

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA Y
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA DE LA REPÚBLICA ARGENTINA

CURSO REGIONAL DE CAPACITACIÓN EN LA PROSPECCIÓN DE URANIO

BUENOS AIRES, 8 de setiembre - 31 de octubre 1969

II. YACIMIENTOS URANÍFEROS

3. ÁREAS GEOLOGICAS FAVORABLES Y SU SELECCION

Dr. ALBERTO E. BELLUCO,

Dr. PEDRO N. STIPANICIC

AREAS GEOLOGICAS FAVORABLES Y SU SELECCION

ALBERTO E. BELLUCO - PEDRO N. STIPANICIC

Comisión Nacional de Energía Atómica

I. INTRODUCCION

La selección de áreas geológicamente favorables a la prospección por uranio está ligada al conocimiento de una serie de complejos procesos que rigen la distribución vertical y horizontal de dicho elemento en la corteza terrestre.

Los yacimientos de uranio tienen su origen en la interacción de procesos orogénicos, estructurales, geomorfológicos (en especial paleogeográficos y paleoclimáticos), geológicos, etc., que originan, distribuyen y eventualmente concentran dicho elemento en criaderos comerciales.

La distribución del uranio en la litosfera reviste tal grado de complejidad, que resulta difícil interpretar o circunscribir su presencia en los esquemas simples de ciertas metalogénias clásicas. Evidencia de tal complejidad es el grado de controversia que se alcanzó en cuanto se refiere al origen de muchos yacimientos y de ahí que, para mejor comprender la distribución de este elemento, se estima imprescindible consagrar un capítulo resumido al conocimiento de los procesos teóricos que influyen o pueden intervenir en dicha distribución.

El uranio integra parte de un ciclo geológico que comprende 3 fases:

- La primera, en que predomina el proceso ígneo y

que da lugar a la distribución primaria del uranio según provincias petrográficas y/o metalogénicas.

-La segunda, en que prevalecen los procesos epigénicos o exógenos de alteración, meteorización, erosión, transporte, etc. y en la cual el uranio es removido de su posición original y termina por concentrarse en ambientes de sedimentación por lo común continentales (grandes yacimientos comerciales del mundo), o bien pasa al mar y en última instancia, se concentra en sus depósitos marinos.

-La tercera, en que ejercen su dominio los procesos metamórficos y metasomáticos (ultrametamorfismo según Routhier) (1) (anatexis), corresponden a efectos de refusión de rocas metamórficas, las que en las zonas profundas de la corteza, evolucionan hacia un estado de "magma", al cual vuelve a integrarse el uranio.

Las fases 1º y 3º de este ciclo parten de la presencia o formación de un "magma", donde ubicamos el estado inicial del ciclo geoquímico de este elemento.

Trataremos más adelante con detalles particulares la evolución de cada una de estas fases.

II. ESBOZO GEOQUIMICO DEL URANIO

Según clasificación geoquímica de Goldschmidt (2), el uranio es un elemento típicamente litófilo, cuya concentración se produce preferentemente en la corteza terrestre bajo formas oxidadas tanto en sus minerales propios, como en sus otras formas de presentarse en las rocas (solución acuosa, adsorbido, sustitución diadócica, etc.), etc.

Es uno de los elementos que se consideran "escasos" en la Tierra, pues aparece con una abundancia de 0,0002, es decir de 2 gr/t de roca. Sin embargo, resulta dos veces más abundante que el wolframio, diez más que el antimonio, veinte veces más que la plata y casi quinientas veces más que el oro.

Pero además, presenta una característica muy importante, que se refiere a su distribución selectiva de acuerdo con los tipos de rocas que lo contienen. Así, su contenido se eleva considerablemente en la corteza terrestre hasta 3-4 p.p.m. en las rocas "graníticas" normales (se incluye en este término una amplia variedad de rocas granudas ácidas, plutónicas y efusivas, compuestas principalmente por cuarzo, de una o más especies de feldespatos y de una o más especies ferro magnesianas). Por otra parte, no es raro encontrar plutonitas con contenido anormal en uranio (6-8 p.p.m.), tobas con 10 p.p.m., etc.

