, depósitos tabulares compuestos de Zn, Pb y Ag con intercalaciones de sulfuros de hierro y rocas sedimentaria.

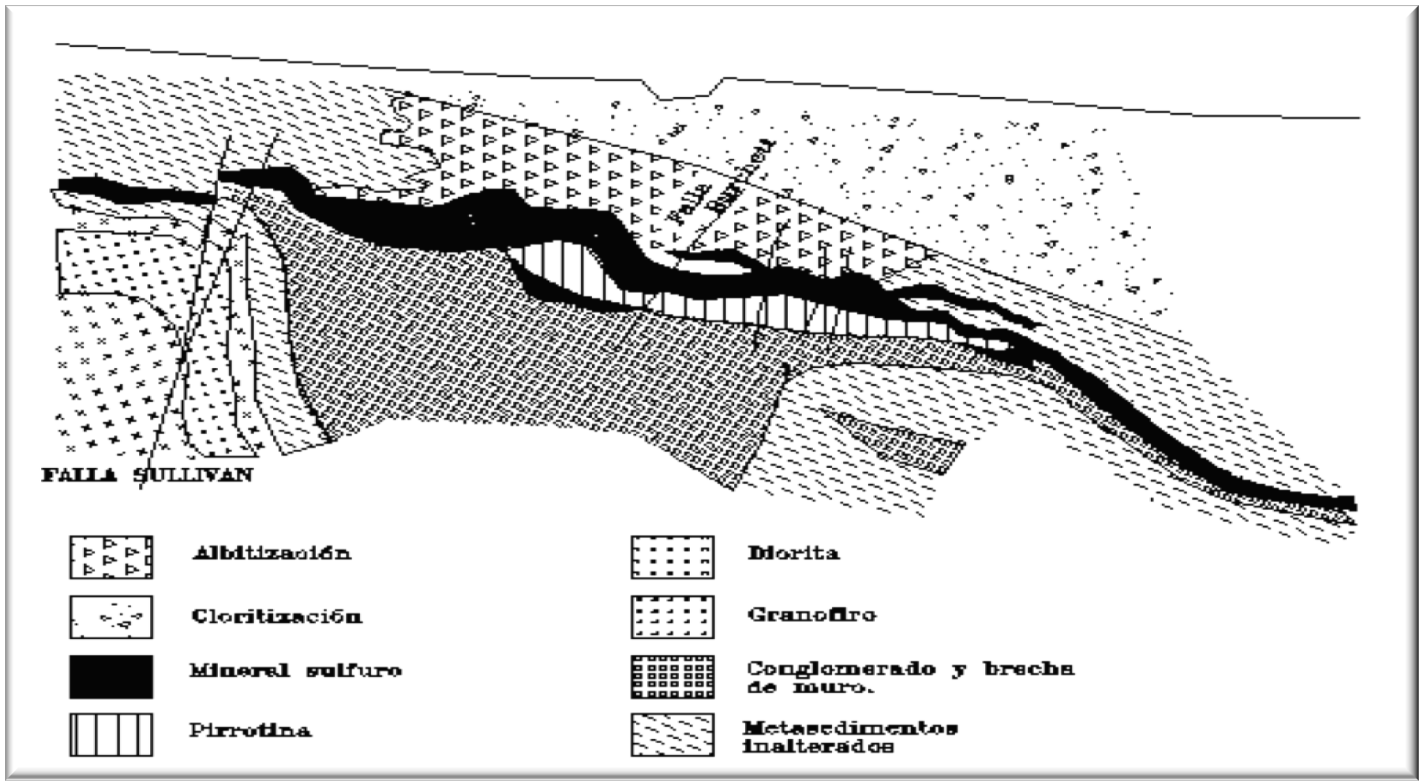
Exhalativos-Sedimentarios:

- Detríticos: Sullivan
- Carbonatados

Asociados a rocas sedimentarias como lutitas negras carbonosas, arniscas y rocas carbonatadas.

Relacionados con fluidos hidrotermales procedentes de actividad ígnea, expelidos hacia cuencas sedimentarias.

Yacimientos Exhalativos



Corte transversal de Mina Sullivan.

LA FAJA IBÉRICA

Comprende parte de las provincias de Sevilla y Huelva en España, y el Sur de Protugal.

Más de 70 minas.

LA FAJA IBÉRICA; RIOTINTO, THARSIS, NEVES CORVO

La Faja Pirítica es una franja de 230 Km de largo por 30 Km de anchura media que, de Este a Oeste, parte de las cercanias de Sevilla (España), cruza toda la provincia de Huelva y se interna en Portugal hasta Grándola.

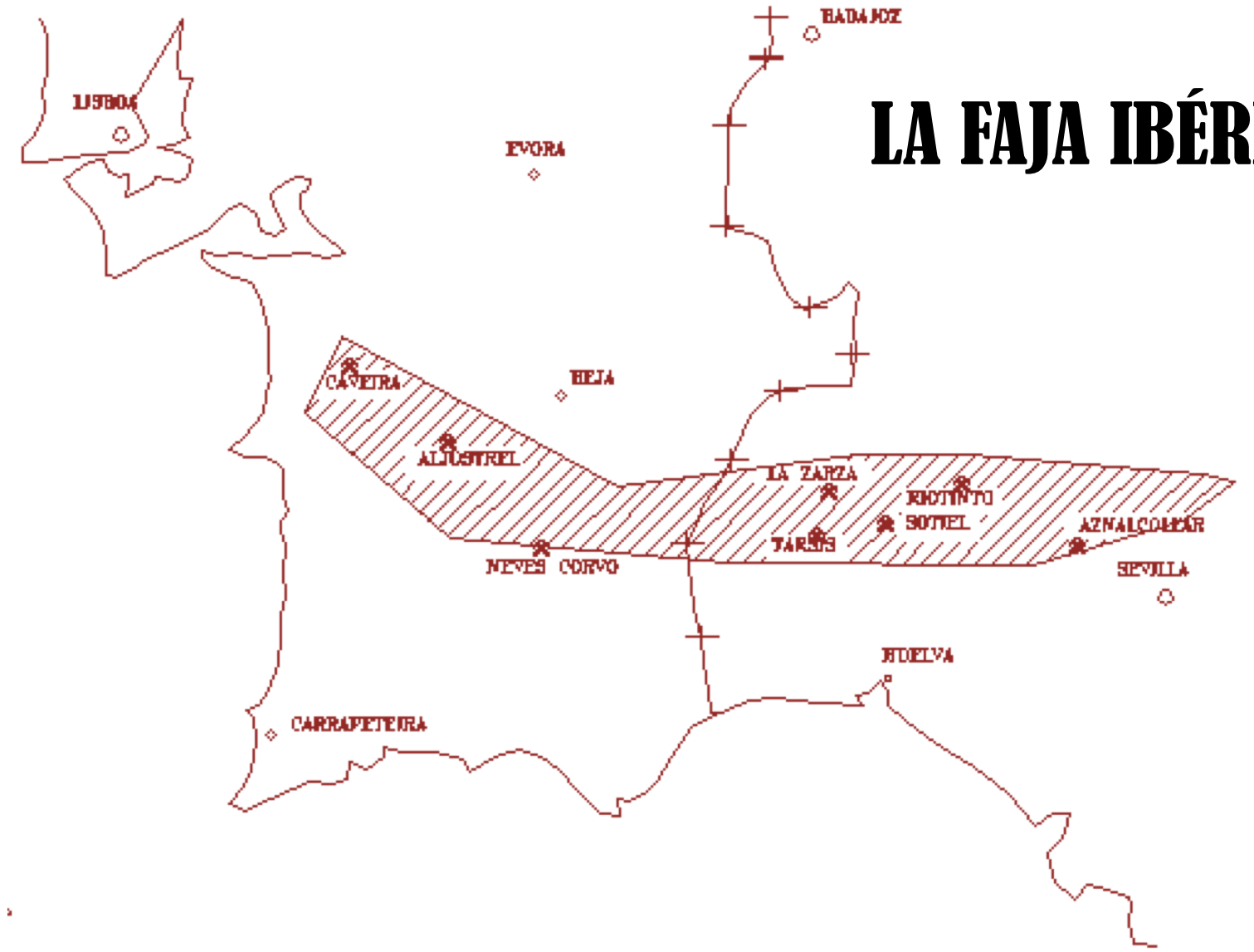
Sus límites son, por el N. las Sierras de Aracena y Bejar, últimas estribaciones de Sierra Morena; al Sur penetra discordante bajo terrenos terciarios y cuaternarios; al Este está limitada por la falla del Guadalquivir y al Oeste por la de Grándola.

