

0297



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

EL ESTUDIO DE OCLUSIONES FLUIDAS
EN LAS ROCAS COMO TECNICA
DE EXPLORACION MINERA

TESIS

que para obtener el título de
Ingeniero Geólogo
presenta

JOSE BENJAMIN F. PONCE SIBAJA

MEXICO, D. F., 1976.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central

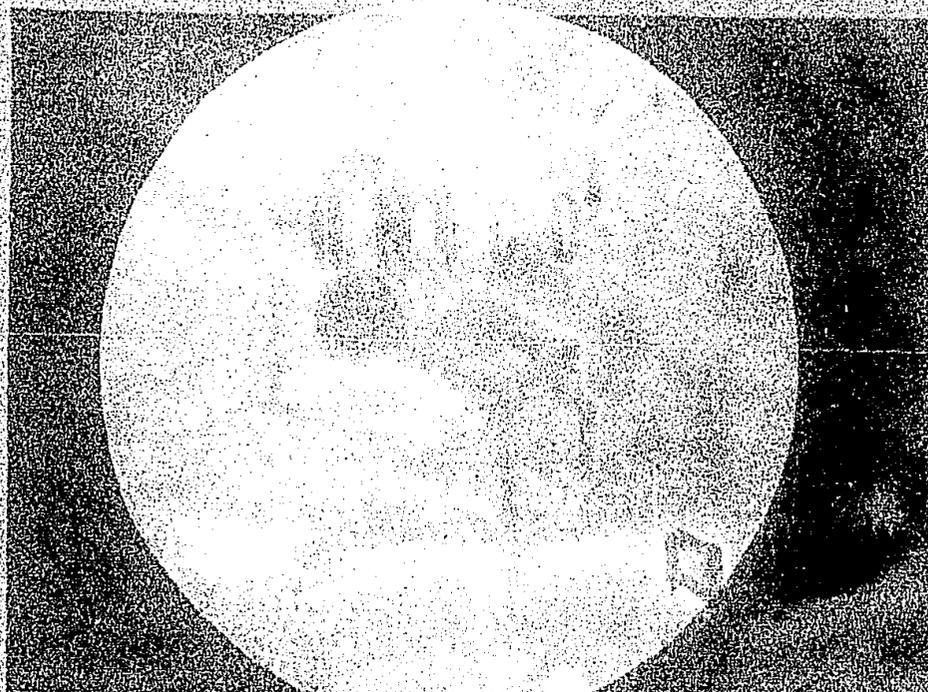


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



EL ESTUDIO DE OCLUSIONES FLUIDAS
EN LAS ROCAS COMO TECNICA
DE EXPLORACION MINERA

JOSE BENJAMIN F. PONCE SIBAJA

MEXICO, D. F., 1976.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
EXAMENES PROFESIONALES
60-1-77

Al Pasante señor JOSE BENJAMIN F. PONCE SIBAJA,
P r e s e n t e.

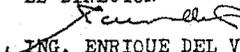
En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el Profesor Ingeniero Germán -- Arriaga García, para que lo desarrolle como tesis en su Examen Profesional de Ingeniero GEOLOGO.

"EL ESTUDIO DE OCLUSIONES FLUIDAS EN
LAS ROCAS COMO TECNICA DE EXPLORA -
CION MINERA".

- 1.- Introducción.
- 2.- Teoría de las oclusiones fluidas.
- 3.- Métodos analíticos usados y su validez.
- 4.- Aparatos usados-principios de operación.
y calibración de éstos-(métodos no destructivos).
- 5.- Significado de los datos obtenidos por métodos no destructivos.
- 6.- Discusión del estudio por oclusiones -- fluidas.
- 7.- Técnica de muestreo.
- 8.- Exploración minera por oclusiones fluidas.
- 9.- Aplicaciones del método de las oclusiones- fluidas y datos que aportan.
- 10.- Ejemplos de estudios por el método de oclusiones fluidas (datos obtenidos y su interpetación).
- 11.- Bibliografía.
- 12.- Ilustraciones.

Ruego a usted tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá -- prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de -- seis meses como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así como de la disposición de la -- Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares -- de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente.
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 30 de marzo de 1976.
EL DIRECTOR


ING. ENRIQUE DEL VALLE CALDERON

.EVC/DA/smg.

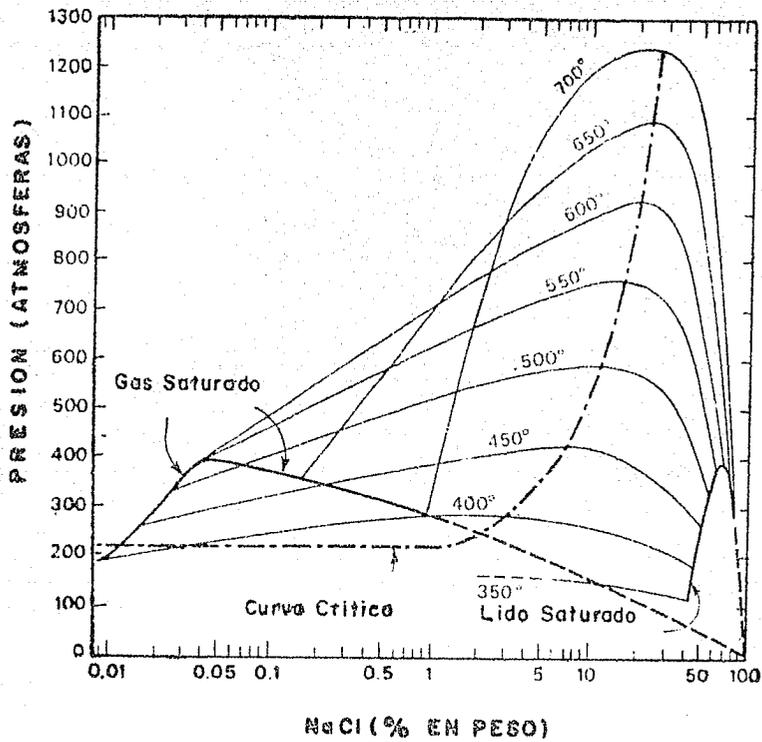


FIG. 5. - DIAGRAMA PRESION-COMPOSICION DE FASES LIQUIDA Y GASEOSA COEXISTENTES EN EL SISTEMA NaCl-H₂O.
(TOMADO DE ROEDDER, 1967 EN BARNES, P. 560)

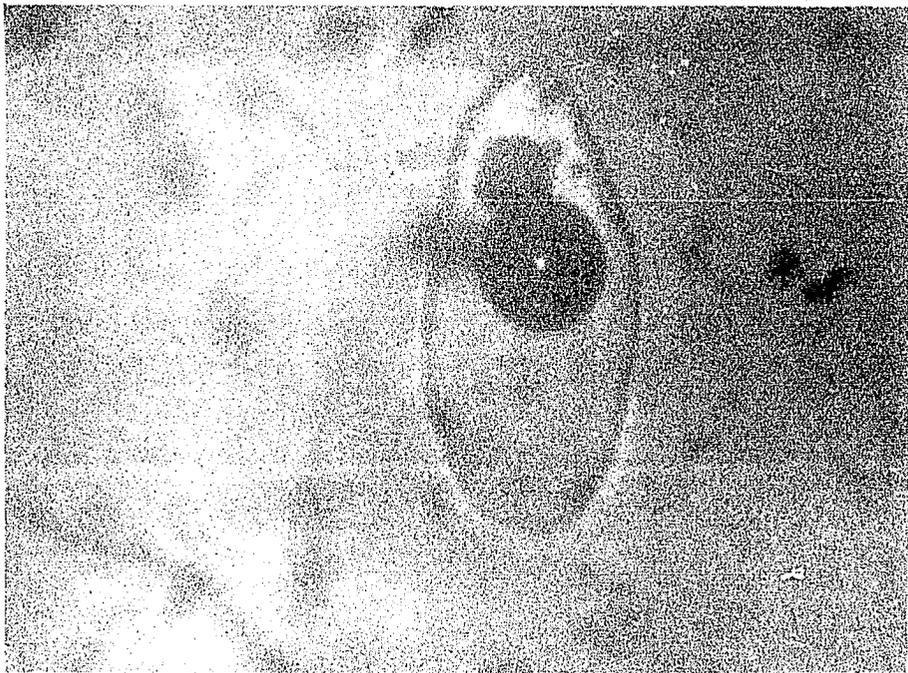


FOTO 1. - FOTOMICROGRAFIA (X 35) MOSTRANDO UNA OCLUSION FLUIDA EN UN CRISTAL DE FLUORITA DEL CERRO DEL PILOTE, DISTRITO LA ENCANTADA, COAH., COMPUESTA POR UN LIQUIDO SALINO, UNA BURBUJA (ESFERICA) Y UN CRISTAL CUBICO DE NaCl. (TOMADA POR EL DR. KESLER).

A mis padres Francisco y Aurora, por darme lo mejor de sus vidas; a mis hermanos: Guadalupe, Mario, Francisco, Elizabeth y Alma Rosa, por permitirme gozar de lo que algunos de ellos carecieron.

A mis maestros, compañeros y amigos, y a toda aquella persona que de diferente manera ha influido en mi vida brindándome su amistad y su experiencia, haciéndome vivir, inclusive con su sola presencia. Contribuyendo así, a moldear el barro informe que es un niño hasta esculpir un profesionista.

A todos ustedes me permito dedicar el presente trabajo como un débil testimonio de que su esfuerzo no ha sido en vano.

Agradezco sinceramente a las Autoridades del Consejo de Recursos Minerales, las facilidades brindadas para realizar este trabajo. En particular al Dr. José Luis Lee Moreno, Gerente de Estudios Especiales.

Agradezco también de una manera especial las enseñanzas del Dr. Stephen E. Kesler.

Hago patente mi reconocimiento al Ing. Germán Arriaga García por aceptar dirigirme este trabajo y por hacerlo, a mi criterio, en una forma excelente. Al Ing. Leovigildo Cepeda Dávila y al Dr. Fernando Ortega por sus críticas y magníficas sugerencias. Y a todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron en el desarrollo de este trabajo.

CONTENIDO

- 1 INTRODUCCION.
- 2 TEORIA DE LAS OCLUSIONES FLUIDAS.
 - 2.1 INTRODUCCION.
 - 2.1,1 Historia.
 - 2.1,2 Definiciones.
 - 2.1,3 Importancia.
 - 2.2 MECANISMOS DE CAPTURA.
 - 2.3 CRITERIOS PARA DISTINGUIR OCLUSIONES PRIMARIAS DE LAS SECUNDARIAS Y PSEUDOSUCUNDARIAS.
 - 2.4 NATURALEZA DEL MATERIAL CAPTURADO.
 - 2.5 FUGA Y CONTAMINACION DE OCLUSIONES.
- 3 METODOS ANALITICOS USADOS Y SU VALIDEZ.
 - 3.1 METODOS NO DESTRUCTIVOS.
 - 3.1,1 Obtención de datos físicoquímicos (Temperatura, Salinidad).
 - 3.2 METODOS DESTRUCTIVOS.
 - 3.3 COMPOSICION DE LAS OCLUSIONES FLUIDAS.
- 4 APARATOS USADOS — PRINCIPIOS DE OPERACION Y CALIBRACION DE ESTOS (METODOS NO DESTRUCTIVOS).
 - 4.1 EQUIPO.
 - 4.1,1 Equipo para homogeneización.
 - 4.1,2 Equipo para congelar oclusiones fluidas.
- 5 SIGNIFICADO DE LOS DATOS OBTENIDOS POR METODOS NO DESTRUCTIVOS.
 - 5.1 IMPORTANCIA DE LA TEMPERATURA Y SALINIDAD DE LAS OCLUSIONES FLUIDAS COMO EVIDENCIA DE LA COMPOSICION DE LOS FLUIDOS MINERALIZANTES.
 - 5.2 RELACION DEL AMBIENTE QUIMICO CON LOS FACTORES ANTERIORES (TEMPERATURA, PRESION Y SALINIDAD) Y SU INFLUENCIA EN LA EVOLUCION DE LOS FLUIDOS.
 - 5.3 PARAGENESIS Y ZONEAMIENTO.