Al hablar de corteza terrestre nos referimos preferentemente al SIAL, al cual se asociaría restrictivamente el U y los demás elementos litófilos raros (Wo, Th, etc.). Separamos de ella al SIMA, cuyas rocas representativas (gabros, peridotitas, etc.) acusan contenidos en U que solo alcanzan la décima parte de los valores del SIAL.

Clarke y Washington (1) calcularon la composición química de los primeros 16 Km de la corteza, comenzando por estimar las proporciones de los diferentes componentes, según el siguiente detalle:

95 % de rocas ígneas y cristalofílicas.

5 % de rocas sedimentarias (4 % de arcillas, 0,75 % de rocas silíceas, 0,25 % de calcáreas).

Esta consideración resulta explicable admitiendo que las rocas sedimentarias que recubren aparentemente la mayor superficie externa del planeta, corresponden a simples películas, que se espesan solo en las cubetas de subsidencia marcada.

Sobre estas bases se realizaron más de 5000 análisis de rocas, que dieron una composición química promedio de la corteza, acorde a lo detallado en figura 1.

Esos valores promedios se conocen (según Vernadsky-

1924) (1) como "clarke" para el porcentaje del elemento en la corteza y "clarke de concentración" para el grado de concentración de un elemento en un mineral, yacimiento, etc. (relación tenor/"clarke") Ej.: el Cu tiene un "clarke" de 0,007 % y su tenor de explotación es aproximadamente de 0,7 %, luego su "clarke concentración" es de 100. El U acusa un "clarke" de 0,0004 % y su tenor medio de explotabilidad de 0,1 %; su "clarke de concentración" es de 250. Esta posibilidad de concentración de los elementos define la necesidad de estudiar las causas y los procesos que originan sus respectivas acumulaciones.

Habíamos establecido una inclinación ubicuitaria preferencial primaria del uranio en la corteza siálica de la tierra. Esta preferencia no obedece a causas fortuitas sino más bien sistemáticas y están relacionadas con bases genéticas de las rocas que constituyen el SIAL, el SIMA y el resto de las esferas corticales del planeta.

Las diferencias petrográficas de las dos primeras zonas (SIAL y SIMA) son condiciones derivadas de los clásicos procesos de diferenciación magmática, sean:

-Originales durante la solidificación de la corteza.

-Presentes en los diferentes ciclos orogénicos acacidos durante la evolución geológica de la tierra.

En los procesos primarios de solidificación de la costra superficial, diferenciaciones en el magma original deben haber dado lugar a la acentuada heterogeneidad petrográfica que se observa en los viejos escudos antecámbricos. Los procesos físico-químicos de esas diferenciaciones, dieron origen a los múltiples grupos, familias y especies de rocas magmáticas, concebiéndose en torno a tal heterogeneidad, el concepto de provincias magmáticas originales.

Los sucesivos procesos orogénicos acaecidos en la tierra a través del tiempo geológico, dieron lugar a otras tantas repeticiones de los conocidos procesos de diferenciación magmática (diferenciación y cristalización según los magmatistas) o de refusión y consolidación por metamorfismo (según los metasomatistas), acentuando aún más la heterogeneidad de las rocas constitutivas de la corteza y permitiendo así establecer la existencia, de diferentes épocas o provincias metalogénicas en relación a los períodos orogénicos.

