

U.N.A.M.

17  
Cienfuegos  
Cuba

30

*Prospección (Exploración)  
Geoquímica del Cobre*

**TESIS PROFESIONAL**

**RAFAEL AGUILERA MEDRANO**

México, D. F.

1965.

12328



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

**ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS QUIMICAS**  
de la  
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**"PROSPECCION (Exploración) GEOQUIMICA DEL COBRE"**

**TESIS PROFESIONAL**

que para obtener el título de

**QUIMICO METALURGICO**

presenta

**RAFAEL AGUILERA MEDRANO**

México, D. F.

1965

*A mis padres*

*A mis hermanos*

ROGELIO

RAUL

XAVIER

XOCHITL

HUGO GUILLERMO

**A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS**  
**que me animaron a presentar esta TESIS.**

**CESAR RINCON ORTA**

**LISANDRO CASTELLANOS**

**LUIS ZAVALA MURO**

**JOSE GREGORIO SOLORIO**

## **RECONOCIMIENTOS**

**Agradesco al personal del Instituto de Geología de la UNAM, la valiosa ayuda que se sirvieron prestarme para la elaboración de esta tesis y en especial a la Sra. Rebeca M. de Schmitter.**

## PROLOGO

La creciente industrialización de México ha traído una demanda cada vez mayor de materiales básicos para la producción. Entre estos materiales, los elementos metálicos ocupan un lugar muy importante, especialmente en un País como el nuestro que siempre se significó por su alta producción minera.

Algunos yacimientos minerales quedan parcialmente expuestos a la vista en los llamados afloramientos y en estos casos su localización es muy sencilla, por lo que constituyen el primer objetivo de las compañías mineras. Cuando la abundancia de minerales es suficiente, hay tal cantidad de estos afloramientos que la exploración minera se limita a la búsqueda de filones y vetas, empleando las técnicas de los gambusinos. Evidentemente, al avanzar la explotación de estos recursos no renovables, los yacimientos se van agotando por lo que se hace necesario encontrar nuevas reservas que sustituyan a las que van dejando de producir. Con el tiempo llegan a escasear los afloramientos y entonces, cuando la localización de un buen depósito ya no puede depender de los métodos tradicionales, es cuando debe haber un cambio fundamental en los sistemas de exploración, y a menos que se asimilen las nuevas ideas que aportan la geoquímica y la geofísica, se confrontará la incapacidad de responder con suficiente rapidez a la siempre creciente demanda de nuestra economía.

En las consideraciones anteriores se ha buscado la justificación de este trabajo que se presenta como Tesis y que consiste en la descripción de algunos de los procedimientos con que la geoquímica cuenta para localizar yacimientos explotables de minerales de cobre.

En este trabajo no se ha tenido la pretensión de hacer una investigación exhaustiva sobre el tema, sino que el autor se ha limitado a la discusión breve de los métodos que ha creído más importantes. Con la presente Tesis se tiene la esperanza de contribuir aunque sea en una mínima parte, a la solución del problema de utilizar de mejor manera los recursos naturales de nuestro País.

# INTRODUCCION

Cada roca debe considerarse como un sistema químico en equilibrio con el medio que le rodea. Al cambiar cualquiera de los factores que gobiernan este equilibrio, el sistema se desplaza de acuerdo con leyes físico químicas bien establecidas, en el sentido de restablecer su posición estable dentro del nuevo grupo de condiciones, originándose así nuevos sistemas.

Los cambios en las condiciones de equilibrio en las rocas, que se presentan con más frecuencia en la corteza terrestre, son cambios de temperatura y presión, así como procesos geológicos que implican movimiento de materiales y por ende, cambios en la composición química de los sistemas. El resultado global de estos procesos es lo que ha dado en llamarse ciclo geológico de las rocas que puede resumirse brevemente como sigue:

Los sedimentos que se depositan en las cuencas oceánicas o en el fondo de los lagos van quedando sepultados por cantidades cada vez mayores de nuevos sedimentos que los comprimen y litifican. El aumento de presión y el consiguiente aumento en la temperatura pueden llegar a tal magnitud que sean capaces de producir metamorfismo en los sedimentos que de este modo se transforman en rocas metamórficas. Si el aumento de temperatura es suficientemente grande, los materiales que forman las rocas metamórficas pueden llegar a alcanzar el estado semi-fluido que caracteriza a los magmas, los que al enfriarse producen las llamadas rocas ígneas. Estas rocas, a su vez, cuando quedan expuestas a la erosión de la lluvia, del aire, del viento o de las glaciaciones, se corroen y denudan es decir, que producen pequeños fragmentos que son arrastrados por los agentes del intemperismo y que al depositarse en los lugares adecuados forman los sedimentos que completan el ciclo geológico.

Como resultado de los movimientos de los materiales terrestres de un medio a otro, cada elemento se distribuye en secuencias que reflejan, tanto su abundancia como las características de su equilibrio químico en los ambientes locales. En la literatura geoquímica a estas secuencias de distribución se les ha designado "modelos de dispersión", término que pone énfasis en la naturaleza dinámica de los procesos involucrados en su formación.



Los modelos de dispersión se clasifican como primarios o secundarios, ya sea que se formen a profundidad por procesos ígneos o metamórficos, o en la superficie de la tierra, por los agentes de intemperismo erosión y transporte superficial.

Los modelos de dispersión se presentan como áreas en donde la abundancia de un elemento es mayor que en las áreas vecinas. Esto puede ser el efecto de características especiales del medio que produjeron el enriquecimiento local del elemento en cuestión, a partir de un material de composición normal, o bien el resultado de la presencia de una fuente de material con un contenido más alto que el promedio del elemento de que se trate. Si la fuente "enriquecida" es un depósito mineral o está relacionada de alguna forma con los procesos metalogénicos, el modelo de dispersión que resulta puede ser un buen indicio para la búsqueda del yacimiento correspondiente. A las áreas en las que la distribución química de los elementos indica la presencia de minerales, se les llama "anomalías geoquímicas".

La exploración geoquímica de minerales incluye cualquier método de exploración mineral, basado en la medida sistemática de una o más propiedades químicas de los materiales que se presentan en la naturaleza. Generalmente la propiedad química que se mide es el contenido de algún elemento o grupo de elementos y los materiales de la naturaleza pueden ser: rocas, suelos, residuos glaciales, vegetación, corrientes de agua, etc.

La aplicación de los principales geoquímicos en los problemas de explotación minera, se basa en la abundancia promedio de algunos elementos en los materiales terrestres y en las leyes que controlan su distribución y la formación de anomalías geoquímicas. Un conocimiento detallado del mecanismo que produce las anomalías antes dichas, es esencial en la exploración por métodos geoquímicos.

Las anomalías geoquímicas que indican concentraciones comercialmente importantes de algunos elementos, pueden reconocerse solamente por contraste con zonas no mineralizadas. La abundancia normal de un elemento en cualquier material en el que el equilibrio no ha sido modificado por la presencia de un depósito mineral, se conoce como "fondo" o "nivel de referencia" y puede variar ampliamente en respuesta a procesos físicos o químicos a resultados de los cuales el contenido de ciertos elementos aumenta, mientras que el de otros disminuye. Como un guía del rango de valores que debe razonablemente esperarse, es conveniente referirse a los resultados estadísticos de la composición de rocas ígneas, aguas corrientes y plantas (Tabla 1).

T A B L A 1

**Abundancia de algunos elementos en rocas ígneas,  
agua dulce y plantas terrestres**

ELEMENTOS	ROCAS IGNEAS (ppm)	AGUAS DULCES		PLANTAS TERRESTRES	
		Agua (mil- crogramo por litro)	Residuo (ppm)	Peso Seco (ppm)	Cenizas (ppm)
Aluminio	81,300	700	4,800	20	800
Antimonio	1	—	—	—	—
Arsénico	5	1	7	—	—
Bario	250	160	1,100	30	1,200
Berilio	6	—	—	—	—
Bismuto	0.2	—	—	—	—
Boro	3	110	750	5	200
Cadmio	0.15	—	—	—	—
Calcio	36,300	29,600	202,700	5,000	200,000
Cromo	200	5.3	36	—	—
Cobalto	23	4.9	33	—	—
<b>COBRE</b>	<b>70</b>	<b>20 - 70</b>	<b>140-480</b>	<b>5</b>	<b>200</b>
Fluor	600-900	250	1,700	—	—
Galio	15	—	—	—	—
Germanio	7	—	—	—	—
Oro	0.005	0.0033	0.023	—	—
Indio	0.1	—	—	—	—
Fierro	50,000	510	3,500	—	—
Plomo	16	3.4	23	—	—
Litio	65	—	—	0.1	4
Magnesio	20,900	4,400	30,300	700	28,000
Manganeso	1,000	52	360	—	—

(Continuación) TABLA No. 1

ELEMENTOS	ROCAS IGNEAS (ppm)	AGUAS DULCES		PLANTAS TERRESTRES	
		Agua (ml- crogramo por litro)	Residuo (ppm)	Peso Seco (ppm)	Cenizas (ppm)
Mercurio	0.077-0.5	0.05	0.34	—	—
Molibdeno	2.5-15	—	—	0.5	20
Niobio	24	—	—	—	—
Níquel	80-90	15	100	—	—
Platino	0.005	—	—	—	—
Potasio	25,900	2,900	20,200	3,000	120,000
Tierras raras	120	—	—	0.4	16
Renio	0.001	—	—	—	—
Rubidio	310	—	—	2	80
Selenio	0.09	8	55	—	—
Silicio	277,200	8,000	54,500	1,500	60,000
Plata	0.1	0.0071	0.048	—	—
Sodio	28,300	3,800	26,300	200	8,000
Estroncio	300	—	—	20	800
Azufre	520	5,500	27,900	500	20,000
Tantalio	2.1	—	—	—	—
Telurio	0.0018	—	—	—	—
Talio	1.3	—	—	—	—
Estaño	40	—	—	—	—
Titanio	4,400	25	170	2	80
Tungsteno	1.5-69	—	—	—	—
Vanadio	150	—	—	0.2	8
Zinc	132	10	70	32	1,300
Zirconio	220	—	—	—	—

# C A P I T U L O I

## DISPERSION PRIMARIA

Los principios que controlan la migración de los elementos a cierta profundidad son muy diferentes de los que operan en condiciones superficiales. En ambientes "profundos" los procesos geoquímicos dependen de la estabilidad relativa de los minerales, bajo un conjunto de condiciones determinado presión y temperatura y suministro de materiales. Los elementos que pueden entrar en la red cristalina de un mineral estable, quedan inmovilizados; los que no, permanecen en estado móvil hasta que encuentran un medio en el cual puedan acomodarse, en un compuesto químico de las características anteriores. Esta regla se cumple independientemente de que el proceso que formó las rocas se considere como metamorfismo primario, metasomatismo o cristalización a partir de un magma.

La abundancia de los materiales produce un efecto de tal naturaleza que la mayoría de los minerales resultan estables solamente en presencia de suficiente suministro de los elementos que lo componen. Por lo tanto, los minerales que forman las rocas comunes tienen como constituyentes esenciales solamente a los 9 elementos en la naturaleza. Estos elementos son, en orden de abundancia: oxígeno — silicio — aluminio — fierro — calcio — sodio — potasio — magnesio y titanio.

Los elementos conocidos como tierras raras se presentan como constituyentes esenciales, exclusivamente en algunos minerales accesorios de las rocas ígneas o metamórficas, principalmente zircón y monazita. En resumen, de los 88 elementos químicos estables, solamente 12 más algunas tierras raras, entran como componentes básicos en la mayoría de los minerales que componen las rocas.