- 6 DISCUSION DEL ESTUDIO POR OCLUSIONES FLUIDAS.
 - 6.1 SUPOSICIONES Y LIMITACIONES.
 - 6.2 CAMBIOS DEBIDOS A RECRISTALIZACION.
 - 6.3 PRESION Y DENSIDAD ESTIMADAS.
- 7 TECNICA DE MUESTREO.
 - 7.1 MINERALES SUSCEPTIBLES DE SER ANALIZADOS.
 - 7.2 REPRESENTATIVIDAD DE LAS MUESTRAS COMO INDICE DE MINERALIZACION PRIMARIA.
 - 7.3 DENSIDAD DE MUESTREO.
- 8 EXPLORACION MINERA POR OCLUSIONES FLUIDAS.
 - 8.1 RELACION GENETICA ENTRE ROCAS IGNEAS Y MINERALIZACION.
 - 8.2 SITUACION DE LA FUENTE DE MINERALIZACION.
 - 8.3 CRONOLOGIA RELATIVA.
 - 8.4 PROFUNDIDAD DE LOS CUERPOS MINERALIZADOS.
 - 8.5 EXTENSION VERTICAL DEL CUERPO MINERALIZADO, Y PROBLEMAS DE DEPOSITACION MINERAL.
 - 8.6 PARAGENESIS Y ZONEAMIENTO.
 - 8.7 IMPORTANCIA DE LA TEMPERATURA Y SALINIDAD DE LAS OCLUSIONES EN LOS PORFIDOS CUPRIFEROS.
- 9 APLICACIONES DEL METODO DE LAS OCLUSIONES FLUIDAS Y DATOS QUE APORTAN.
 - 9.1 COMPOSICION ISOTOPICA
 - 9.2 EDAD ABSOLUTA.
- 10 EJEMPLOS DE ESTUDIOS POR EL METODO DE OCLUSIONES FLUIDAS (DATOS OBTENIDOS Y SU INTERPRETACION).
 - 10.1 EJEMPLOS MUNDIALES.
 - 10.2 EJEMPLOS MEXICANOS
- 11 BIBLIOGRAFIA.
- 12 ILUSTRACIONES.

Fig 1 a) Representación diagramática de 7 etapas sucesivas en el desarrollo de una espiral de crecimiento.

b) Zona de crecimiento imperfecto (P) susceptible de capturar oclusiones fluidas.

Fig. 2 Diagrama de Temperatura-Densidad para el agua.

Fig. 3 Relación entre el punto de fusión y el contenido de NaCl disuelto en el agua.

Fig. 4 Diagramas que muestran las partes integrantes de la planta térmica.

Fig. 5 Diagrama de Presión-Composición de fases líquida y gaseosa coexistencia en el sistema NaCl-H₂O.

FOTO 1 FOTOMICROGRAFIA (X 35) mostrando una oclusión fluída en un cristal de fluorita del cerro del Pilote, distrito La Encantada, Coah. compuesta por un líquido salino, una burbuja (esférica) y un cristal cúbico de Na Cl. (tomada por el Dr. Kesler).

FOTO 2 FOTOMICROGRAFIA (X 35) que muestra una oclusión muy compleja compuesta por una burbuja de vapor, otra burbuja menor formada por un líquido no identificado y cristales de sal y calcita. Cristal de fluorita (misma localidad de la foto 1) (Tomada por el Dr. Kesler).

FOTO 3 FOTOMICROGRAFIA (X10) en la que se observan las zonas de crecimiento imperfecto (partes oscuras). Cristal de fluorita de Cuatro Palmas, Coah., (tomada por el Dr. Kesler).

En la actualidad la exploración geológica-minera, así como el estudio de la génesis de los yacimientos han tenido que auxiliarse o basarse en las Geociencias, e inclusive acudir a la ciencia pura y aplicada para la solución de algunos problemas.

El resultado ha sido una exploración y un estudio de génesis de yacimientos más científicos que en épocas anteriores. Esto se puede observar en los trabajos contenidos en las publicaciones de información y divulgación geológico-científicas más comunes, por ejemplo *Economic Geology*, *International Geological Review*, etc.

Dentro de los métodos científicos utilizados en el mundo, principalmente en los países desarrollados, ha desarrollado en particular el estudio de oclusiones fluidas, acompañado en ocasiones de estudios de isótopos estables, texturas paragenéticas, composición química con microsonda electrónica, etc.

Dada la cantidad de trabajos realizados por los geocientíficos interesados en las oclusiones fluidas, se han organizado congresos mundiales dedicados por completo al mejor conocimiento, práctica y difusión de este tipo de estudios. Dentro del curso de actualización para graduados impartido en Italia en 1975, tuvo un lugar importante la serie de conferencias dictadas por el decano de los estudios de oclusiones fluidas en América, Edwin Roedder.

Hasta ahora los estudios de oclusiones fluidas hechos en yacimientos mexicanos han sido realizados por post-graduados de universidades norteamericanas e inglesas y presentados como doctorales. De estos trabajos sólo conocemos resúmenes; otros más escasos se encuentran en los archivos de las compañías mineras sin publicar.

En México el método no es muy conocido y no existe a la fecha ningún trabajo publicado realizado por geólogos mexicanos, tal vez porque poca gente domina sus bases, pues no ha sido estudiado a fondo. Inclusive de las personas que se han especializado en el extranjero ninguna lo ha hecho en esta rama, algunas de estas personas conocieron este tipo de estudios pero no se han dedicado a ellos, posiblemente por la carencia de equipo especializado y personal entrenado, lo cual además hace que estos estudios tengan un costo un poco elevado.

En 1974 vino a México el Dr. Stephen E. Kesler, de la Universidad de Toronto, Canadá. Este investigador realizó un trabajo de oclusiones fluidas e isótopos de azufre en yacimientos de Pb, Zn y Fluorita en el norte de Coahuila, y para ese fin montó un laboratorio en el Departamento de Geoquímica del Consejo de Recursos Minerales. En este proyecto tuve la oportunidad de colaborar con el Dr. Kesler y de esa manera aprender el método, haciendo estudios de las muestras en el laboratorio. Esto se complementó con los conoci-

mientos adquiridos en una fase didáctica de campo, la cual, comprendió una visita con el Dr. Kesler a las minas de Taxco, Gro. y otra al Distrito de Pachuca, Hgo.

El que escribe estaba interesado en realizar como tesis un trabajo de detalle en una de las áreas trabajadas a escala regional por el Dr. Kesler (Distrito La Encantada), pero dado que en el trabajo sería necesaria la exposición de los métodos de estudio; evaluar su precisión y el significado de las mediciones, y que se usarían además términos y conceptos poco conocidos o comunes, se intentó un capítulo de introducción. Este capítulo se amplió hasta convertirse en el trabajo actual debido a que había que tomar en cuenta muchos factores, discutir y sentar algunas bases fisicoquímicas, termodinámicas y geoquímicas para la interpretación de resultados, así como esbozar algunos lineamientos para la toma de muestras.

Además, de esta manera en lugar de atacar un problema en particular, se trató de dar idea del alcance de estos estudios, de su versatilidad, sus problemas, limitaciones, de la gran cantidad de datos que aportan, así como de la factibilidad de resolver muchos de nuestros actuales problemas de exploración y génesis de yacimientos.

Dada la falta de literatura de esta especialidad en el país, sería estimulante que este trabajo, que es el primero sirviera para interesar un poco a otras personas y popularizar en México el estudio de oclusiones fluidas.

EL ESTUDIO DE OCLUSIONES FLUIDAS EN LAS ROCAS COMO TECNICA DE EXPLORACION MINERA.

1 INTRODUCCION.

En años recientes el estudio de las oclusiones fluidas ha alcanzado un amplio desarrollo dentro del campo de la prospección geoquímica-minera.

Durante el crecimiento de los cristales a partir de una solución mineralizante, porciones de esa solución quedan ocluidas en cavidades muy pequeñas que permanecen como testigos tanto de su composición como de las condiciones fisicoquímicas prevalecientes en esa etapa particular de diferenciación del fluido. En los minerales transparentes pueden determinarse por vía óptica la temperatura de homogeneización (temperatura mínima original) y la salinidad de las oclusiones, sometiéndolas a procesos termodinámicos. En minerales opacos no existe aún una técnica de análisis confiable.

El equipo requerido consiste esencialmente de un microscopio petrográfico con objetivo de distancia focal grande (35 X), una platina térmica (temperatura máxima de 600° C), un dispositivo de congelamiento (temperatura mínima de -40° C), un termopar de hierro-constantán y un potenciómetro de alta precisión. Otras propiedades pueden determinarse mediante sistemas de análisis complejos.

El campo de estudio de las oclusiones fluidas puede complementar los métodos tradicionales de estudio de la paragénesis y alteración, porque mientras éstos estudian el efecto producido por los fluidos mineralizantes, el análisis de las oclusiones se efectúa de manera directa sobre los fluidos mismos.

Estas constituyen, por otra parte, el único vestigio de la fase volátil que desempeña un papel importante en la mineralización.

La objetividad de la técnica de oclusiones fluidas dentro de la exploración puede resumirse en los siguientes puntos:

Estimación de la posición y características del foco mineralizante.

Delimitación de la zona con mayores perspectivas económicas.

Clasificación del yacimiento.

Predicción probable de la secuencia paragenética y del zoneamiento

Determinación del gradiente térmico, con el que se puede aproximar la extensión vertical del depósito, situando los límites superior e inferior de mineralización.

Además, como método de investigación, conduce a una mayor comprensión de la génesis de los yacimientos minerales.

2. TEORIA DE LAS OCLUSIONES FLUIDAS.

2.1 INTRODUCCION

2.1.1 Historia.

Aunque se tiene referencia de que las oclusiones fluidas ya eran conocidas desde los tiempos de San Agustín, y que en el siglo XI ya hay una descripción específica realizada en Asia Central por Abu Reykhan Al-Birundi, la primera referencia directa sobre ellas es la Brewster quien, en 1923, llamó la atención acerca de la presencia de fluidos en las cavidades de ciertos minerales como el cuarzo, berilo y topacio. Posteriormente muchos otros autores se han interesado y dedicado a este tipo de estudios, pudiéndose mencionar entre ellos a Sorby (1858), Zirkel (1876) y Rosenbuch, quienes aportaron una amplia y variada cantidad de datos (algunos útiles hasta la fecha, y otros erróneos). Todos estos datos han llegado a nosotros por los trabajos de compilación realizados por Smith (1953), el cual resume la mayoría de los trabajos efectuados en el Mundo Occidental hasta

1953. Los estudios desarrollados en la U.R.S.S. han sido compilados por Ermakov (1950). Más recientemente E. Roedder (U.S.G.S.) ha corregido y reinterpretado los datos y estudios hasta 1970. A partir de 1960 hasta la fecha se ha duplicado la cantidad de artículos de científicos como Kesler, Takenouchi, Roedder, Ohomoto, etc.

2.1.2 DEFINICIONES

Las oclusiones fluidas son pequeñas cantidades de soluciones acuosas que estuvieron presentes durante la formación de minerales metálicos y otros asociados y que se encuentran preservadas en diminutas cavidades como testimonios de fluidos antiguos. Por su origen, se pueden distinguir tres tipos principales de oclusiones:

a) Oclusiones Primarias.—Son aquellas capturadas durante el crecimiento de un cristal. Contienen fluido a partir del cual se precipitó el mineral por lo que el fluido ocluido y el mineral que lo encierra son contemporáneos. Generalmente se encuentran en planos paralelos a las superficies de crecimiento del cristal.

b) Oclusiones Secundarias.—Su formación es posterior a la cristalización del mineral anfitrión y ocupan fracturas, las cuales son rellenadas y selladas por soluciones posteriores.

c) Oclusiones Pseudosecundarias.—Se forman anteriormente a la completa cristalización del mineral anfitrión, pero se alojan en fracturas.

2.1.3 IMPORTANCIA

Los fluidos mineralizantes contienen una parte volátil muy importante que permanece como traza en los minerales. Esta traza son las oclusiones fluidas, las que constituyen buenas evidencias de los fluidos originales que existieron durante la génesis de los yacimientos y a partir de los cuales se formaron. Además, son testigos evidentes de algún otro suceso en la historia geológica de dichos yacimientos (oclusiones

primarias y pseudosecundarias en el primer caso, y secundarias en el segundo).

Las oclusiones son importantes para descubrir los mecanismos de transporte y depósito de minerales económicos, porque desempeñan el papel de auto-claves naturales. En consecuencia tienen una gran aplicación en la explotación minera, ya que constituyen un método de Geotermometría muy confiable, generalmente el más aplicable de todos los termómetros geológicos conocidos.

2.2 MECANISMOS DE CAPTURA.

Los mecanismos de captura que existen para atrapar las oclusiones fluidas son muy diversos. A continuación se expondrán los más importantes:

OCCLUSIONES FLUIDAS PRIMARIAS.