Explotada en épocas anteriores a los romanos, primero se benefició el Au, Ag y Cu que se extraía de sus monteras de hierro, explotaciones que se iniciaron con los tartesos.

Luego los romanos crearon una floreciente industria extractiva, llegando a adquirir Riotinto y Tharsis gran renombre en la antigüedad.

Posteriormente, las explotaciones quedaron abandonadas durante la Edad Media y, a partir de Felipe II, se reanudan los trabajos.

LA FAJA IBÉRICA



LA FAJA IBÉRICA

La columna estratigráfica de la Faja Pirítica está formada en su base, por un potente banco de pizarras y cuarcitas de edad Devónica, procedentes de la sedimentación de arenas y arcillas en el fondo de un geosinclinal poco profundo (formación prevolcánica). Movimientos tectónicos verticales produjeron elevaciones y hundimientos en la artesa, señalados por la existencia de estratificación cruzada, areniscas de aguas poco profundas y, al final, un conglomerado discontinuo con coladas de lavas espilíticas en estratos del Devónico Superior que indican un relativo ascenso de la formación prevolcánica durante este periodo, y el inicio de la fase paroxismal. Sobre esta formación prevolcánica se encuentra una potente serie de rocas efusivas y piroclásticas, que son las portadoras de los yacimientos masivos de pirita y, finalmente, de los carbonatos y silicatos de manganeso y hierro, cuya edad es Carbonífero Inferior (Visense). Casi todos lo depósitos de pirita se sitúan en tres bandas mineralizadas de dirección NW-SE que parecen indicar la existencia de tres episodios volcánicos

LA FAJA IBÉRICA

Yacimientos formados por **agrupaciones de masas** sucesivas relacionadas con un foco volcánico. Alineación de focos.

Al muro: stockworks de Py en rocas volcánicas con CalcoPy y Q.

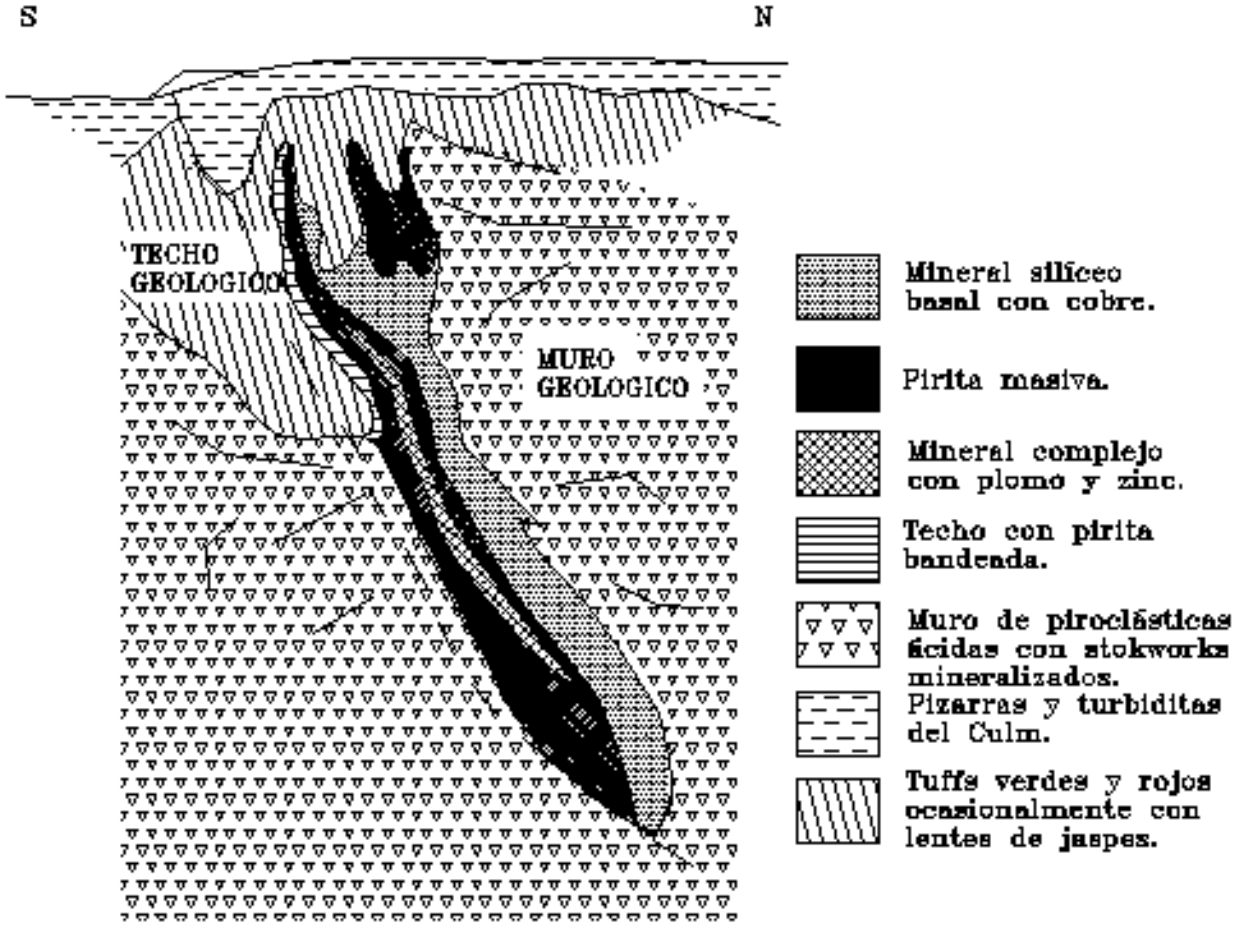
Rocas encajantes: pizarras arcillosas y grafitosas, lavas,y cineritas.

Alteración hidrotermal intensa: sericitización, caolinitización y cloritización.

Carbonífero

Las explosiones volcánicas también se sucedían en los momentos de exhalación de los fluidos mineralizantes, como lo demuestra esta fotografía tomada de una muestra extraída de la corta de San Miguel en la que se señalan los cantos de riolita englobados en una matriz de pirita. Es evidente el deslizamiento de la roca durante el estado geliforme de la pirita.

Minas de La Faja Ibérica



Corte geológico de La Zarza

Destacan en Portugal: Neves Corvo, Aljustrel, Sao Domingos, Lousal.

Y en España: Riotinto, Lomero-Poyatos, Tharsis, La Joya, El Buitrón, Aguas Teñidas, Cueva de la Mora, La Zarza, Sotiel, Cobre Las Cruces…

YACIMIENTOS RELACIONADOS CON PROCESOS METAMÓRFICOS

METAMORFISMO

- El metamorfismo es un proceso en el que la elevación de las presiones y temperaturas, junto con el movimiento de fluidos hidrotermales, produce modificaciones en las texturas y la mineralogía de las rocas preexistentes. Estas modificaciones físico-químicas y, en especial, el intercambio iónico con las rocas adyacentes de las aguas metamórficas generan yacimientos metálicos o no metálicos o modificaciones en los preexistentes
- Aunque las rocas metamórficas son menos abundantes en la corteza terrestre que los otros dos grandes tipos de rocas, ígneas y sedimentarias, tienen un gran interés desde el punto de vista económico, ya que en ellas pueden existir todo tipo de metales, salvo Cr, Sb y Hg.

Tipos de yacimientos metamórficos

Los yacimientos asociados a las rocas metamórficas pueden ser de dos tipos:

- **1º Yacimientos metamórficos:** formados por procesos metamórficos propiamente dichos, fluidos metamórficos o intercambio de materia.
- **2º Yacimientos metamorfizados:** situados entre las rocas que sufren el metamorfismo y son afectados por los cambios de presión y temperatura, que pueden modificar su mineralogía o estructura, dando yacimientos característicos, relacionados íntimamente con las rocas que los contienen.

