

Yacimientos Minerales

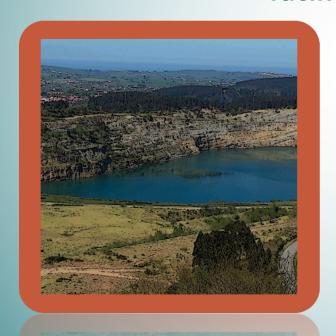


PLOQUE II. GÉNESIS DE YACIMIENTOS MINERALES

Yacimientos de oxidación y enriquecimiento supergénico

Yacimientos residuales

Yacimientos MVT



Gema Fernández Maroto

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

Este material se publica con licencia:

<u>Creative Commons BY-NC-SA 4.0</u>







Yacimientos de Oxidación y Enriquecimiento Supergénico



Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros



YACIMIENTOS DE OXIDACIÓN Y ENRIQUECIMIENTO SUPERGÉNICO

- Entre los procesos externos de concentración de minerales para la formación de yacimientos de interés económico, la oxidación y transformación de minerales primarios en secundarios más ricos (monteras de hierro) son los más conocidos y los que han tenido mayor éxito desde la antigüedad, ya que por su extensión y colorido han llamado la atención de todos los exploradores y sirven, además, para la localización en profundidad, de depósitos primarios, aunque éstos últimos tengan mineralizaciones diferentes.
- Al erosionarse la corteza terrestre, los yacimientos generados en su interior quedan expuestos en la superficie, al contacto con el oxígeno del aire y demás agentes atmosféricos, modificándose las condiciones físico-químicas iniciales, afectando a los minerales metálicos inestables en las nuevas condiciones.
- Los sulfuros (minerales primarios más frecuents) pasan a óxidos, hidróxidos, sulfatos y carbonatos.





YAC. DE OXIDACIÓN Y ENRIQUECIMIENTO SUPERGÉNICO

- Son yacimientos importantes porque se consiguen depósitos de carácter secundario con leyes minerales mucho mayores que las que había en el depósito primario.
- El proceso consigue que depósitos primarios no rentables lo sean.
- En algunos casos son el objetivo de la explotación debido a **su contenido en metales preciosos** (gossans de RioTinto y Tharsis por su contenido en oro).
- Este tipo de depósito se dan en lugares donde haya depósitos de sulfuros Ni-Cu (pórfidos cupríferos), Cu-Fe, Pb-Zn.....que hayan sido **exhumados**.





YAC. DE OXIDACIÓN Y ENRIQUECIMIENTO SUPERGÉNICO

- Estudios basados dataciones K-Ar (Sillitoe y McKee 1996) sitúan la actividad supergénica en períodos entre **0,4 a 6,2 millones de años.**
- El proceso de oxidación y enriquecimiento supergénico:
 - INICIO: exhumación de los depósitos primarios
 - FIN: al formarse una nueva asociación mineralógica estable en las nuevas condiciones.





REACCIONES EN LA ZONA DE OXIDACIÓN-REDUCCIÓN

- Los sulfuros son presa fácil para la meteorización química. El S forma el ión SO4, quizá pasando por los estados intermedios de S libre y SO2, aunque estos no suelen ser detectables en las zonas oxidadas. Los metales pueden formar compuestos insolubles (óxidos, carbonatos, silicatos) o pueden pasar a disolución. Los iones metálicos disueltos pueden descender a la zona de sulfuros no oxidada y precipitar por reacción con los sulfuros
- La oxidación de cualquier depósito de sulfuros conduce a la formación de disoluciones ácidas. El aumento de acidez puede producirse por la simple hidrólisis del ión metálico o por la precipitación de un hidróxido insoluble. El grado de acidez depende de la naturaleza del ión metálico o de la





REACCIONES EN LA ZONA DE OXIDACIÓN-REDUCCIÓN

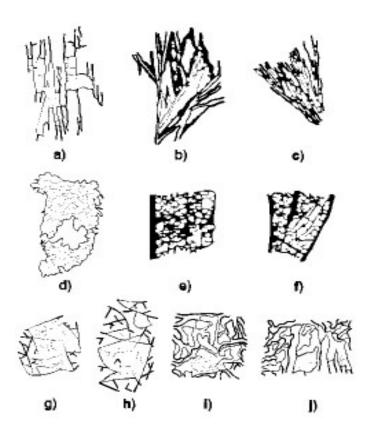
- El grado de acidez depende de la naturaleza del ión metálico o de la insolubilidad del hidróxido. Los minerales que se forman dependen de los aniones que se encuentren presentes y de la solubilidad de los posibles compuestos metálicos. Lo que determina el carácter de los metales no son los aniones que forman sales solubles, sino los que pueden precipitarlos.
- Los cristales de minerales primarios se encuentran enclavados en rocas silíceas, cuando son lixiviados dejan el hueco con un habitus caracterítico del mineral inicial (cúbico, exagonal, etc), a estos huecos se les denomina "boxworks" o "texturas réplica" y, mediante su estudio, pueden determinarse los minerales primarios que, además de la pirita y los minerales silíceos, fueron los constituyentes iniciales de las actuales "monteras de hierro" o "gossans".
- El estudio de estas texturas es fundamental en la prospección de los yacimientos de pórfidos cupríferos, al diferenciar, en las grandes monteras de hierro, el mineral original (calcopirita, blenda, molibdenita, etc).





REACCIONES EN LA ZONA DE OXIDACIÓN-REDUCCIÓN

El estudio de estas texturas es fundamental en la prospección de los yacimientos de pórfidos cupríferos, al diferenciar, en las grandes monteras de hierro, el mineral original (calcopirita, blenda, molibdenita, etc).



a), b) y c): estructuras dejadas por galena. d) y e): estructuras dejadas por la alteración de esfalerita. f) Relictos de alteración de calcopirita. g) y h) boxwork procedentes de bornita. i) y j) estructuras dejadas por tetraedrita.





Condiciones de formación

- La erosión ha de ser más lenta que la alteración química
- Exhumación de la masa de sulfuros
- Sistema de aguas subterráneas no muy activo
- Superficie freática profunda
- Rocas permeables.
- Si la masa de sulfuros **no es expuesta a la atmósfera** (oxidante) no se inician los procesos de formación de los depósitos.
- Si el **nivel freático** no desciende a través de la mineralización diseminada, el proceso se detiene y el enriquecimiento cesa.
- Cuando las rocas **no son permeables**, las aguas meteóricas no son capaces de lixiviar los productos de oxidación y llevarlos a la zona de aguas subterráneas.





Morfología de la mineralización

• Este tipo de yacimientos tiene una morfología típica que es común a todos los tipos de mineralización primaria.

