

YACIMIENTOS HIDROTERMALES (Amplia información en Internet – depósitos Hidrotermales)

A medida que un magma se solidifica se van formando los minerales propios de las rocas ígneas (silicatos y óxidos) mientras las fases líquida y gaseosa de la mezcla se van enriqueciendo en agua con ciertos elementos y sustancias en solución (F, Cl, B, CO₂, S, Fe, Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Sb, Ba, Ca, etc).

Estas fases son expulsadas del magma, principalmente durante su solidificación, a temperaturas de 400 a 800°C y a considerable presión, produciendo efectos de metasomatismo y relleno en las rocas de caja.

El agua expulsada de su fuente magmática se desplaza, lateral o verticalmente, para llegar finalmente a la superficie donde aflora como fuente o manantial de agua termal.

Desde la profundidad magmática hasta la superficie el agua pierde temperatura y presión, perdiendo en consecuencia la mayor parte de su poder disolvente. Por ello, casi todas las sustancias disueltas en el agua precipitan “en el camino” originando concentraciones o depósitos minerales.

Los conductos por los cuales el agua se moviliza son, fundamentalmente, fallas y diaclasas, aunque localmente pueden tener importancia otros espacios abiertos como vesículas de lava, intersticios de sedimentos, **cuevas de disolución** y brechas de colapso y de explosión.

Las fallas y diaclasas no solamente sirven como conductos sino que, a medida que transcurre el proceso, se van rellenando con las sustancias que precipitan. Podría compararse este relleno con la forma como se deposita el sarro en una cañería, desde las paredes hacia el centro, hasta a obstrucción total.

Los depósitos minerales que se producen por este mecanismo de relleno tienen la forma del conducto y, como la mayoría de los conductos son fallas y diaclasas, las formas más comunes son las vetas (cuerpos groseramente tabulares).

En ciertas condiciones, y en especial cerca de la fuente magmática, las aguas calientes también pueden atacar a las rocas de caja, produciendo alteración, disolución y precipitación de nuevas sustancias en lugar de las disueltas (metasomatismo).

Cuando la mineralización ocurre en el inmediato contacto con la masa magmática. La concentración resultante se llama yacimiento "metasomático de contacto" o "piro- metasomático".

Si la mineralización se produce fuera de la zona de contacto, a medida que aumenta la distancia y disminuye la temperatura, los yacimientos resultantes se llaman "hipotermiales", cuando se forman a más de 300°C, mesotermiales, cuando lo hacen entre 150 y 300°C, y epitermales a menor temperatura.

Dejando de lado, por el momento, la influencia de presión, puede decirse, de manera general, que cada mineral tiene un determinado rango de temperaturas de formación dentro del cual se produce su precipitación. Por eso, el hidrotermalismo tiene a particularidad de presentar una “Zonación”, es decir una distribución en zonas con distintas mineralizaciones de acuerdo a la temperatura. Por ejemplo: (Fig.: 1)

Piro-metasomáticos	
Pirrotina	Granate
Magnetita	Molibdenita
Cuarzo	Casiterita
Fluorita	Especularita
Turmalina	Bismutita
Topacio	
Wolframita	
Scheelita	

Hipotermales:	
Cuarzo	Casiterita
Pirrotina	Cobre (sulfuros)
Molibdenita	Oro
Wolframita	Oligisto
Scheelita	

Mesotermales:	
Cuarzo	Blenda
Calcita	Plata
Siderita	Oro
Oligisto	Galena
Cobre (sulfuros)	

Epitermales:	
Baritina	Cinabrio
Calcita	Manganeso (óxidos y carb.)
Siderita	
Antimonita	