Sulfuros más comunes: bornita, calcopirita, galena, pirita y esfalerita.

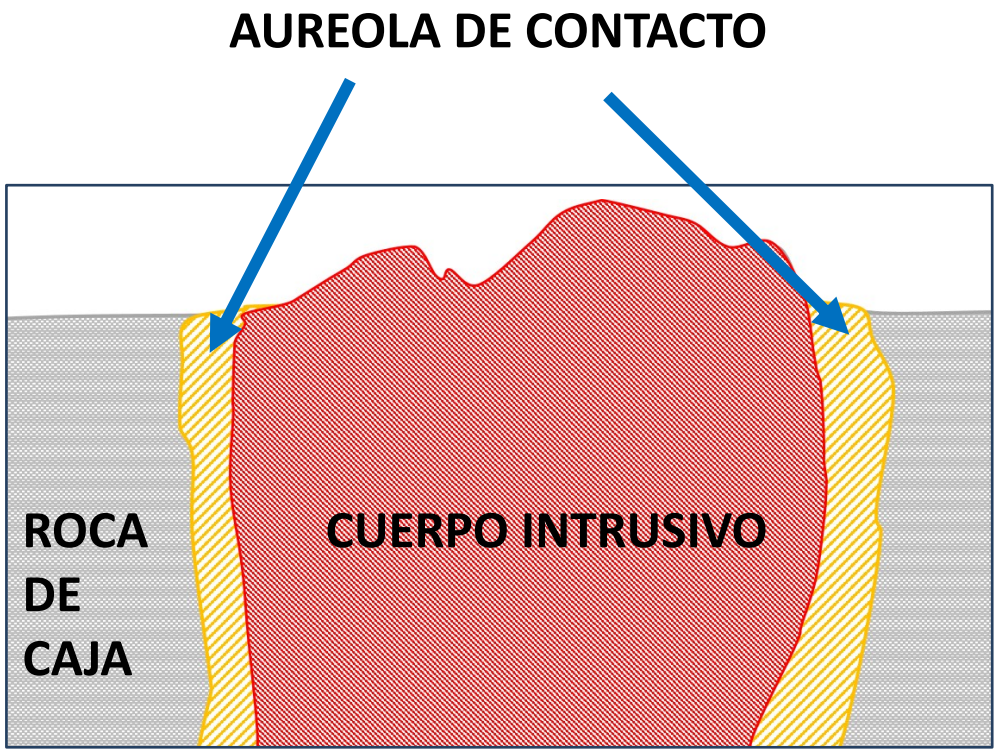
Óxidos: hematites y magnetita

TIPOS DE METAMORFISMO

Metamorfismo regional: Se relaciona con los grandes depósitos de sedimentos en una cuenca geosinclinal en subsidencia en los que, de forma progresiva, se van acumulando sedimentos. La superposición de grandes cantidades de materiales en forma de capas produce al principio la desecación de los materiales, seguida de un incremento de presión y temperatura que transforma los sedimentos en rocas. La acumulación de materiales en el fondo de la cuenca provoca una elevación de presión y temperatura relacionada con el espesor de los sedimentos, llegando a provocar cambios químicos, texturales y estructurales sobre algunos minerales preexistentes, produciendo otros nuevos, "minerales de neoformación" , con texturas y estructuras propias del metamorfismo.

TIPOS DE METAMORFISMO

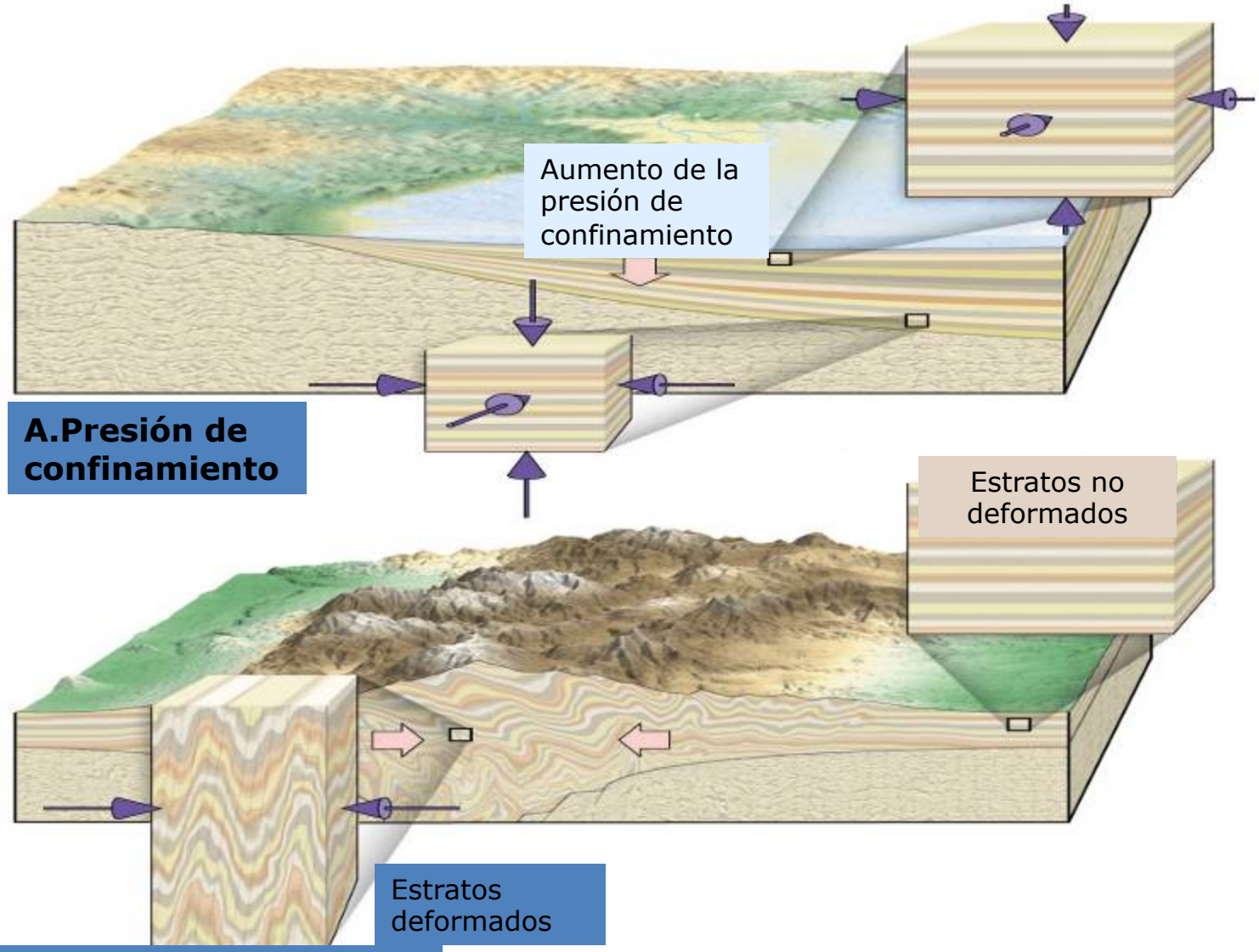
Metamorfismo de contacto: El metamorfismo de contacto está ligado a rocas intrusivas que, al penetrar en la corteza terrestre originan una ***"aureola"*** de elevada temperatura y presión que provoca cambios químicos y texturales en las rocas adyacentes. La aureola de contacto es tanto mayor cuanto más grande es la intrusión, pero su espesor no pasa, en general, de varios centenares de metros, aunque en ocasiones se pueden advertir cambios metamórficos a mayor distancia.