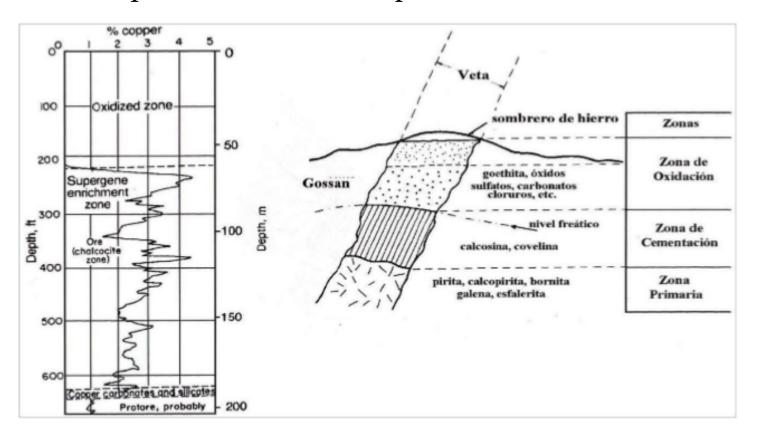
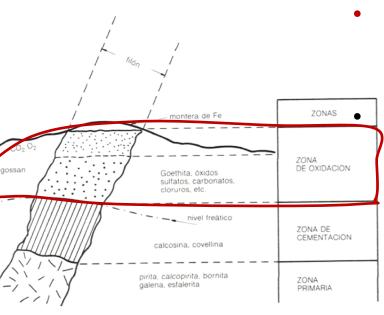


Figura 2: perfil de mineralización de los depósitos de oxidación y enriquecimiento secundario, con diferenciación de las diversas zonas y los minerales de cada una. Además, el gráfico de la izquierda de la figura muestra el porcentaje de Cu (la ley) en función de la profundidad.





Morfología de la mineralización



Zona de enriquecimiento en Au, este prácticamente no se moviliza y la lixiviación de otros minerales origina la concentración de oro en esta zona.

Zona de OXIDACIÓN: parte superior, comprendida entre la superficie y el nivel freático. A techo se encuentra el gossan.

Caracterizada por la presencia de un ambiente oxidado y ácido. Las aguas meteóricas que se filtran por la porosidad de la roca y por sus fracturas producen uan lixiviación de la mayoría de los elementos. El resultado final es una roca lavada con alta presencia en óxidos e hidróxidos.

- Los cambios químicos que se producen son:
 - Eliminación o lavado de ciertos materiales
 - Transformación de minerales a compuestos oxidados



Fragmentos de GOETHITA IRISADA





FORMACIÓN DE "GOSSANS"

Se denominan "gossans" o "monteras de hierro" a la corteza de óxidos e hidróxidos que se produce por la oxidación superficial de los yacimientos de sulfuros metálicos, especialmente pirita.

La oxidación superficial de un yacimiento se origina por la exposición subaérea prolongada del mismo, y alcanza desde su superficie hasta el nivel piezométrico de la época en que la erosión alcanzó el nivel más bajo (se pueden encontrar yacimientos oxidados por debajo del nivel del mar actual).

Las reacciones, tienen lugar a temperaturas y presiones ordinarias y son accesibles a la observación directa. La zona de meteorización de los yacimientos de minerales metálicos ha sido objeto de intensa investigación debido a que estos procesos tienen gran importancia económica al concentrar metales a partir de depósitos de baja ley.





FORMACIÓN DE "GOSSANS"

En principio se explotaron como minerales de Fe (zona de oxidación) para, posteriormente, llegar a la zona de reducción y aprovechar los minerales de cobre secundario existentes en la misma.

La agresividad de la acción destructiva del agua depende de su quimismo.

Las aguas más agresivas son las ácidas, sulfáticas, pero pueden quedar neutralizadas si las rocas encajantes provocan reacciones químicas básicas, inhibiendo la evacuación de los metales de la zona de oxidación.

La composición mineral es muy importante para su grado de alteración, distintos minerales y sus asociaciones tienen estabilidades diferentes en la zona de oxidación.

Es importante también la estructura de los cuerpos mineralizados.

Todo este conjunto de factores contribuye al desarrollo de las monteras de hierro.



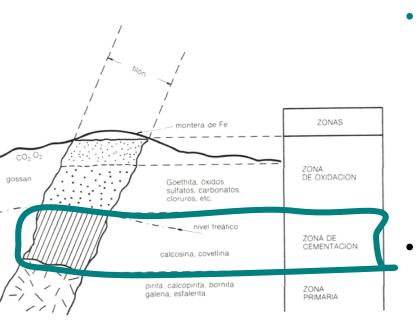








Morfología de la mineralización



- Zona de CEMENTACIÓN o ENRIQUECIMIENTO SUPERGÉNICO: Zona situada por debajo del nivel freático. La acidez de los lixiviados que provienen de la zona superior se neutraliza y el ambiente se vuelve reductor (escasez de oxígeno).
- Los metales disueltos precipitan dando lugar a nuevos minerales que enriquecen el yacimiento ya que se origina una zona de mayor ley.
- Si se trata de un yacimiento de sulfuros de Cu-Fe, en esta zona lo que se forma es calcosina y covellina.



Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros

X

PRECIPITACIÓN EN LA ZONA REDUCTORA

En la **Zona de reducción**, o de **"enriquecimiento secundario"**, la mena enriquecida está formada por sulfuros de una generación más joven que la de los sulfuros primarios a los que ha sustituido.

Estos sulfuros secundarios se forman a partir de disoluciones descendentes que contienen iones metálicos derivados de compuestos solubles de la zona de oxidación.

Los iones, al penetrar por las grietas en la zona no aireada, reaccionan con los minerales presentes, y sustituyen a los sulfuros de la zona no oxidada.

El Cu, entre todos los metales, es el que muestra más frecuentemente enriquecimiento supergénico.

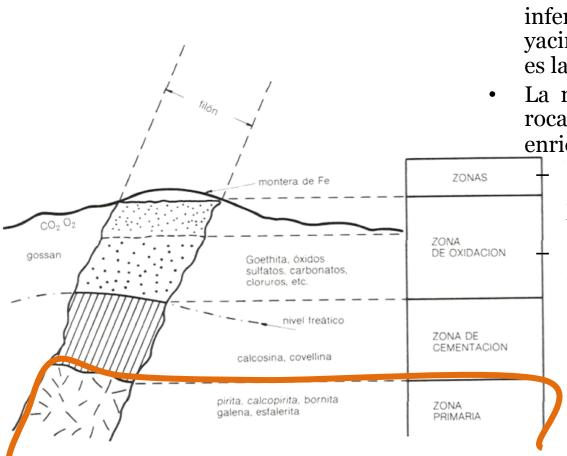
La Covellina (SCu) y la calcosina (SCu2), se concentran en la parte superior de muchos depósitos primarios de Cu, incrementando la ley del mineral, produciendo un nuevo yacimiento, secundario, más rentable.

La Bornita Cu5FeS4 y la calcopirita S2CuFe son de origen supergénico mas dudoso. El Cu se oxida cerca de la superficie y pasa a las disoluciones, ya que los compuestos oxidados no son insolubles en medio ligeramente ácido. El Cu++ disuelto establece contacto con sulfuros primarios por debajo de la zona de oxidación.





Morfología de la mineralización



Zona PRIMARIA: es la parte inferior del perfil, en la que el yacimiento no se ha alterado, la roca es la del depósito inicial.

La mineralización que contenga la roca determinará el tipo de enriquecimiento que se formará:

Si son sulfuros ricos en Cu en la zona de enriquecimiento se formará calcosina

Si son de Pb, se formará cerusita.....