1).—Muchos cristales crecen como una serie de bloques paralelos, a partir de una misma área de crecimiento (Buerger, 1932) algunos bloques se desarrollan más rápidamente que otros, de manera que pueden llegar a rodear a un bloque de menor crecimiento, formando las paredes de un cristal negativo; más tarde los bloques se inclinan ligeramente y se uniformiza su crecimiento ocluyendo parte del fluido.

2).—Otra forma de captura podría ser de la siguiente manera: el crecimiento de estos bloques es en espiral (Figura 1), y en el lugar donde tres espirales se tocan se crea una zona de crecimiento imperfecto (Figura 1b) que puede capturar oclusiones alargadas en el sentido de crecimiento del cristal (Fig. 1).

3).—Un proceso también importante se debe al cambio local de la concentración química de los fluidos que afecta fuertemente la cristalización normal, y que ha sido descubierto en los cristales sintéticos de sal (Sheftal, 1957). El mecanismo es el siguiente: la solución alimentadora llega primero a los bordes de la superficie de un cristal, y al

faltar la concentración necesaria en el centro, se desarrollan cristales esqueléticos, que después son sellados formando oclusiones fluidas.

4).—Una aceleración rápida en el crecimiento de un cristal puede formar una ligera capa dendrítica con entradas muy irregulares (Schlichta, 1968), si después se normaliza el crecimiento de dicho cristal se cubren las irregularidades formando muchas oclusiones, proceso muy común en los cristales de fluorita.

En resumen, cualquier proceso que altere el crecimiento de un cristal puede provocar la captura de oclusiones fluidas.

Oclusiones Fluidas Secundarias.

Si en presencia de un fluido de cierta capacidad de disolución se produce el fracturamiento de un cristal, el fluido que lo rodea penetra en la fractura, disolviendo y recristalizando las paredes; durante este proceso se sella la fractura, atrapando oclusiones secundarias.

Oclusiones Pseudosecundarias.

En el transcurso de su crecimiento un cristal puede fracturarse y el fluido a partir del cual se están formando los bordes penetra al centro del cristal. El fluido puede haber sufrido un cambio de concentración y seguramente una variación mínima de temperatura (el autor ha medido cambios de temperatura entre 5° y 8°C de las oclusiones primarias del centro a las de los bordes en cristales bien formados de fluorita), entonces dos oclusiones adyacentes tendrán diferentes características. Los cambios de presión, temperatura o composición de la solución que rodea el cristal pueden ser la causa de fracturamiento y éste a su vez responsable de la captura de oclusiones pseudosecundarias.

Otro proceso común en la formación de oclusiones pseudosecundarias es la lixiviación hidrotermal, la cual remue-

ve una cara, línea o área uniforme de un cristal, que principalmente por irregularidades de las dimensiones atómicas, o por espacios intersticiales es más soluble que el resto del cristal y se disuelve más rápidamente.

2.3 CRITERIOS PARA DISTINGUIR OCLUSIONES PRIMARIAS DE LAS SECUNDARIAS Y PSEUDOSECUNDARIAS.

Hasta ahora, la fuente de error más común es la dificultad de establecer plenamente bajo el microscopio —en todos los casos— si una oclusión es primaria, secundaria o pseudosecundaria, lo que ha sido la causa primordial de la obtención de datos ambiguos. Los criterios más comunes para establecer esta importante diferencia son los siguientes (Roedder, 1967):

Las oclusiones primarias generalmente ocurren en cristales que crecieron en espacios abiertos, en cavidades y vetas. Desafortunadamente muchos de esos cristales se encuentran fracturados y no siempre es posible diferenciar cuando el fracturamiento es contemporáneo con el crecimiento o es posterior, ya que como se anotó anteriormente las condiciones termodinámicas y fisicoquímicas pueden ser la causa de dicho fracturamiento.

Las oclusiones primarias ocurren regularmente aisladas y en cristales eudrales negativos.

Las secundarias aparecen generalmente en grupos, son planas y ocurren en fracturas y planos con una orientación cristalográfica arbitraria.

Las oclusiones pseudosecundarias se encuentran alojadas en planos de cruce o en fracturas que terminan abruptamente contra una superficie de crecimiento.

2.4 NATURALEZA DEL MATERIAL CAPTURADO.

De acuerdo con las cantidades de sales que han sido encontradas en las

muestras de fluidos mineralizantes (oclusiones fluidas), y teniendo en cuenta que la salinidad eleva proporcionalmente la temperatura y presión de vaporización, se ha determinado (Sourirajan y Kennedy, 1962) que las condiciones críticas para la coexistencia de una fase líquida y una fase gaseosa en condiciones corticales implican temperaturas del orden de 500° a 600° C, y como la mayoría de los yacimientos hidrotermales se formaron en condiciones subcríticas es de esperar que hayan sido formados generalmente —aunque no siempre— a partir de una fase líquida. Eventualmente se han encontrado evidencias de alguna fase gaseosa presente durante la génesis de algunos yacimientos.

Por la razón antes citada se considera que las oclusiones más comunes y abundantes fueron formadas por captura de fluidos en una sola fase homogénea, pero que al ser observadas presentan dos fases: líquido y gas, debido a que se examinan a temperaturas y presiones inferiores a las que fueron capturadas. Esta separación de fases se produce porque al decrecer la temperatura decrece la solubilidad del fluido. Tomando en consideración que el coeficiente volumétrico de expansión termal para el agua es cinco veces mayor que para la mayoría de los minerales, la cavidad se reduce mucho menos que el fluido interior y cuando la presión interna baja, la energía cinética de las partículas de gas baja también, entonces la separación de gases y líquidos forma una burbuja.

Algunas oclusiones están formadas además de una fase líquida y una gaseosa, por una fase sólida; esta última representada comúnmente por cristales de NaCl, de minerales metálicos, no metálicos, etc. Esta fase puede tener dos orígenes muy diferentes:

1).—Es posible que se haya precipitado posteriormente al confinamiento de la oclusión; cristalizando, por tanto, a

partir del fluido capturado. Los cristales resultantes han sido llamados "minerales hijos", ya que se han formado a partir del fluido ocluido.

2).—Puede ser que el líquido a partir del cual creció el cristal llevase algunas partículas sólidas en suspensión, las que podrían actuar según el mecanismo antes citado (Capítulo 2.1), formar oclusiones y servir de núcleo de crecimiento de un cristal. En este caso las oclusiones resultantes serían mixtas, es decir, líquidas y sólidas.

OCCLUSIONES DE AMBIENTE HETEROGENEO

La captura de gas o vapor primario con la fase líquida origina un sistema heterogéneo de dos fases en el tiempo de la captura, lo cual es raro (principio del Capítulo 2) pero algunas oclusiones muestran evidencias de ello; este fenómeno se reconoce por la diferencia en la proporción de fases presentes en las oclusiones de una misma generación (contemporáneas). Entonces se dice que los fluidos estuvieron en la curva de ebullición al ser capturados (Fig. 3).

Es posible encontrar dos fases líquidas inmiscibles dentro de una misma oclusión, como por ejemplo: gotas de petróleo en fluorita en varios yacimientos de Coahuila (Kesler, 1974), CO₂ líquido o H₂S inmiscible en solución acuosa, el petróleo puede haber sido arrastrado por los fluidos al pasar por rocas generadoras o puede resultar de la actividad hidrotermal sobre los bitúmenes o partículas de materia orgánica que el fluido extrajo de las rocas encajonantes y transportó hasta el lugar del depósito.

2.5 FUGA Y CONTAMINACION DE OCCLUSIONES.

La posibilidad de movimiento del fluido ocluido hacia afuera o la penetración de algún líquido exterior a la oclusión son importantes. Una de las

causas de estas fugas es la existencia en los cristales de zonas o direcciones de porosidad debidas a dislocamientos, diferencias de concentraciones en soluciones generadoras, etc., pero son escasas y en ocasiones es posible detectarlas al microscopio. Por otra parte, la difusión iónica podría ser otro proceso viable para la fuga del líquido, pero necesita elevados gradientes de temperatura que aunque existen en la naturaleza son fácilmente detectables.

Se ha logrado en el laboratorio movimientos de fluidos a través de las paredes de las cavidades; dichas paredes tienen espesores del orden de .5 a .75 mm. por lo que ha sido necesario aplicar fuertes gradientes de presión y temperatura (270-1500 Atm. y superando la temperatura de homogeneización), en un corto tiempo. Estas condiciones son difícilmente obtenibles en la naturaleza, pero cuando llegan a ocurrir son perfectamente identificables. Así, se han encontrado oclusiones con un escape completo de fluidos en zonas de deformación intensa, y se han usado para fechar períodos de deformación y metamorfismo local (Ypma, 1963). También han aportado información útil para esclarecer la edad y relación de diques y mineralización, problema que frecuentemente causa controversias y no siempre podría ser aclarado totalmente.

Independientemente de estos casos especiales, en condiciones normales en la naturaleza no ocurre la fuga o contaminación del fluido ocluido. Como evidencias de esto existen el zoneamiento de temperaturas, el zoneamiento de composición (salinidad) y la presión dentro de las oclusiones, que frecuentemente es de vacío. Grandes diferencias se han encontrado en la relación Deuterio/Hidrógeno entre el agua de oclusiones encontradas en esfalerita en cristales proyectados en espacios abiertos (Creede, Colorado), y el agua subterránea que se supone ha bañado a estos cristales a una presión de 30 a

40 atmósferas durante millones de años (Roedder, 1972).

3 METODOS ANALITICOS USADOS Y SU VALIDEZ

Existen hasta la fecha una gran cantidad de métodos usados para la obtención de datos geoquímicos y termodinámicos que van desde su análisis químico normal (en oclusiones mayores de 1 cm³, aunque por desgracia estas oclusiones se encuentran en pocas partes del mundo, por ejemplo Minas Gerais y Río Grande Do Sul, Brasil. Taxco, Gro., México) hasta el uso de la microsonda eléctrica pasando por estudios de rayos X, técnicas petrográficas, etc.

Los métodos se pueden agrupar en dos: destructivos y no destructivos; a continuación serán analizados cada uno de ellos.

3.1 METODOS NO DESTRUCTIVOS

Son principalmente los métodos microscópicos que se basan en la identificación de las distintas fases, apoyándose en las múltiples propiedades ópticas que presentan. Son métodos cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos.

La composición de la fase líquida se identifica por características como fluidez o viscosidad, color, tensión superficial de los líquidos, índice de refracción comparativo, etc.

La fase sólida se analiza por las técnicas petrográficas pero debido a la naturaleza de la muestra existen severas limitaciones, por ejemplo: el tamaño común de la muestra es de 10 micras de diámetro: los minerales no tienen un espesor conocido o uniforme, la observación de la birrefringencia y ángulos de extensión están limitados por las propiedades ópticas del mineral

anfitrión. Sin embargo, se pueden observar el hábito cristalino, color, pleocroísmo e índice de refracción relativo.

3.1. OBTENCION DE DATOS FISICO-QUIMICOS (TEMPERATURA, SALINIDAD)

La utilización de las oclusiones fluidas como termómetros geológicos ha sufrido incremento debido a su confiabilidad. Se han desarrollado los siguientes métodos:

a) Método de Homogeneización. Este método sirve para determinar la temperatura y se basa en lo siguiente:

De acuerdo con lo establecido en el capítulo 2 (Teoría de las oclusiones fluidas) las oclusiones se formaron a partir de una sola fase líquida homogénea, que por causas fisico-químicas se disocia en dos fases y se crea una burbuja. Sorby en 1888 propuso que este proceso puede ser reversible por calentamiento de las oclusiones, así se aumenta la solubilidad del líquido, se eleva la presión interna, se expande el líquido y la energía cinética de las partículas gaseosas no le permiten a la burbuja seguir estable, por lo tanto desaparece, entonces se dice que el sistema se homogeneizó en una fase. La temperatura de homogeneización más una corrección por la diferencia de la presión a la que se realiza el proceso reversible y la presión de captura, da la temperatura de formación del mineral anfitrión. El proceso es válido sólo en oclusiones primarias, y ha sido comprobado en cristales sintéticos. Mediante este método es posible obtener algunos datos sobre la composición del fluido si se puede estimar su coeficiente de expansión térmica en función de la salinidad, (lo que es susceptible de realizarse en oclusiones fluidas alargadas). Además basándose en la solubilidad de algunos minerales hijos, durante este fenómeno se puede identificar, por ejemplo el KCl que es ocho veces más soluble que el NaCl.