AGENTES FISICO-QUIMICOS DEL METAMORFISMO

- ***Calor*:** La elevación de la temperatura puede ser producida por el enterramiento profundo de los sedimentos, por el contacto con rocas ígneas, procesos tectónicos, puntos calientes de la corteza terrestre, etc.
- ***Presión:*** La presión influye, sobre todo, en la textura de la roca, pasando de una roca granuda (arenisca) a otra más compacta (cuarcita), en la que los granos se interpenetran entre sí, aumentando su dureza. La presión puede ser producida por el peso de los sedimentos depositados en la cuenca, por la tectónica generada en la colisión de placas tectónicas, o por una intrusión ígnea.
- ***Agua:*** Los sedimentos iniciales contienen hasta un 80% de agua que, por efecto de la presión, ascienden a la superficie, arrastrando los minerales que disuelven. Las aguas metamórficas pueden ser de baja temperatura o alcanzar temperaturas elevadas, llegando al estado hipercrítico en el que se disuelven minerales que en condiciones normales son insolubles.

Presión como agente metamórfico



Ambientes metamórficos y tectónica de placas

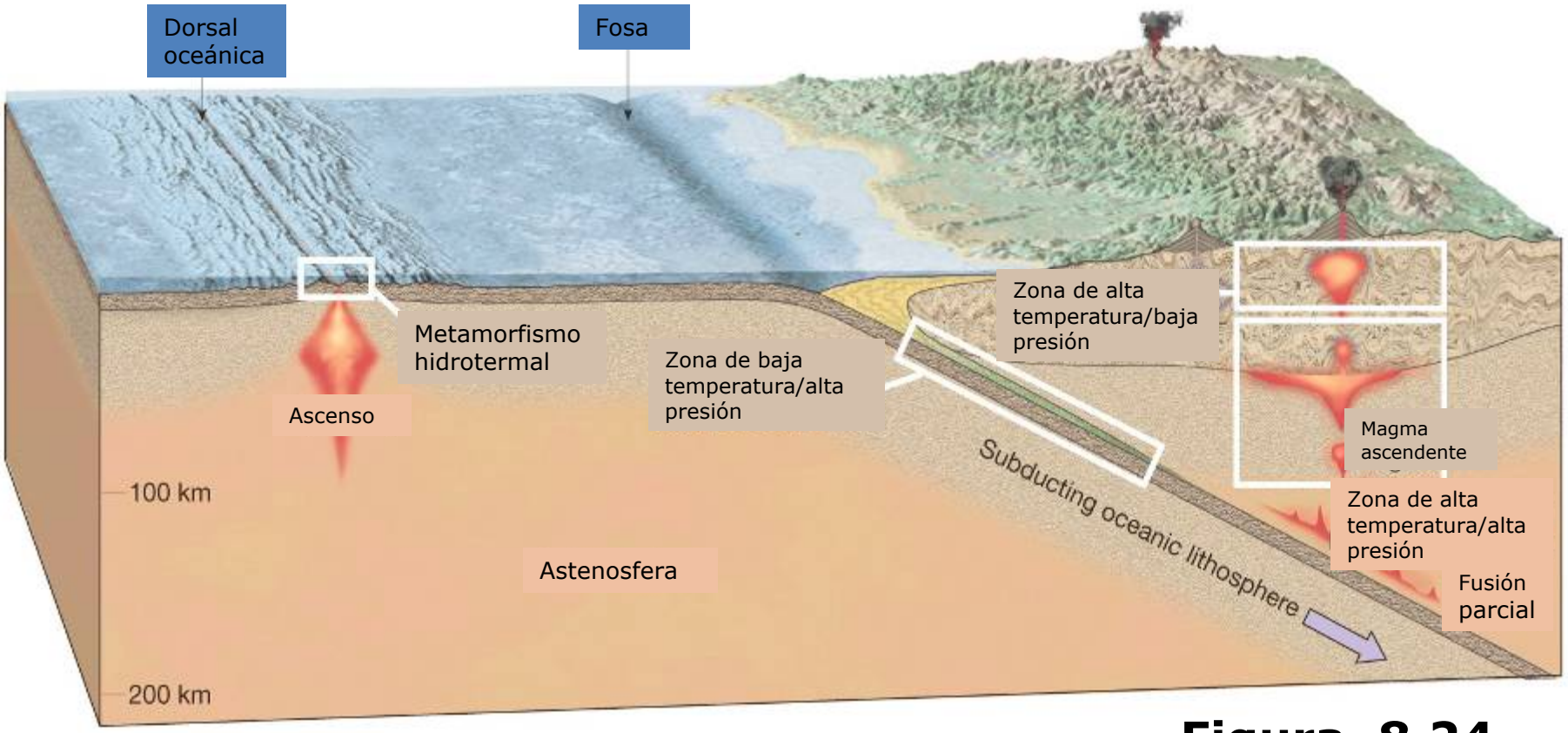


Figura 8.24

EFECTOS DEL METAMORFISMO SOBRE LOS YACIMIENTOS

1. **Efectos producidos por la presión litostática y la temperatura en cuencas.** Los cambios metamórficos que afectan a los minerales pueden ser grandes, pero son mayores los que se operan a nivel general del yacimiento y de las rocas de la caja. Los yacimientos sedimentarios son los más afectados por este tipo de metamorfismo.
2. **Cambios producidos por el metamorfismo de contacto.** Las modificaciones producidas por el metamorfismo de contacto se deben a la presión del magma contra las rocas adyacentes y a la temperatura del mismo con intercambio de materia entre la intrusión y las rocas de caja.
3. **Efectos de trituración o milonitización en los yacimientos:** Afectados por fenómenos de dinamometamorfismo, sufrirán rupturas que pueden ser simples fracturas, o fallas con milonitización en forma de brechas.

YACIMIENTOS METAMORFIZADOS

Los procesos metamórficos actúan sobre los minerales preexistentes, tanto rocosos como metálicos.
Cuando los minerales son metálicos pueden formar, por transformaciones metamórficas, valiosos depósitos de minerales, por removilización y recombinación de los minerales que integran las rocas afectadas por los procesos metamórficos.

La **galena** "fluye" entre los intersticios de los minerales más estables como la pirita.

La **pirita** puede transformarse en pirrotina.

La **hematites** se transforma en **magnetita** y el **Hg** se volatiliza.

La mineralogía de los yac. Metamórficos es compleja: **W, Mo, Cu, Zn, Fe, Sn, y metales preciosos.**

YACIMIENTOS METAMORFIZADOS

- Las texturas y estructuras originales se oscurecen con el metamorfismo, dificultando la determinación de la génesis de los depósitos originales. La mayor parte de los yacimientos afectados por el metamorfismo regional están situados entre sedimentos antiguos (Precámbrico y Paleozoico), fuertemente replegados, con mineralizaciones muy irregulares, y un alto contenido metálico.

- Generalmente, los yacimientos metamorfizados no modifican su mineralogía primitiva, son frecuentes las removilizaciones de minerales de baja temperatura (galena, calcopirita) y la modificación de las texturas originales.

LAS PRINCIPALES REACCIONES DEL METAMORFISMO SON:

1. ***Recristalización metamórfica*** de las impurezas de las rocas carbonatadas.

2. ***Reacción metasomática*** entre los minerales de las rocas adyacentes.

3. ***Infiltración metasomática*** causada por líquidos hidrotermales

ZONALIDAD METAMÓRFICA

La zonalidad de las rocas metamórficas consiste en los cambios de textura, estructuras y mineralogía en las rocas a medida que los efectos metamórficos disminuyen. Se puede observar la zonalidad tanto en el metamorfismo de contacto como en el metamorfismo regional, pero las modificaciones estructurales y mineralógicas son más importantes y continuas en éste último.

En el metamorfismo regional, el ***"grado de intensidad del metamorfismo"*** se puede relacionar con la profundidad, aunque no coincide exactamente con ella. La presión es compleja en la que interviene, además de la ***"carga litostática"*** de las capas superiores y la ***"presión hidrostática"*** del agua intersticial, las variaciones locales de acumulaciones de fluidos, que pueden ser importantes. Las principales reacciones del metamorfismo son:

1. Recristalización metamórfica de las impurezas de las rocas carbonatadas.
2. Reacción metasomática entre los minerales de las rocas adyacentes.
3. Infiltración metasomática causada por líquidos hidrotermales.