Movilidad de los iones

- **Hierro**: elemento poco móvil, zonas próximas a la superficie.
- **Cobre**: el Cu²⁺ es transportado en solución desde la ZO hasta la ZC donde su afinidad mayor por el S hace que se formen nuevos sulfuros(calcosina, covellina)
- **Plomo**: poco móvil, no desciende a la ZC. Concentrado en la ZO (cerusita, anglesita)
- **Zinc**: muy móvil, desciende a la ZC. En áreas con rocas carbonatadas sustituye al Ca y forma carbonatos de zinc próximos a yacimientos oxidado.





Mineralogía

Yacimientos de Cu-Fe:

- ZO: rica en óxidos e hidróxidos de hierro (goethita y hematites)
- ZC: sulfuros secundarios de cobre (calcosina, covellina, bornita)
- ZP: sulfuros de Cu-Fe (**pirita**, **calcopirita**)

Yacimientos de Ni-Cu:

- ZO: rica en óxidos e hidróxidos de hierro (goethita y hematites).
 El Ni y Cu han sido lixiviados y transportados a zonas inferiores, por lo que está empobrecida en estos elementos.
- ZC: rica en pirita, marcasita, violarita (FeNi2S2) y calcopirita.(Precipitación de metales disueltos en la parte superior de perfil.
- ZP: mineralización original del yacimiento: pirita, pirrotina, petlandita y calcopirita.





Mineralogía

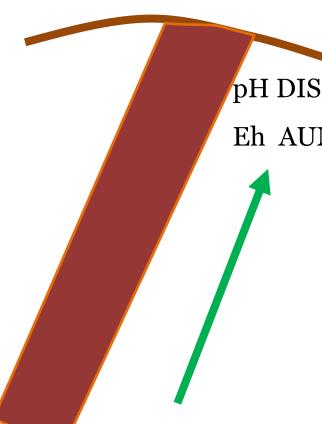
Yacimientos de Pb-Zn:

- En este tipo de yacimientos no se da una clara diferenciación de las zonas como en el caso de los anteriores. En este caso, la zona de oxidación pasa gradualmente a la zona de mineralización primaria.
- Hay zonas enriquecidas en plomo, con minerales como cerusita y anglesita.
- Si hay presencia de Mn en la roca primaria se pueden formar especies minerales con Mn y Pb y Zn como Coronadita (PB(Mn y calcofanita
- El Zn lixiviado en las zonas superiores puede concentrarse cerca del yacimiento en zonas carbonatadas.





GEOQUÍMICA



Ámbiente ácido y oxidante

pH DISMINUYE

Eh AUMENTA

La pirita produce fluido ácido lixiviante.

PIRITA+ METEORIZACIÓN→ SULFATO DE Fe y ÁCIDO SULFÚRICO, que se disuelven en las aguas que han penetrado desde la superficie dando lugar a iones (SO4-2, H+, Fe3+, Fe2+) que producen la lixiviación y disolución de los metales y su transporte a zonas inferiores del perfil.





INTERÉS DE LOS YACIMIENTOS SUPERGÉNICOS

- Minerales secundarios de fácil extracción
- Yacimientos diseminados de baja ley son explotados por el aumento de ley debido al enriquecimiento secundario
- Zona de oxidación: Au





YACIMIENTOS RESIDUALES





YACIMIENTOS RESIDUALES

· Los yacimientos secundarios son una acumulación de minerales autóctonos, formados in situ poralteración de los existentes, o acumulación de minerales estables por lixiviación y transporte de laganga, quedando un depósito enriquecido. Cuando los minerales estériles que acompañan a lamena son solubles, pueden ser disueltos y llevados por el agua en disolución, quedando "in situ", ocon ligero transporte, los minerales estables, o los compuestos originados, estables a condicionesambientales. Estos "residuos" inalterables pueden constituir acumulaciones de minerales rentablesy se les denomina Yacimientos residuales





YACIMIENTOS RESIDUALES

- La Meteorización química es la causante de este tipo de yacimientos.
- Los principales procesos son:
 - HIDRATACIÓN: Es el proceso por el cual el agua se combina químicamente con un compuesto. Cuando las moléculas de agua se introducen a través de las redes cristalinas de las rocas se produce una presión que causa un aumento de volumen, que en algunos casos puede llegar al 50%.
 - HIDRÓLISIS: La oxidación se produce por la acción del oxígeno, generalmente cuando es liberado en el agua. En la oxidación existe una reducción simultánea, ya que la sustancia oxidante se reduce al adueñarse de los electrones que pierde la que se oxida.





YACIMIENTOS RESIDUALES

- OXIDACIÓN: La oxidación se produce por la acción del oxígeno, generalmente cuando es liberado en el agua. En la oxidación existe una reducción simultánea, ya que la sustancia oxidante se reduce al adueñarse de los electrones que pierde la que se oxida.
- DISOLUCIÓN: Consiste en la incorporación de las moléculas de un cuerpo sólido a un disolvente como es el agua.
- Esta meteorización química sobre las diferentes clases de rocas, supone la oxidación de Fe²⁺ a Fe³⁺ y la remoción de Na, Ca y Mg en solución.



Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros



GÉNESIS Y ESTABILIDAD DE LOS MINERALES

Cuando los minerales se forman bajo las condiciones físico-químicas existentes en el interior de plutón, se alteran con facilidad al pasar a las condiciones atmosféricas de baja temperatura y presión, con un alto potencial de O.

- Los minerales que primero se alteran son los que primero se forman en el interior de la cámara magmática (presión y temperatura altas, falta de oxígeno, etc.), silicatos ferromagnesiano y plagioclasas, siendo los más estables los feldespatos, micas y cuarzo.
- En las rocas metamórficas la relación no está tan clara como en las ígneas, los procesos de metamorfismo modifican la estabilidad de algunos minerales, transformándolos en otros más o menos estables.
- En general, los minerales típicos del metamorfismo, como los granates, wollastonita etc., son extraordinariamente estables.





BAUXITAS Y LATERITAS

- La meteorización de rocas básicas produce una capa o costra rojiza compuesta por arcillas, alúmina hidratada muy rica en Fe y otros productos de alteración que se denominan "Lateritas" o "Bauxitas" según su contenido en Al₂O₃.
- Lateritas son productos de lixiviación subaérea de ciertas rocas. Consiste en minerales oxidados como la goethita, hematites, hidróxidos de aluminio, caolinita y cuarzo. La relación SiO₂/(Al₂O₃+Fe₂O₃) puede ser más baja que en una roca caolinizada.
- La Bauxita es un miembro de la familia de las rocas lateríticas, caracterizado por un particular enriquecimiento en aluminio libre e hidróxidos como la gibbsita, bohemita y diásporo.





Proceso laterítico

En un tipo medio de un proceso laterítico, se pueden distinguir los siguientes

horizontes.