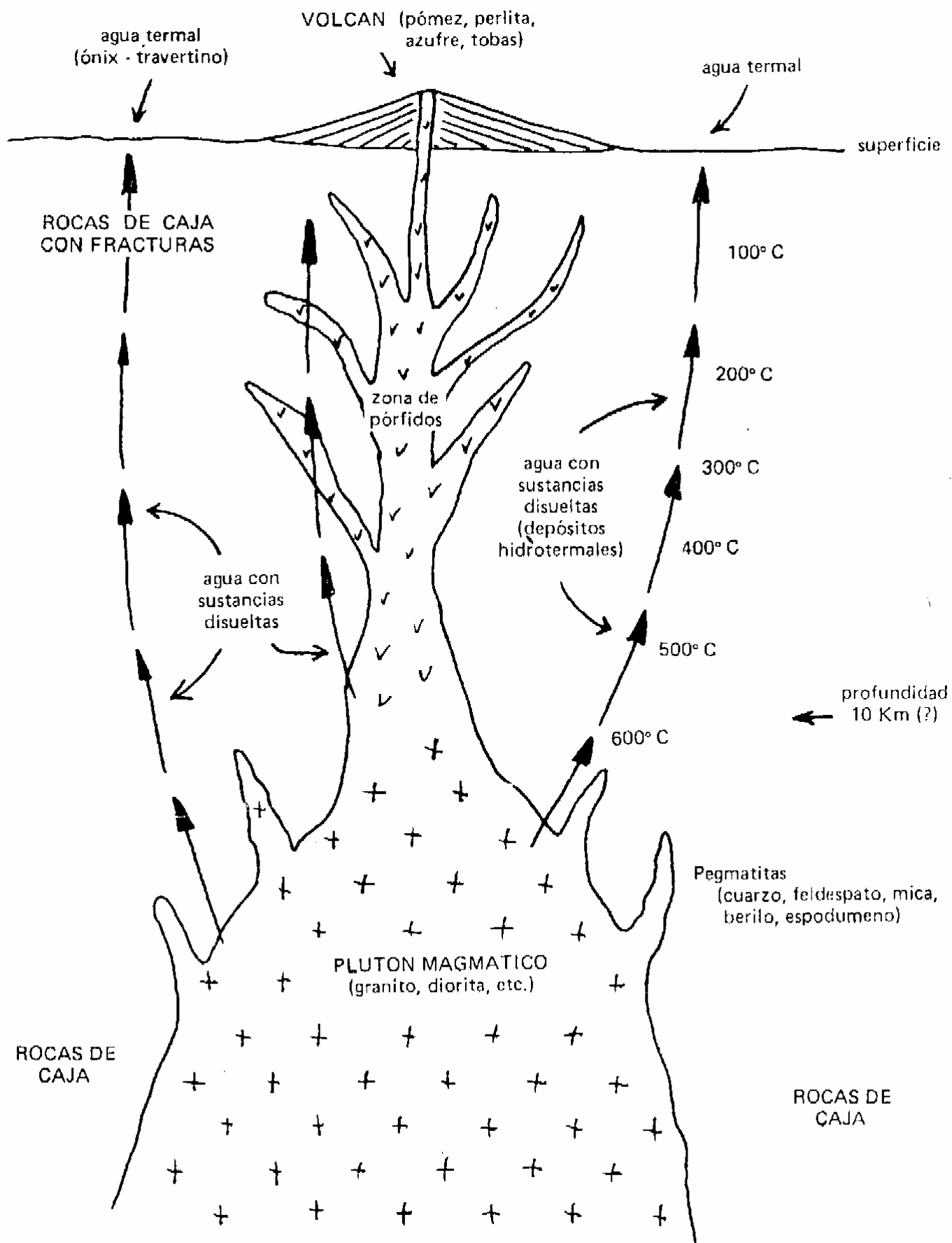
Este ordenamiento se cumple en muchos casos pero no agota las posibilidades ni representa un esquema rígido. Más aún, si se agrega la influencia de la presión, la re-actividad de las cajas y la repetición de los aportes de agua, el cuadro general del hidrotermalismo se complica de tal manera que pueden darse mezclas que no guarden relación con las temperaturas de precipitación.

Los procesos hidrotermales han dado lugar a una gran cantidad de yacimientos de variados minerales. En Argentina, los grandes yacimientos de cobre diseminado Pachón y Alumbreira, todos los de plata, plomo, zinc, fluorita, estaño, wolframio, antimonio, bismuto, y gran parte de los de oro y baritina son yacimientos de ese origen.

Hidrotermalismo submarino

En ciertas zonas de separación de placas corticales, como ocurre actualmente en el mar Rojo, junto con los fenómenos volcánicos submarinos, se produce la salida de aguas calientes del mismo tipo de las descritas. Las sustancias disueltas precipitan en el fondo del mar, originando depósitos estratificados de los cuales los más interesantes son los de "sulfuros masivos", compuestos por una gran cantidad de pirita o pirrotina, con pequeñas proporciones de galena, blenda, calcopirita, plata y oro.

Yacimientos de este tipo podrían ser la mina de cobre Salamanca, en Mendoza, y la de plomo-plata Santa Elena, en San Juan.