ZONALIDAD METAMÓRFICA

Los grados de intensidad del metamorfismo con la Tª y la profundidad son denominados por ESKOLA:.

1. **EPIZONA:** Tª < 300ºC, moscovita, clorita, epidota. MET. DE BAJO GRADO.
2. **MESOZONA**: 300-500ºC, biotita, hornblenda y granate. PROF. INTERMEDIAS.
3. **CATAZONA**: 500-800ºC, ortosa, augita y olivino. ALTAS PROF..

MINERALRES REFRACTARIOS

Las temperaturas alcanzadas en el metamorfismo producen nuevos minerales caracterizados por su gran dureza y estabilidad a elevadas temperaturas, se utilizan en la industria como refractarios. Son silicatos alumínicos utilizados para el revestimiento de hornos de calcinación o fusión donde se alcanzan elevadas temperaturas.

- **Asbesto de serpentina**. El asbesto crisotilo $H_4Mg_3Si_2O_9$ y el amianto $CaMg_3Si_4O_{12}$ se encuentran en las serpentinas alteradas.
- •**Grafito**. El carbono se presenta en dos variedades: **Cristalina:** Consistente en capas delgados de un negro casi puro que se utiliza en crisoles especiales y en electricidad.
- **Amorfo:** Variedad impura no cristalina que se emplea en metalurgia a gran escala.
- •**Talco y Esteatita**. El talco es un silicato hidratado de magnesio, producto del metamorfismo, $((SiO_3)_4H_2Mg_3)$ que, al ser molido finamente, forma el conocido polvo de talco. La esteatita es una roca blanda compuesta esencialmente por talco.

YACIMIENTOS METASOMÁTICOS

El ***"metasomatismo"***, es un ***"metamorfismo de contacto"*** en el que las emanaciones gaseosas e hidrotermales a elevada tempertura que escapan durante la consolidación de los magmas intrusivos intercambian sus iones con las rocas adyacentes. Los efectos que producen pueden ser de tres tipos:

1. **Térmicos,** sin adición de nuevos materiales, ***"pirometamorfismo"***.
2. **Térmicos combinados con transferencia de materia**, reemplazando unos iones por otros,con aporte de nuevos minerales y evacuación de los preexistentes. La transferencia de materia suele realizarse en ambos sentidos, desde el intrusivo a las rocas encajantes y viceversa.
3. Cuando el metasomatismo se efectúa sobre rocas calcáreas, con la formación de minerales característicos, se denomina ***"skarn"***. Los minerales propios del skarn son, granates, wollastonita, anfíboles, piroxenos, magnetita, cuarzo etc. El skarn es pues el metasomatismo de las rocas calcáreas.

YACIMIENTOS METASOMÁTICOS

El metasomatismo difiere del metamorfismo regional por la adición de materia procedente del magma, y reacción metasomática con las rocas de contacto, formando nuevos minerales en condiciones de elevada temperatura y presión. La mineralogía resultante es más compleja y variada que en el metamorfismo térmico únicamente.

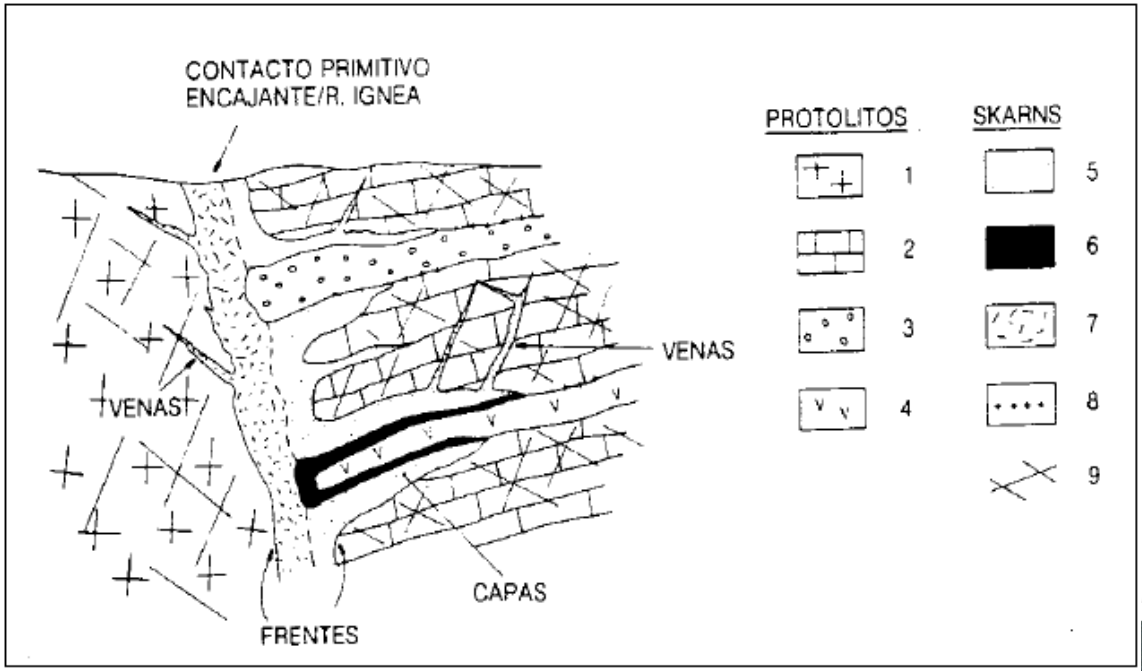
Según Smirnov (1982), los yacimientos de skarn pueden contener toda clase de metales, menos Cr, Sb y Hg. Además de los minerales metálicos, los skarns son fuente de otros muchos minerales industriales como la flogopita, andalucita, magnesita, talco o grafito.

YACIMIENTOS TIPO SKARN

El término **skarn** fue introducido por petrólogos metamórficos suecos para designar rocas metamórficas regionales o de contacto constituidas por silicatos de Ca, Mg y Fe derivados de un protolito de calizas y dolomitas en las cuales se ha introducido metasomáticamente grandes cantidades de Si, Al, Fe y Mg.

GRANATE DE OCNA DE FIER, RUMANÍA

YACIMIENTOS TIPO SKARN



Corte esquemático de un skarn. 1) Roca plutónica. 2) Rocas carbonatadas. 3) Capas detríticas. 4) Intercalaciones volcánicas básicas. 5)Exoskarn sobre mármoles. 6) Exoskarn de tipo periskarn, 7) Endoskarn. 8) Skarn de tipo reaccional o bimetasomático. 9) Red de fracturas. Tomado de C. Casquet en Yacimientos Minerales (Lunar&Oyarzun, 1991).

Muestra de skarn

YACIMIENTOS TIPO SKARN

El término **SKARN** es ampliamente utilizado para referirse a este tipo de depósitos relacionados con **aureolas de contacto de intrusiones dentro de secuencias calcáreas** (calizas, dolomías).

Calizas y Dolomías → Mármoles y/o skarns por el efecto del **metamorfismo de contacto**.

La producción principal de depósitos de tipo skarn incluye: Fe, Cu, W, C (grafito), Zn, Pb, Mo, Sn, U, Au., granate, talco y wollastonita.

Los minerales calcosilicatados diópsido (clinopiroxeno), andradita (granate cálcico) y wollastonita (piroxenoide) son los dominantes en skarn mineralizados e indican, junto con otras evidencias, que el rango de formación de skarn es en general de 400º-600ºC. Aunque los skarn de Zn-Pb se forman a temperaturas más bajas, en términos generales en el proceso de formación de skarn están involucradas altas temperaturas. La presión es variable y estos depósitos se forman de 1 a varios Km de profundidad.