Muchos de los elementos restantes pueden incorporarse parcialmente en algunos de los minerales comunes, ocupando una posición en la estructura cristalina de estos minerales, que normalmente debería estar ocupada por uno de los elementos principales. A este tipo de sustitución se le llama diadóquica y se produce solamente cuando las características del ión que sustituye no discrepan de las del ión sustituido o lo hacen dentro de muy pequeños límites. Por ejemplo, el radio iónico y el potencial de ionización del plomo son muy semejantes a los del potasio, y por tanto, el primero puede sustituir al segundo en los feldespatos potásicos. Esto produce el curioso efecto de que la mayor abundancia del plomo presente en la naturaleza, se derive del contenido que de éste elemento tienen los feldespatos y no de los espectaculares afloramientos de minerales plumbíferos, tales como la galena. De modo semejante, el zinc, el cobre y el cobalto pueden sustituir al fierro y al magnesio de las anfíbolos y las biotitas, etc. La magnitud de la sustitución diadóquica de estos elementos en los minerales adecuados, es proporcional a su abundancia relativa en el material a partir del cual se formaron los cristales. Es-

Lo quiere decir que la presencia de una mica rica en estaño, procedente de un dique pegmatítico, implica necesariamente un fluido pegmatizante rico en estaño.

Los elementos que no pueden acomodarse en la estructura cristalina de los minerales comunes se concentran en el líquido residual. Una pequeña parte puede quedar atrapada mecánicamente en forma de delgadas capitas que cubren las interfaces cristalinas. Sin embargo, el mayor porcentaje de ellos queda fuera del sistema. El enriquecimiento progresivo de elementos raros en el líquido residual favorece la formación de minerales que contengan éstos elementos como constituyentes esenciales y es responsable de los poco usuales conjuntos mineralógicos que se encuentran en las pegmatitas. El agua no puede acomodarse completamente en los minerales de alta temperatura y se concentra también en los fluidos residuales y con el descenso de la temperatura les imparte las conocidas propiedades de las soluciones acuosas. Los depósitos hidrotermales que forman la mayor parte de los yacimientos de sulfuros de metales básicos se forman por precipitación, en esta etapa, dentro del ciclo geológico primario.

En la exploración en busca de yacimientos minerales, son importantes 3 clases de anomalías primarias o modelos de dispersión: las provincias geoquímicas, dentro de las cuales la composición química de las rocas puede correlacionarse directamente con la presencia de cierta clase de yacimientos; los modelos de dispersión formados por el movimiento de fluidos acuosos contemporáneos a la mineralización y finalmente las secuencias producidas por el movimiento de gases a bajas temperaturas.

### PROVINCIAS GEOQUÍMICAS

Por provincia geoquímica debe entenderse una parte de la corteza terrestre en la cual la composición química es significativamente diferente del nivel de referencia. Su presencia se pone de manifiesto al comparar los análisis de sus rocas con la composición media de las rocas ígneas. Ahora bien, los procesos normales petrogenéticos pueden causar variaciones en la composición química de las rocas que podrían enmascarar a los cambios derivados de composiciones químicas diferentes a los magmas originales. Sin embargo, el contenido de los elementos minoritarios es poco afectable por los procesos petrogenéticos y puede servir de norma en la localización de una verdadera provincia geoquímica. La hipótesis entonces es que las rocas ígneas que tienen un contenido similar de los elementos principales, son el resultado de procesos petrogenéticos semejantes y que el contraste en la composición de los elementos minoritarios es un reflejo de las diferencias originales en la composición de los materiales primarios a partir de los cuales se formaron las rocas ígneas.

Los técnicos dedicados a la geología económica han identificado zonas caracterizadas por la abundancia de minerales de un determinado elemento y les han llamado provincias metalogenéticas, las más clásicas de las cuales han quedado definidas casi ex-

clusivamente de acuerdo con la producción que se ha obtenido de ellas. A medida que se profundiza el estudio de tales provincias se hace más evidente que la existencia de una gran parte de ellas está relacionado con áreas en las que las rocas ígneas tienen contenidos elevados de los mismos elementos. Esto equivale a decir que la abundancia de minerales de cierta clase es simplemente una manifestación de la existencia de una provincia geoquímica.

En la búsqueda de depósitos de cualquier elemento, el explorador debe dirigirse a las provincias geoquímicas o metalogénicas enriquecidas en el elemento de que se trate y por esto, las provincias geoquímicas deben usarse como guía preliminar en la selección de áreas en las que deben hacerse una investigación más detallada. Bajo condiciones favorables es posible seleccionar zonas adecuadas para la exploración, por medio del análisis de huellas de los elementos, practicados sobre unas cuantas muestras de rocas ígneas o de minerales, interpretando después los resultados en términos de provincias metalogénicas.

#### DISPERSION CON FLUIDOS ACUOSOS

La mayoría de los depósitos minerales son el resultado de precipitación de materiales a partir de un fluido acuoso de determinada clase, que se mueve a través de un sistema de canales en la roca. La naturaleza exacta de estos fluidos es objeto de muy intensa investigación, ya que suele ser muy diferente de acuerdo con las diferentes clases de mineralización. Bajo determinadas condiciones puede tratarse de soluciones acuosas a temperaturas relativamente bajas y bajo otras puede ser un fluido gaseoso, rico en agua y aún un magma acuoso.

A medida que el fluido acuoso viaja a través del sistema de canales, el ambiente físico y químico que le rodea va cambiando constantemente y, en un esfuerzo para mantener el equilibrio con el medio, se producen series de reacciones químicas, tanto en el interior del fluido como entre el fluido y la roca encajonante. Entre las principales reacciones de este tipo está la formación de minerales de mena y su precipitación como yacimientos metalíferos.

Se han estudiado cuidadosamente los modelos de alteración en los que el efecto de las soluciones mineralizantes se manifiesta fundamentalmente a través de la modificación del conjunto mineral primario, y ha quedado bien establecida su importancia en el campo de la exploración geoquímica. Los estudios de tales alteraciones están basados en el dibujo de mapas de la distribución de minerales secundarios diagnósticos que puedan identificarse directamente, bien sea en los ejemplares de mano o bajo el microscopio. Sin embargo, por regla general, los modelos de metales dispersados por estos procesos no pueden mapearse sin la ayuda de análisis químicos del material alterado.

Ha sido con la aplicación reciente de las técnicas de análisis rápidos al estudio de las rocas modificadas hidrotermalmente, que

los modelos de dispersión hidrotermal se han hecho más importantes, tanto en la exploración de depósitos minerales como para explicar la génesis de los mismos.

Gross, 1950-1952 al estudiar la relación entre la mineralización de oro, con troncos graníticos en Ontario, encontró un aumento de la radiactividad del granito en dirección del área mineralizada. Los estudios químicos demostraron que con el aumento de la radiactividad había un aumento en el contenido de uranio, torio, Zirconio, silicio y metales pesados en el granito. Gross postuló que todos estos elementos se concentraron por movimientos de los residuos ígneos en la dirección de menor potencial gravitatorio y el mismo factor debió haber controlado la localización del depósito de oro.

### Lixiviación

En numerosas áreas se han cartografiado modelos de metales dispersos en las rocas y en zonas de fractura sobre depósitos cubiertos. A los modelos de dispersión de esta clase se les ha dado el nombre "halos de lixiviación", de acuerdo con la teoría de que algo de los metales se ha lixiviado hacia arriba a partir del yacimiento y aunque no se ha comprobado se presume que los mencionados halos representan las últimas manifestaciones de fluidos mineralizantes ya exhaustos que se mueven hacia arriba después de haber entregado la mayor parte de su carga metálica.

### Dispersión en la roca encajonante

En la literatura geoquímica se han descrito también algunos ejemplos de dispersión por medio de fluidos acuosos en los que se habla de trazas de minerales metálicos dispersos en la roca encajonante del depósito mineral. Indudablemente la mayor parte de este tipo de dispersión se formó simultáneamente con la deposición de los cuerpos minerales al tiempo en el que los fluidos mineralizantes juveniles proporcionaron una cantidad suficiente de metales. Algunos otros tipos de dispersión se producen posteriormente, debido a la entrada de soluciones hidrotermales capaces de disolver los elementos que constituyen el yacimiento mineral preexistente.

### Aplicaciones

Cada una de las diferentes clases de anomalías primarias formadas por el movimiento de fluidos acuosos tienen su campo particular de utilidad en la exploración. Los halos de lixiviación tienen su principal importancia en el sentido de que son uno de los pocos índices disponibles para encontrar cuerpos minerales altados a profundidad y que no afloran. Los halos en las rocas encajonantes son muy útiles en la exploración subterránea, etc.

## DISPERSION GASEOSA

Algunos componentes de la corteza terrestre se mueven a baja temperatura en forma de gases que pasan a través de los poros de las rocas y suelos y escapan directamente a la atmósfera. Un movimiento de esta clase depende de la existencia de canales abiertos continuamente. Cerca de la superficie el flujo de gases queda modificado por los cambios en la presión barométrica que producen movimientos alternos de entrada y salida de gases.

Los modelos de dispersión gaseosa pueden detectarse directamente por medio del análisis de los propios gases o bien bajo condiciones favorables, analizando el material a través del cual han pasado formando productos de condensación.

Los componentes hidrocarbonados volátiles de los mantos petrolíferos, por ejemplo algunas veces encuentran manera de escapar a través de las rocas suprayacentes hasta alcanzar la superficie. Tal posibilidad es la base de muchos métodos geoquímicos de exploración por petróleo que consisten en el análisis sistemático de suelos, buscando trazas de algunos compuestos hidrocarbonados diagnósticos.

El decaimiento de los núcleos de algunos elementos radiactivos produce gases nobles. En la desintegración del uranio, por ejemplo se producen radón y helio. Semejantemente se produce argón al decaer el isótopo 40 del potasio. Estos gases pueden viajar distancias bastante considerables y formar modelos de dispersión que son muy útiles en la exploración geoquímica de los elementos padres. Debido a que los gases nobles son químicamente inertes, no inducen ningún cambio en las rocas a través de las cuales viajan y tienden a escapar hacia la atmósfera por la ruta más corta posible. Se ha calculado que el agua de los manantiales radiactivos pierde hacia la atmósfera más del 40 por ciento de su radón en el primer metro y medio de flujo superficial. No obstante eso, el radón decae, a su vez a través de una serie de productos radiactivos intermedios que incluyen isótopos de polonio, plomo y bismuto. Consecuentemente los modelos de dispersión formados por los hijos radiactivos del radón pueden detectarse y medirse a través de estudios sistemáticos de suelos y aguas.

Entre los metales no radiactivos, el mercurio es el único cuyo modelo de dispersión gaseoso proporciona alguna ayuda en su exploración. En Rusia Saukov (1946) describe una zona de actividad en mercurio y una arenisca de 2,000 m de ancho que rodean todos los yacimientos de mercurio conocidos en esa vecindad. El mencionado autor interpreta esas anomalías como efecto de la dispersión gaseosa en el mercurio a partir de los depósitos primarios a través de los poros de la roca de la región.

Los modelos formados por dispersión gaseosa en el mercurio a partir de los depósitos primarios a través de los poros de la roca de la región



Los modelos formados por dispersión gaseosa, al igual que los halos de lixiviación proporcionan información acerca de yacimientos sepultados que no afloran a la superficie. Sin embargo, su utilidad en la exploración queda limitada a los pocos materiales que o bien son volátiles o producen volátiles, especialmente petróleo, mercurio y uranio.