ESQUEMA DEL ORIGEN DE MINERALIZACIONES MAGMATICAS E HIDROTERMALES

FIG 1

Principios de los yacimientos hidrotermales.

Los geólogos atribuyen a los procesos hidrotermales la gran variedad de depósitos minerales metálicos que proporcionan la mayoría de nuestros útiles metales y minerales. De dichos depósitos se obtienen la mayor parte del oro, plata, cobre, plomo y zinc, mercurio, antimonio y molibdeno, la mayoría de los metales menores y muchos minerales no metálicos. Por consiguiente, estos depósitos han sido explotados, investigados y estudiados mucho más que los de ningún otro grupo. Ellos han dado origen a muchos de los grandes distritos mineros del mundo; la ciencia de la minería surgió de ellos.

Factores esenciales para la formación de depósitos hidrotermales son:

- 1) Disponibilidad de soluciones mineralizadoras susceptibles de disolver y transportar materia mineral
- 2) Presencia de aberturas en las rocas las cuales puedan canalizarse las soluciones
- 3) Presencia de lugares emplazamiento para la deposición del contenido mineral
- 4) Reacción química cuyo resultado sea la deposición
- 5) Suficiente concentración de materia mineral depositada para llegar a constituir depósitos explotables.

Carácter de las soluciones

La naturaleza de las soluciones hidrotermales debe interpretarse por deducción y por analogía con ciertos tipos de manantiales termales. Su acción es visible sólo en la forma de depósitos minerales o como una alteración de la pared rocosa. Como implica la palabra hidrotermal, son aguas calientes cuya temperatura oscila probablemente entre los 500°C y 50°C. Las de temperatura elevada están también a presión elevada

Aberturas en las rocas

El desplazamiento de las soluciones hidrotermales desde su origen hasta el lugar de deposición depende en gran manera de las aberturas que se hallen disponibles en las rocas. La deposición de grandes masas minerales extraños implica la necesidad de una continua provisión de materia nueva, y esto significa que deben existir conductos de tránsito. Las aberturas tienen que estar interconectadas. Además, es evidente que los depósitos de relleno de cavidades no pueden formarse a menos que existan cavidades susceptibles a ser rellenadas. También es evidente que los depósitos de sustitución no pueden formarse a menos que las soluciones puedan llegar a la roca que experimenta la sustitución. Por consiguiente, las aberturas en las rocas son fundamentales para la formación de depósitos epigenéticos. Asimismo son esenciales para la existencia de masas de aguas freáticas, petróleo y gas.

Los diferentes tipos de aberturas en las rocas que pueden servir de receptáculos para los minerales o permitir el desplazamiento de soluciones o de sus constituyentes a través de las rocas, pueden clasificarse del modo siguiente:

Cavidades primitivas.

1. Retículos cristalinos:

Los espacios existentes entre los átomos de cristal pueden permitir la difusión de iones de radios iónicos más pequeños. Esta difusión puede permitir que se produzcan sustituciones o adiciones dentro de los cristales

2. Vesículas o "burbujas de aire":

Son aberturas producidas por vapores en dilatación, típicas de la parte superior de muchas corrientes de lava basáltica. Son de forma tubular, casi circulares en sección transversal y pueden estar separadas por espacios de 1,25 a 5 cm entre sí. Si las vesículas están llenas, la roca se denomina amigdaloides. Si están apiñadas, forman una roca celular como una esponja, llamada escoria.

3. Conductos de expulsión de lavas:

Se forman en las corrientes de las lavas cuando solidificado la parte exterior de ésta, y la lava líquida que queda en el centro se escurre hacia afuera dejando un tubo o túnel.

4. Grietas de enfriamiento:

Se forman como resultado de la contracción al enfriarse las rocas ígneas. Pueden ser juntas espaciadas regularmente que dividen a la roca en bloques, o bien fracturas lisas paralelas, o resquebrajaduras irregulares.

5. Cavidades de brechas ígneas:

Las brechas ígneas son de dos tipos:

Brechas volcánicas que forman conglomerados

Brechas de intrusión.

Ambas están formadas por fragmentos angulares y gruesos de rocas ígneas, con materiales más finos en los intersticios. Pueden ser totalmente permeables.