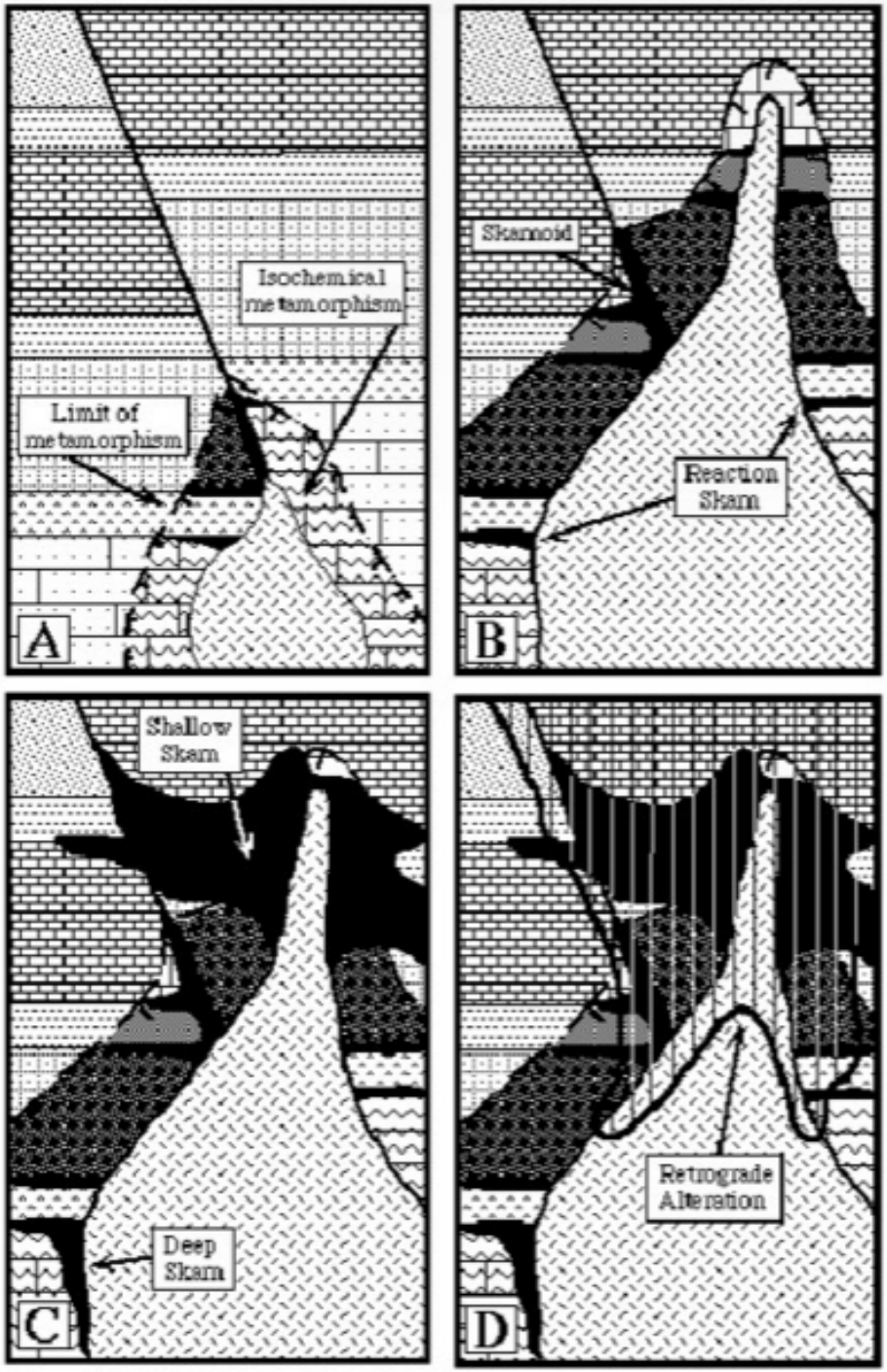
Formación del SKARN

Primera fase: Metamorfismo térmico producido por difusión del calor generado por el batolito con volatilización de los líquidos contenidos en la roca encajante y tendencia a escapar siguiendo zonas de mayor permeabilidad. Esta etapa es estéril desde el punto de vista económico, aunque se puedan formar algunos minerales de interés industrial tales como la wollastonita y la espinela.

Segunda fase: Metamorfismo producido por el agua en estado hipercrítico procedente de las últimas fases magmáticos (600º-750ºC). Este líquido magmático, rico en Si, Al y Fe, contiene cantidades significativas de otros elementos metálicos (Cu, Zn, Sn), que se escapan hacia el encajante formando yacimientos de estos metales, junto con otros anhidros típicos como el granate, piroxenos, wollastonita. En esta etapa se forma el volumen principal del skarn y se desarrolla la zonación metasomática.

Formación del SKARN

Tercera fase: Metamorfismo de baja temperatura (450º-300ºC), en el que los minerales del skarn de alta temperatura son reemplazados por silicatos hidratados (anfíboles y epidota principalmente) y feldespatos o carbonatos. Esta etapa es importante porque durante la misma precipitan los sulfuros (pirrotina, pirita, calcopirita), así como la mayor parte de la magnetita de los skarns ferríferos. La etapa es claramente postmagmática y los líquidos que intervienen en ella pueden tener procedencia freática convectivaEl ***"aposkarn"*** se instala a favor de fracturas tardias o en cavidades preexistentes, más o menos interconectadas



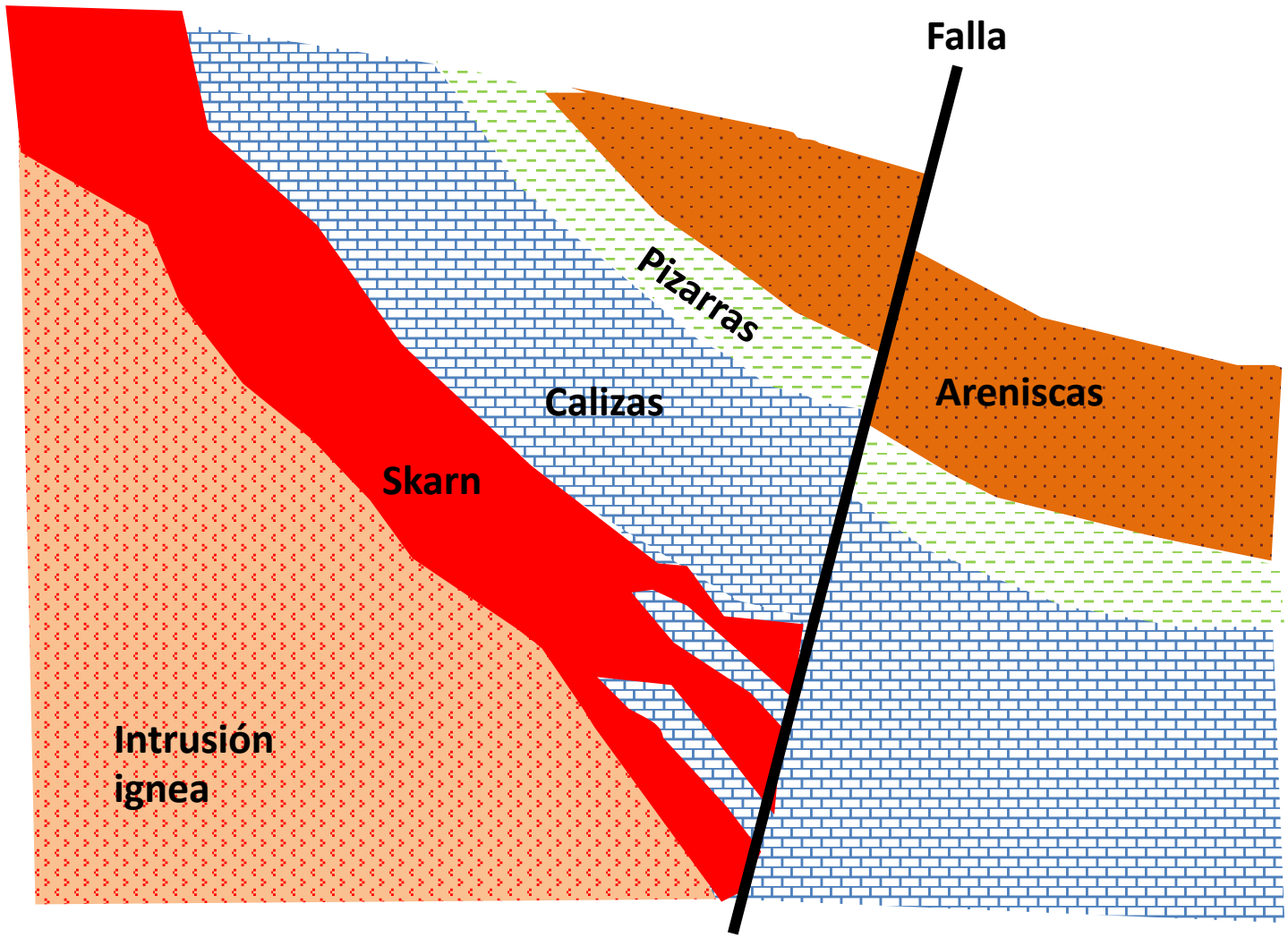
ETAPAS EVOLUTIVAS DE DEPÓSITOS SKARN ASOCIADOS A PLUTONES:

A) La intrusión inicial causa metamorfismo de las rocas sedimentarias.