Algunas oclusiones se homogeneizan en una fase gaseosa, y a la temperatura ambiente la fase líquida aparece subordinada a la fase gaseosa. Este tipo de oclusiones se supone que se formaron a partir de fluidos en fase de vapor; no son muy abundantes llegando más bien a ser escasos en el registro geológico. Por esta causa no han sido muy estudiadas; sin embargo se piensa que la fase gaseosa tiene poca posibilidad en la formación de mineral ya que por datos empíricos, cálculos y razonamientos, esta fase, por sí sola, no tiene un papel importante en el transporte de minerales económicos.

b) Método de Congelamiento. El punto de congelación del líquido permite hacer una estimación de la concentración de sales en el fluido (figura 4) además de que proporciona a otros datos composicionales cuantitativos. Por otra parte el comportamiento de una oclusión sometida a congelamiento proporciona datos útiles; así el CO₂ hidratado gaseoso cristaliza a partir de la burbuja y se puede identificar.

3.2 METODOS DESTRUCTIVOS.

La finalidad de estos métodos es la realización de un análisis cuantitativo completo y exacto del contenido total de una oclusión. Para ello, se ha usado una gama de métodos cualitativos y cuantitativos, se ha analizado el gas, el líquido y el sólido, tanto sus constituyentes principales como los menores, y se han hecho mediciones del pH (H⁺), Eh (e⁻), así como estudios isotópicos de elementos radiactivos y estables. Se han determinado elementos en trazas como H, S, O₂ en el espectrómetro de masas. El problema más serio es la fuga o contaminación al abrir las oclusiones que, debido a la naturaleza de la muestra, es muy difícil evitar.

Los minerales hijos removidos de una oclusión abierta pueden ser identificados por pruebas petrográficas, por rayos X y/o por microsonda electrónica, o pue-

den ser dejados en la cavidad y se drenan los fluidos originales introduciendo otros de índice de refracción conocido para hacer pruebas de inmersión e identificar los minerales sin extraerlos y evitar la contaminación.

Una prueba burda pero efectiva para detectar las sustancias aromáticas en las oclusiones consiste en romper las cavidades, produciéndose un olor peculiar. De este modo se han detectado pequeñas cantidades de H₂S y de hidrocarburos en las oclusiones en fluorita de Coahuila (Distrito La Encantada).

3.3 COMPOSICION DE LAS OCLUSIONES FLUIDAS

Generalmente en las oclusiones se encuentra un líquido de baja viscosidad y una burbuja que puede ser de vapor de gas, con un volumen menor que el del líquido. Este líquido es una solución acuosa con un contenido de sales que fluctúa de 0 a 40% en peso. Las sales que se encuentran en mayores cantidades son: Cationes: Na⁺, K⁺, Ca²⁺. Aniones: Cl⁻, SO₄²⁻, SiO₃²⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻.

Los constituyentes más abundantes son: Na⁺, Cl⁻ y CO₂ líquido o gaseoso.

Por lo general la burbuja tiene presión de vacío. Pueden existir dos fluidos inmiscibles en fase líquida, siendo los más comunes el H₂O y CO₂ líquido. También es posible encontrar dos burbujas, una de vapor de agua o CO₂ y otra comúnmente de H₂S (S. Kesler, Com. Pers.)

Se han encontrado minerales opacos dentro de las oclusiones de algunos yacimientos y se ha comprobado que precipitaron a partir del fluido ocluido; su rareza y pequeño tamaño han servido para situar los límites de las cantidades de minerales metálicos que pueden ser transportados y precipitados de los fluidos mineralizantes, por descenso de temperatura y disminución

de la salinidad. El rango común va de 1 a 10 p.p.m, aunque se han encontrado concentraciones de sulfuros de 1%.

Algunos cristales de cuarzo que crecieron en cavidades en rocas sedimentarias tienen materia orgánica, y se han identificado compuestos como metano y etano. Dicha materia orgánica está presente como asfalto y como aceite amarillo (petróleo), formado por alteración de la materia orgánica o arrastrado de otras rocas generadoras. Puede encontrarse en yacimientos de alta y baja temperatura, desde yacimientos de scheelita hasta depósitos de mercurio. En muchos yacimientos de Pb-Zn y de fluorita (Coahuila) se encuentran estos tipos de oclusiones.

4 APARATOS USADOS—PRINCIPIOS DE OPERACION Y CALIBRACION DE ESTOS (METODOS NO DESTRUCTIVOS)

4.1 EQUIPO

El equipo necesario para estudiar oclusiones fluidas por métodos no destructivos y obtener información aplicando el método de homogeneización, consiste de dos partes principales: el sistema de observación y el sistema de calentamiento.

4.1.1 Equipo para Homogeneización consiste en lo siguiente:

a) Partes del sistema de observación: microscopio petrográfico, objetivo (35x) de longitud focal grande y fuente de luz. Para lo posterior se considera que es necesario recalcar que para la observación se debe usar un objetivo de distancia focal grande ya que de lo contrario dicho objetivo se puede dañar debido al calor irradiado por la platina.

b) Partes del sistema de calentamiento: platina térmica (diseñada y fabricada en la Universidad de Toronto,

Canadá, por el Dr. S. Kesler), un transformador variable (110-220V), un termopar de fierro-constantán, un potenciómetro, lápices calibradores de cera (funden a temperaturas específicas) y pinzas.

El sistema de calentamiento puede producir y medir temperaturas con un rango de 0-600°C, pero opera mejor abajo de 400°C. El termopar conectado al potenciómetro es lo que mide la temperatura producida por la platina térmica, la cual ha sido construida de tal manera que se evite o se reduzca al mínimo el gradiente de temperatura dentro de ella.

Calibración del equipo de calentamiento. El equipo de calentamiento debe ser calibrado una vez por semana para asegurarse que está dando temperaturas correctas. Para hacer la calibración se ponen en la platina las ceras que funden a temperaturas constantes, se eleva la temperatura y cuando las ceras se funden se anota la temperatura leída en el termopar, esto se hace con 6 u 8 ceras y los datos obtenidos se grafican y se calcula la corrección, si es necesaria.

4.1.2 Equipo para Congelar Oclusiones Fluídas.

Este equipo consiste de un sistema de observación, con un potenciómetro y un termopar discutidos arriba.

El sistema de congelamiento consta de un dispositivo para congelar muestras, tanque de nitrógeno con regulador, termo especial para líquidos muy fríos, tubo de cobre y hule con válvulas para conducir el nitrógeno desde el tanque hasta el dispositivo, hielo seco e isopropanol.

El nitrógeno sale del tanque y viaja a través del tubo de cobre y hule hacia el dispositivo de congelamiento; en este trayecto el tubo forma un serpiente que se encuentra dentro del termo, el cual está lleno de una mezcla

de hielo seco e isopropanol, de modo que el nitrógeno se enfría y así entra al dispositivo de enfriamiento.

La temperatura del dispositivo es inversamente proporcional a la cantidad de gas enfriado que entra al mencionado dispositivo. La mezcla de hielo seco e isopropanol da una temperatura de -78°C con la cual se obtienen en el dispositivo temperaturas de -40°C.

a) Calibración del equipo del congelamiento. Es necesario hacer una calibración cuidadosa por lo menos una vez al mes, para estar seguros que la temperatura medida por el termopar es la temperatura verdadera. Este proceso es de importancia primordial ya que el rango de temperaturas que se está midiendo es muy reducido (de -30° a 0°C) y un error pequeño en uno o dos grados en la temperatura puede significar una variación de 2-4% de NaCl.

El método más simple para calibrar el equipo es usar soluciones con cantidades conocidas de NaCl como 0%, 5%, 10%, 15 por ciento y 20 por ciento, las cuales pueden variar según el rango de salinidad encontrado en las oclusiones con las que se trabaje. Se pone un poco de cada solución en recipientes plásticos y se congelan en hielo seco; después se pone un trozo de cada hielo en el dispositivo y se mide su temperatura de fusión, y así se puede considerar la magnitud de la corrección por aparato.

5 SIGNIFICADO DE LOS DATOS OBTENIDOS POR METODOS NO DESTRUCTIVOS

Estos datos son especialmente útiles como claves para entender la naturaleza del fluido mineralizante, ya que es muy común pensar que el fluido formador de un yacimiento dado ha sido rico únicamente en los constituyentes que depositó, es decir, rico en

proporción a la abundancia del depósito. Sin embargo, hasta antes del uso del método de oclusiones fluidas, poco o nada se sabía acerca de los constituyentes volátiles y sales solubles que deben haber intervenido en la formación. Esta parte se conserva en oclusiones fluidas complejas.

5.1 IMPORTANCIA DE LA TEMPERATURA Y SALINIDAD DE LAS OCLUSIONES FLUIDAS COMO EVIDENCIA DE LA COMPOSICION.

En base a la temperatura, salinidad y presión, se ha determinado cuáles minerales son capaces de coexistir y sus concentraciones relativas.

a) Presión. Los compuestos químicos en medios acuosos son estables cuando se encuentran bajo presiones parciales de sustancias importantes como O_2 , CO_2 y S.

a) Temperatura. Con la temperatura generalmente aumenta la solubilidad de los líquidos, sólidos y gases y la cristalización está controlada principalmente por el descenso de temperatura.

c) Salinidad. Algunas evidencias muestran que las altas concentraciones de sales en los fluidos son responsables de solubilidades de minerales inesperadamente altas. Para minerales relativamente insolubles como galena, oro y platino han alcanzado soluciones aparentes de 2.350 p.p.m. para galena, y de 100 a 200 p.p.m. para oro y platino en condiciones de $400^\circ C$ y concentración de 15% de KCl y NaCl; resultados similares se obtienen con uranio, cobre y níquel.

Por tanto, los principios fisicoquímicos son útiles para saber las condiciones de los minerales en particular y las características necesarias para que permanezcan juntos. Además para deducir la clase de elementos que se pueden esperar de determinados tipos de solución en medios definidos.

5.2 RELACION DEL AMBIENTE QUIMICO CON LAS FACTORES ANTERIORES (TEMPERATURA, PRESION Y SALINIDAD) Y SU INFLUENCIA EN LA EVOLUCION DE LOS FLUIDOS HIDROTERMALES.

La primera etapa en la formación de fluidos hidrotermales tiene lugar a partir del magma o de sus productos cristalinos; posteriormente se elevan por diferencias de densidad pudiendo constituir yacimientos hidrotermales. Estos fluidos se separan del magma a presiones totales menores de 20.000 atmósferas, y temperaturas menores de $1,800^\circ C$. Los fluidos contienen CO_2 y una concentración de cloruros de 3% en peso (6M) distribuidos aproximadamente de la siguiente manera: 35M NaCl, 0.2M KCl, 0.04M HCl y 0.05M $CaCl_2$. Debido a la presencia de HCl, las soluciones son ligeramente ácidas, siendo posible además que se enriquezcan en compuestos (minerales económicos y no económicos) contenidos en las rocas por las que atraviesan.

Existen algunos problemas para comprender el transporte de minerales económicos en un medio rico en sulfuros, y la mayor parte de los metales básicos no ferrosos se encuentran así: entonces, el ion (S^-) debe estar presente en grandes cantidades en el sitio de depósito. Sin embargo, dicho ion es altamente insoluble. Algunos investigadores pensaban que los iones metálicos venían en una solución y los iones S^- en otra, pero más tarde se comprobó que los aniones y los cationes son de una misma fuente. Se ha pensado que los minerales son transportados en complejos iónicos (Stanton, 1972); estos complejos son asociaciones de dos o más especies simples y que bajo las mismas condiciones no son capaces de existencia independiente. Particularmente dos grupos son muy importantes: Cloruros y Bisulfuros-Polisulfuros.

Complejos Iónicos.

a) Complejo de los Cloruros. Los principales compuestos son HCl, NaCl, KCl; los dos últimos son muy estables a temperaturas de 100-364°C y presiones de 1-2 000 atmósferas.

Una solución de NaCl-HCl-H₂O en equilibrio a 300°C puede disolver más de 600 p.p.m. de plomo el cual se transporta bajo la forma de PbCl₂ y PbCl₄²⁻, condición suficiente para formar yacimientos económicamente explotables. Un comportamiento similar ha sido observado en los otros minerales básicos en medios de alta concentración de cloruros. Estos cloruros tienen gran importancia en soluciones ligeramente ácidas, pues en las soluciones alcalinas son los sulfuros complejos los transportadores más eficaces.

b) Bisulfuros-polisulfuros. En un sistema de H-S-O el Zn en forma de ZnS tiene una solubilidad de 1 mg/litro, sin embargo, en presencia de HS- se forma el complejo Zn(HS)₃⁻ con una solubilidad superior a 2,700 mg/litro.