- *Horizonte residual*: Forma el horizonte superior y está compuesto por productos de lixiviación superficial, mecánica y química, mezclados con residuos de plantas y materia húmica. Su color se relaciona con la roca madre, pero puede ser más oscuro o más claro según la cantidad de materia húmica u óxidos de hierro que contiene y la intensidad de los efectos de la lixiviación por aguas de lluvia. Puede existir cuarzo en este horizonte, pero siempre en estado libre.
- *Corteza salina*: Generalmente es una zona dura de acumulación y recristalización de sales de hierro de nueva formación. En la mayor parte de los perfiles tiene un fuerte color rojo ladrillo que pasa a rojo marrón y a azul oscuro.
- *Horizonte de bauxita*: Representa la parte inferior de horizonte laterítico y se diferencia del horizonte salino superior por su menor contenido en minerales de hierro y menor dureza.





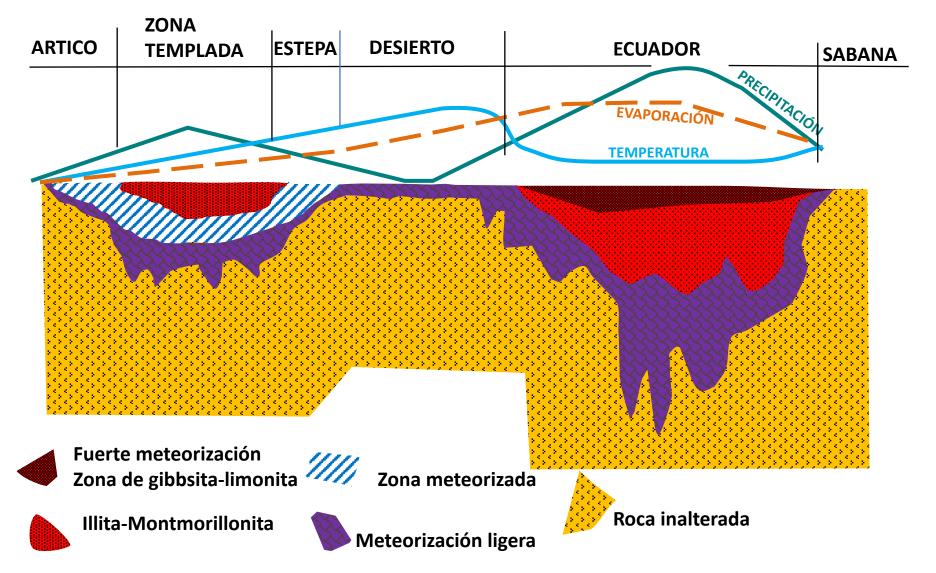
Proceso laterítico

- *Horizonte descompuesto:* Compuesto por silicatos alumínicos producto de la lixiviación de la roca madre, principalmente caolinita y minerales como el cuarzo, rutilo, circón, etc. altamente resistentes a los procesos de lixiviación atmosférica. El horizonte puede tener dos zonas la superior, sin texturas de relictos, y la inferior, con estructuras y texturas con relictos de la roca madre.
- Roca madre: Se denomina "roca madre" a la parte inferior de la zona alterada, roca que, porlos procesos de alteración superficial, se convierte en laterita. La composición de la roca madre no puede determinarse superficialmente debido a la gran alteración superficial, que puede llegar a alcanzar hasta los 100 m. Las principales rocas madre son el basalto (roca volcánica), la dolerita (hipoabisal), rocas sedimentarias (arcillas y arenas con caolín, pizarras) y el granito como roca plutónica.



Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros





La meteorización química es más importante en las zonas tropicales que en los polos.



Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros





El producto final no es hidróxido puro, sino una mezcla de hidróxidos de aluminio, SiO₂; Fe2O₃,_{TiO2}, aluminosilicatos(arcillas) y otras impurezas que recibe el nombre de **BAUXITA**: $>50\%\text{Al}_2\text{O}_3$, $<15\%\text{SiO}_2$, 2- $30\% \text{Fe}_2 \text{O}_3$, $<6\%_{\text{TiO}_2}$





YACIMIENTOS RESIDUALES de BAUXITA

• Los hidróxidos de aluminio que forman las Bauxitas son: Gibbsita, Boehmita y Diásporo.



Gibbsita de la mina Xianghualing (China)Al(OH)₃



Cristales de boehmita en <u>natrolita</u> Origen: <u>Porsgrunn</u> (<u>Noruega</u>)









YACIMIENTOS RESIDUALES de BAUXITA

CONDICIONES PARA LA FORMACIÓN DE BAUXITAS:

- Clima tropical
- Roca madre adecuada, con elevada porosidad
- Cobertera vegetal que favorezca la actividad bacteriana
- Relieve suave: circulación lenta del agua y retirada del residuo
- Drenaje que permita la eliminación de SiO2 y otras sustancias disueltas
- Prolongado período de meteorización
- Sellado posterior que evite la erosión de los yacimientos ya formados
- Estabilidad tectónica





MINERALOGÍA DE BAUXITAS Y LATERITAS

$$Al_2O_3 > 50\%$$

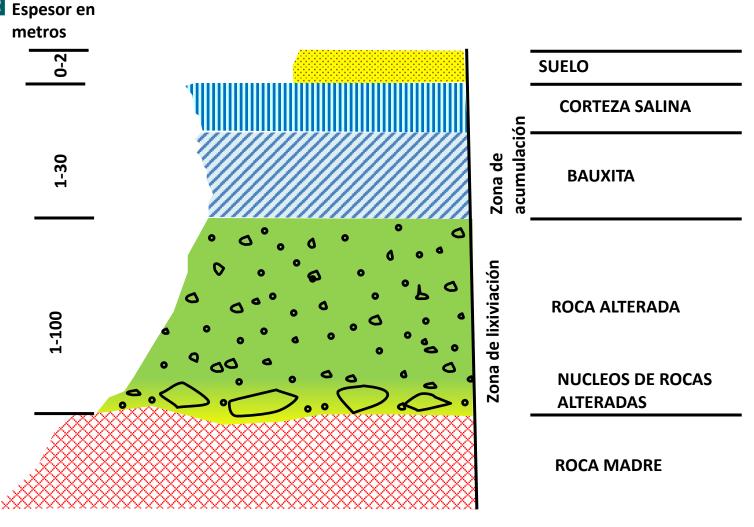
 $SiO_2 < 15\%$
 $Fe_2O_3 < 30\%$
 $TiO_2 < 6\%$

- La bauxita se compone de diminutos cristales de uno o más hidróxidos de aluminio, formando un conjunto amorfo en el que se incluyen impurezas como caolinita, cuarzo, leucoxenos y goethita. El metamorfismo de la bauxita produce corindón.
- Los minerales de la bauxita son:
 - **Gibbsita** Al(OH)3, es uno de los principales componentes.
 - **Diásporo** AlO OH, su metamorfismo es lo que produce el corindón.
 - Bohemita Al2O3 + H2O.
 - Alumogel Al2O3 + agua. Es el gel del hidróxido de aluminio.

UC UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros





Perfil de una zona laterítica





BAUXITAS EN EL TIEMPO GEOLÓGICO

En la historia geológica de la Tierra existieron períodos en los que las condiciones climáticas fueron propicias para la formación de yacimientos de bauxita. Los principales depósitos son recientes, pero existen algunos antiguos, de escasa importancia.