B) Recristalización metamórfica y cambios de fase

C) Cristalización y liberación de una fase acuosa

D) Enfriamiento del plutón, circulación de aguas meteóricas → alteración retrógrada de minerales calco-silicatados.



Corte de un depósito de skarn

Económicamente hablando, la tipología de los skarns abarca numerosos depósitos ricos en Cu, Pb, Zn, Au, Fe, W y Sn, así como en otros minerales industriales (**wollastonita**, grafito, asbesto, talco, fluorita, etc.).

Gran dureza y estabilidad a elevadas temperaturas.

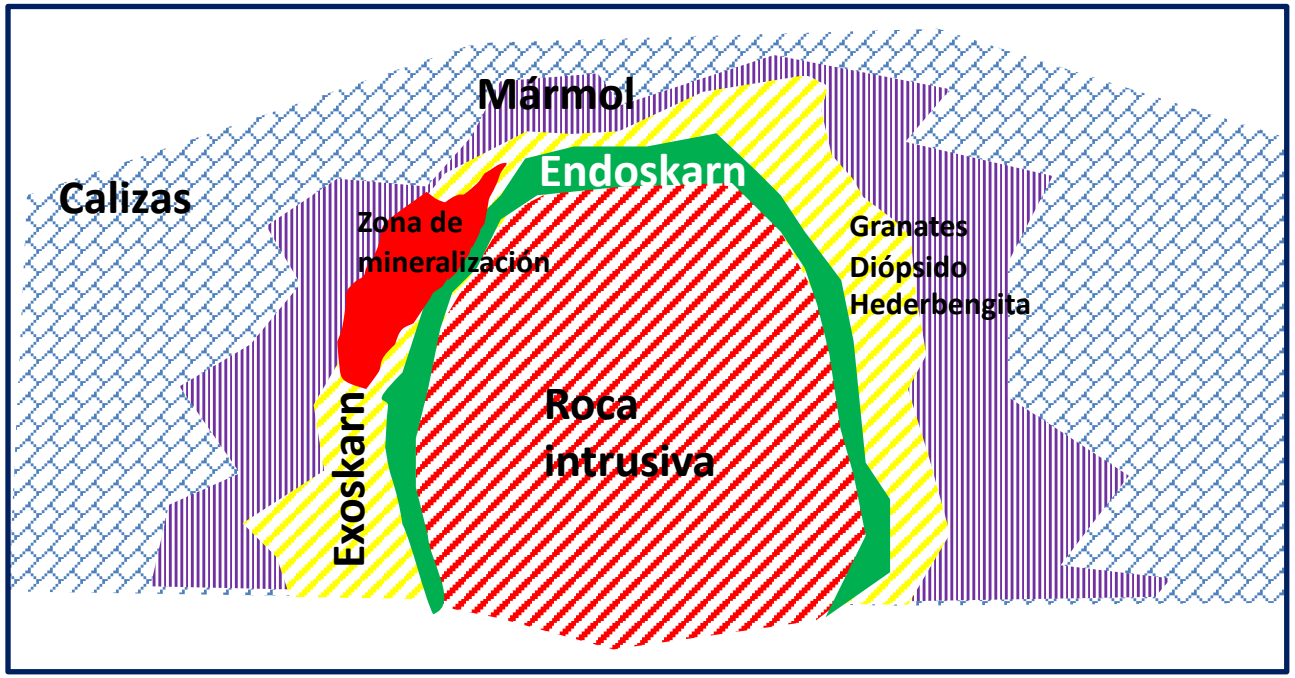
WOLLASTONITA:
Ingrediente necesario en la cerámica refractaria y utilizado como aditivo en pinturas, Se utiliza también en el sector cementero y en la industria del papel.

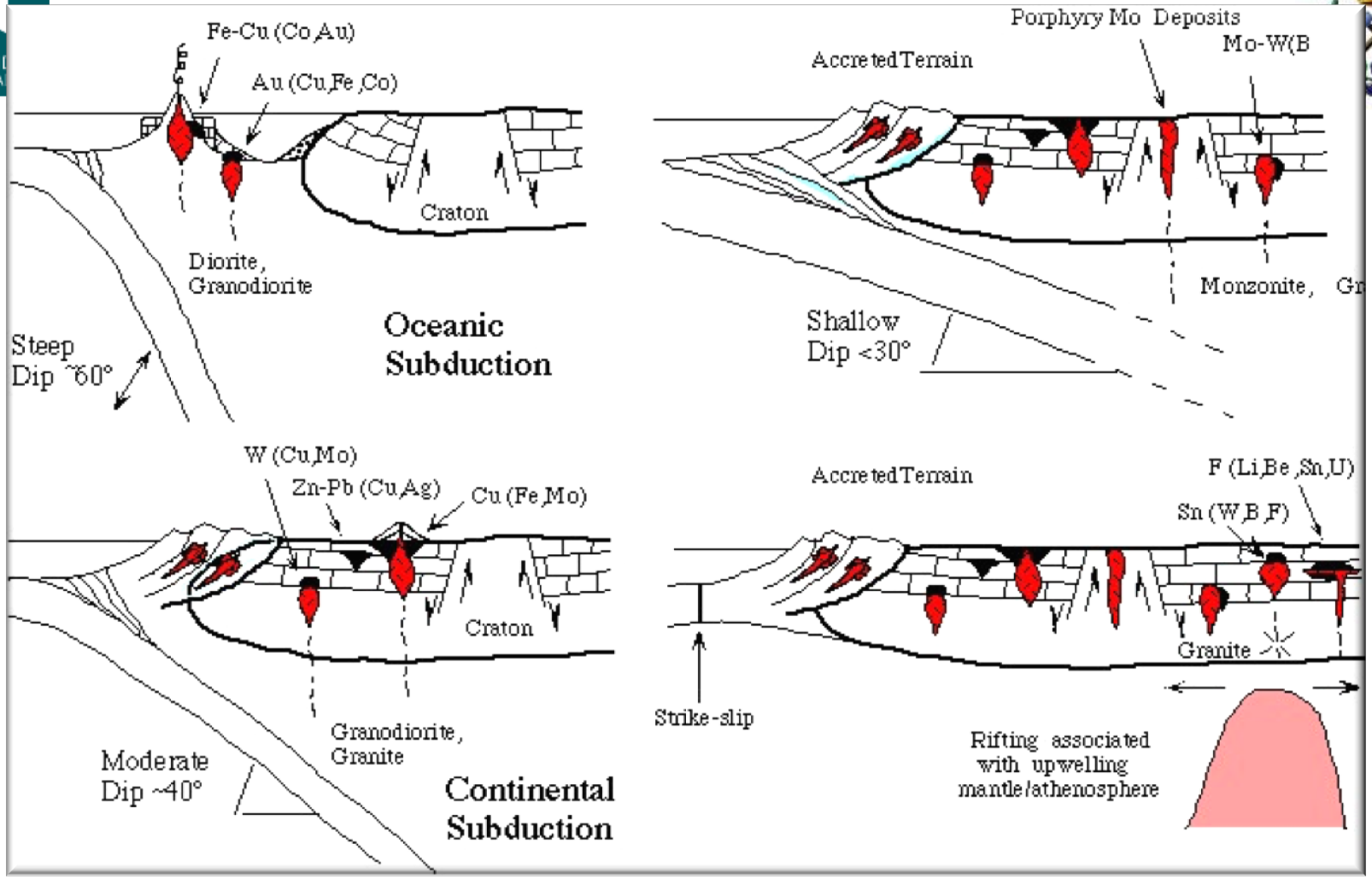
GRAFITO: mina de los lápices.
en ladrillos, lubricante sólido, juntas, rodamientos, fabricación de electrodos, Grafeno, material de alta conductividad eléctrica y térmica.