El plomo en un sistema de este tipo (alcalino) forma el complejo Pb(HS)₃⁻ que tiene una solubilidad 10 veces mayor que el PbS, pero no comparable con la solubilidad de los cloruros. En este sistema las condiciones requeridas son: pH alto, Eh bajo, abundancia de HS- bajo la forma de bisulfuros para la formación de iones complejos.

c) Comportamiento de algunos otros minerales. La solubilidad de la fluorita está afectada por la presión, temperatura, fuerza iónica y principalmente por la concentración de calcio y NaCl, mientras que el pH no ejerce gran influencia.

La solubilidad de la calcita decrece con el NaCl y aumenta con la presión de CO₂.

La solubilidad del SiO₂ en fluidos hidrotermales es ligeramente indepen-

diente de la concentración de las sales disueltas y esencialmente independiente del pH, pues solo depende de la temperatura y presión; su mayor rango de deposición es de 600-700°C y al bajar la temperatura y presión decrece la solubilidad.

Depósito. De las observaciones anteriores se puede resumir que las causas principales de la solubilidad de los iones formadores de minerales económicos dependen principalmente de la temperatura, presión (de CO₂) y salinidad (datos obtenibles por el estudio de oclusiones fluidas), junto con el pH y Eh; por tanto, los cambios fisicoquímicos del medio y la adaptación del fluido a estos cambios causa la deposición.

5.3 PARAGENESIS Y ZONEAMIENTO

Los minerales metálicos tienen un alto grado de reajuste, lo que les permite estar en constante reequilibrio de acuerdo con las condiciones cambiantes (Stanton, 1972); además, algunos agentes (sustancias oxidantes o ácidos fuertes) posteriores a la génesis de los yacimientos —puesto que son incompatibles con esos ambientes— en ocasiones enmascaran la relación original, como las texturas de depósito y las demás características observables son oscurecidas y generalmente reflejan la última etapa de la historia genética del yacimiento (Barnes y Czamanske, 1967). Esto es debido a que la temperatura de los fluidos aumenta al ocurrir la precipitación, mediante este proceso se disuelven parte de los cristales mostrando corrosión en los bordes (Toulmin y Sydney, 1967). Por las razones anteriores los estudios de texturas y oclusiones se complementan muy bien.

La sucesión, paragénesis y zoneamiento son fenómenos que representan la evolución de los fluidos y su distribución en tiempo (paragénesis y sucesión) y en espacio (zoneamiento). Estos efectos se presentan debido a los

cambios en la solubilidad (la cual es dependiente a su vez de la temperatura, presión y salinidad).

La secuencia deposicional de sulfuros muestra que la movilidad de los minerales metálicos en el fluido transportador deben seguir una secuencia descendente de Hg, Pb, Zn, Cu, Sn, Ni, Fe a Co. El estudio de oclusiones fluidas arroja mucha luz sobre la paragénesis y el zoneamiento, ya que se estudia directamente la causa de estos fenómenos sobre los fluidos mismos.

6 DISCUSION DEL ESTUDIO POR OCLUSIONES FLUIDAS

Algunos geólogos (Ingerson, 1964) no consideran de gran valor el estudio de oclusiones fluidas, ya que una parte del fluido atrapado en un mineral de veta no es representativo del fluido que estuvo moviéndose a través de ésta en el tiempo de formación, porque el fluido no es cien por ciento homogéneo. Esto se refleja en las oclusiones pues no se encuentran dos exactamente con la misma composición. Pero el punto importante es la magnitud de las diferencias, las cuales no son grandes y se reducen por métodos estadísticos.

Hay aseveraciones (Taylor Sr., 1970) en el sentido de que los fluidos capturados no son muestras reales de fluidos mineralizantes, más bien se dice que son el último residuo de la fracción final disponible a partir de la cristalización del mineral. Las oclusiones primarias capturadas en cristales subedrales, ya sean de mena o ganga, están presentes desde los inicios de la mineralización hasta antes de que se termine de formar el cristal. Por tanto, las oclusiones difícilmente pueden representar la última fracción disponible del fluido, debido a que en algunas ocasiones parte del mineral anfitrión ya disuelto en el fluido atrapado y puede seguir cristalizando en las paredes de la oclusión

después de su captura, además se han encontrado minerales hijos de menor temperatura como los encontrados en esfalerita, la cual cristaliza alrededor de 250°C y encerró líquido a partir del cual precipitaron cristales de galena.

Si se recuerda el proceso en el que el fluido comenzó a saturarse con respecto a los componentes del mineral anfitrión de las oclusiones, lo cual pudo ser por pérdida de gases, mezcla con otros fluidos, expansión adiabática, pérdida de calor, reacción con las rocas encajonantes o minerales de vetas, etc., se concluye que el fluido que está pasando por el cristal es la solución de la cual el cristal está creciendo, y si tal fluido es atrapado como oclusión, esa es una muestra del fluido mineralizante.

Después de que el fluido ha pasado por el yacimiento y ya dentro de una veta estéril a donde no hay deposición por cambios químicos con las paredes, este fluido puede ser considerado como el último residuo disponible, pero sólo con respecto a tal yacimiento, ya que de este fluido todavía pueden precipitar algunos minerales de mayor estabilidad y formar otro yacimiento a niveles superiores. Entonces, con respecto al nuevo yacimiento no se podrá considerarlo como un residuo, más bien sería el fluido mineralizante. El problema estriba en seleccionar muestras representativas —problema que será discutido en el capítulo siguiente— ya que se puede obtener información inclusive de las condiciones en que cristalizó el magma, o sea la fuente de los fluidos en vidrio, atrapadas antes de que cristalizaran los silicatos.

Algunos más piensan que la entrada o salida de fluidos contaminan a la oclusión, esto ya se discutió anteriormente. Además hay que considerar que esto es algo así como la determinación de la edad, es muy complejo y hay cosas aún no comprendidas; sin embargo, con trabajos y estudios será posi-

ble aclararlas y cuando esto se haga se obtendrá un arma más poderosa que ahora, aunque, ciertamente no se logrará una panacea.

6.1 SUPOSICIONES Y LIMITACIONES

Es una propiedad intrínseca de la mayoría de los materiales el expandirse al ser sometidos a calor, por lo tanto, se piensa que la cavidad después de sellada se reduce en volumen y esto altera la temperatura de homogeneización, pero debido al tamaño microscópico de las cavidades y a la pequeñez del coeficiente de dilatación, el cambio es mínimo, además de que es reversible; al ser calentada la muestra, la cavidad recobra su volumen original.

Cuando el fluido atrapado a elevada temperatura está saturado con respecto a su mineral anfitrión, es posible que al bajar la temperatura cristalice en las paredes y también reduzca el volumen, esto es raro pero se ha podido observar cristalización en las paredes de algunas oclusiones, identificando el fenómeno.

6.2 CAMBIOS DEBIDOS A RECRISTALIZACION

No es común observar este fenómeno porque la solubilidad del mineral anfitrión en el fluido del cual precipitó es baja; sin embargo, si el mineral es soluble en el fluido capturado, comienza un proceso de recristalización, que da como resultado el estrangulamiento de oclusiones grandes, formándose a partir de éstos, varias series de oclusiones pequeñas.

Un segundo caso ocurre cuando una serie de oclusiones disuelven el material que los separa y se unen para formar una sola oclusión grande, la cual es peculiar por tener sus paredes muy irregulares. Ambos procesos han sido estudiados en cristales sintéticos (Lemmlein, 1952).

6.3 PRESION Y DENSIDAD ESTIMADAS

El rango de presiones que se van a encontrar en los ambientes corticales varían de 1 bar a 20 kilobars, que son las presiones aproximadas de la cima y de la base de la corteza sílica, respectivamente, y marcan los límites para la formación de yacimientos.

Una oclusión no puede proporcionar siempre temperatura y presión de formación; sin embargo, si la composición es conocida se pueden estimar ambas, sabiendo la salinidad del líquido obtenida por procesos de congelamiento y usando la gráfica que da la presión mínima. Es más común y exacto que la presión se estime por evidencias geológicas de campo, o sea por la profundidad de la cubierta y suponiendo que la presión de formación es igual a la presión hidrostática.

7 TECNICA DE MUESTREO

La toma de muestra es una de las fases más delicadas del estudio por oclusiones fluidas por las causas que se expondrán más adelante.

7.1 MINERALES SUSCEPTIBLES DE SER ANALIZADOS

Los métodos analíticos más confiables son los que se realizan en minerales transparentes, como fluorita, cuarzo, esfalerita (con bajo contenido de fierro), calcita, otros carbonatos, berilo, halita, topacio, biotita, apatita, turmalina, vidrio, olivino, yeso, etc.; siendo preferidos los minerales que son capaces de cristalizar en diferentes condiciones como fluorita, cuarzo y calcita.

7.2 REPRESENTABILIDAD DE LAS MUESTRAS COMO INDICE DE MINERALIZACION PRIMARIA

El principal problema es estimar la validez de las muestras obtenidas y la

magnitud de los errores que pueden ocurrir, ya que genéticamente los yacimientos no muestran una sola etapa de mineralización. Más exactamente, un mineral es el producto de una serie de estos procesos; por esa razón, es necesario que las muestras sean los testigos de la mineralización primaria, y que se tomen de una sola etapa, o de varias pero definidas, dependiendo del objeto del estudio. Además es recomendable que la persona que desarrolla el trabajo de laboratorio efectúe el muestreo, ya que con las condiciones geológicas (plegamientos, intrusivos) en mente será posible eliminar muchas ambigüedades que seguramente surgirán en el desarrollo del análisis de las muestras, y que son determinantes en la interpretación y conclusiones.

7.3 DENSIDAD DE MUESTREO.

La densidad de muestreo debe ser generalmente alta porque muchas de las muestras obtenidas presentan problemas para su estudio (características intrínsecas del mineral). Además, esta densidad es variable según el tipo de información buscada. El estudio se puede hacer a nivel regional (obteniendo pocas muestras de muchos lugares, minas o distritos) para observar las diferentes presentaciones de un mismo fenómeno geológico, o para observar la cantidad y variabilidad de fenómenos sufridos por una región, distrito minero o veta de interés (muchas muestras de un lugar).

8 EXPLORACION MINERA POR OCLUSIONES FLUIDAS

El estudio de oclusiones fluidas puede aplicarse indirecta y directamente en la prospección de nuevos yacimientos o extensiones de los ya conocidos, es una herramienta muy versátil, y como cualquier otro recurso de exploración no va a ser usado por sí mismo. Es con-

veniente recalcar que las aplicaciones mencionadas a continuación son solo las inmediatas y más obvias, pero hay más, y el geólogo es el que tiene que mantener la mente abierta y ver la posibilidad de aplicar este método y considerarlo como un arma potencial que le ayude a resolver problemas.

El mayor interés de las oclusiones fluidas ha sido enfocado hacia su estabilidad como termómetros geológicos y ocasionalmente como barómetros así como para investigar directamente la química de los fluidos hidrotermales, los cuales pueden proporcionar guías utilizables en la exploración; de este modo Garrels y Friedman (1955) reportan que el CO₂ gaseoso es suficientemente abundante en los yacimientos de oro de Baley lo que podría constituir un arma poderosa en la prospección, pues las vetas de cuarzo con oro van frecuentemente acompañadas por vetas similares pero estériles, y cualquier indicio que permita discernir entre unas y otras y reconocer el camino de los fluidos mineralizantes es de gran importancia. Existen otros informes de éxito en el uso de oclusiones utilizadas como indicadoras de la zona económica de los yacimientos de oro en vetas de cuarzo. El CO₂ gaseoso ha sido usado también en las oclusiones del yacimiento de mercurio de Red Devil, Alaska.

8.1 RELACION GENETICA ENTRE ROCAS IGNEAS Y MINERALIZACION

Un yacimiento asociado a rocas ígneas, situado entre varios cuerpos intrusivos generalmente estará relacionado con alguno de ellos, pero es difícil determinar esta relación sólo por sus características geológicas. En este caso un estudio de oclusiones fluidas podría ayudar. Se buscaría un patrón zonal horizontal de temperatura y salinidad, en minerales de mena y de ganga. Habrá un incremento de temperatura en dirección del cuerpo buscado.

En otros casos se estudian oclusiones de las rocas ígneas, y se comparan con las contenidas en los minerales de los yacimientos, esto da la información sobre la relación y evolución de los fluidos mineralizantes durante su migración desde la fuente.