6. Planos de estratificación:

Son rasgos bien conocidos de todas las formaciones sedimentarias. Permiten la entrada de soluciones hidrotermales y la substitución de las paredes adyacentes por menas minerales

Cavidades provocadas

1. Fisuras con fallas o sin ellas:

Las fisuras son aberturas tabulares continuas en las rocas, generalmente de considerable longitud y profundidad. Las originan fuerzas de compresión, de tensión o torsión que actúan sobre las rocas y pueden ir o no ir acompañadas de fallas. Así, las fallas son fisuras, pero no todas las fisuras son necesariamente fallas. Pueden constituir conductos largos y continuos para las soluciones. Cuando están ocupadas por metal o minerales forman filones de fisura.

2. Cavidades de zonas de cizallamiento:

Las zonas de cizallamiento se producen cuando las fracturas, en lugar de estar concentradas en una o dos roturas individuales, se descomponen en innumerables superficies de roturas y trituración, muy poco espaciadas entre sí a pesar de ser discontinuas, más o menos paralelas. Generalmente las fallas están presentes. Las aberturas delgadas y hojosas, en su mayoría de tamaño infinitesimal, son excelentes conductos para las soluciones, como lo demuestran las copiosas corrientes de agua que fluyen por ellas en los lugares donde forman túneles y minas. Por razón de las diminutas aberturas, sólo puede producirse en ellas una deposición menor en espacio descubierto, pero la gran superficie específica disponible hace que las zonas de cizallamiento sean favorables para la localización de depósitos de substitución.

3. Cavidades debidas a plegamiento o alabeo:

- a- Crestas de pliegues
 - b- Declives y planicies
 - c- Grietas y roturas de anticlinales y sinclinales
- La flexión y el plegamiento de los estratos sedimentarios dan origen a:
- 1) aberturas de crestas de plegamientos (pagina 144) en las crestas de anticlinales estrechos y muy estrechamente plegados
 - 2) declives, que son muy inclinados, y planicies, aberturas formadas por la fractura de capas por un ligero hundimiento
 - 3) Grietas longitudinales a lo largo de las crestas de los anticlinales y sinclinales.

4. Chimeneas volcánicas:

Cuando una actividad volcánica explosiva practica aberturas tubulares, las materias expulsadas pueden volver a caer o ser arrastradas de nuevo a la abertura, formando una brecha angular con espacios entre los fragmentos. Estas aberturas constituyen excelentes conductos para el transporte de soluciones mineralizantes a partir de las cuales pueden formarse depósitos de relleno de cavidades o depósitos de substitución.

5. Brechas:

Pueden formarse por la fragmentación de cualquier roca quebradiza reducida por plegamiento, fallas, intrusión u otras fuerzas tectónicas, en cuyo caso se forman las brechas tectónicas o bien por hundimiento de las rocas situadas encima de una abertura, en cuyo caso se forman las brechas de hundimiento. Como en otras brechas, los espacios existentes entre los fragmentos angulares proporcionan espacio para circulación de soluciones, relleno de cavidades o substitución.

6. Aberturas de alteración de rocas:

Las paredes rocosas que han sido alteradas por soluciones resultan ser (después de practicar en ellas pruebas adecuadas) generalmente más porosas que las rocas no alteradas y permiten la entrada de soluciones mineralizantes.

Factores que afectan a la deposición

Los modos de formación de los minerales de los diferentes tipos de yacimientos se estudian en las páginas. Los que se refieren a la deposición a partir de soluciones hidrotermales son cambios predominantemente químicos en las soluciones, reacciones entre las soluciones y las paredes rocosas o los materiales de los filones, y cambios de temperatura presión.

Cambios y reacciones químicas. - En su largo camino ascendente, las soluciones mineralizadoras tienen que experimentar inevitablemente algún cambio químico por su reacción con las rocas que atraviesan. Las rocas silicatadas las hacen alcalinas o más alcalinas. La concentración de iones hidrógeno (pH) puede determinar cuándo ha de ocurrir la reacción con las rocas o la deposición.

En la sustitución, puede producirse naturalmente la sustitución de los minerales antiguos por otros nuevos, sólo por reacción entre la solución y un sólido. Paredes rocosas muy reactivas, como calizas, en desequilibrio con las soluciones producen un rápido cambio químico acompañado de deposición.

Temperatura y presión. - Los factores más importantes que provocan deposición hidrotermal a partir de soluciones son los cambios de temperatura y presión. En general, un descenso de temperatura hace disminuir solubilidad y produce la precipitación.