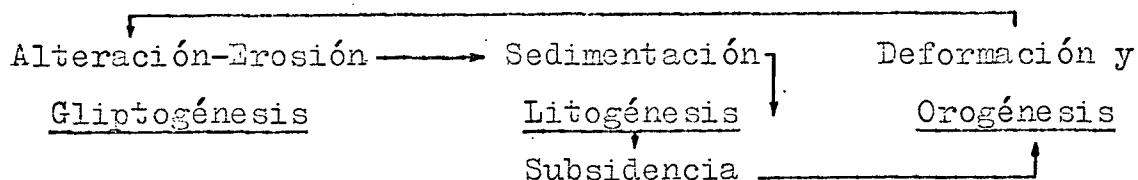
El uranio en su ciclo primario está íntimamente ligado a estas condiciones de consolidación original y sucesivas pulsaciones del "magma" original o refundido en la misma. La heterogeneidad de las rocas ígneas de la corteza son sugeridas por algunos autores como base de delimitación de posibles áreas uraníferas, donde este elemento, al igual que otros metales, tiende a agruparse constituyendo lo que se define como provincias uraníferas originales.

A partir de esta yacencia original o singenética, como componente de rocas ígneas o de filones, el U pasa en solubilidad creciente a las aguas subterráneas, superficiales, etc, que precipitan este elemento, bajo condiciones especiales, en depósitos por lo común de carácter continental, o lo vuelcan al mar para terminar precipitándose en sus depósitos marinos.

III. RELACIÓN GEOQUÍMICA, YACIMIENTOS DE URANIO Y GEOLOGÍA DE LA CORTEZA TERRESTRE.

El uranio, al igual que otros metales, está ligado a lo que se define como "ciclo geológico" ("dramas" según Termier - 1958) (3) el que, en secuencias periódicas a través de las eras geológicas, se ha sucedido desde tiempos antecámbricos hasta nuestros días, con diferentes condiciones de presentación. El esquema adjunto sintetiza las fases de este ci-

clo a los cuales se liga el U (según Routhier, 1963) (1):



Resulta evidente, en consecuencia, que el U, en su ciclo geoquímico, participa por igual de los fenómenos geodinámicos internos y externos de la corteza terrestre. Los primeros se desarrollan en el interior de la litósfera y están ligados de una u otra forma al origen de los "granitos", rocas metamórficas, vulcanismo, rocas básicas, etc., mientras que los segundos evolucionan regidos casi exclusivamente por los fenómenos exógenos.

En la primera de estas fases debemos buscar la "paternidad" u origen de muchos de los yacimientos secundarios de uranio; de allí que dedicaremos, a estas fuentes naturales de ese elemento, un capítulo especial.

III.1. EL URANIO EN LA PRIMERA FASE DE SU CICLO GEOLOGICO.

III.1.1. Fuentes originales o singenéticas.

Estudios particulares muy especializados se han realizado sobre este tema en los últimos 20 años. Ellos encierran la posibilidad de contar con criaderos potenciales de uranio de baja ley (de posible comercialización en un futuro), y en especial porque sirven para suministrar datos geológicos acerca de la posibilidad de ubicar los importantes yacimientos comerciales de tipo secundario (sedimentario).

Hemos fijado en esta la. fase ígnea o endógena, el comienzo del ciclo del uranio en directa relación con los distintos períodos orogénicos desarrollados en la Tierra. La mayor parte de los yacimientos de uranio en el mundo se concentran en dichas zonas orogénicas o en sus proximidades, salvo el caso de los criaderos o afloramientos en sedimen-

tos marinos de lutitas negras, fosforitas, etc., no aprovecha**bles** por el momento.

Las fajas o áreas orogénicas se emplazan en zonas débiles de la corteza terrestre (borde de un bloque siálico, zona de fracturas, etc.) donde diferencias de sus condiciones de comportamiento mecánico, provocan el nacimiento de una cuenca sedimentaria potente, con mezcla de exhalaciones volcánicas, sismicidad, etc. Esta cubeta, en permanente subsidencia, da lugar a la formación de un geosinclinal que desarrolla su ciclo en 4 fases principales, durante las cuales el uranio tiene diferente participación, en relación al carácter metalogénico de los diferentes "granitos" (x) que se van originando.

1a. Fase preorogénica. Desarrolla una sedimentación detrítica fina, de "flysch" tranquilo en un mar poco profundo, con permanente subsidencia. Estas acumulaciones pueden llegar a ser de varios miles de metros de potencia, lo que permite la refusión del material de base, dando lugar a un granito "in situ" de "anatexis". Estas rocas son por lo general de tipo calco-alcalino incipiente, de gran densidad (granito o granodiorita), de contornos difusos y flanqueados por migmatitas.