## CAPÍTULO II

### MOVILIDAD DE LOS ELEMENTOS EN AMBIENTES SUPERFICIALES

El medio físico y químico que prevalece en la superficie de la Tierra difiere diametralmente con respecto al que se encuentra a las profundidades en las que se forman las rocas ígneas y metamórficas y sus minerales asociados. Los compuestos químicos que son estables en los medios profundos se descomponen en la superficie y se forman nuevos conjuntos de minerales. Se producen complejas series de equilibrios químicos, físicos y biológicos que comienzan con la desintegración inicial de las rocas primarias y terminan finalmente con el depósito de una nueva secuencia de rocas sedimentarias. El mecanismo según el cual se mueven los elementos, sufre un cambio radical. Los factores que gobernaban la movilidad de los elementos en las rocas sepultadas a profundidad, ya no son operantes y los sistemas quedan controlados por un conjunto de influencias completamente nuevo. Algunos elementos, tales como el cobalto, que originalmente estaban inmovilizados formando parte de minerales de alta temperatura, se hacen relativamente móviles en condiciones superficiales mientras que otros, tales como el silicio, se comportan a la inversa. En general no hay ninguna correlación inmediata entre la movilidad de los elementos en los ciclos gequímicos primario y secundario.

El comportamiento característico de los elementos puestos en libertad por el intemperismo de los depósitos minerales determina la naturaleza de los modelos de dispersión resultantes y de las anomalías geoquímicas. Y cuando la exploración debe ser planeada inteligentemente, se tiene que contar con un completo entendimiento de los factores que gobiernan la movilidad de los elementos.

La movilidad o sea la facilidad y rapidez con que se mueven los materiales, es la resultante de un vasto conjunto de diferentes factores que en general pueden agruparse en físicos, químicos y biológicos.

#### Factores que afectan la movilidad

El factor más importante responsable del movimiento de materiales en la superficie de la Tierra es la fuerza de gravedad a la cual se oponen las fuerzas de fricción que deben ser superadas antes de que el movimiento se produzca. En los agregados sólidos y secos la fuerza de fricción es alta, pero con el humedo-

cimiento del sistema éste se lubrica y queda en condiciones de iniciar su movimiento. De acuerdo con la composición y estructura del agregado sólido, el movimiento originado podrá ser de treva, derrumbe, flujo de lodo, etc. Cuando el material que se mueve bajo la influencia de la fuerza gravitacional es principalmente acuoso, esta fuerza se origina en la atracción de superficie y trabaja contra las paredes del canal; en una roca en donde el agua está contenida en pequeñas fracturas, el efecto de la gravitación suele ser despreciable, comparado con las fuerzas que tienden a sujetar a las moléculas de agua en su lugar; en los suelos moderadamente permeables el movimiento es lento pero medible y en los canales abiertos y ríos, el flujo es relativamente libre y los materiales pueden viajar grandes distancias en tiempos comparativamente cortos.

Las elementales consideraciones anteriores llevan a una conclusión de primordial importancia en la valoración de la movilidad de los elementos en los ambientes superficiales: puesto que el agua puede moverse en la superficie terrestre con más libertad que cualquier otro elemento, todo material que es acarreado por ella recibe una movilidad equivalente. Los materiales que pueden viajar en solución o como suspensión coloidal en el agua, son los que presentan la más alta movilidad, y aquellos a los que el agua mueve muy raras veces solamente, son los que tienen la menor. La movilidad de un elemento, por lo tanto, es casi siempre sinónimo de la tendencia que tiene éste a ser estable en soluciones acuosas o en suspensiones.

Además de la fuerza de gravedad y de la fricción opuestas a la primera otras fuerzas físicas intervienen en el movimiento de los materiales, bajo determinadas condiciones. La capilaridad, por ejemplo, es capaz de mover soluciones a través de los finos poros que hay en los materiales y suelos, en contra de la fuerza de gravedad. La difusión actuando en un sistema acuoso estático, puede mover a los iones en dirección de su menor concentración. En una matriz cristalina rocosa de grano fino, los iones también pueden moverse a lo largo de la superficie de las partículas minerales y emigrar de unas a otras.

#### Factores químicos que afectan la movilidad

En el párrafo anterior quedó establecido que todo material capaz de ser transportado por el agua, es móvil y aquel que no se comporta como relativamente inmóvil en los ambientes superficiales. Las reacciones químicas en estos medios también resultan dominadas por el agua, que es el solvente en el que se efectúa la gran mayoría de las antes dichas reacciones.

El efecto catalítico que produce el agua en las reacciones químicas, es el resultado de su capacidad para disociar compuestos inorgánicos solubles, en sus iones, es decir, de romper algunas de las ligaduras que mantienen unidos a los compuestos. Todo cambio químico involucra el rompimiento de ligaduras. A temperaturas

elevadas estas ligaduras se rompen por la agitación térmica de los átomos dentro de las moléculas y las reacciones químicas alcanzan rápidamente su equilibrio. Sin embargo, a temperaturas como las que prevalecen en la superficie terrestre las reacciones solamente caminan bajo la poderosa influencia de un agente catalítico, tal como el agua.

Las propiedades de las soluciones iónicas más importantes en la formación de anomalías geoquímicas secundarias son: concentración de iones hidrógeno; solubilidad de las sales; coprecipitación; adsorción; aborción; potencial de oxidación, y formación de compuestos orgánicos o de iones complejos.

**Concentración de iones hidrógeno.**—La alcalinidad o acidez de una solución acuosa puede expresarse cuantitativamente en términos de la concentración de iones hidrógeno dentro de ella. El agua pura bajo condiciones normales es neutra, es decir, tiene una concentración igual, tanto de iones hidrógeno como de iones oxhidrilo ( $10^{-7}$  moles-litro). Se acostumbra expresar la acidez o alcalinidad de las soluciones en términos del negativo del logaritmo de la concentración de iones hidrógenos que es a lo que se da el nombre de pH. Por tanto, en condiciones ideales, una solución neutra tiene un pH de 7, una solución ácida 1 N tiene un pH de 0 y una solución básica 1 N, de 14.

El pH de un suelo se define como el pH del lodo acuoso que se forma al agregar agua destilada al suelo. En el caso de los minerales, se acostumbra hacer una medida semejante, pulverizándolos y disolviéndolos en agua pura.

El pH normal de las aguas superficiales varía entre 4.5 y 8.5, y la mayoría de las reacciones químicas en el ciclo de intemperismo se producen dentro de este mismo rango. Una notable excepción a esta regla es la oxidación de la pirita y de la marcasita en donde el ácido sulfúrico que se forma produce condiciones de acidez extrema. El pH común de los suelos varía entre 4 y 9.

La solubilidad de la mayor parte de los elementos y la estabilidad de sus compuestos es extremadamente sensible a los cambios de pH del agua ambiente y sólo muy contados de ellos, entre los que están los metales alcalinos, se disuelven normalmente como iones disociados a través de todo el intervalo de pHs. La mayor parte de los elementos metálicos se disuelven como cationes en soluciones ácidas, pero tienden a precipitarse como hidróxidos o sales básicas al disminuir la concentración de los iones hidrógeno.

**Solubilidad de las sales.**—La capacidad de un ión para permanecer en soluciones acuosas está limitada por la solubilidad de las sales que forma con los iones de carga opuesta presentes en la misma solución. Además del anión OH, cuyo efecto se mencionó brevemente en el párrafo anterior, en las soluciones naturales se encuentran generalmente presentes los aniones  $\text{CO}_3$ ,  $\text{Cl}$ - y  $\text{SO}_4$ -.

Para tener una idea aproximada acerca de la solubilidad de un precipitado inorgánico, es útil referirse a esta solubilidad en términos de una constante conocida como el producto de solubilidad que es una consecuencia de la ley de acción de masas y que indica que una sal puede precipitarse a partir de una solución saturada, al aumentar la concentración de cualquiera de los iones participantes, y viceversa.

En la naturaleza la formación de un buen número de minerales se halla restringida a ambientes muy especiales en los que se producen sistemas enriquecidos con los iones que van a formar los minerales. Entre los más notables de estos ambientes especiales deben mencionarse los que producen las oxidaciones de los depósitos sulfurados. Por ejemplo, la abundancia local de iones plomo y iones sulfato, ambos producidos por la oxidación de la galena, muy frecuentemente excede el producto de solubilidad del sulfato de plomo, con la consecuente formación de anglesita; el yeso se precipita cuando una solución rica en sulfúrico reacciona con la cal disuelta en aguas normales. Semejantemente los carbonatos de cobre, junto con otros muchos minerales se precipitan a partir de las soluciones acuosas, cerca de la zona de oxidación de minerales sulfurados cuando la concentración de los iones componentes es relativamente alta.

La disolución de los compuestos simples formados en los ambientes superficiales también resulta influida por la abundancia de iones componentes en las soluciones. Muchos minerales secundarios estables en presencia de soluciones ricas en sulfatos, en metales o en ácidos, que son características de los ambientes de oxidación de los depósitos sulfurados, se redisuelven al entrar en contacto con soluciones normales. Así, por ejemplo, los minerales secundarios de zinc pueden preservarse solamente cuando están muy cerca de una fuente activa de zinc y tan pronto como el efecto protector de las soluciones enriquecidas desaparece los minerales a su vez se disuelven.

**Sustituciones diatómicas.**—En los minerales que se encuentran en la naturaleza precipitados a partir de soluciones acuosas, es común encontrar trazas de muchos otros elementos, además de los principales. Así, por ejemplo, la limoniat puede contener cantidades importantes de arsénico, cobre y cobalto; la barita, formada por precipitación en aguas termales generalmente tiene un contenido elevado de radio, etc. Como ya se dijo este tipo de sustituciones se produce cuando las propiedades físicas del ión huésped, en particular el radio iónico y el potencial de ionización, son muy semejantes de las de los iones de los compuestos principales presentes en la red cristalina de los minerales recién formados. Los iones "extraños" también pueden quedar ocluidos o atrapados mecánicamente dentro del cuerpo del cristal huésped, sin ocupar necesariamente una posición sistemática en la red cristalina.

**Adsorción.**—Cuando las soluciones iónicas están en contacto con partículas sólidas, se producen fuerzas de atracción que tienden a sujetar a los iones en la superficie de las partículas. Esta fuerza de atracción es el resultado de cargas eléctricas no balancea-

das o de uniones rotas en la superficie irregular del mineral. La fuerza del ligamento depende de la magnitud de la carga superficial y de las propiedades de cada especie iónica y será diferente para cada una de ellas. La "capacidad de intercambio" o número de iones que pueden fijarse por adsorción, varía también con el tamaño de grano y con el tipo de red cristalina del mineral. Las arcillas y la materia orgánica tienen la mayor capacidad de intercambio y por esto la adsorción se hace muy importante en relación con los suelos y sedimentos de grano fino, enriquecidos en estos materiales.

Los iones sujetos por las fuerzas superficiales forman un equilibrio dinámico con la solución que les rodea. Un cambio en el contenido iónico de éstas se reflejará por lo tanto en un cambio en el contenido de iones adsorbidos.

Ya se dijo que la fuerza de ligadura de los iones es diferente para cada distinta especie. Los cationes más comunes pueden ordenarse en series de la manera siguiente:

Li Na K— NH<sub>4</sub> Rb Cs Mg Ca Ba H

En esta serie el litio es el que tiene la ligadura más débil y el hidrógeno la más fuerte, por lo tanto, los iones de la izquierda en la serie ceden su posición ante la presencia de los iones de la derecha y como el pH de un suelo es una medida de la abundancia de iones hidrógeno intercambiables, y además, como las reacciones de intercambio obedecen a la ley de acción de masas, al aumentar la acidez de un suelo aumenta la sustitución de los metales alcalinos por el hidrógeno.

**Absorción.**—Algunas veces los iones pueden entrar en la estructura cristalina abierta de algunos minerales, ya sea ocupando huecos de tamaño apropiado o reemplazando a los iones que ya estaban presentes. Este fenómeno se observa con mayor frecuencia en los minerales arcillosos del grupo de la montmorillonita que están caracterizados por estructuras cristalinas relativamente abiertas que forman "conductos" a través de los cuales pueden entrar los iones extraños. La lenta modificación de montmorillonita e illita en condiciones de superficie debe visualizarse como el resultado de la absorción de potasio, magnesio, calcio, fierro y otros cationes a través de los espacios que están entre las capas de la montmorillonita.