Las soluciones hidrotermales inician su camino con el calor proporcionado por el magma, calor que se pierde lentamente al ir atravesando las rocas. El descenso de temperatura depende del ritmo de pérdida de calor en las paredes rocosas, lo cual depende a su vez de la cantidad de solución que las atraviese, de las reacciones exotérmicas y principalmente de la capacidad de la pared rocosa para absorber el calor. Cuanto mayor es la difusibilidad térmica de una roca más rápidamente absorberá el calor y mayor será el descenso de la temperatura en las soluciones. En las fases iniciales de circulación con paredes rocosas frías, el descenso de temperatura será relativamente rápido, pero la continua fluencia de soluciones calentará las rocas de las paredes hasta llegar a la temperatura de las soluciones, en cuyo momento disminuirá la pérdida de calor.

La naturaleza de las aberturas rocosas afecta también a la pérdida del calor. La fluencia rápida a través de una fisura abierta de paredes rectas provocará menor pérdida de calor que la fluencia por las complicadas aberturas de una brecha que tenga gran superficie específica, donde el descenso inicial de temperatura será rápido. Sin embargo, una vez calentada, la brecha no absorberá mucho calor de la solución. Cuanto mayor sea el volumen de solución nueva que pase por un punto dado tanto mayor será la aportación de nuevo calor, y más lento el descenso de temperatura de las soluciones. Así, en una fisura con constricciones y espacios abiertos característicos, la temperatura de las soluciones descenderá menos en las porciones angostas que en otras más amplias. Dichos rasgos tienen también importancia en la determinación y localización de la deposición del mineral.

Las soluciones se inician a las altas presiones existentes en las grandes profundidades donde se originan. Su camino ascensional, a través de zonas de baja presión, ya acompañado normalmente por un descenso de presión que provoca asimismo la precipitación. Pero también existen otros factores que pueden determinar cambios en la presión. Las angosturas de los conductos, el relleno parcial por deposición mineral, o los obstáculos, pueden provocar excesos de presión. El escape de las soluciones a espacios más abiertos por encima de las angosturas hace descender la presión y provoca la deposición. De este modo, los cambios de carácter físico de las aberturas por las cuales pasan las soluciones desempeñan un papel importante determinar y localizar la deposición de minerales a partir de la solución hidrotermal.

Alteración de la pared rocosa.

Los depósitos minerales hidrotermales van generalmente acompañados de una faja de alteración de las paredes rocosas, visible a simple vista. Por ejemplo, en un filón de fisura, la zona de alteración es paralela a las paredes de fisura, de anchura relativamente uniforme y varía en amplitud según el volumen del filón. La intensidad de la alteración depende también de la pared rocosa y del carácter químico, temperatura y presión de las soluciones mineralizantes. Si los filones están poco separados entre sí, el halo de alteración de una veta puede confundirse con el de otro, y el espacio comprendido entre ambos está enteramente alterado. Ello es particularmente sorprendente en el caso de los "cobres porfídicos" donde la roca huésped comprendida entre las numerosas vetas pequeñas que se cortan entre sí han sido alteradas intensamente hasta distancias que alcanzan centenares de metros.

En un filón epitermal, la zona alterada visible es generalmente estrecha, y la alteración se descubre difícilmente, pero en uno mesotermal la zona será probablemente ancha e intensa, y se confundirá gradualmente con la roca nueva partiendo de la veta. En condiciones hipotermas, pueden formarse en las paredes rocosas minerales de alta temperatura tales como la turmalina, topacio, piroxenos y anfíboles.

La naturaleza de la alteración varía algo, también con la clase de la roca, pero es sorprendente que en el caso de un depósito de cobre mesotermal, el producto de la alteración de una monzonita cuarcífera se parece al derivado de una diorita o de un esquisto cristalino. Con la mayoría de las rocas salvo la caliza y la cuarcita, el producto final de la alteración es una roca formada en su mayor parte por sericita y cuarzo. Los feldespatos, minerales ferromagnésicos y micas primarias se transforman en sericita y generalmente se les añade sílice. A esto se le llama "**sericitación**".

Trabajos recientes han permitido descubrir que en muchos de los "cobres porfíricos" la zona exterior de alteración se caracteriza por la alteración arcillosa es decir: la formación de minerales arcillosos como dickita y montmorillonita.