Sobre el eje principal del geosinclinal se suelen alinear macisos de rocas ultrabásicas (peridotitas, honblenditas, etc.), los que fijan la posición de máxima orogénesis del geosinclinal y corresponden en casos, a los conocidos procesos de vulcanismo ophiolítico correspondiente a emisiones de rocas simáticas.

2a. Fase cataorogénica o primera formación de montaña. Da lugar a la elevación de los sedimentos o parte del zó-

(x) Se insiste que bajo este concepto se reúne un número de rocas granudas ricas en sílice, etc.

calo, según plegamientos sencillos ("apalachianos") que son rápidamente destruidos por erosión, aportando al geosinclinal un material gruesos, poco rodado o "wild flysch". En el seno del "granito de anatexis", se diferencia ahora una granodiorita de menor densidad, que tiende a subir y formar macizos según el eje de los plegamientos. Son los granitos sinorogénicos, ordinariamente alcalinos, que presentan en sus bordes filones pegmatíticos con tierras raras, U, etc. y que pueden aún dar lugar a filones de cuarzo con casiterita, wolfram, etc.

Las partes marginales del geosinclinal sufren nuevas subsidencias, las que dan lugar a otras tantas cubetas "parállicas" en los bordes del zócalo.

3a. Fase epirogénica o segunda formación de montañas. Los "granitos" continúan subiendo, ahora constituidos por un material más liviano y homogéneo que el de la segunda fase; se depositan más alto que los anteriores y son más ricos en feldespatos potásicos. Se los define como granitos "post-tectónicos" o "circunscriptos" y son normalmente leucocráticos.

Siguen luego otros granitos de facies alcalina cada vez más marcada, algunos sódicos y otros potásicos y que pasan en transición a microgranitos y lavas riolíticas.

Los "granitos" de las fases descriptas corresponden a los de la cubeta principal o del fondo donde se constituyó el granito de "anatexis". Existen también "granitos" surgidos del zócalo geoanticlinal, cuya ubicación puede ser contemporánea con los anteriores.

La 4a. fase y fases tardías, dan lugar al desarrollo de bloques de falla, con penetración por efusiones fisurales en los mismos de materiales de magma simático (basalto de meseta).

A través de las fases descriptas, de diferenciaciones de los "granitos", se escalonan los procesos geoquímicos de gran importancia en la petrogénesis y en la metalogenia de un área, y a los cuales el uranio se liga en forma directa. Así es como podemos establecer que:

- Es poco probable que se produzcan concentraciones importantes de uranio durante la formación del geosinclinal primario. Los depósitos acumulados en esta fase en el geosinclinal, corresponden a concentraciones singenéticas, que terminan por constituir un magma simático de composición variable entre ultrabásico a intermedio y cuyas rocas finales, poseen muy poco uranio. Mundialmente las rocas básicas (salvo rarísimas excepciones) no registran presencia de U en yacimientos o acumulaciones anormales. Su "clarke" es de 0,3 ppm.

- En la 2a. fase cataorogénica y especialmente en la 3a. fase epirogénica, el uranio muestra condiciones preferentes de concentración. Las intrusiones "graníticas" de estos períodos se manifiestan como importantes bases de retención del uranio. Este elemento tiende a concentrarse en las fases póstumadas de la diferenciación por cristalización, interviniendo singenéticamente en la formación de rocas, o si las condiciones estructurales así lo permiten, dan lugar al emplazamiento de filones de pechblenda, etc.

Durante las sucesiones cronológicas, los "granitos" desarrollan una evolución en su composición química, en relación con la naturaleza de las rocas vecinas. Sintetizando podemos resumir este proceso, generalizando el siguiente esquema teórico:

1- Granitos calco-alcalinos. Desde granodiorita hasta diorita cuarcífera, con una mineralización variable y a veces con depósitos pirometasomáticos.