Existen muchos otros minerales, además de la montmorillonita, con la propiedad de absorber iones en cantidades más o menos grandes.

No es fácil marcar una división clara entre los fenómenos de adsorción y los de absorción, puesto que en ambos casos la "intercambiableidad" depende de la fuerza de ligadura que mantiene a los iones en una posición determinada sobre o dentro de la estructura cristalina. Por esta razón muchos autores prefieren considerar a los dos fenómenos anteriores dentro del término único de "sorción".

**Potencial de oxidación.**—Una de las características más sobresalientes de los ambientes de intemperismo, es la abundancia de oxígeno libre, comparada con las condiciones que rigen en los medios en que se forman las rocas ígneas o metamórficas. Muchos minerales estables a profundidad se descomponen bajo la influencia del oxígeno atmosférico.

La razón por la cual el oxígeno estimula las reacciones químicas es obviamente su capacidad para incrementar la valencia positiva de un gran número de iones. Los sulfuros, por ejemplo, tienden a reaccionar con aguas ricas en oxígeno para formar sulfatos; los iones ferrosos pasan a férricos y lo mismo sucede con el magnesio, cobre, vanadio, uranio, etc.

El mecanismo opuesto a la oxidación es la reducción, en la que la valencia positiva de los elementos disminuye. Las condiciones reductoras se producen como resultado de actividad orgánica, en la que se consume el oxígeno y se acumula materia carbonosa en abundancia.

El aumento de la valencia positiva en un ión es el resultado de la pérdida de electrones de éste, y la tendencia que tienen los electrones a escapar, es mayor en un sistema parcialmente oxidado. La libertad relativa de los electrones puede medirse por medio de un metal conductor químicamente inerte tal como el platino, que se pone en contacto con las soluciones y se compara el potencial eléctrico que resulta entre el electrodo metálico y el de hidrógeno. El resultado de esta medida es a lo que se llama Eh.

Cuando el Eh de una solución acuosa sobrepasa cierto valor límite, el agua se descompone con desprendimiento de oxígeno elemental, mientras que si pasa por debajo de otro valor límite determinado, la descomposición da por resultado el desprendimiento de hidrógeno elemental. Los anteriores parámetros limitan el intervalo de potenciales de oxidación que son posibles en soluciones acuosas naturales, y todas las reacciones de oxidación-reducción que tienen lugar en la superficie de la Tierra se efectúan dentro de ese rango.

El potencial de oxidación al cual se efectúan la mayoría de las reacciones de oxidación-reducción, cambia con el pH de las soluciones. A excepción hecha de unas cuantas reacciones que son esencialmente independientes del pH, con el aumento de éste, disminuye el Eh al cual se producen las reacciones y por tanto, al hacer alcalina una solución puede producirse la oxidación de muchos iones. Por ejemplo, el hierro ferroso puede resultar estable aún en presencia de soluciones ligeramente oxidantes si el ambiente es relativamente ácido; pero si la solución pasa por condiciones de alcalinidad, el hierro ferroso se oxidará a férrico y se precipitará como hidróxido. El ión manganeso también es estable en aguas ácidas, pero al aumentar el pH pasa a mangánico que se hidroliza inmediatamente a  $MnO_2$  (pirolusita). En soluciones ácidas la pirolusita queda fuera de los límites de estabilidad del agua, por lo tanto, la presencia de este mineral indica que el pH del medio ambiente en el cual se formó, tuvo que ser relativamente alcalino.

**Complejos inorgánicos.**—Algunos iones que contienen varios átomos, tales como los iones sulfato deben considerarse como complejos y suelen tratarse como combinaciones de iones simples con compuestos neutros, o bien con otros iones. Los nuevos compuestos ionizados tienen propiedades totalmente diferentes de los iones a partir de los cuales se formaron y, por tanto, la formación de complejos inorgánicos cambia totalmente el comportamiento químico de los iones y modifica los modelos de dispersión que se forman en ambientes superficiales.

**Soluciones coloidales.**—Una solución coloidal puede definirse como un medio líquido que contiene partículas sólidas dispersas cuyo tamaño sobrepasa al de las moléculas simples, pero que sin embargo no puede ser observado por un microscopio común. Esto quiere decir que el tamaño de las partículas sólidas debe encontrarse entre 500  $\mu$  y 1  $\mu$ . Debido a lo extremadamente pequeño de su tamaño, el movimiento de las partículas coloidales en los medios líquidos está regido más bien por sus propiedades eléctricas superficiales que por la gravitación y, como resultado los materiales coloidales en suspensión no se sedimentan, sino que permanecen dispersos y se mueven dentro del líquido, de la misma manera que las soluciones verdaderas.

El medio dispersor más común en la naturaleza es el agua, por lo que las soluciones coloidales se forman generalmente en la zona de intemperismo en la que hay materiales que precipitan químicamente a partir de soluciones acuosas verdaderas, pero que por una u otra razón no llegan a formar agregados o cristales de mayor tamaño. La sílice hidratada, la alúmina y el óxido de hierro que precipitan durante el intemperismo, en condiciones apropiadas pueden dispersarse como partículas submicroscópicas y formar soluciones coloidales. Lo mismo sucede con minerales arcillosos de grano muy fino y en este estado es frecuente que tales materiales salgan del sistema acarreados por el agua y no se conserven junto con los otros productos insolubles.

En los párrafos anteriores se ha dado una ligera revisión a los factores más importantes que determinan la movilidad de los elementos en los ambientes superficiales. La distribución de tales elementos entre la fase líquida móvil y la fase sólida relativamente inmóvil, depende del conjunto de los anteriores factores físicos, químicos y biológicos. En algunos casos tal distribución queda determinada por uno sólo de ellos, pero en general, la movilidad relativo de un elemento es el resultado de una complicada combinación de factores cuyo efecto neto es extremadamente difícil predecir.

#### Movilidad de los elementos en ambientes mineralizados

Para la exploración geoquímica es muy importante la forma en que los metales se dispersan a partir de los yacimientos minerales. Las condiciones que gobiernan la movilidad de los elementos cerca de un depósito de sulfuros en oxidación, son muy diferentes a

aquellas que son características de los ambientes normales, debido a las condiciones extremas de acidez creadas por el sulfúrico libre que resulta de la oxidación de la pirita o de la marcasita.

Las observaciones empíricas hechas por Emmons sobre la movilidad de yacimientos metálicos en aguas de mina ricas en sulfatos, le llevaron a la conclusión de que en la zona de enriquecimiento secundario y en ausencia de cloruros la plata posee una movilidad mayor que el plomo o que el oro. El cobre es relativamente más móvil en ambientes oxidantes y, finalmente, el zinc adquiere su mayor movilidad en medios ácidos. De aquí se concluye que en aguas ácidas ricas en sulfatos procedentes de una mena, son el plomo, el cobre y el zinc los que presentan la mayor movilidad, sin embargo, es extraordinariamente raro encontrar aguas que contengan más de 10 microgramos por litro de plomo, aún en aquellas que proceden del drenaje de depósitos de plomo de alta ley. La relativa inmovilidad del plomo en los ambientes mineralizados se debe parcialmente a la estabilidad relativa de la galena, en comparación con la de otros sulfuros. Asimismo, el sulfato de plomo es mucho menos soluble que los sulfatos de zinc o de cobre. Este último generalmente es un constituyente importante en las aguas que ocurren a través de depósitos cupríferos, siempre y cuando el pH sea inferior a 5. En las aguas superficiales normales, en las que el pH varía entre 5.5 y 7.5, el contenido del cobre queda por debajo del límite de sensibilidad del método de la ditizona.

### DISPERSION SECUNDARIA

Se han revisado someramente los factores que gobiernan la separación que sufren los elementos entre la fase acuosa móvil y la fase sólida inmóvil en los ambientes superficiales. Los modelos de dispersión que resultan de esta separación dependen de los diferentes agentes que influyen los tipos de movimientos que sufren los materiales en la corteza terrestre.

En el sentido estricto de la palabra, el intemperismo constituye únicamente la primera fase del ciclo geoquímico secundario, que es la que está dominada por los cambios químicos y físicos necesarios para restablecer el equilibrio de las rocas con las nuevas condiciones superficiales. En este tipo de procesos el movimiento de los materiales es de importancia secundaria. Sin embargo, en la parte final del ciclo los cambios que sufren los productos durante su viaje hasta el sitio de su sedimentación final, están controlados por los diferentes agentes de transporte. Los modelos de dispersión de los productos del intemperismo quedan determinados por la forma del flujo de hielos tipo de drenaje y ambiente biológico predominante en el medio.

#### Intemperismo

Se define intemperismo como el cambio de las rocas de su forma masiva hasta los estados elásticos, o incluye a todos los pro-



cesos mediante los cuales se fragmenta la roca original y por los cuales estos fragmentos se reorganizan para formar nuevos sistemas estables.

**Procesos de intemperismo.**—El mecanismo físico dominante en los procesos de intemperismo es la desintegración de la roca masiva en fragmentos cada vez más pequeños. Esta fragmentación es el resultado de muy diferentes causas, entre las que cabe mencionar la expansión y contracción diferenciales que resultan de cambios bruscos de la temperatura; las fracturas ocasionadas por la expansión del agua contenida en las cavidades preexistentes al congelarse; la penetración de raicillas, y alguna otra actividad orgánica intrusiva.

Los procesos químicos, mucho más poderosos que los físicos, son el resultado del contacto con agua en abundancia, oxígeno y dióxido de carbono. La mayoría de los minerales primarios, inestables en los ambientes superficiales, tienden a transformarse en otros por hidrólisis oxidación y reacciones de doble descomposición, y al hacerlo, los granos se expanden diferencialmente. Las rocas entonces desarrollan la tendencia a romperse a lo largo de las líneas intergranulares.

**Productos del intemperismo.**—Los productos inmediatos del intemperismo pueden agruparse en tres clases:

- a) Minerales primarios residuales.
- b) Minerales secundarios que se forman en el mismo sitio o muy cerca de la roca original.
- c) Material soluble arrastrado por las aguas circulantes.

**Anomalías geoquímicas en las cubiertas residuales.**—En muchos suelos residuales los minerales primarios y secundarios que pueden considerarse como "diagnósticos" para la exploración geoquímica, son de grano demasiado fino, por lo que se dificulta su identificación. Los análisis químicos de materiales residuales pueden poner en evidencia algunas características latentes heredadas de la roca original y que no son obvias bajo la inspección ocular. Sin embargo, en el mapeo geológico y en la exploración geológica se ha hecho poco uso de los análisis químicos de los suelos, a pesar de que hay bastante trabajo experimental que demuestra que la determinación del contenido de algún elemento puede relacionarse directamente con la identificación de la roca original.

Entre los métodos geoquímicos de exploración minera el análisis de los suelos en busca de trazas de metales se ha convertido en el método más efectivo y en el más generalmente usado. Se han hecho muchas exploraciones de campo y el contenido de los suelos residuales que cubren depósitos sulfurados muestra casi sin excepción alguna, modelos de dispersión que corresponden a la distribución de los metales de las rocas infrayacentes.

La cantidad absoluta de los metales en los suelos, comparada con el contenido de los mismos metales en la roca original, depende por supuesto de la movilidad de éste o de la facilidad con la cual puede extraerse de sus soluciones.

Las anomalías geoquímicas en las cubiertas residuales suelen distorsionarse por movimientos de los suelos, según la dirección de menor pendiente. El resultado es una curva asimétrica en la cual el contenido metálico disminuye más o menos rápidamente en la dirección de la cima o de la base del depósito.