En muchos lugares pueden superponerse dos fases de alteración de la roca donde la mineralización de cobre hipogénico estuvo acompañado de una amplia e intensa sericitación de las rocas huéspedes.

condiciones	roca mural	algunos productos de alteración
epitermal	caliza	silificación
	lavas	alunita, clorita, pirita, algo de sericita, minerales arcillosos
	intrusivas ígneas	clorita, epidotita, calcita, cuarzo, algo de sericita, minerales arcillosos
mesotermal	caliza	silificado a jasperoide; dolomitas, derita
	pizarras, lavas	silificación, minerales arcillosos
	rocas ígneas sílicas	Principalmente sericita y cuarzo; algo de minerales arcillosos
	rocas ígneas básicas	serpentinizado, epidota, clorita
hipotermal	Rocas graníticas; esquistos; lavas	Greisen; topacio; mica blanca; turmalina; piroxenos; anfíboles.

Localización de la mineralización hidrotermal.

La causa de la localización de los yacimientos hidrotermales tiene, a la vez, interés científico e importancia práctica. Naturalmente, varía en cada distrito, y puede ser debida a uno o más factores que hayan actuado conjuntamente. Las más de las veces depende del carácter químico y físico de la roca huésped, de los rasgos estructurales, de la intrusión, de la profundidad de la formación, de los cambios que experimenten las aberturas de las rocas o de una combinación de todos estos factores. En algunos casos se ve claramente definida la causa de la localización; en otros, es enigma.

Intrusiones. - Como la mayoría de soluciones hidrotermales son de procedencia magmática, la situación de la intrusión madre puede determinar la localización del mineral. Las cúpulas o las apófisis en las intrusiones pueden localizar el mineral en sus proximidades; los volcanes pueden hacer lo mismo

Carácter de la roca huésped.- Los depósitos hidrotermales pueden formarse en cualquier clase de roca huésped, pero algunas de ellas influyen en la deposición más que otras. En el caso de depósitos de relleno de cavidades, la localización de la abertura, más que el carácter de la roca contenedora, es lo que localiza el mineral, si bien la naturaleza física y química de la roca huésped puede determinar el emplazamiento y forma de la cavidad. Por ejemplo, las rocas quebradizas se desmenuzan más fácilmente que las no quebradizas, y por consiguiente localizan las fracturas y brechas; las rocas carbonatadas permiten la formación de aberturas para la solución. Prescindiendo de que una roca pueda ser químicamente favorable, la deposición de mineral no puede producirse a menos que existan aberturas en la roca que ofrezcan emplazamientos para el relleno de cavidades o que permitan la entrada de soluciones para la substitución. Es necesaria la permeabilidad, y ésta le puede proporcionar el espacio poroso originario, la fusibilidad, los planos de exfoliación de los minerales, las brechas, las juntas, las pequeñas fracturas y otros factores. La influencia de la roca huésped en la localización del mineral puede ser, por lo tanto, química o física, o ambas cosas a la vez. También la superficie específica es un factor importante.

Rasgos estructurales. - Los rasgos estructurales son importantes localizadores de depósitos hidrotermales. Las fisuras sirven por, sí solas como emplazamientos, así como de conductos para el desplazamiento de los

fluidos minerales hasta las rocas susceptibles de sustitución. La intersección de fisuras con rocas favorables se utiliza en la búsqueda de depósitos de sustitución. Ambas son necesarias. Puede existir una caliza favorable a la sustitución, pero no podrá producirse sustitución alguna en ella si las soluciones no pueden llegar a la misma, y al revés: puede existir un excelente conducto de fisura, pero si sus paredes son desfavorables, no se producirá ninguna sustitución. Es necesaria la coincidencia de ambas cosas. Así, en muchos distritos mineros, hasta las más pequeñas fisuras son seguidas con taladros hasta llegar a capas favorables ya conocidas, con la esperanza de descubrir depósitos explotables en tales emplazamientos.

Las fisuras múltiples y las zonas de cizallamiento localizan los depósitos minerales de un modo parecido a las fisuras.

Las intersecciones fisurales son emplazamientos particularmente favorables a la deposición de mineral. Los plegamientos juntos e inclinados y los plegamientos de arrastre fueron importantes localizadores para depósitos de sustitución. Las brechas son emplazamientos muy favorables, tanto para los depósitos de relleno de cavidades como para los de sustitución. Los rasgos debidos a sedimentación, como planos de estratificación, laminación o capas permeables continuas, irregularidades del terreno o capas impermeables superyacentes, pueden influir en la localización de depósitos, proporcionando conductos para las soluciones mineralizadoras.