2- Granitos alcalinos (sódicos y potásicos), acompañados de pegmatitas con elementos raros.

3- Estado eventual post-batolítico, con presencia de rocas alcalinas: sienitas nefelínicas, "granitos", porfiritas muy alcalinas, etc. Suelen verse acompañadas por depósitos polimetálicos con fluorita, etc. Genéricamente podemos también establecer, que la mayor parte de las mineralizaciones ligadas a los "granitos" (y entre ellos el U) corresponden a los "granitos" post-tectónicos o circunscriptos (Fig. 5).

El uranio que se puede presentar en el "magma" de estas fases orogénicas, manifiesta un incremento paulatino a medida que progresa la formación de las rocas ígneas, debido a procesos de su diferenciación por cristalización, difusión, etc.

En las primeras fases de estas diferenciaciones se separan los minerales máficos como: olivino, piroxeno, plagioclasa cálcica, etc., los que no pueden retener al U en sus redes dado el gran radio iónico de ese elemento (en sus redes no se admite más de 1 ppm); por el contrario los minerales secundarios de las facies posteriores, tales como el zircón, etc., llegan a admitir de 10 a 100 ppm de U en sus redes.

Detallados estudios estadísticos, en gran número de rocas de diferentes batolitos mundiales, permiten destacar el efecto de concentración tardío de este elemento (Fig. 2).

A su vez, dentro de rocas semejantes, existen variantes en sus contenidos en uranio, hecho que puede explicarse admitiendo que las mismas están relacionadas con pequeñas modificaciones en sus condiciones químicas, petrográficas y estructurales. Dichas condiciones responden a su vez

a procesos geológicos que deben haber afectado las rocas semejantes, en distintos puntos o en un mismo punto de la corteza.

Así alcanzaríamos a explicar la existencia de granitos con contenidos en U variables entre 1 y 100 ppm. La presencia en estos casos, de abundancia diferente de Zr, tamaño de los granos, o porcentaje de la mineralización secundaria, se consideran como causa de estos valores anómalos, lo que en sí implica falta de semejanza química o petrográfica entre las rocas comparadas.

Otra importante postulación surge de considerar que las rocas volcánicas de un cuerpo ígneo, son más uraníferas que las hipoabisales semejantes, valor que se incrementaría en una relación de 1 a 3. Según Adams (4) estas rocas contendrían entre 0,8 a 15 ppm, desde los basaltos a las riolitas, con un promedio de 5,4 ppm para unas 50 muestras efusivas del mundo.

Finalmente podemos destacar que, con excepciones, el uranio presenta variaciones seriadas análogas a las presentes en otros minerales.

Así vemos que el U varía en proporción directa con el contenido de Si y K de rocas plutónicas, admitiéndose como un enriquecimiento paralelo de estos elementos durante la diferenciación por cristalización, difusión, etc.

Podemos sintetizar estas observaciones bajo las siguientes generalizaciones:

- Las rocas básicas tienen contenidos pobres en uranio con un "clarke" de 0,2 - 0,4 ppm.
 - Las rocas intermedias manifiestan un "clarke" 2 ppm.
 - Las rocas ácidas tienen un "clarke" de 4-5 ppm.
- Estas condiciones, como veremos más adelante, son

de importancia capital para estudiar la génesis de ciertos criaderos secundarios, o para fijar prioridades de prospección en zonas vírgenes.

Finalmente debemos referirnos a la posibilidad de que el uranio de los "granitos", si existen condiciones favorables, tienda a concentrarse en las últimas fases de enriquecimiento de volátiles.

Existen diferentes opiniones o hipótesis tendientes a explicar el estado y proceso que siguen los elementos que dan origen a este tipo de criadero (soluciones hidrotermales; teoría volatilista, teoría iónica, etc.). Soslayaremos su consideración y aceptaremos que existen en la naturaleza elementos que se han ido concentrando al final de la cristalización de los "granitos" y que pueden llegar, si existen condiciones favorables, a escapar del mismo, llevándose los metales enriquecidos en esta fase. Las Fig. 3 y 4 correspondientes al diagrama de Niggli (3) y a la tabla de comparación geoquímica de Fersman (5), ilustran esta relación "granito-mineralizadores". En especial la Fig. 4 nos ilustra la participación del U en las fases pegmatíticas (sin importancia económica) y las fases pneumatolíticas e hidrotermales (de cierto interés económico).