### MOVIMIENTO EN AGUAS SUBTERRANEAS

Entre los factores que alteran los modelos típicos de dispersión de los minerales, el agua constituye uno de los principales. El agua de lluvia se filtra a través de los suelos y va reemplazando al aire en los espacios intergranulares de los materiales.

Si los materiales porosos alcanzan suficiente profundidad, el agua de lluvia puede llegar hasta el manto acuifero, definido como la superficie debajo de la cual todos los espacios porosos de las rocas están completamente reemplazados por agua. El agua que queda debajo de este nivel tiende a moverse lateralmente en la dirección de menor presión y puede alcanzar la superficie en forma de manantiales u ojos de agua.

En áreas de rocas cristalinas o metamórficas cuya porosidad es despreciable, el nivel del manto acuifero suele localizarse muy por debajo de la superficie.

El agua y las sales disueltas en ella pueden moverse también en contra de la fuerza de gravedad, bien sea por capilaridad, por difusión o por migración de iones en la superficie de los minerales. Estos efectos son más pronunciados en las zonas no saturadas. El resultado neto del movimiento en contra de la fuerza de gravedad, en términos generales, es una dispersión de los constituyentes disueltos hacia arriba y hacia los lados, en la dirección de menor concentración.

Los elementos que pueden moverse más rápidamente en aguas subterráneas son los que tienen más alta movilidad, tales como el zinc y el cobalto y los modelos de dispersión que forman pueden cartografiarse directamente muestreando y analizando el agua misma. También pueden localizarse midiendo el intercambio catiónico en los materiales a través de los cuales se precolaron las soluciones. A medida que se obtiene un equilibrio entre los iones adsorbidos y la matriz, el halo de los iones disueltos se extiende a mayor distancia a partir de su origen y se produce en la matriz un modelo de dispersión que es una réplica exacta de la dispersión en el agua.

#### Actividad animal

En algunas zonas profundamente intemperizadas los exploradores han utilizado como material de estudio el acarreado hacia

la superficie por los animales. En Africa y en Australia se ha utilizado el análisis de los hormigueros en busca de trazas de metales, como método de exploración, aunque a la fecha no se hayan leído publicaciones acerca de los resultados que obtuvieron.

### **Actividad vegetal**

---

Los principios en los que se basan los estudios químicos o botánicos de las plantas como método para localizar depósitos minerales sepultados, son básicamente simples. Puede considerarse a las raíces de los árboles como mecanismos muestreadores capaces de extraer soluciones representativas de un gran volumen de material del subsuelo. Al evaporarse el agua el contenido mineral de esas soluciones se deposita y concentra en las hojas. Sin embargo, el sistema circulatorio de las plantas terrestres es bastante complicado. En él interviene un complejo conjunto de relaciones de equilibrio que se pone en marcha desde el momento en que las soluciones nutrientes entran por las raíces y termina en el momento en que el agua se dispersa en la atmósfera.

De las consideraciones anteriores se desprende que si el contenido metálico de una planta va a usarse en la exploración geoquímica, es necesario demostrar que existe una correlación simple entre este contenido y el contenido del suelo. Aunque este no es el caso general, en los casos en los que se pueden fijar y mantener constantes la mayoría de los factores que intervienen en este proceso puede encontrarse un grado de correlación bastante conveniente en el auxilio de la exploración geoquímica.

**Exploración por medio de observaciones botánicas.**—El efecto de las diferentes concentraciones metálicas en las soluciones nutrientes puede ir mucho más allá de la simple variación en la composición de las diferentes partes de la planta. Las altas concentraciones metálicas en el suelo puede modificar la morfología o el color de la flora y aún determinar cuáles especies pueden sobrevivir bajo tales condiciones. La identificación de los síntomas y de las especies que son características de los diferentes ambientes químicos puede proporcionar mucha ayuda para el explorador, aún sin el uso del análisis químico de los materiales.

Las características morfológicas y los colores anormales de las plantas ocasionados por elementos venenosos en las soluciones nutrientes se designan en general como "síntomas de toxicidad". Entre el límite del contenido de un elemento que una planta puede tolerar sin sufrir ningún cambio y aquel en el cual no puede sobrevivir, queda un intervalo de concentraciones en el cual la planta vive pero sufre los efectos tóxicos del elemento dado.

Generalmente la toxemia se presenta en forma de un crecimiento raquítico. Algunas plantas desarrollan síntomas diagnósticos peculiares que pueden interpretarse directamente en términos del exceso probable de algún elemento tóxico en el suelo. Así, por ejemplo la abundancia de zinc produce un color amarillento en las hojas que se conoce como clorosis. Cuando hay cobre, cobalto o cadmio en exceso, o bien una deficiencia de hierro, se producen síntomas cloróticos similares.

El agente de acarreo más importante de los materiales superficiales es el agua que corre en la superficie de la tierra. Los productos del intemperismo son arrastrados por ella, en parte como partículas sólidas que resultan de la erosión mecánica y en parte como material soluble que puede recorrer en poco tiempo grandes distancias.

Los modelos de dispersión que forman las aguas corrientes están restringidos a los canales de drenaje; el resultado es una distribución esencialmente lineal de los productos del intemperismo, en contraste con los arreglos tridimensionales de la mayoría de los modelos de dispersión primarios. Por esta razón se les conoce como "trenes de dispersión", en contraste con los halos u otros modelos no lineales que se forman en la corteza terrestre.

Puesto que los productos del intemperismo de una cuenca drenada por un río están formados por material acarreado de todas partes por donde fluye, la carga que lleva una corriente de agua en un punto dado, es una muestra del material procedente del área drenada y su composición será un reflejo de la composición química media de las rocas de la región. En particular el contenido metálico procedente de la intemperización de un depósito mineral suele quedar indicado por leyes más altas que las normales en los materiales acarreados por el río. Por lo tanto bajo condiciones favorables, los análisis químicos, ya sea de la carga sólida o bien de la carga soluble arrastrada por los ríos, pueden utilizarse en la valoración de la potencia mineral del área drenada por el agua.

Por supuesto que el modelo de dispersión característica de cualquier elemento en particular en un sistema de drenaje, depende de la facilidad con la que este elemento se mueve como mineral estable o resistente, o de la facilidad con la cual puede entrar en solución en la corriente acuosa.

**Minerales resistentes.**—Los materiales que no se descomponen con rapidez en los ambientes superficiales, incluyen tanto a los minerales residuales resistentes heredados de las rocas ígneas originales, como a los minerales arcillosos y óxidos secundarios. Estos minerales constituyen generalmente la mayor parte de la fracción de grano grueso que arrastran los ríos y se mueve fundamentalmente por arrastre a una velocidad mucho menor que la del agua. Los minerales arcillosos de la fracción hidrolizada son de grano más fino y acompañan al movimiento turbulento del agua, en suspensión mecánica coloidal. Al cesar la turbulencia la mayor parte de este material de suspensión se sedimenta en forma de lodos.

El transporte de los granos residuales produce una repetida erosión y sedimentación a lo largo del cauce de los ríos y durante éste, las fuerzas abrasivas actúan en el sentido de reducir continuamente el tamaño de los granos. Un arreglo empírico en el orden ascendente en cuanto a resistencia, es el que sigue: galeña, cuarzo, zircon, ilmenita, esfalerita, casiterita, magnetita, rutilo, cromita, pirita y turmalina.

La continua erosión y redeposición de lodos y de granos arenosos, resulta en un acomodo de los minerales de acuerdo con sus densidades. Los minerales pesados se concentran en el fondo de los canales y cuando contiene oro nativo o casiterita, por ejemplo se conoce como depósito de placer.

Los minerales secundarios estables, en condiciones favorables, también puede presentarse en la fracción de grano grueso de los sedimentos. Entre los principales debe mencionarse a la limonita, óxidos de manganeso, sobre secundario y minerales de plomo.

La exploración en busca de depósitos minerales se ha hecho desde hace tiempo, estudiando los minerales pesados. El gambusino debe localizar los minerales pesados derivados del intemperismo de depósitos de veta. Muchos de éstos se presentan únicamente en depósitos hidrotermales. Entre los principales deben mencionarse el oro, la casiterita y el cinabrio.

La exploración basada en el estudio de los minerales pesados consiste en determinar las cantidades relativas de algún mineral económico en los sedimentos de ríos e ir siguiendo el cauce hacia arriba hacia la fuente que está indicada por la secuencia creciente de las concentraciones.

En los casos en que la abrasión ha reducido el tamaño de grano hasta el extremo de que sus propiedades físicas no pueden observarse fácilmente el análisis química ha sustituido ventajosamente la identificación mineralógica. Algunos investigadores utilizan los análisis espectrográficos de los sedimentos como método de exploración, en busca de vetas estaníferas. En otros casos el análisis de los sedimentos de los arroyos muestra una distribución en su contenido de cobre que puede correlacionarse directamente con la presencia de menas río arriba.

**Material soluble.**—La fracción soluble de la carga arrastrada por los ríos viaja más aprisa que los minerales residuales o que los hidrolizados, como resultado, los modelos de dispersión de los elementos disueltos en el agua constituyen fenómenos relativamente transitorios y muy susceptibles a rápidos cambios en su configuración.

Los cambios físicos y químicos ambientales pueden modificar la composición de las corrientes de agua alterando la movilidad de muchos elementos. Entre los más sensibles a los cambios de esta clase están los de movilidad intermedia; así, el cobre y el zinc, por ejemplo, son muy sensibles a los cambios del pH, a los agentes orgánicos complejantes y a la capacidad de intercambio iónico de los sedimentos.

Una variación en el pH especialmente si las aguas son ácidas, produce las mayores variaciones en el contenido metálico del agua. El cobre tiende a salir de la solución cuando el pH pasa de 5 y por eso las aguas ácidas ricas en cobre pierden mucho de su contenido cuprífero a medida que se van diluyendo con aguas neutras.

La continua erosión y redeposición de lodos y de granos arenosos, resulta en un acomodo de los minerales de acuerdo con sus densidades. Los minerales pesados se concentran en el fondo de los canales y cuando contiene oro nativo o casiterita, por ejemplo se conoce como depósito de placer.

Los minerales secundarios estables, en condiciones favorables, también puede presentarse en la fracción de grano grueso de los sedimentos. Entre los principales debe mencionarse a la limonita, óxidos de manganeso, sobre secundario, y minerales de plomo.

La exploración en busca de depósitos minerales se ha hecho desde hace tiempo, estudiando los minerales pesados. El gambusino debe localizar los minerales pesados derivados del intemperismo de depósitos de veta. Muchos de éstos se presentan únicamente en depósitos hidrotermales. Entre los principales deben mencionarse el oro, la casiterita y el cinabrio.

La exploración basada en el estudio de los minerales pesados consiste en determinar las cantidades relativas de algún mineral económico en los sedimentos de ríos e ir siguiendo el cauce hacia arriba hacia la fuente que está indicada por la secuencia creciente de las concentraciones.

En los casos en que la abrasión ha reducido el tamaño de grano hasta el extremo de que sus propiedades físicas no pueden observarse fácilmente el análisis química ha sustituido ventajosamente la identificación mineralógica. Algunos investigadores utilizan los análisis espectrográficos de los sedimentos como método de exploración, en busca de vetas estaníferas. En otros casos el análisis de los sedimentos de los arroyos muestra una distribución en su contenido de cobre que puede correlacionarse directamente con la presencia de menas río arriba.

**Material soluble.**—La fracción soluble de la carga arrastrada por los ríos viaja más aprisa que los minerales residuales o que los hidrolizados, como resultado, los modelos de dispersión de los elementos disueltos en el agua constituyen fenómenos relativamente transitorios y muy susceptibles a rápidos cambios en su configuración.