Por épocas se pueden distinguir:

- Cuaternario: Colombia, Costa Rica, Panamá, Islas de Hawai y Salomón.
- **Terciario:** Venezuela, Brasil, Guinea, Ghana, Costa Oro, Australia del Oeste, Jamaica, República Dominicana, Haití, Victoria (Australia), Oregón y Washington (USA), Irlanda del Norte, Surinam, Guayana, Queensland, Tasmania y Norte de Australia, Italia, Yugoeslavia, India, USA (Arkansas, Alabama, Georgia, Mississippi)
- **Mesozoico:** Turquia, Francia, Hungría, Rumania, Grecia, Yugoeslavia, Arabia Saudí, todos cársticos.
- Paleozoico: Turquia, USA, China, URSS, España (cársticos o sedimentarios





BAUXITAS KÁRSTICAS

Las "bauxitas cársticas" del tipo de "terra rossa" rellenan cavidades entre las rocas carbonatadas karstificadas.

- Su formación se relaciona con los campos de caliza que han experimentado una influencia combinada de elevación y erosión profunda, acumulándose los residuos arcillosos y ferruginosos insolubles en las deposiciones cársticas locales, transformándose luego en bauxita.
- La superficie superior de estos criaderos es más o menos plana, siendo extremadamente irregular la inferior, debido a que se adapta a las depresiones de un lapiaz cárstico.
- La estructura interna de los criaderos es compleja, determinada por la alternancia de masas de arcilla y bauxitas irregulares, siendo muy variable la calidad del mineral en sentido horizontal y vertical.
- Los depósitos cársticos de bauxita son de menor tamaño que los lateríticos de peneplanización.



Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros



Las bauxitas son consideradas "indicadores climáticos".

Cinturón bauxítico del Mediterráneo

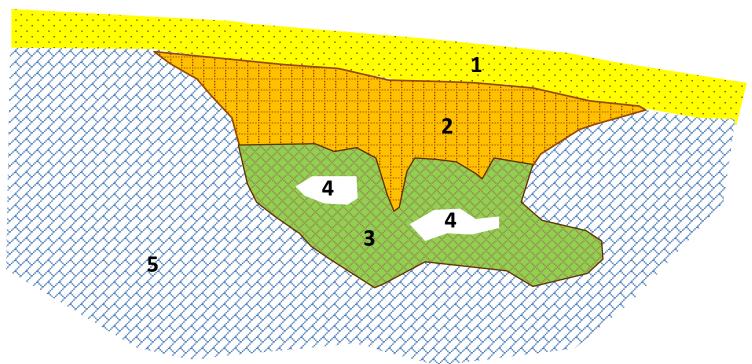






BAUXITAS KÁRSTICAS

Parte superior plana, extremadamente irregular la inferior.



1. Arenas y conglomerados

2, Bauxitas blancas refractarias

- 3, Bauxitas rojas
- 4, Lentejones de arcilla
- 5, Calizas dolomitizadas





Bauxitas en España



- Escasas
- Sur Pirineos
- Cordilleras Béticas
- Murcia: calizas del Jurásico Inf.





YACIMIENTOS RESIDUALES DE NIQUEL

Existen dos tipos de yacimientos explotables de niquel, los yacimientos asociados a rocas ígneas y los residuales o yacimientos lateríticos.

El porcentaje de concentración del níquel en las rocas ígneas es de 80 ppm. y solamente se encuentra en las rocas básicas y ultrabásicas.

El níquel puede presentarse como sulfuro (pentlandita y millerita), o sustituyendo al Fe y Mg en los silicatos, especialmente olivino, o óxidos (magnetita).

En los depósitos residuales, el níquel procede de la lixiviación del olivino.

La mineralogía de los yacimientos residuales de níquel se compone de hidróxidos de hierro niquelífero, goethita, smectita (arcilla rica en NiCrNa), talco, cromita, minerales amorfos de hierro, etc. La ganga, además de los óxidos de aluminio y hierro, la componen arcillas, cuarzo y demás productos procedentes de la descomposición de la serpentina.

Los principales yacimientos de níquel residual se desarrollan a partir de la roca del muro, generalmente peridotita, que es la roca base, aunque entre ella y la laterita puede encontrarse una capa de caolín de espesor variable, procedente de la alteración de la peridotita serpentinizada.



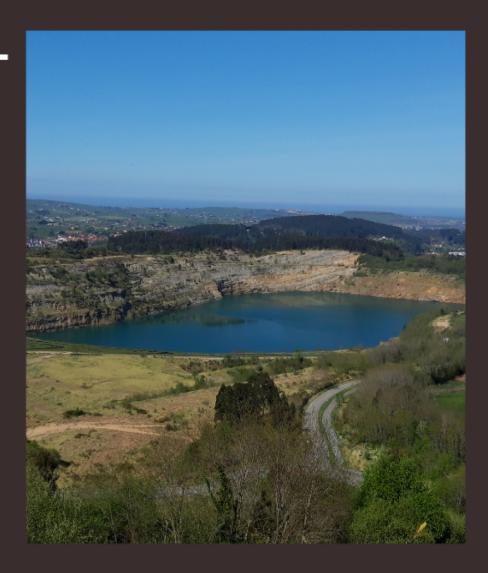


OTROS YACIMIENTOS RESIDUALES

- Existen numerosos yacimientos residuales que se explotan para arcillas u otros elementos no metálicos.
- Uno de los principales es el caolín, que se utiliza desde antiguo en la fabricación de utensilios para el hombre o en la pasta de papel. El caolín es un hidroaluminosilicato formado por la destrucción de los silicatos de aluminio, principalmente de los feldespatos.
- Para ello se necesitan rocas con feldespatos hidrotermales y una meteorización posterior en condiciones tropicales o subtropicales. La caolinización es similar a la bauxitización.
- Los mayores depósitos del mundo de caolin se encuentran en USA, Reino Unido, Guayana y Brasil. Aunque existen yacimientos antiguos (Paleozoico), los depósitos de caolín mas importantes del mundo son recientes, Terciario.

Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros

YACIMIENTOS TIPO MISSISSIPI VALLEY



Gema Fernández Maroto





YACIMIENTOS FORMADOS DURANTE LA SEDIMENTACIÓN DE UN GEOSINCLINAL

Existen una serie de yacimientos con características que difieren de los modelos anteriores pero tienen una característica en común, que pueden relacionarse, de forma genérica, como yacimientos formados durante la sedimentación de una cuenca geosinclinal.

El abanico de este tipo de yacimientos es muy variado, muchos de ellos se encuentran **asociados a rocas carbonatadas** (modelo Mississippi Valley), pero pueden situarse entre **rocas detríticas** (areniscas, pizarras), o **rocas volcánicas distales** (tobas y cineritas).

Al modelo de yacimientos asociados a rocas carbonatadas se le añaden numerosos yacimientos de características muy dispares, con el denominador común de estar formados en un geosinclinal-





YACIMIENTOS FORMADOS DURANTE LA SEDIMENTACIÓN DE UN GEOSINCLINAL

La mineralización se asocia al movimiento de los fluidos durante la sedimentación y diagénesis o a fluidos producidos por procesos de convección, esto les da un carácter epigenético incompatible con un yacimiento sedimentario, por ello, suelen denominarse estratoligados, debido a que la mineralización se encuentra en una capa sedimentaria, adaptada a la estratificación, posterior a la deposición de los sedimentos.