YACIMIENTOS TIPO SKARN

1.ENDOSKARN: zona interna del contacto del cuerpo intrusivo con calizas.

2. EXOSKARN: zona externa del contacto intrusivo con la roca calcárea.

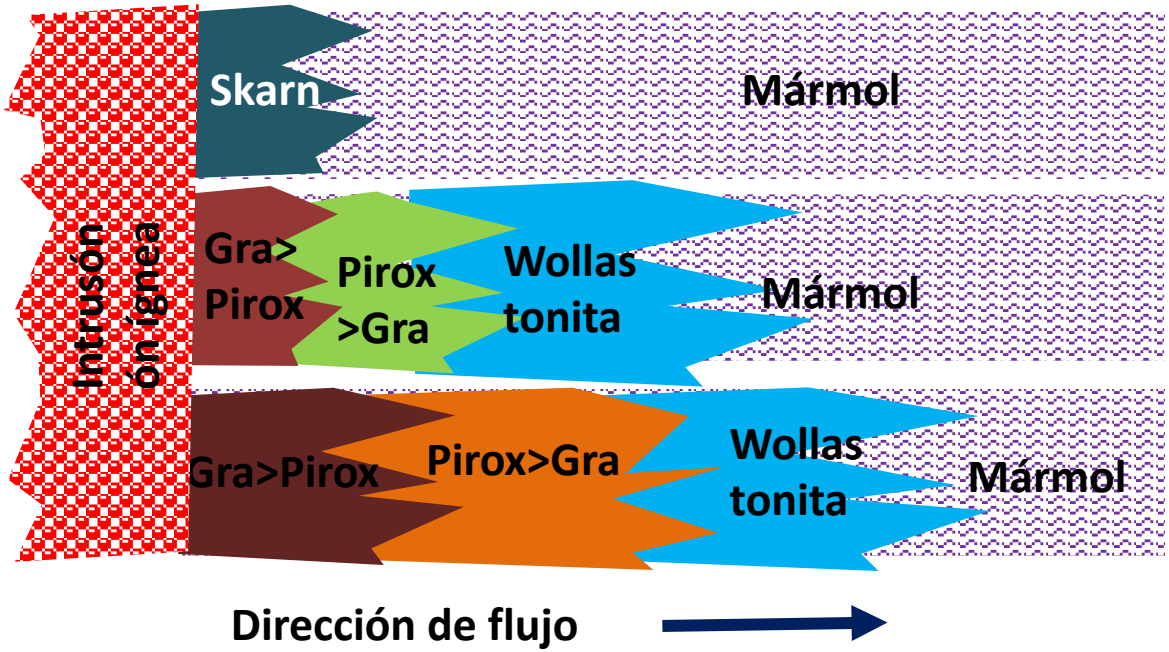




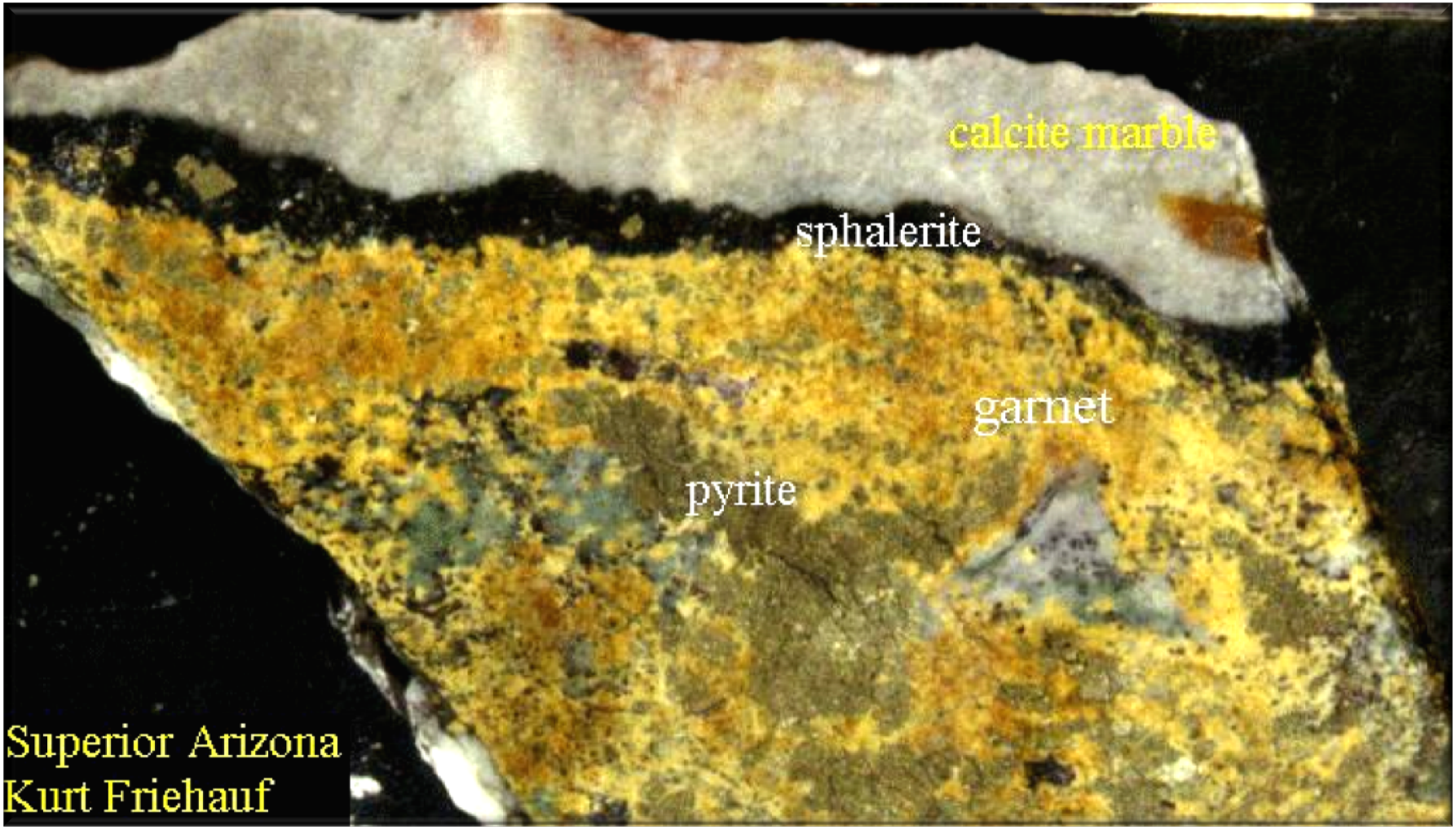
- Los depósitos de tipo skarn ocurren en distintos marcos geotectónicos, dada la presencia de secuencias calcáreas y de intrusiones, pero la mineralización asociada dependerá de la composición de los magmas relacionados a cada ambiente geotectónico particular.

Zonación de los depósitos Skarn

En la mayoría de skarns hay un patrón general de zonación granate proximales, distales piroxeno e idiocrase (o un pyroxenoide como wollastonita, o rodonita) en el contacto entre Skarn y mármol.



Yac. Metamórficos y Metamorfizados



MINERALOGÍA DEL SKARN

MIN. DE WOLFRAMIO (Scheelita y Wolframita)

MIN. DE ESTAÑO (Casiterita)

MIN.DE COBRE (Calcopirita)

MIN. DE Zn-Pb (Esfalerita y Galena)

MIN. DE MOLIBDENO (Molibdenita)

MIN. DE HIERRO (Oligisto)

Molibdenita

Wolframita

Scheelita

ROCAS

MÁRMOLES

CORNUBIANITAS