Los cambios físicos y químicos ambientales pueden modificar la composición de las corrientes de agua alterando la movilidad de muchos elementos. Entre los más sensibles a los cambios de esta clase están los de movilidad intermedia; así, el cobre y el zinc, por ejemplo, son muy sensibles a los cambios del pH, a los agentes orgánicos complejantes y a la capacidad de intercambio iónico de los sedimentos.

Una variación en el pH especialmente si las aguas son ácidas, produce las mayores variaciones en el contenido metálico del agua. El cobre tiende a salir de la solución cuando el pH pasa de 5 y por eso las aguas ácidas ricas en cobre pierden mucho de su contenido cuprífero a medida que se van diluyendo con aguas neutras.

Al seguir el tren de dispersión de un elemento, debe ponerse muy especial atención a la forma en que éste es transportado. Siempre existe un equilibrio dinámico entre la fracción inestable de la carga sólida y la fracción soluble y la forma en que se distribuye cada elemento, en cada una de estas fases, depende del balanceo de muchos factores difíciles de evaluar, en bases puramente teóricas; sin embargo, dadas las condiciones de campo, siempre es posible tener una idea empírica de la forma en que se distribuye el elemento de que se trata. El material más conveniente para mostrarse puede seleccionarse tomando como base esta información preliminar empírica.

## C A P I T U L O   I I I

### EXPLORACION GEOQUIMICA APLICADA

En las páginas anteriores se han considerado brevemente algunas de las leyes que gobiernan la dispersión de los elementos químicos en los materiales terrestres y las características de los modelos de dispersión resultantes. Ahora debe considerarse la aplicación de tales estudios a la solución práctica de los problemas de exploración geoquímica en busca de minerales.

#### Selección del método de exploración

La exploración minera se hace en general estrechando poco a poco los círculos en los cuales se sabe que está contenido el depósito del mineral que se busca. Cada zona se caracteriza por algunas condiciones físicas o químicas que pueden servir para diagnosticar el ambiente favorable a la formación de una mena. Algunas de estas características están constituidas por estructuras geológicas favorables; otras son anomalías geofísicas que se forman como respuesta directa a las propiedades poco comunes del cuerpo mineral en sí y finalmente, hay las constituidas por los modelos de dispersión. Cuando no se conoce la zona en que se trabaja, la exploración debe comenzar por un estudio geológico de reconocimiento, tendiente a formar algún criterio sobre la posible forma y distribución de los depósitos minerales, criterio que debe servir para seleccionar las partes del terreno con mayor probabilidad y las que deben eliminarse, por considerarse relativamente poco favorables. Después de que se han seleccionado las zonas que parecen adecuadas, se debe hacer un estudio geológico un poco más cuidadoso, tomando en consideración aspectos más detallados que puedan servir para eliminar aquellas áreas cuyas características así lo ameriten.

Para seleccionar el método de exploración a seguir, deben tomarse en cuenta finalmente, el tamaño del objetivo, la probabilidad de localizarlo, la estimación aproximada de la clase de mena que pueda encontrarse y el costo de exploración por unidad de área.

Por tamaño del objetivo debe entenderse el tamaño del área favorable que puede delimitarse por el método que se esté aplicando. Por ejemplo, el examen de las características estructurales de

la región, en general proporciona áreas muy grandes. Por otra parte, las exploraciones magnéticas indican anomalías magnéticas a distancias menores de 30 m del cuerpo metálico que las causa y por tanto, estas observaciones deben hacerse en áreas muy reducidas.

La probabilidad de localizar el depósito significa la posibilidad de obtener y reconocer indicios fehacientes de algún cuerpo mineral o distrito mineralizado. Esto depende, por supuesto, de que el cuerpo mineralizado exista y además de que el método de análisis sea efectivo para ese mineral específico.

La estimación aproximada de la clase de mena que pueda encontrarse en una área dada, se determina tomando en consideración el valor de los depósitos conocidos en la región, y si éstos no existen, por comparación con áreas geológicas semejantes.

El costo de la exploración geoquímica es el único de los factores antes mencionados que puede calcularse cuantitativamente. Sin embargo, es importante valorar estos costos en términos de unidades de área, porque un costo total elevado no implica necesariamente un costo unitario elevado.

La eficiencia de cualquier método de exploración depende del balance de estos 4 factores. Es por tanto obvio que los métodos geoquímicos para la exploración no son de aplicación universal, puesto que para cada problema dado deben pesarse los pros y los contras y comparar el resultado de esta valoración, con las ventajas que presenten otros métodos disponibles.

**Programa de muestreo.**—El programa de muestreo de cualquier material se hace sobre bases geológicas que son las que fijan la geometría de las probables anomalías. Cuando se tienen cuencas hidrográficas adecuadas la forma lineal de los modelos de dispersión permite que el trabajo de muestreo se planea siguiendo las anomalías corriente arriba a través de los canales. Se ha sugerido (Sergeev, 1962) que en cada confluencia importante se tomen 3 lotes de muestras: dos en la corriente principal, una arriba y otra arriba de la desembocadura del tributario, y la tercera sobre el propio tributario. En la práctica suele resultar más conveniente muestrear la corriente principal a intervalos fijos y regresar y repetir cuando el contenido metálico baje o suba anormalmente.

El espaciamento adecuado que debe haber entre cada punto muestreado debe ser tal, que garantice que ninguna anomalía importante pudo pasar por alto, pero al mismo tiempo debe ser consistente con el costo calculado para el muestreo. Por supuesto que si las anomalías son homogéneas, el número de muestras necesarias disminuye y viceversa.

**Técnicas de muestreo.**—La técnica empleada para coleccionar las muestras es función directa del tipo de material que va a muestrearse. En esta Tesis se mencionan únicamente los problemas que se refieren al muestreo de aguas y al de sedimentos, por ser este tipo de muestras las únicas que se analizaron para el presente estudio.



**Muestras de agua.**—El principal problema que se presenta al coleccionar muestras de agua consiste en la extracción de iones de la solución por adsorción de las paredes de los recipientes que se utilizan para guardar las muestras. Si la muestra se guarda por períodos de tiempo más o menos largos, generalmente se produce un precipitado de hidróxido de hierro, junto con el cual, por coprecipitación se pierde también parte del contenido metálico de la muestra. Con objeto de reducir al mínimo este problema, se sugiere acidular la muestra inmediatamente después de colectada, aunque lo más conveniente, siempre que se pueda, es analizar las muestras en el sitio mismo en donde se colectan utilizando un equipo portátil.

**Sedimentos.**—Cuando se desea analizar el contenido de minerales pesados de los sedimentos, es conveniente tomar la muestra en el centro del canal, por medio de la construcción de un pequeño pozo. Al igual que para el análisis de los suelos, una muestra final de 5 g es suficiente para la mayoría de los análisis corrientes.

**Selección de elementos a determinar.**—En el caso más general, la localización de una mena de cobre implica la determinación de trazas de cobre en la región, sin embargo muchas veces los métodos que se basan no forman un modelo de deposición que puede cartografiarse fácilmente y en estos casos debe tomarse en cuenta la distribución de elementos asociados, no necesariamente en el valor porcentual y que reciben en la literatura nombres de patrones, que pueden definirse como aquellos minerales o elementos que se concentran asociados al elemento que se busca, pero que pueden determinarse más rápidamente y con más facilidad que el elemento en cuestión. El empleo de tales indicadores los constituyen las piritas que sirven para rastrear depósitos argentíferos, el cobre suele estar asociado con menas de níquel, cobalto, molibdeno y metales preciosos, y por tanto, junto con el zinc puede usarse como indicadores útiles tanto en la exploración de menas de zinc y de cobre como en la de otros tipos de mineral.

## C A P Í T U L O I V

### TÉCNICAS ANALÍTICAS

En relación a los métodos de análisis químicos usados en la exploración geoquímica es importante insistir en que el propósito de ésta es la localización de menas. Vamos a decir que por definición el mejor método de análisis químico es el que resulte más económico y que proporcione los datos suficientes para localizar las menas, es decir, el mejor procedimiento analítico es el que incluye economía, rapidez en la obtención de resultados y exactitud suficiente para el propósito que se busca.

Una discusión completa de los numerosos procedimientos analíticos que se han desarrollado para usarse en la exploración geoquímica queda completamente fuera del margen de esta Tesis. El autor elige 3 métodos: colorimétrico, espectrográfico y de rayos X, por parecerle que son los que mejor reúnen los requerimientos que se buscan.

## Método colorimétrico

El método colorimétrico elegido es el llamado de la "Ditizona" y que se basa en la propiedad que tiene este compuesto de extraer el cobre de sus soluciones ácidas.

### Reactivos.

- 1) Solución de ditizona al 0.001% aproximadamente, preparada por dilución de 25 ml de solución de ditizona concentrada, hasta un volumen de 250 ml, utilizando como diluyente al tetracloruro de carbono.
- 2) Solución reguladora buffer, preparada mezclando 38 g de ácido cítrico y 21 g de fosfato disódico, disolviendo en agua bidestilada y aforando a 250 ml. La solución buffer se purifica agitando en un embudo de separación, con pequeñas porciones de ditizona al 0.003%, hasta que la última porción quede de color verde. Se elimina el exceso de reactivo agitando la mezcla con tetracloruro de carbono.
- 3) Patrones de cobre. La solución de cobre que se usa para hacer los patrones se prepara disolviendo 0.05 g de cobre electrolítico puro en 20 ml de HNO<sub>3</sub> 1:1. Se evapora la solución casi a sequedad y se diluye el residuo con agua. Se hierve la solución hasta desaparición de óxidos de nitrógeno y se afora a 500 ml con agua bidestilada. 1 ml de esta solución contiene 0.1 mg de cobre. Los patrones se preparan diluyendo 1 ml de esta última solución a 100 ml; de esta manera cada ml de la dilución contiene 1 gamma de cobre.
- 4) Acido sulfúrico al 10%
- 5) Hidróxido de amonio 1:1
- 6) Anaranjado de metilo 1%.

### Material de Laboratorio

- a) Probetas de 250 ml
- b) Probeta de 10 ml.
- c) Embudos de separación de 500 ml.
- d) Matraces aforados.
- e) Pipeta volumétrica.
- f) Tubos de ensayo de 50 ml, con tapón de vidrio esmerilado.
- g) Reloj.
- h) Goteros.

**Procedimiento.**—Se toma una parte alícuota de la solución problema, procurando que contenga de 50 a 20 gammas de cobre y se diluye con 25 ml de agua bidestilada. Se pone en un embudo de separación y se agregan 2 gotas de anaranjado de metilo. Se neutraliza cuidadosamente la solución con hidróxido de amonio 1:1, hasta que el color cambie de rojo a amarillo. Se agregan entonces 2 gotas de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 10% y después 2 ml de solución buffer. Enseguida se agregan 3 ml de ditizona al 0.001% en tetracloruro de carbono, agitando la mezcla 2 minutos. Durante la agitación el color de la capa orgánica cambia de verde a rojo violáceo. Se separan los líquidos y la capa de tetracloruro de carbono que contiene el ditizonato de cobre se transfiere a un tubo de ensaye con tapón esmerilado. Se repite la extracción con ditizona, agregando porciones de 2 ml de esta solución al problema y efectuando extracciones sucesivas cuyos productos se colectan en el mismo tubo de ensaye.

La extracción se continúa hasta que la última porción de reactivo agregado permanezca verde. En total estas extracciones no deben ser mayores de 5.

Por separado se han preparado las soluciones patrón de cobre, utilizando concentraciones de 1 a 10 gammas. El tratamiento que se da a las soluciones de cobre debe ser idéntico al que se le aplicó a la muestra problema y, además, debe correrse un "blanco" simultáneamente.

El análisis termina con la comparación de los colores mediante un colorímetro. Esta comparación se hace después de que se ha eliminado el exceso de ditizona, con 2 ml de hidróxido de amonio 1:500.