Geosinclinal es una cuenca de sedimentación de forma alargada.

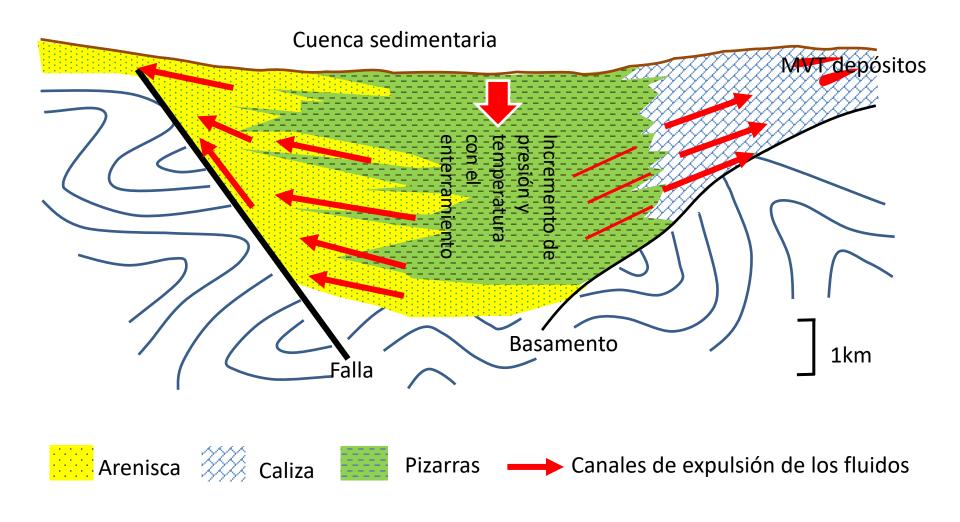
Se forma generalmente al borde de un continente, mediante el relleno progresivo de materiales procedentes de la erosión de tierras próximas.

Durante el proceso de un geosinclinal se manifiesta un fenómeno en el cual la acumulación progresiva de sedimentos no disminuye la profundidad de la cuenca, sino que se produce un paulatino hundimiento denominado **subsidencia**, y que no tiene relación con el peso de los sedimentos.





Migración de agua en una cuenca sedimentaria

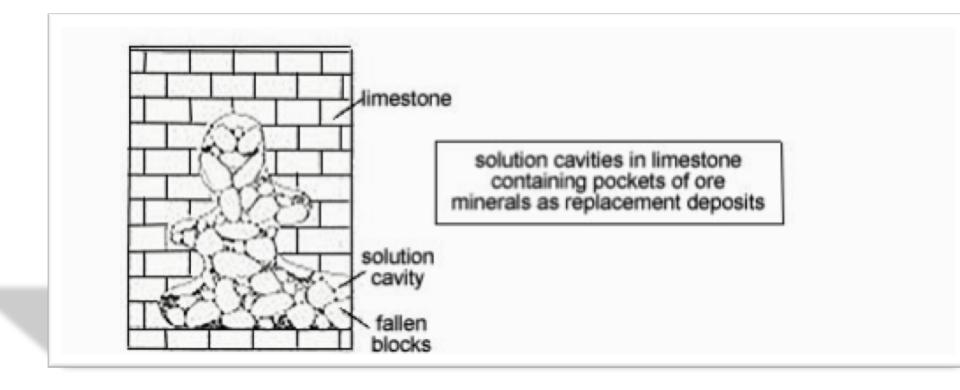




Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros



YACIMIENTOS FORMADOS DURANTE LA SEDIMENTACIÓN DE UN GEOSINCLINAL







YACIMIENTOS FORMADOS DURANTE LA SEDIMENTACIÓN DE UN GEOSINCLINAL

Atendiendo al control de la mineralización y su relación con las rocas encajantes:

- •Mississipy Valley: Son los más conocidos de todos los yacimientos formados en el sinclinal, sin embargo, dentro de este grupo, se han introducido numerosos depósitos con características diferentes, muchos de ellos difíciles de clasificar dentro de un modelo homogéneo.
- •Yacimiento sedimentarios-estratiformes: Semejantes a los yacimientos volcanogénicos, situados en rocas sedimentarias clásticas, sin relación con rocas volcánicas.





YACIMIENTOS FORMADOS DURANTE LA SEDIMENTACIÓN DE UN GEOSINCLINAL

- Epigenéticos, estratoconfinados encajados en rocas carbonatadas.
- Importantes recursos de Pb-Zn, Ag, barita, yeso y fluorita.
 - CANADÁ: Pine Point, Polaris y Nanisivik
 - ESTADOS UNIDOS: Upper Missippi Valley, Missouri
 - AUSTRALIA: Lennard Sheif y Coxco.
 - EUROPA: Silesia, Alpes, Reocín y Cévenes.





MODELO MISSISSIPY VALLEY (MVT):

- •La mineralización se asocia frecuentemente con elevaciones del basamento, situándose dentro de **estructuras arrecifales** o alrededor de estas elevaciones.
- Mineralización formada a profundidades relativamente bajas (1-1.5km).
- •Inclusiones fluidas indican que las soluciones mineralizadoras fueron de baja **temperatura**: **50-200**°C.
- •Estudios de isótopos de S señalan que la fuente de este fueron aguas de mar. Los datos isotópicos de las inclusiones fluidas indican su semejanza con la de los fluidos en cuencas sedimentarias.
- •Los minerales principales son: galena, blenda, pirita, marcasita, calcopirita, dolomita, calcita, fluorita, barita y cuarzo.
- •Con subproductos: Ag, Cd, Ge, Barita y Fluorita
- •Existencia de brechas y estructuras de colapso y kársticas.





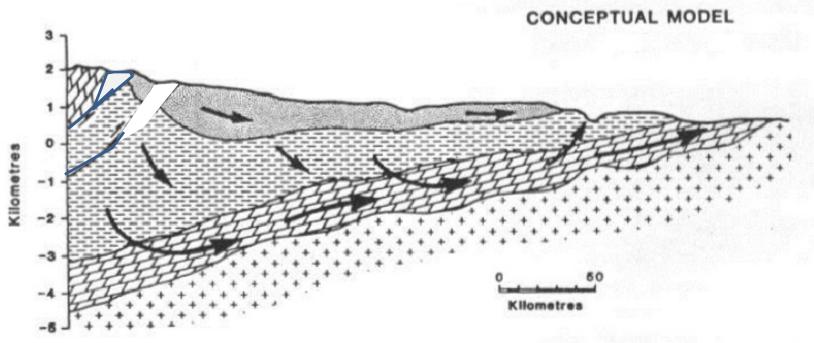


Figure 7 Conceptual model of fluid in a carbonate unit which could be the locus of a stratabound orebody, as given by Garven and Freeze (1982, 1984a). Precambrian basement (+ pattern) is overlain by a carbonate unit which localized fluid flow from overlying shale units; compactional fluid flow through carbonate unit is enhanced by topographic cross-formational flow (Toth, 1980) from elevated thrust-faulted landmass to the left. Garven's and Freeze's (1982, 1984a,b) approach to quantify this conceptual model is to use finite element computer programs to solve the coupled equations of fluid flow, heat transport and mass transport for a series of two-dimensional cross-sections (normal to the figure) representative of sedimentary basins. Metals, leached from a source unit or units in the shales, spread throughout the basin as a function of time and flow parameters, and concentrate at the discharge end.



Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros



No están asociados a rocas ígneas.

Encajados en formaciones calcáreas o dolomíticas (plataformas carbonatadas).

Se encuentran en áreas suavemente deformadas.

Características comunes de los yacimientos MVT

La mineralización se encuentra estratoconfinada en filones y reemplazamientos.

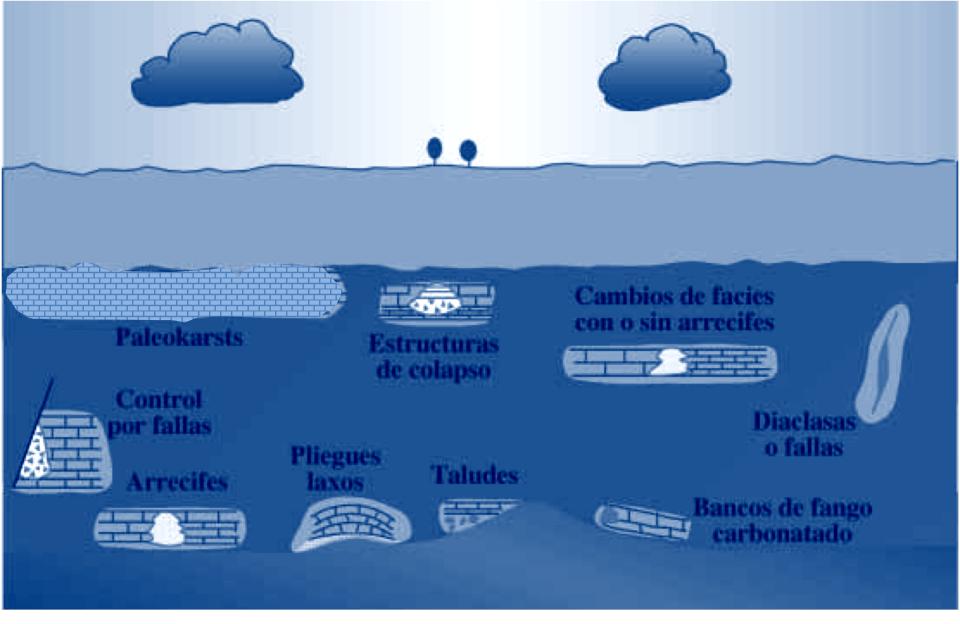
La mineralización se asocia frecuentemente con elevaciones del basamento situándose dentro de estructuras arrecifales o alrededor de estas elevaciones.

Mineralización formada a profundidades relativamente bajas (1-1,5km). Inclusiones fluidas→soluciones de baja temperatura (50-200°C)con una salinidad del 10-30%NaCl.

Minerales principales de mena: galena, blenda, pirita, marcasita, calcopirita, dolomita, calcita, fluorita, barita y cuarzo.

Datos isótopos de S: fluidos en cuencas sedimentarias, sin relación magmática.

Existencia de brechas y estructuras de colapso y cársticas.



Ambientes geológicos en los que se encuentran los depósitos de metales base en rocas carbonatadas (Callahan, 1967)



Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros



MISSISSIPI VALLEY

- Cuencas sedimentarias, en todas las épocas geológicas.
- Todos los depósitos situados en un mismo distrito (aunque éste tenga cientos de Km2 de superficie) tienen similitud, con pequeñas particularidades.
- Las mineralizaciones son relativamente pobres en metales preciosos, pero con un alto contenido en diferentes elementos traza (Cu, Ge, Ga, Co, Ni, Hg etc.),.
- Grosera cristalinidad de la blenda, galena y fluorita, especialmente en las abundantes cavidades.





EDAD MINERALIZACIÓN

Mineralización coetánea con el levantamiento tectónico de cadenas orogénicas distales

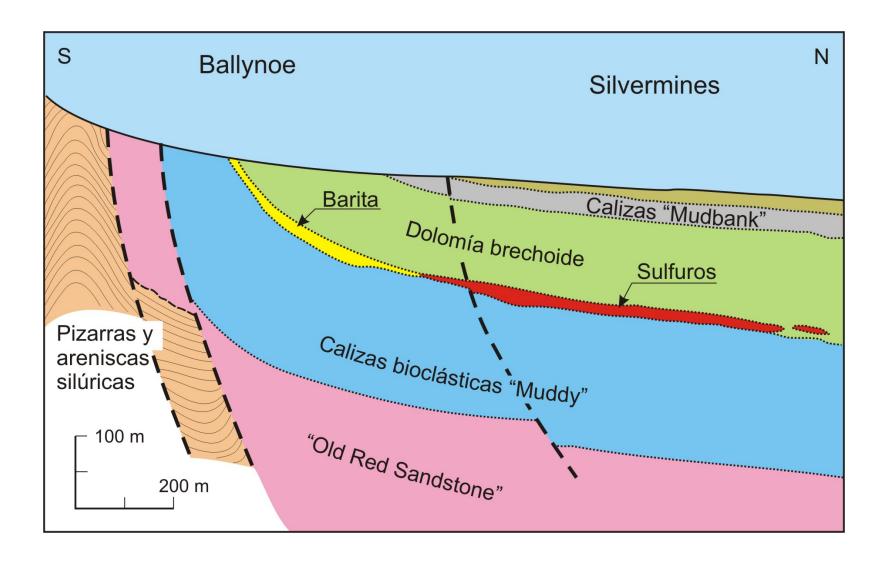
La mineralización no se produjo hasta 200Ma después de la formación de las rocas carbonatadas

En la formación intervinieron soluciones salinas en las que predominaban: Cl, Na, Ca, K y Mg.





Esquema de los yacimientos de Silvermines-Ballynoe (Irlanda)





GÉNESIS DE LOS YACIMIENTOS MVT

- Movimiento de los fluidos en la cuenca
- Ambientes fo-qo y espacios adecuados en la masa calcárea
- Precipitación de sulfuros en presencia de H₂S
- H₂S de reducción bacteriana de sulfatos de depósitos de evaporitas o de petróleo







GÉNESIS DE LOS YACIMIENTOS MVT

Los yacimientos MVT se desarrollan en cuenca con sedimentos detríticos y carbonatados sobre la que se inicia la diagénesis por presiones litostáticas.

- 1º Los fluidos de la cuenca se ponen en movimiento por presiones diagenéticas, calentándose y disolviendo los metales y otros solutos en su circulación a través de los poros preexistentes. La disolución de sales como el ClNa, ClK, y los sulfatos, favorecen la posterior disolución de metales.
- 2º La circulación de los fluidos a través de la masa calcárea en su camino hacia la parte superior de la cuenca puede encontrarse con ambientes físico-químicos y espacios adecuados para la deposición de los metales disueltos.
- 3º Los fluidos derivados de la compactación de los sedimentos (aguas connatas), lixivian los materiales depositados en la cuenca, formando cloruros y complejos orgánicos que precipitan en forma de sulfuros cuando se encuentran con H2S.
- 4º El H₂S puede proceder de la reducción bacteriana de sulfatos de depósitos de evaporitas próximos o de la posible presencia de petróleo en la cuenca de sedimentación.