En Japón, Takenouchi e Imay (1975) han estudiado oclusiones en el cuarzo de riolitas, pórfidos y granitos, limitándose a observarlas, pues la mayoría de ellas no fueron susceptibles de tratarse por los métodos normales (homogeneización y congelación). También estudiaron oclusiones en vidrio en las rocas antes mencionadas y obtuvieron las características del fluido inclusive durante la cristalización del magma, debido a que estas oclusiones son muestras de mezclas magmáticas, y si la mineralización se derivó de ellas en una etapa posterior de actividad ígnea es posible esperar que contengan pequeñas cantidades de metales. En la mina Chitose, Japón, fueron identificados Zn y Pb en una oclusión de vidrio primario, en cantidades de 1 gr. por lt. de fluido (Takenouchi, 1962 b).

8.2 SITUACION DE LA FUENTE DE MINERALIZACION

Este problema es similar al anterior, solo que aquí no se observa la roca fuente. Mediante un muestreo de semi-detalle en un distrito es posible situar su posición y profundidades aproximadas mediante un zoneamiento de temperaturas y salinidad; en base a esto se pueden trazar curvas isogradas que definan el cuerpo buscado.

8.3 CRONOLOGIA RELATIVA

Si se observan las oclusiones en un área estructuralmente compleja cortada por muchas vetas de cuarzo estériles, se podrán encontrar diferencias en las varias generaciones formadoras de cuarzo y así se establecerá una cronología. Esto se puede hacer extensivo a cuerpos minerales de emplazamiento tem-

prano. Las oclusiones en estos cuerpos son peculiares, pues algunas explotan al ser sobrecalentadas por intrusiones postminerales del magma formador del dique o cuerpo intrusivo tardío.

8.4 PROFUNDIDAD DE LOS CUERPOS MINERALIZADOS.

El fenómeno de ebullición en los fluidos mineralizantes en el tiempo de la formación de yacimientos proporciona una medida de la máxima presión hidrostática. El fenómeno puede ser detectado en las oclusiones fluidas y esto permite situar los límites de la profundidad de la cubierta y esto es útil en exploración.

8.5 EXTENSION VERTICAL DEL CUERPO MINERALIZADO Y PROBLEMAS DEL DEPOSITO DE MINERALES

Uno de los usos más comunes de las oclusiones fluidas es el tratar de reconocer gradientes térmicos horizontales y verticales dentro de un yacimiento en un tiempo dado durante la deposición. Para esto hay que diferenciar las etapas de emplazamiento mineral y así se pueden delinear los canales de acceso y la dirección de movimiento del fluido, y algunos problemas como el telescopio. También los gradientes en la salinidad pueden delinear una zona salina, con varios grados de disolución en la periferia, y si el cambio en el contenido de sales es muy pequeño o no se presenta con la profundidad, esto indica que actuaron algunas otras fuerzas en el régimen hidrológico.

Conociendo las características de deposición del mineral temprano y del último en cristalizar se podrá inferir la extensión vertical y en ocasiones lateral del cuerpo, marcando así las condiciones mínimas y máximas para la mineralización y basándose en el gradiente encontrado se podrá calcular la persistencia de la mineralización con la profundidad.

Todo lo anterior permitirá delimitar cuerpos similares asociados y sus zonas con mayores perspectivas económicas.

8.6 PARAGENESIS Y ZONEAMIENTO

Si se analizan muestras de la etapa temprana de mineralización y mediante éstas se conocen las características del fluido mineralizante, y además se observan los rasgos estructurales, físicos y químicos de las rocas de la región, se podrá, con buenas bases conocer los cambios que el fluido sufrió —causas directas que van a determinar la deposición, así como la paragénesis, sucesión y zoneamiento.

En los estudios hechos (Sawkins, 1964) en cuarzo, blenda, fluorita y calcita, de la mina Providencia, Zac. (Apartado 10.2) se determinó los cuerpos masivos se emplazaron a temperaturas cercanas a 350 grados C, la blenda zonada de 350-200 grados C, calcita y cuarzo a temperaturas menores de 350 grados C los fluidos mineralizantes tuvieron un gradiente vertical menor de 50 grados C por km.

8.7 IMPORTANCIA DE LA TEMPERATURA Y SALINIDAD DE LAS OCLUSIONES EN LOS PORFIDOS CUPRIFEROS

La temperatura y salinidad tienen mucha relación con los tipos principales de alteración en los pórfidos cupíferos, ya que le permiten al explorador situarse dentro del modelo ideal (Sillitoe, 1973). Se sabe que la zona potásica fue formada por fluidos hidrotermales, la sericitica, por una mezcla de estos fluidos con aguas meteóricas, etc.

Estudiando muestras de cuarzo (Sawkins, 1971) de las vetillas del stockwork, se han encontrado temperaturas de 630 grados C. En la zona potásica se tienen temperaturas de 550 grados C que son aún temperaturas magnéticas y las mínimas para la formación

de granitos circunscritos. En la zona sericitica se han medido temperaturas de 350 grados C y hacia afuera, en los filones hidrotermales se tienen temperaturas de 150-200 grados C.

En la zona potásica existen oclusiones con una salinidad equivalente de más de 60 por ciento (los metales como Cu y Mo se concentran dentro de los fluidos de alta salinidad). En la zona de alteración sericitica se encuentran salinidades de 20-25 por ciento. Los datos anteriores fueron obtenidos de varios yacimientos y forman un bosquejo muy general, sin embargo es poco común encontrar un patrón simple, pero se puede interpretar una distribución que refleje la migración de los fluidos hacia los sitios de depósito.

En Copper Canyon, Nevada, se encontraron oclusiones simples y otras con halita, silvita y anhidrita. Ubicando estas últimas sobre un plano se observó que están rodeando al yacimiento actual conocido de cobre, por lo tanto esta área constituye una anomalía de fluidos y puede servir como una guía gráfica adicional para indicar la zona favorable para la mineralización.

La distribución de fluidos altamente salinos refleja los controles litológicos y fracturamiento, pues la permeabilidad primaria es importante, como se observa en Copper Canyon, en donde los fluidos se extienden más en los conglomerados que en las rocas arcillosas (formaciones Battle y Pumper Nickel, respectivamente).

En este yacimiento coinciden totalmente las anomalías de cobre, oro y bismuto con el halo salino. Dicho halo es parcialmente coincidente con la zona de piritización, más pequeño y más específico como guía de exploración. Esto es raro, como se mencionó anteriormente se ha demostrado la asociación de fluidos salinos con sulfuros. Estos fluidos no están restringidos ni dispuestos simétricamente respecto al intrusivo.

Los estudios de algunos otros yacimientos tipo pórfido cuprífero revelan que los fluidos altamente salinos no se alejaron muchos de los intrusivos mineralizantes como el ejemplo anterior, y los minerales diseminados ocurren dentro de rocas que contienen oclusiones fluidas de alta salinidad.

Una combinación del estudio de elementos menores, petrografía, geoquímica de fluidos y alteración pueden ser de gran efectividad en el delineamiento de terrenos o zonas económicamente favorables (Theodore y Nash, 1972).

8.8 GENESIS DE YACIMIENTOS Y CLASIFICACION GENETICA

Generalmente una clasificación sirve para enmarcar una serie de hechos u objetos para introducir orden en ellos; por lo tanto es necesario tomar rasgos representativos de los mencionados objetos por clasificar. Los yacimientos minerales están formados de sustancias que varían grandemente en el contenido, forma, tamaño, origen, valor, etc. Con características tan variables es difícil establecer una clasificación perfecta. Lindgren seleccionó temperatura y presión como los factores básicos de su clasificación, los cuales controlan muchas de las características mencionadas anteriormente y que con algunas modificaciones, es la más usada.

La clasificación de un yacimiento complementada con oclusiones fluidas toma en cuenta presión, temperatura y composición de los fluidos mineralizantes, así como procesos y medios de formación. Con estos datos es posible comprender la génesis de un yacimiento, mina o distrito, pues aparentemente los patrones espaciales sistemáticos de distribución de temperatura y composición representaba la historia de la evolución, continuidad y cambios bruscos que sufrió el fluido mineralizante: cuando su fuente experimentó también cambios, éstos quedaron marcados como una distribución de temperaturas, pre-

siones y composición en el tiempo (etapas y períodos sucesivos de mineralización).

Además, con estudios de isótopos estables es posible saber si los fluidos y por lo tanto los minerales, vinieron del manto, o si vinieron de la corteza, y solo disolvieron metales de evaporitas y demás rocas. Todo lo anterior puede parecer de utilidad puramente académica, sin embargo el origen de un yacimiento indicado por la clasificación tiene gran importancia en exploración debido a que se pueden dirigir los estudios hacia un determinado ambiente geológico eliminando otros y haciendo un diagnóstico de los productos minerales. También como se mencionó anteriormente las oclusiones fluidas e isótopos proporcionan argumentos para decir si un yacimiento es epigenético o singenético, diferencia que puede ser crucial en la planeación de la exploración.

En conclusión, las oclusiones fluidas proveen una variedad de recursos, muchos de los cuales han sido ya probados en el campo y no necesariamente bajo condiciones óptimas, y a pesar de esto han resuelto muchos problemas, como los estructurales, a mejorar la comprensión de la geología regional o local, a la determinación del ambiente del depósito de minerales, para la búsqueda de cuerpos cubiertos, etc.

9 APLICACIONES DEL METODO DE LAS OCLUSIONES FLUIDAS Y DATOS QUE APORTAN

9.1 COMPOSICION ISOTOPICA

La composición isotópica del azufre de los sulfuros y sulfatos puede brindar información sobre la fuente del azufre y el origen de los yacimientos (Ohmoto, 1972), (Rye y Ohmoto, 1974), (Kesler, 1974).

Hay dos tipos principales de azufre, uno es el que exhiben la mayoría de las rocas ígneas y meteoritos, y el segundo es el que se encuentra en las evaporitas (yesos y otros sulfatos precipitados).

En el primer caso, la fuente es magmática y da valores aproximados de $\pm 0\%$. En el segundo caso la fuente es el mar y da valores de $\pm 20\%$ que varía hasta el $+5\%$. Este valor se obtiene de la siguiente manera:

$$\delta S^{34}\text{‰} = \frac{S^{34}/S^{32} \text{ de la muestra}}{S^{34}/S^{32} \text{ patrón}} - 1) \times 1000$$

Se concluye que si se puede determinar la composición isotópica de los minerales de un yacimiento y ésta es aproximadamente 20% , ó 5% , se sabrá que la solución obtuvo su azufre del mar, al circular el fluido por una cuenca con evaporitas. En el caso de que el azufre dé valores cercanos a 0% se considera primitivo o sea que vino de un magma.

Para hacer estas determinaciones se tiene que conocer el pH, fO₂ (fugacidad del oxígeno) y temperatura (datos obtenidos por oclusiones fluidas), ya que la composición isotópica depende de todos estos factores. Con estos datos hay que hacer una serie de cálculos y determinar el $\%$.

9.2 EDAD ABSOLUTA.

Se ha tratado de medir la edad absoluta de los fluidos basándose en la relación argón-potasio. A la fecha no se ha logrado porque se han encontrado algunos problemas, como por ejemplo, la contaminación del fluido al hacer la extracción, la captura de argón primitivo en terrenos metamórficos, etc. lo cual invalida en ciertos casos los resultados obtenidos.

10 EJEMPLOS DE ESTUDIOS POR METODO DE OCLUSIONES FLUIDAS (DATOS OBTENIDOS Y SU INTERPRETACION)

Los ejemplos siguientes fueron seleccionados de la literatura actual disponible. Los tres primeros tratan de

esclarecer génesis y mecanismos de emplazamiento. El trabajo que se aboca específicamente a problemas exploratorios además de cubrir los genéticos, es el del Dr. Stephen E. Kesler, y en el cual tuvo el autor la oportunidad de colaborar, ya que fue realizado en México y en el laboratorio de oclusiones fluidas del Departamento de Geoquímica del C. R. N. N. R..

10.1 EJEMPLOS MUNDIALES.

Mina Bluebell, Columbia Británica. Ohomoto y Rye (1970).

a) Los yacimientos de Pb-Zn se localizan como reemplazamientos de calizas. Los minerales principales son pirrotita, esfalerita y galena; la ganga está formada de knebelita (fayalita manganesífera) cuarzo y calcita.

El estudio realizado de paragénesis y oclusiones fluidas en minerales de ganga y mena indicaron que los cuerpos masivos de mineral fueron depositados a temperaturas superiores a los 450 grados C en tres etapas principales y que los minerales tardíos que se depositaron en espacios abiertos se formaron a temperaturas entre 450 y 320 grados C, con presiones hidrostáticas de 300-800 atmósferas y a una profundidad máxima de 6 km. Los puntos de fusión mostraron que la salinidad de los fluidos hidrotermales fue variando gradualmente de 10.3% de NaCl equivalente en peso al descender la temperatura en el rango marcado anteriormente la salinidad indica que en las últimas etapas de mineralización hubo

mezcla con aguas meteóricas— Fueron estudiadas más de 5,000 oclusiones.