### **Método espectrográfico**

---

Uno de los instrumentos más ampliamente usado en investigaciones geoquímicas es el espectroscopio de emisión. El término "análisis espectroquímico" cubre las diversas técnicas analíticas que utilizan este instrumento.

El análisis espectroquímico se usó primero como método de análisis químico cualitativo y posteriormente fue usado para el análisis químico cuantitativo. Sus ventajas residen en la rapidez con la que se hacen las determinaciones.

**Origen del espectro.**—Cuando una muestra de roca o mineral se calienta a altas temperaturas en un arco eléctrico, la muestra se vaporiza y los átomos de los elementos presentes se excitan y emiten energía radiante (luz), de longitudes de onda diferentes, pero características de cada uno de los elementos presentes, ya que esta radiación es diferente para cada elemento y como la intensidad de la radiación es proporcional a la concentración de éste en particular, se tiene un método de análisis químico cualitativo y cuantitativo. La radiación producida en el arco eléctrico pasa a través de una rendija estrecha en el espectroscopio, en donde es dispersada por un prisma o una red de difracción produciéndose un espectro que se observa por medio de un lentejo.

Las líneas que aparecen se comparan directamente con la línea del elemento que se desea identificar, por medio de una película que tiene registradas las líneas características de los elementos.

Al superponer las rayas características de la película con el espectro obtenido, se logra identificar a los elementos presentes en la muestra.

Los electrodos usados para obtener el arco eléctrico fueron de grafito. Uno de los cuidados principales que se deben tener con los electrodos, es el de comprobar cuidadosamente su pureza, así como la del portamuestras.

El análisis espectroscópico se hizo directamente sobre el material pulverizado, el cual se pasó entre las mallas 100 y 150.

El análisis cuantitativo por este método se base, como ya se dijo, en la medida de la intensidad de las líneas características. En el caso presente se comparó la intensidad de las líneas características del cobre con la intensidad de las líneas producidas por los patrones preparados con diferentes concentraciones.

Para acelerar el trabajo, se construyó una gráfica de las concentraciones contra las correspondientes intensidades.

#### **Método de espectrometría por fluorescencia de rayos X**

Los rayos X se producen cuando una partícula cargada con suficiente energía eléctrica es desacelerada rápidamente. Generalmente se usan electrones para este propósito y la radiación se produce en tubos de rayos x que contienen una fuente de electrones y 2 electrodos metálicos; el voltaje mantenido a través de los electrodos hace que los electrones se dirijan rápidamente al anodo, chocando contra el electrodo positivo, anticátodo blanco donde se estrellan a gran velocidad. Los rayos x se producen en el punto de impacto y son emitidos en todas direcciones.

Cuando se analizan los rayos provenientes del anticátodo, se encuentra que están constituidos por una mezcla de radiaciones de diferentes longitudes de onda y la variación de la intensidad de éstas depende del voltaje del tubo.

El espectro continuo se debe a la rápida desaceleración de los electrones, golpeando el anticátodo, pues como ya se mencionó, cualquier carga desacelerada emite energía. Sin embargo no todos los electrones son desacelerados de la misma manera; algunos frenan con un solo impacto y ceden toda su energía instantáneamente, mientras que otros resultan desviados de su trayectoria por medio de los átomos del anticátodo, perdiendo sucesivamente fracciones de su energía cinética, hasta que se consume ésta totalmente. Los electrones frenados de un solo impacto dan por resultado fotones de máxima energía. La mayor parte de la energía cinética se convierte en calor y menos del 1% se transforma en rayos x.

Cuando el voltaje de un tubo se eleva arriba de un cierto valor crítico, característico para el metal del anticátodo, aparece una in-

tensidad máxima precisa para ciertas longitudes de onda, superpuestas sobre el espectro continuo. Debido a que estas longitudes de onda están bien definidas y son características del metal usado como anticátodo, se les llama líneas características y caen dentro de varios grupos referidos como K, L, M, N, O, en el orden de incremento de longitudes de onda. El conjunto de todas las líneas es lo que forma el espectro característico del metal usado como anticátodo, mientras que el espectro continuo es causado por la desaceleración rápida de los electrones por el anticátodo; para entender este fenómeno es suficiente el considerar a los átomos como consistentes de un núcleo central rodeado por electrones que quedan en varias órbitas o niveles. Cuando uno de los electrones que bombardean el anticátodo tiene suficiente energía eléctrica para desplazar a un electrón fuera de la órbita K, dejando al átomo correspondiente en un estado de excitación que es inestable; uno de los electrones exteriores cae inmediatamente en el lugar vacío de la órbita K, emitiendo energía en el proceso que constituye el restablecimiento del estado de equilibrio del átomo. La energía emitida está en forma de radiación de longitud de onda definida.

Es posible llenar el hueco de una celda K, ya sea desde la órbita L ó M, de manera que un átomo del ánodo pueda estar emitiendo radiación K  $\alpha$ , mientras que su vecino está emitiendo K  $\beta$ .

Debido a que la radiación característica es emitida por el átomo independientemente del origen de la excitación que la produzca esta propiedad se usa como base de un método de análisis químico. Si los elementos de la muestra que se va a analizar se bombardean con rayos x, emiten sus líneas características que pueden servir para identificarlos, analizando tal radiación. El análisis se lleva a cabo por medio de un espectrómetro de rayos x, difractando la radiación por medio de un cristal de red cristalina conocida.

El análisis de la muestra puede ser, tanto cualitativa cuando sólo se identifican las varias líneas características en el espectro emitido, como cuantitativo si la intensidad de estas líneas se compara con la intensidad de la línea de una muestra tipo apropiada. Cuando la muestra se pone fuera del tubo de rayos x y se bombardea con éstos, la radiación primaria causa la emisión de una radiación secundaria fluorescente que luego se analiza en un espectrómetro.

Este método de información acerca de los elementos químicos presentes en la muestra, independientemente de su combinación química o de las fases en las que exista.

El análisis por fluorescencia no es destructivo y es mucho más rápido que los métodos químicos ordinarios de análisis por vía húmeda.

Para determinar la cantidad de un elemento x en una muestra, normalmente se usa el método de la línea sencilla; la intensidad  $I_x$  de una línea característica particular del elemento x se compara con la intensidad  $I_p$  de la misma línea, producida por

una muestra patrón que normalmente contiene el elemento x puro. La forma en que la relación  $I_x/I_p$  varía con la concentración de x en la muestra, depende esencialmente de los otros elementos presentes, por lo que no puede calcularse. Por esto es necesario establecer tal variación por medio de medidas hechas en muestras de composición conocida.

Debido a las complicaciones que los efectos de matriz, absorción y excitación múltiple, introducen dentro de cualquier cálculo de intensidades fluorescentes el análisis cuantitativo se efectúa siempre sobre bases empíricas.

**Preparación de la muestra.**—Las muestras sólidas se muelen y se tamizan (100 a 150 mallas) y se empacan en un portamuestras, de manera que quede una superficie plana. El aparato de rayos x que se usó en esta práctica es de la marca Philips Norelco, Modelo 120-A6, y consta de un elevador de voltaje con rectificador de corriente, una unidad de registro electrónico, un geómetro para fluorescencias, un contador geiger y un cristal de cloruro de sodio.

**Experimentación.**—La corriente que se le proporcionó al tubo de rayos x con anticátodo de molibdeno, fue de 95 kilovatios y 20 milliamperes. Se obtuvieron gráficas de la radiación de cobre de muestras patrón con las cuales se obtuvo una gráfica logarítmica de intensidad contra concentración, por medio de la cual se pudieron cuantear hasta 10 ppm.

**Discusión.**—Los métodos espectrográficos fueron usados ampliamente para exploración geoquímica ante la Segunda Guerra Mundial. Cuando es necesario determinar 2 o más constituyentes a cada muestra, el análisis semicuantitativo espectroquímico es mas económico que los métodos químicos. En la actualidad se construyen unidades espectrográficas móviles por lo cual este método tiende a tener una gran aplicación en la exploración geoquímica.

## C A P I T U L O V

### PARTE EXPERIMENTAL

#### Descripción de la región

El área seleccionada para la parte experimental de esta Tesis, es la que está comprendida entre los paralelos 26° 40' y 27° 40' de latitud norte y los meridianos 100 y 101 de longitud oeste, en el noreste de la República Mexicana, entre los límites de los Estados de Coahuila y Nuevo León.

**Orografía.**—La zona explorada está atravesada por 2 sierras, la Sierra Candela y la Sierra Lampazos que corren paralelas hacia el noroeste con una longitud aproximada de 150 km cada una y con alturas respectivas de unos 1000 m sobre el nivel del mar. Entre estas sierras y un poco más próxima a la de Candela, se localiza una meseta que recibe el nombre de Cartujanos.

**Aspectos geológicos.**—La formación del terreno corresponde en su mayor parte al Cretácico Superior y está constituido por calizas sedimentarias de origen marino y continental. Entre las formaciones que se localizan en esta parte se menciona la Cuesta del Cura, La Hendidura, La Caracol, La Parra y La Difunta.

Las Sierras de Candela y de Lampazos también están formadas por calizas, pero en este caso son del Cretácico Inferior. Entre las formaciones que las constituyen se mencionan La Cupido, La Monclova y La Aurora.

En la Sierra de Candela se pueden observar pequeños afloramientos de las formaciones Zuloaga, La Casita, La Gloria Las Cajas y Yeso Olvido, que son calizas y yesos de edad Jurásica.

La Meseta de Cartujano está formada por rocas ígneas intrusivas del Cenozoico Inferior, siendo este afloramiento el único de rocas intrusivas en el área.

**Hidrografía.**—La región es de tipo semidesértico extremo, con régimen pluvial bajo, que origina poca irrigación y escasez de ríos.

Esta región pertenece a la Cuenca del Río Salado que, a su vez es tributario del Río Bravo.

Entre los ríos que cruzan la región sólo el Salado acarrea agua todo el año. Se mencionan a continuación los ríos y cauces que se tomaron en cuenta para la exploración realizada (véase mapa adjunto).

- 1) Río Salado, con caudal escaso pero permanente todo el año.
- 2) Río Candela, con caudal escaso.
- 3) Arroyo Grande de Mojina.
- 4) Arroyo La Noria.
- 5) Arroyo de Alamos.
- 6) Arroyo Chapote.

### **Proyecto de exploración**

Teniendo en cuenta las características hidrográficas de la región que se ilustra en el mapa, se proyectó una exploración hidrogeoquímica y de sedimentos que comenzaría en la parte inferior del Río Salado (localidad 1), por pensarse que el agua y los sedimentos que arrastra éste, constituyen un reflejo de la mineralogía de toda la zona. Los resultados que se adjuntan (Tabla 2) demostraron que el contenido de cobre en las aguas de la cuenca eran superiores al promedio (Tabla 1), por lo que se pensó en la posible existencia de una provincia geoquímica favorable a la localización de menas cupríferas.

Con objeto de delinear con más precisión esta provincia, se tomaron muestras de los sedimentos arrastrados por los arroyos de Las Norias (localidad 2) y del Grande Mojina (localidad 3), con los resultados que se indican.