Movimiento de los fluidos

El movimiento de fluidos en la cuenca puede deberse a las siguientes causas:

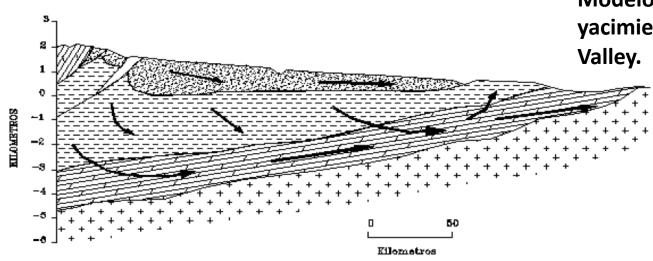
- La porosidad de los sedimentos. Inicialmente los sedimentos de una cuenca tienen una gran porosidad debido a que son materiales sueltos, pero la porosidad decrece en su proceso de compactación del orden del 70-80%, quedando aún del 0-20% de agua a 3.000 m. de profundidad.
- La compactación debida a presiones verticales producida por la acumulación de materiales en la cuenca, provoca movimientos ascendentes del fluido. Cuando en su camino ascendente encuentra materiales impermeables, los movimientos se hacen horizontales.
- Los fluidos de la cuenca sedimentaria aumentan su contenido en sales al atravesar, en su movimiento (horizontal o ascendente), los materiales que encuentran a su paso (pizarras, evaporitas).
- Como en el caso del petróleo, los mecanismos de migración de los fluidos de una cuenca es uno de los fenómenos más enigmáticos y que más discusiones producen, debido a la dificultad de entender el movimiento de las enormes cantidades de fluido que se necesitan para obtener un yacimiento de tipo medio.





Movimiento de los fluidos

Para mover estas cantidades de fluido se precisa mucho tiempo, durante el cual existirán indudables variaciones en las condiciones físico-químicas del medio, lo que provocará modificaciones en los depósitos anteriores y numerosas particularidades.



Modelo genético de yacimientos tipo Mississipi Valley.

Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros



POR REDUCCIÓN DE SULFUROS

POR REDUCCIÓN DE SULFATOS

Formación de sulfuros

MODELO DE MEZCLA

CADA YACIMIENTO PRESENTA CARACTERÍSTICAS PROPIAS





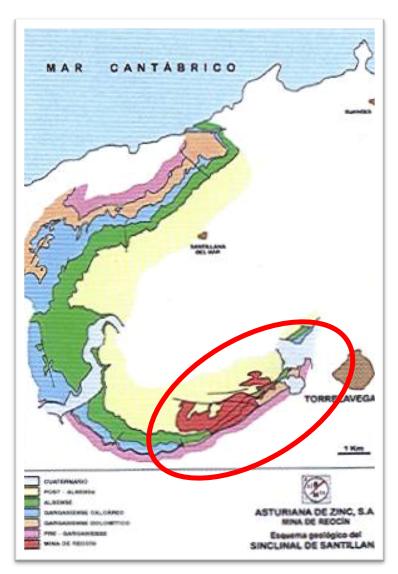
MODELOS BALMAT, ALPINO E IRLANDA

Con objeto de explicar algunos tipos de yacimientos que, procediendo de la sedimentación de una cuenca geosinclinal, tienen diferencias acusadas con el modelo MVT, se propusieron otros tres modelos: Balmat, Alpino e Irlanda.

- •Modelo Alpino: sulfuros finamente interestratificados entre los componentes de las rocas encajantes, carbonatos y margas, generalmente dolomitizados, formando delgadas capas con gran extensión lateral. Las inclusiones fluidas→ temperaturas de formación relativamente altas. S singenético.
- •Modelo Balmat: los minerales de Pb y Zn (principalmente blenda) se encuentran en rocas evaporíticas y dolomías
- •Modelo Irlanda de Pb-Zn (Ag y Cu) asociados con importantes anomalías de Fe, Mn y Ba, semejantes a las de los yac. exhalativos-volcanogénicos, con fallas intraformacionales que fueron activas durante los procesos sedimentarios, lo que dio lugar al desarrollo de relieves submarinos por la diferente subsidencia de los bloques.



EL YACIMIENTO DE REOCIN (CANTABRIA)



El yacimiento de Reocín se sitúa en el borde suroriental del Sinclinal de Santillana (Cantabria).

En Cantabria se explotó durante más de un siglo y medio uno de los yacimientos estratoligados en rocas carbonatadas más importantes del mundo, Reocín,.





EL YACIMIENTO DE REOCIN (CANTABRIA)

Geológicamente, Reocín se sitúa en el borde suroeste del "Sinclinal de Santillana", una suave estructura que, con dirección NE, va desde Udias a Santander, introduciéndose en el mar con un leve buzamiento. Limita por el N con el anticlinal de Ubiarco y por el sur con la facies Weald, llegando hasta la falla cabalgante del Escudo de Cabuérniga.

Estratigráficamente Reocín se sitúa en el Aptiense Superior (Gargasiense), piso del Cretácico Inferior (Mesozoico).

Las rocas encajantes son exclusivamente dolomías situadas sobre las calizas margosas.





EL YACIMIENTO DE REOCIN (CANTABRIA)

- La mineralización primaria de Reocín se compone de blenda, galena y marcasita, sin indicios de plata, mercurio u otros metales traza que pudieran sugerir un origen volcánico lejano.
- Morfológicamente el yacimiento es un cuerpo estratoide irregular, alargado en dirección NE con 3.250 m. de longitud, 1.000 m. de anchura y una potencia variable en las distintas partes del yacimiento.
- La Mina de Reocín se puede dividir en 4 zonas que se diferencian por sus rasgos morfológicos y su mineralización: Zona Oeste (Capa Sur), Zona Centro, Zona Este (Barrendera) y La Flexion 3E:





YACIMIENTOS ESTRATIFORMES EN MATERIALES CLÁSTICOS

- Cierto número de yacimientos estratiformes de Zn, Pb, Cu o metales preciosos se han formado en la evolución del geosinclinal. A diferencia de los yacimientos volcanogénicos sedimentarios distales, estos yacimientos sedimentario-estratiformes no tienen relación con rocas volcánicas, aunque se encuentran dentro de la misma secuencia.
- Los mejores ejemplos son McArthur River (Australia), Sullivan (Canadá), Meggen (Alemania) y Mufulira (Zambia), los tres primeros tienen una mineralización de sulfuros complejos con predominio de la blenda y galena, y el último de cobre.
- Típicamente, estos depósitos consisten en cuerpos estratiformes de sulfuros masivos bandeados, entre sedimentos que sugieren una deposición anterior a la litificación.
- Los yacimientos sedimentario-estratiformes no están asociados a rocas carbonatadas, aunque pueden estarlo en algún caso aislado, generalmente se encuentran asociados a rocas detríticas, lo que los diferencia de los yacimientos tipo Mississippi Valley.