Datos que aporta:

—La temperatura de los fluidos está en los límites de la clasificación hidrotermal (hipotermal).

—Mezcla de fluidos con aguas meteóricas.

—Presión deducida de oclusiones pues la historia tectónica no permitió hacer estimaciones de campo.

—El gradiente térmico fue de 65°C /km.

b) Origen de las chimeneas de brecha mineralizadas con cobre y turmalina, Chile. Sillitoe y Sawkins (1971).

La mineralización hidrotermal de estas chimeneas ha sido dividida en una etapa de reemplazamiento seguida por un relleno de cavidades, encontrándose agregados de cuarzo-sericita con intensa silicificación y turmalinización, además de turmalina, especularita y cuarzo, y algunos otros como scheelita, calcopirita, pirita, molihdenita y galena.

Estudios de oclusiones primarias y pseudosecundarias en cristales de cuarzo indican que éste se depositó entre 350-440 grados C. Hubo fluidos de alta y baja densidad con variaciones de salinidad de 2.9-36% de NaCl equivalente en peso. Algunas de las oclusiones contienen minerales hijos complejos, además de cubos de sal.

Las chimeneas se interpretan como brechas postmagmáticas de colapso hidrotermal, formadas como resultado de la corrosión y remoción de roca por la acción de los fluidos hidrotermales.

Los estudios geológicos, mineralógicos y de oclusiones fluidas dan bases excelentes para pensar en una estrecha relación genética entre las chimeneas de brecha y las últimas etapas del ciclo magmático del Terciario Temprano en Chile.

Fueron estudiados cristales de turmalina y cuarzo por técnicas de homo-

geneización y congelación (150 y 50 oclusiones respectivamente).

Discusión. Las zonas de alta temperatura mostraron una mezcla de dos tipos básicos de oclusiones, las cuales indican ebullición de los fluidos ascendentes, y una salinidad de los fluidos del orden del 30%. La temperatura fue de 440 grados C, con una presión de 325 atmósferas y una profundidad de 1.5-3 km, lo cual parece razonable para la localización de la mineralización.

La turmalina es anterior al cuarzo, porque se supone emplazó a una temperatura mayor de 440 grados C. Se encontraron gran variedad de minerales hijos que permiten estimar la composición de los fluidos mineralizantes de la siguiente manera: 35% NaCl 10% KCl y 10% de otros minerales (inclusive opacos) en relación al peso de la oclusión.

10.2 EJEMPLOS MEXICANOS

a) Deposición de Pb-Zn en la mina Providencia, Zacatecas, México, (Sawkins, 1964).

Los yacimientos tienen forma de chimenea y poseen una mineralogía comparativamente simple, compuesta por esfalerita, galena y pirita; los minerales de ganga son calcita y cuarzo.

El estudio de oclusiones fluidas se realizó principalmente en esfalerita, y también en cuarzo, calcita y fluorita. Los resultados indican que los minerales masivos fueron emplazados a temperaturas superiores a los 350 grados C, encontrándose cristales de esfalerita zonada emplazada entre 200 y 350 grados C, mientras que la calcita y el cuarzo fueron formados por debajo de los 350 grados C. El límite superior para el depósito de esfalerita se situó a 425 grados C.

Los datos obtenidos sugieren que los gradientes de temperatura dentro de los conductos durante la mineralización fueron menores de 50 grados C por Km.

La salinidad de los fluidos mineralizantes varió entre 5 y 40% de NaCl y el patrón de variación fue complejo. Se ha calculado que el volumen de las soluciones necesario para depositar los yacimientos de Providencia fue del orden de 10 km cúbicos. La fuente de estas soluciones fue un cuerpo magnético grande a alguna profundidad no determinada, tomando en cuenta que el volumen de las soluciones calculado no pudo ser producido por los intrusivos expuestos en las obras. Esto es apoyado por la relación estructural entre la mineralización y el stock Providencia.

Discusión. El estudio se realizó para conocer datos específicos relacionados con la distribución de la temperatura en tiempo y espacio durante el depósito. Para complementarlos se investigaron los yacimientos de las Animas, Oeste Zinc, Salaverna, San Marcos, Rucio y el Stock Providencia, y no fue posible construir un patrón zonal horizontal. Verticalmente se tiene en los cuerpos una diferencia de temperatura de aproximadamente 50 grados C, pero su distribución no es uniforme y no se pudo establecer un gradiente,

b) Yacimientos de Fluorita y su relación con yacimientos de Pb-Zn en el noreste de México (estudio de oclusiones fluidas e isótopos de azufre) (Kessler, 1974).

Los objetivos principales de este estudio fueron la determinación de la mineralogía, el control geológico, la temperatura de formación, el carácter y origen de las soluciones que depositaron la fluorita, y en base a ello usar los yacimientos de fluorita como guía de yacimientos de sulfuros.

Se muestrearon los siguientes yacimientos y distritos de fluorita y barita. En Coahuila: Pico Etéreo, Encantada-Buenavista, Sto. Domingo, El Tule, San Manuel, San Vicente (este) y Sta. Anita-El Melón. En San Luis Potosí: Distrito Zaragoza (Consentida, Esperanza y Las Cuevas).

Por su forma, los yacimientos anterior-

res se pueden dividir en dos grupos: mantos, vetas y chimeneas. Generalmente los mantos son más pequeños que las vetas y chimeneas, los primeros se localizan en el contacto entre la Caliza Georgetown (Sta. Elena o Aurora) y la sobreyacente Lutita Del Rio, por ejemplo, en el distrito Encantada-Buenavista, los yacimientos en vetas y chimeneas son más importantes, como en el cuerpo de Pico Etéreo. En los dos tipos de yacimientos la ganga es calcita y ocasionalmente cuarzo. En San Luis Potosí no se encontró material susceptible de ser usado.

Yacimientos de sulfuros estudiados. Estos yacimientos se pueden dividir también en dos tipos: chimeneas, mantos y vetas en calizas, vetas y mantos en rocas de silicatos (ígneas y sedimentarias).

Los yacimientos y distritos son: Encantada-San Francisco, Sta. Eulalia, Naica, Ojuela, Providencia-Noche Buena, Zimapán, Múzquiz, Parral, San Francisco del Oro, Sta. Bárbara y Plomosas.

De los estudios, observaciones y mediciones efectuadas en oclusiones fluidas se obtuvieron los siguientes datos:

— La fluorita reemplazó a la caliza (roca encajonante).

— La fluorita se depositó a temperatura de 150 grados C en la mayoría de los mantos (en algunos lugares como en el Distrito Encantada se formó hasta a 400 grados C, debido a su cercanía de las rocas ígneas.

— Las soluciones que depositaron la fluorita estuvieron concentradas (10-15 % de NaCl).

Haciendo cálculos a partir de estas observaciones, se concluyó que las soluciones tenían un pH más o menos de 6, que la cantidad mínima de F⁻ que es necesaria para reemplazar caliza es de 2 p.p.m. y que aumenta aproximadamente 10 p.p.m., para cada número de pH (soluciones más básicas). Esta cantidad de flúor es muy baja, sin embargo casi todas las aguas que han

sido analizadas contienen menos de 1 p.p.m. Entonces se puede concluir que las soluciones que formaron estos yacimientos tuvieron que ser enriquecidas en F, el cual vino de las rocas ígneas asociadas.

Las riolitas contienen un promedio de 16-20 p.p.m. de flúor, las traquitas 595 y las rocas máficas 585. Las riolitas del norte de Coahuila son ricas en F (1030 p.p.m.), por lo tanto la mejor roca para que exista depositación de fluorita es la riolita: intrusiva como en Pico Etéreo o extrusiva como en Euenavista-Encantada. Esta relación puede ser usada para delimitar regiones favorables para yacimientos de este mineral.

Como se dijo al principio, el objetivo principal de este proyecto fue determinar la relación entre los yacimientos de fluorita, y la fluorita presente como ganga en yacimientos de sulfuros, para evaluar la posibilidad de usar dicho mineral como una guía en la exploración de sulfuros.

Hay diferencias fundamentales entre estos dos tipos de fluorita: Los yacimientos de fluorita se formaron a temperaturas de aproximadamente 150°C mientras que los yacimientos de sulfuros lo hicieron entre 250° y 370°C. También existieron diferencias en la salinidad de los fluidos mineralizantes, pues en el primer caso fue de 10-15% de NaCl y muchos de los yacimientos de sulfuros muestran 16% de NaCl o más, lo que indica que los yacimientos de Pb-Zn-Ag fueron depositados cerca del foco mineralizante y las soluciones formadoras de yacimientos de fluorita viajaron más y se diluyeron.

Se puede concluir que las soluciones tuvieron diferentes fuentes, conclusión que refuerza el Dr. Kesler (1974) con las siguientes observaciones: Los mantos de fluorita no contienen sulfuros, posiblemente debido a que los fluidos no tuvieron mucho azufre o éste estaba en forma de sulfato, no susceptible de formar sulfuros. También, los yacimien-

tos de Pb-Zn-Ag en calizas por lo general no están relacionados espacialmente a yacimientos de fluorita, a excepción de Naica, en donde hay fluorita por encima de los sulfuros, pero ésta se encuentra más comúnmente por debajo depositada en la parte inicial del proceso mineralizante. Además hay chimeneas y vetas de fluorita (Cerro del Pilote, entre otras) que fueron depositadas cerca de sus rocas fuente y los fluidos al encontrar calizas depositaron todo el material que llevaban en solución (fluorita botroidal que indica cristalización rápida). Aquí se encontraron oclusiones con temperaturas de 400°C y salinidades de 26%; por último, en la mayoría de los casos los yacimientos de fluorita están asociados a riolitas y los yacimientos de Pb-Zn-Rg a granodioritas.

Resumiendo, no hay posibilidad para utilizar los yacimientos de fluorita como guía de yacimientos de sulfuros, pero se consiguieron datos para exploración por fluorita.

Los isótopos estables de azufre de sulfuros, apoyados en las temperaturas obtenidas por el estudio de oclusiones fluidas en minerales transparentes de los yacimientos del norte de Coahuila aportaron los siguientes datos:

Los yacimientos de sulfuros (b= 10.6‰) en Puerto Rico y Múzquiz tienen un origen asociado con azufre marino obtenido de evaporitas y no muestran evidencias de asociación con magmas, pero hacen falta estudios para definir los procesos generadores. La barita de estos yacimientos no está relacionada con los sulfuros, por lo que no puede usarse como guía.

Los yacimientos de sulfuros (b= 5.7‰) de La Encantada, barita en Múzquiz y Puerto Rico y de fluorita en todo el Norte de Coahuila están relacionados con procesos magmáticos, por eso al explorar por estos minerales en esa zona, se hará en lugares con evidencias de actividad ígnea.