Con la evidencia de que la provincia se localizaba al noroeste de la Sierra de Lampazos, según se confirmó con los resultados negativos de las muestras tomadas en las localidades 2 y 3, se prosiguió sobre el cauce de El Salado hasta su confluencia con el arroyo de El Chapote. Los análisis de las muestras tomadas en las localidades 4 y 5 confirmaron nuestra certeza, toda vez que el contenido de cobre en los sedimentos de la localidad 5, que corresponden al arrastre de la cuenca de El Chapote, aunque ligeramente altos, no bastan para justificar los resultados obtenidos en la localidad 1. La cuantificación del cobre en el agua de El Salado (localidad 4), dio resultados bajos que se explican considerando que el pH del agua de esta parte de la región que como ya se dijo está constituida principalmente por calizas, es superior al que corresponde a las condiciones óptimas en las que se mueve el cobre, en vista de lo cual, con objeto de valorar el tren de dispersión de este elemento, se procedió a analizar un lote de muestras de sedimentos. Estos análisis correspondieron a lo que se esperaba y permitieron proseguir la exploración río arriba, hasta la confluencia de los Ríos Salado y Candela (localidades 6 y 7).

En el sitio indicado con el No. 6 no pudo encontrarse ningún indicio que hiciera suponer la presencia de cobre en la parte alta de este ramal. El Río Candela, de aguas ácidas, permitió analizar el cobre directamente de las muestras de agua y su concentración en ella confirmó que las deducciones hechas eran correctas.

En el sitio en donde se unen el Arroyo Alamos con el Río Candela (localidades 8 y 9), se practicaron nuevos muestreos de los sedimentos, con los resultados que se mencionan.

Los valores obtenidos para el cobre en el sitio marcado con el No. 8, son bajos, pero debido a la elevación del pH de las aguas del lugar, se pensó que los resultados analíticos no correspondían a la mineralogía presente río arriba. Se apoyó esta sospecha en la presencia de una pequeña mina de cobre que se localiza al noreste de la Sierra Candela y entre los 2 brazos del Arroyo Alamos. En las localidades marcadas con los Nos. 10 y 11, se practicaron muestreos de los sedimentos y a pesar de la predisposición que se tenía, no fue posible apoyar tal hipótesis, por lo que se regresó al Río Candela en donde las leyes de cobre continuaban siendo prometedoras.

Por los resultados obtenidos en las localidades 12 y 13 se concluyó finalmente que la provincia cuprífera, en caso de haber alguna, debía estar localizada en las proximidades de la Mesa de Cartujanos o quizás entre las mismas rocas ígneas que forman este cuerpo intrusivo.

Al llegar a esta parte de la exploración, la ausencia de corrientes o cauces determinó que se abandonara el método general que se había venido siguiendo. En condiciones semejantes el paso siguiente es la exploración geobotánica, pero en el caso particular que nos ocupa, este método no fue de ninguna utilidad debido a la carencia de suficiente vegetación en el área estudiada. El poco tiempo de que se disponía, amado a lo inhóspito del terreno, determinaron que se suspendiera en este punto la investigación geológica que se tiene la pretensión de continuar en fecha próxima.



Con la evidencia de que la provincia se localizaba al noroeste de la Sierra de Lampazos, según se confirmó con los resultados negativos de las muestras tomadas en las localidades 2 y 3, se prosiguió sobre el cauce de El Salado hasta su confluencia con el arroyo de El Chapote. Los análisis de las muestras tomadas en las localidades 4 y 5 confirmaron nuestra certeza, toda vez que el contenido de cobre en los sedimentos de la localidad 5, que corresponden al arrastre de la cuenca de El Chapote, aunque ligeramente altos, no bastan para justificar los resultados obtenidos en la localidad 1. La cuantificación del cobre en el agua de El Salado (localidad 4), dio resultados bajos que se explican considerando que el pH del agua de esta parte de la región que como ya se dijo está constituida principalmente por calizas, es superior al que corresponde a las condiciones óptimas en las que se mueve el cobre, en vista de lo cual, con objeto de valorar el tren de dispersión de este elemento, se procedió a analizar un lote de muestras de sedimentos. Estos análisis correspondieron a lo que se esperaba y permitieron proseguir la exploración río arriba, hasta la confluencia de los Ríos Salado y Candela (localidades 6 y 7).

En el sitio indicado con el No. 6 no pudo encontrarse ningún indicio que hiciera suponer la presencia de cobre en la parte alta de este ramal. El Río Candela, de aguas ácidas, permitió analizar el cobre directamente de las muestras de agua y su concentración en ella confirmó que las deducciones hechas eran correctas.

En el sitio en donde se unen el Arroyo Alamos con el Río Candela (localidades 8 y 9), se practicaron nuevos muestreos de los sedimentos, con los resultados que se mencionan.

Los valores obtenidos para el cobre en el sitio marcado con el No. 8, son bajos, pero debido a la elevación del pH de las aguas del lugar, se pensó que los resultados analíticos no correspondían a la mineralogía presente río arriba. Se apoyó esta sospecha en la presencia de una pequeña mina de cobre que se localiza al noreste de la Sierra Candela y entre los 2 brazos del Arroyo Alamos. En las localidades marcadas con los Nos. 10 y 11, se practicaron muestreos de los sedimentos y a pesar de la predisposición que se tenía, no fue posible apoyar tal hipótesis, por lo que se regresó al Río Candela en donde las leyes de cobre continuaban siendo prometedoras.

Por los resultados obtenidos en las localidades 12 y 13 se concluyó finalmente que la provincia cuprífera, en caso de haber alguna, debía estar localizada en las proximidades de la Mesa de Cartujanos o quizás entre las mismas rocas ígneas que forman este cuerpo intrusivo.

Al llegar a esta parte de la exploración, la ausencia de corrientes o cauces determinó que se abandonara el método general que se había venido siguiendo. En condiciones semejantes el paso siguiente es la exploración geobotánica, pero en el caso particular que nos ocupa, este método no fue de ninguna utilidad debido a la carencia de suficiente vegetación en el área estudiada. El poco tiempo de que se disponía, aunado a lo inhóspito del terreno, determinaron que se suspendiera en este punto la investigación geológica que se tiene la pretensión de continuar en fecha próxima.

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES

La industria minera de México atraviesa por un largo período de crisis debido a numerosos factores cuyo análisis queda fuera del margen de la presente Tesis, pero entre los que figura la localización de buenos depósitos minerales que reemplacen a los yacimientos que han dejado de producir o cuya potencia ha disminuido considerablemente.

Las extensas reservas auroargentíferas de Pachuca y Real del Monte, cuya producción dio a nuestro país la supremacía en la extracción de tales elementos, se han agotado y como éste pueden mencionarse innumerables ejemplos en todo el país.

Se proponen los métodos geoquímicos para que, junto con los geofísicos, actualmente en uso, formen el reemplazo de los sistemas tradicionales de exploración. Se ha tratado de hacer notar la posibilidad de utilizar los principios que gobiernan la distribución y migración de los elementos en los diferentes medios naturales, para localizar anomalías que indiquen la presencia de concentraciones minerales favorables a la explotación económica de sus yacimientos y, finalmente, se ha hecho una breve exploración siguiendo la red de drenaje de una zona en la que se conocía la existencia de pequeñas menas cupríferas.

A lo largo de la experimentación que se hizo se pusieron de manifiesto los principales problemas relacionados con este tipo de trabajo, que son los que se mencionan en la Tesis y que son tales, que a la fecha, a 16 años de distancia del nacimiento de la exploración geoquímica sistemática, no se cuenta con procedimientos de rutina que permitan la solución de cada uno de los diferentes problemas involucrados en cada caso particular; sin embargo, se ha tratado de hacer notar como punto más importante del presente estudio, el amplio campo de acción de la geoquímica, cuya aplicación sistemática debe ser un importante factor en la solución del problema minero de México.

Dentro de la parte experimental se puso de manifiesto la ventaja de contar con métodos analíticos baratos, sensibles y que pueden usarse en el sitio mismo en el que se colecta la muestra o en lugares cercanos a éste.

Los resultados obtenidos con la ditizona, comparados con los del espectrógrafo y los rayos x (Tablas 2 y 3), muestran una concordancia que es consistente con la precisión que se obtiene en las muestras naturales, por lo que se recomienda el uso de este método de análisis en la exploración de zonas semejantes.

Debe mencionarse que el área seleccionada para la experimentación, resultó mucho más grande de lo que puede explorarse eficientemente por el método propuesto y que sólo el conocimiento previo de la existencia de cobre en la región permitió interpretar positivamente los aumentos de la concentración de cobre que de otra manera hubieran pasado desapercibidos.

Por último, se sugiere la conveniencia de que las compañías dedicadas a la extracción de minerales, cuenten con personal técnico especializado que utilice estos métodos en la búsqueda de nuevos yacimientos.

Atentamente

**T A B L A 2**

**Resultados analíticos obtenidos por el método de  
la ditizona**

Localidad	C O B R E E N p p m		
	Residuos de mues- tras de agua	Sedimentos	Agua
1	297		
2	—	—	
3	—	—	
4	265	128	
5		133	
6	270	98	
7			22
8	—	111	21
9	308		
10		113	
11		114	
12	315	117	
13	357	131	

**T A B L A 3**

**1.—Residuo de muestras de agua**

Localidad	DITIZONA		RAYOS X		ESPECTROGRAFICO	
	No. de muestras	Promedio en ppm	No. de muestras	Promedio en ppm	No. de muestras	Promedio en ppm
1	8	297	8	280	3	305
2	7	—	7	—	3	huellas
3	6	—	6	—	3	huellas
4	5	265	5	250	3	260
6	5	270	5	265	3	301
8	5		5		3	3
9	5	308	5	290	3	306
12	5	315	5	325	3	318
13	5	357	5	342	3	360

Comparación de resultados obtenidos con los métodos analíticos que se indican.

T A B L A 3

2.—Sedimentos

Localidad	DITIZONA		RAYOS X		ESPECTROGRAFICO	
	No. de muestras	COBRE Promedio en ppm	No. de muestras	COBRE Promedio en ppm	No. de muestras	COBRE Promedio en ppm
2	4	—	3	—	3	huellas
3	4	—	3	—	3	—
4	4	128	3	huellas	3	135
5	4	113	3	huellas	3	121
6	4	98	3	huellas	3	99
8	4	111	3	huellas	3	115
10	4	113	3	huellas	3	115
11	4	114	3	huellas	3	113
12	4	117	3	huellas	3	112
13	4	131	3	101	3	145

Comparación de resultados obtenidos con los métodos analíticos que se indican.

T A B L A 3

3.—A g u a

Localidad	DITIZONA		RAYOS X	
	No. de muestras	COBRE Promedio en ppm	No. de muestras	COBRE Promedio en ppm
7	3	22	2	—
8	3	21	2	—

Comparación de resultados obtenidos con los métodos analíticos que se indican.

## OBRAS CONSULTADAS

- 1.- AHRENS, L. H. y TAYLOR, S. R., 1961, Spectrochemical analysis: Addison Wesley, N. Y.
- 2.- EMMONS, W. H., 1917, The enrichment of ore deposits: U. S. Geol. Survey, Bull. 625, p. 68-70.
- 3.- GINSBURG, I. I., 1960, Principles of geochemicals prospecting: Pergamon Press, New York.
- 4.- GROSS W. H., 1950, A study of the spatial relation of gold ore to intrusive bodies in northwestern Ontario: Geol. Assoc., Canada Proc., v. 3, p. 123-139.
- 5.- HAWKES, H. E., 1957, Principles geochemicals prospecting: U. S. G. S. Bull 1000 F.
- 6.- PEREZ, P. R., 1964, Determinación Rb-Sr en rocas por fluorescencia de rayos x. Tesis Profesional.
7. SAUCON, A. A., 1946, Geochemistry of Mercury (in Russian): Akad. Naun SSSR, Inst. Geol. Nauk Trudy, v. 89, Mineral Geol. ser. no. 17.
- 8.- SERGEEV, E. A., 1946a, Water analysis as a means of prospecting for metallic ore deposits (in Russian): Razvedka Nedr. v. 12, no. 3, p. 51-55. Translation by H. E. Hawkes in "Selected Russian papers on geochemical prospecting for ores., U. S. Geol Survey p. 7-12 Feb. 1950.