BIBLIOGRAFIA

- BARNES, H.L. y CZAMANSKE, G.K., 1967 — Solubilities and Transport of Ore Minerals, in Barnes, H.L. Ed. *Geochemistry of Hidrothermal Ore Deposits*: Holt, Rinehart and Winstory N.Y., P. 334-381.
- BARTON, P.B. y SKINNER, B.J., 1967 — Sulfide Mineral Stabilities, in Barnes, H.L. Ed. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*: Holt, Rinehart and Winstory, N.Y., P. 236-333.
- BATEMAN, ALAN M., 1950 — Economic Mineral Deposits, P. 18-44, Segunda Edición, John Willey & Sons, Inc.
- BURNHAM, C.W., 1967 — Hidrothermal Fluids at the Magmatic Stage, in Barnes, H.L. Ed. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*: Holt, Rinehart and Winstory, N.Y., P. 34-76.
- CAMPBELL, I., 1972 — Glossary of Geology. American Geological Institute, Ed. Gady M. McAfee R. Jr., Wolf, C.
- DANA, E., y FORD W., 1971 — Tratado de Mineralogía, Cuarta Edición, C.E.C.S.A.
- HALL, W. y FRIEDMAN, I., 1963 — Composition of Fluid Inclusions, Cave-in-Rock Fluorite District, Illinois, and Upper Mississippi Valley Zinc-Lead District: *Econ. Geol.*, V. 58, P. 886-911.
- HOLLAND, D.H., 1967 — Gangue Minerals in Hidrothermal Deposits, in Barnes, H.L. Ed. *Geochemistry of Hidrothermal Ore Deposits*: Holt, Rinehart and Winstory, N.Y., P. 382-436.
- KESLER, S.E., 1974 — Informe Final sobre el Proyecto de Fluorita en Yacimientos de Fluorita y de Plomo-Zinc-Plata: Consejo de Recursos Naturales No Renovables. Departamento de Geoquímica (Inédito).
- KRAUSKOPF, KONRAD B., 1967 — Introduction to Geochemistry: International Series in the Earth and Planetary Sciences: McGraw-Hill Book Company.
- LEVINSON, A.A., 1975 — Introduction to Exploration Geochemistry, Applied Publishing Ltd.
- LINDGREN, WALDEMAR, 1933 — Mineral Deposits, Cuarta Edición: McGraw-Hill Book Company.
- MOOKHERJEE, A., 1964 — The Geology of the Zawar Lead-Zinc Mine, Rajasthan, India; *Econ. Geol.*, V. 59, P. 656-677.
- NASH, J.T., 1973 — Geochemical Studies in The Park City District: I; Ore Fluids in the May Flower Mine: *Econ. Geol.* V. 68, P. 34-51.
- OHMOTO, H., 1972 — Systematics of Sulfur and Carbon Isotopes in Hydrothermal Ore Deposits, *Econ. Geol.*, V. 67, P. 551-578.
- OHMOTO, H. and RYE, R.O., 1970 — The Bluebell Mine, British Columbia I: Mineralogy, Paragenesis, Fluid Inclusions and the Isotopes of Hydrogen, Oxygen and Carbon: *Econ. Geol.*, V. 65, P. 417-437.
- PARK, CH. y MACDIARMID, R., 1970 — Ore Deposits, Second Edition: W. H. Freeman and Company.
- ROEDDER, E., 1963 — Studies of Fluid-Inclusions I: Low Temperature Application of a Dual Purpose, Freezing and Heating Stage: *Econ. Geol.*, V. 57, P. 1945-1961.
- ROEDDER, E., 1963 — Studies of Fluid Inclusion II: Freezing Data and their Interpretation: *Econ. Geol.*, V. 58, P. 167-211.
- ROEDDER, E., 1965 — Report on S.E.G Symposium on the Chemistry of the Ore-Forming Fluids: *Econ. Geol.*, V. 60, P. 1380-1403.

- ROEDDER, E., 1967 — Composition of Fluid Inclusions: U.S.G.S. Prof. Paper 440 J J.
- ROEDDER, E., 1967 — Fluid Inclusions as Samples of Ore Fluids, in Barnes, H.L. Ed. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits: Holt, Rinehart and Winstory, N.Y., P. 515-574.
- ROEDDER, E., SKINNER, B., 1968 — Experimental Evidence that Fluid Inclusions do not Leak: Econ. Geol. V. 63, P. 715-730.
- SAWKINS, F.J., 1964 — Lead-Zinc Ore Deposition in the Light of Fluid Inclusion Studies, Providencia, Zac., México: Econ. Geol., V. 59, P. 883-919.
- SAWKINS, F.J., 1968 — The Significance of Na/K and Cl/SO₄ Ratios in Fluid Inclusions and Subsurface Waters, with Respect to the Genesis of Mississippi Valley-Type Ore Deposit: Econ. Geol., V. 63, P. 935-942.
- SILLITOE, R. and SAWKINS, F.J., 1971 — Geologic, Mineralogic and Fluid Inclusion Studies Relating to Origin of Copper-Bearing-Tourmaline Breccia Pipes, Chile: Econ. Geol., V. 66, P. 1028-1041.
- SILLITOE, RICHARD H., 1973 — The Tops and Bottoms of Porphyry Copper Deposits, Econ. Geol., V. 68, P. 799-815.
- STANTON, R.C., 1972 — Ore Petrology: International Series in the Earth The Bluebell Mine, British Columbia I & Planetary Sciences McGraw-Hill Book Company.
- TAKENOUCHI, S., e IMAY H., 1975.— Glass and Fluid Inclusions in Acidic Igneous Rocks from some Mining Areas in Japan: Econ. Geol., V. 70, P. 750-769.
- TOULMIN, P. y CLARK, P.S., 1967— Thermal Aspects of Ore Formation, in Barnes, H.L. Ed. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits: Holt, Rinehart and Winstory, N.Y., P. 437-464.

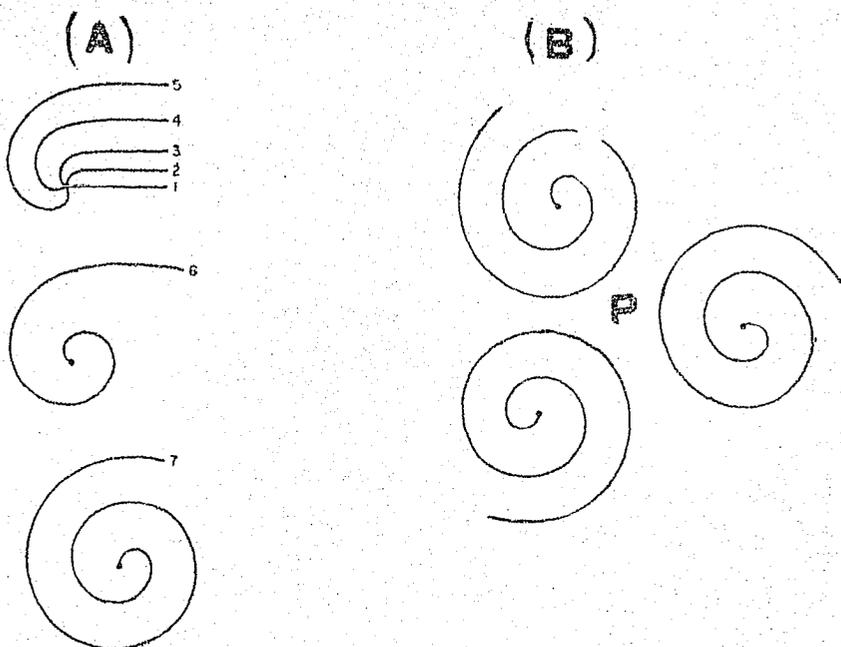


FIG. 1 A) REPRESENTACION DIAGRAMATICA DE SIETE ETAPAS SUCEIVAS EN EL DESARROLLO DE UNA ESPIRAL DE CRECIMIENTO. (TOMADO DE DISLOCATIONS IN CRYSTALS, 1975)

B) ZONA DE CRECIMIENTO IMPERFECTO; SUSCEPTIBLE DE CAPTURAR OCLUSIONES FLUIDAS.

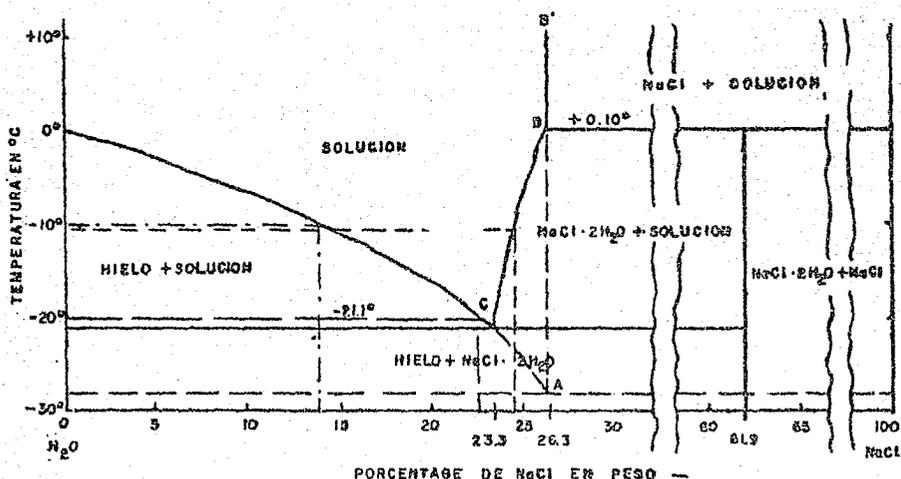


FIG. 2. - DIAGRAMA DE TEMPERATURA - DENSIDAD PARA EL AGUA SE ILUSTRAN EL COMPORTAMIENTO DE CUATRO OCLUSIONES TODAS CAPTURADAS A 540°C Y A DIFERENTES PRESIONES (TOMADA DE ROEDDER 1962, SCIENTIFIC AM. 207, 38-47)

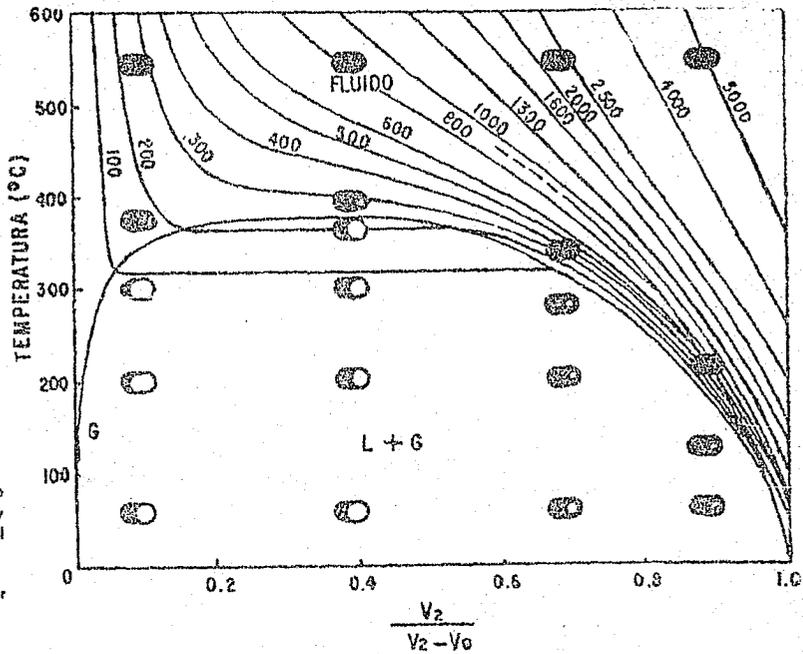


FIG. 3.-Relación entre el punto de fusión y el contenido de NaCl disuelto en agua.

(Tomado de Kesler 1974).

FIG. 4.-DIAGRAMAS QUE MUESTRAN LAS PARTES INTEGRANTES DE LA PLATINA TERMICA

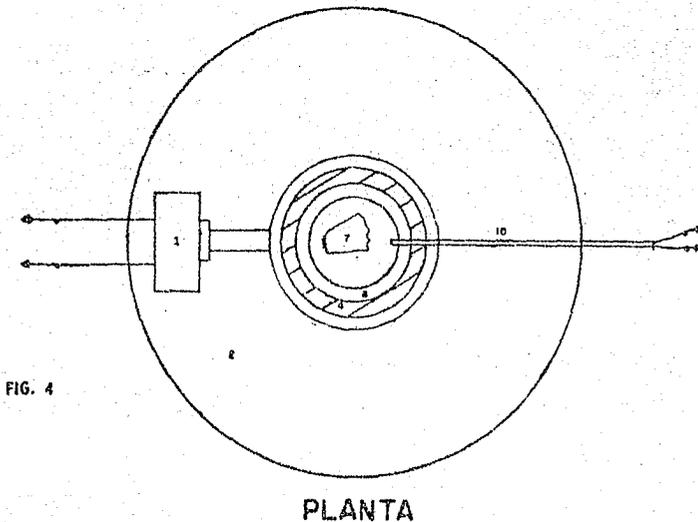
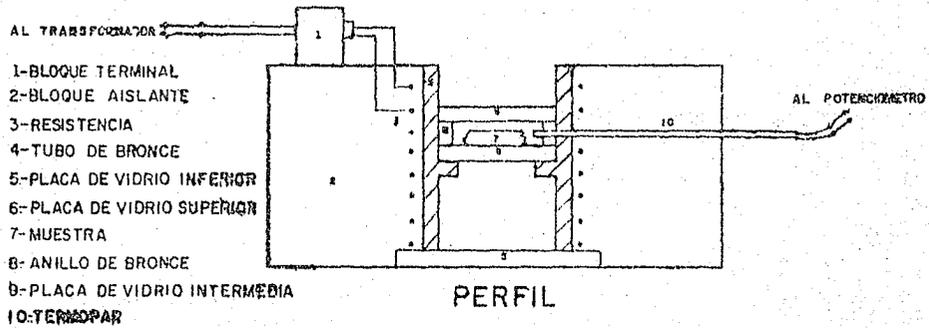


FIG. 4