Estas condiciones de distribución, estarían regidas por las características del U de constituir combinaciones muy volátiles (UF_6), lo que explicaría que ese elemento pase en su mayor proporción a las fases pegmatíticas o pneumatolíticas e hidrotermales, en forma de filones de pechblenda.

Los filones con pechblenda se han ubicado preferentemente en rocas intrusivas y efusivas felsíticas, en esquistos, en los gneis sedimentarios y en las rocas arenosas. Se han clasificado según relaciones de paragénesis en 5 tipos (Everhart) (6).

Tipo A-Oxidos de U-Oxidos de Fe-silice y fluorita.

Tipo B-Oxidos de U-silice-sulfuros de Cu, Pb, Mo y fluorita.

Tipo C-Oxidos de U-sulfuros y carbonatos de Cu, Co, Ni, Pb, Zn y Ag.

Tipo D-Oxidos de U y piritas auríferas.

Tipo E-Hidrocarburos uraníferos.

Los tipos más sencillos A-B son los que se registran con mayor frecuencia y con mayor proporción en su contenido de U.

Este elemento, al igual que otros metales, manifiesta también tendencia a una zonación regional, sea en relación a los macizos "graníticos" como a las condiciones sedimentarias y paleogeográficas. Haciendo referencia exclusiva a una presunta zonalidad hipogénica (su relación al emplazamiento de los granitos), podemos citar como ejemplo, la posición de los filones de pechblenda de los yacimientos del Macizo Central francés, que ocupan la periferia de los cuerpos "granulíticos" (granito de dos micas y cuarzo automorfo). Las asociaciones paragenéticas antes señaladas permiten finalmente ubicar el área de zonación preferencial del U, en relación a los metales acompañantes según los esquemas conocidos de "zonación normal" o "peri-plutónicos" (Fig.5).

III.1.2. Formas de presentarse el uranio en las rocas ígneas y filones. Uranio labil.

Habiendo descripto la distribución del uranio original en las rocas ígneas, filones, etc., es ahora indispensable establecer la forma en que se presenta este elemento en dichas rocas, a fin de conocer como se desarrolla la segunda fase o ciclo de remoción y concentración del uranio, a partir de las mismas.

En general se conocen varias formas de presentarse

de este elemento en dichas rocas, entre las que se destacan:

- Posiciones de intercambio catiónico.
- Dispuesto en diadocia en la estructura de los minerales.
- Adsorbido en la superficie de los granos.
- Como minerales visibles de uranio.
- Disuelto en líquidos intergranulares, etc.

Los porcentajes en que participa el uranio bajo estas formas de presentación son variables para cada tipo de roca. Por ejemplo, la distribución relativa del U en los defectos estructurales y por sustitución diadócica, varía en forma inversamente proporcional con el contenido de sílice. En efecto, en las rocas máficas se tendría mayor porcentaje de uranio, pues los defectos estructurales de sus minerales, son mayores que los que presentan las rocas félsicas.

En realidad, la importancia capital de esta forma de presentación del U en las rocas ígneas reside en el hecho de que esta condición define el grado de reacción del U con los procesos de su remoción o lixiviación.

En los casos citados, el U es normalmente tetravalente, estado principalmente endógeno que se caracteriza por su condición de poca solubilidad, pero que se oxida fácilmente, permitiendo pasar al estado hexavalente, el que se muestra como muy soluble.

En la naturaleza existen aproximadamente unos 100 minerales de uranio, 30 de ellos al estado tetravalente (en general como UO_2) y el resto al estado hexavalente (UO_3), como silicatos, vanadatos, etc. La formación principal de los minerales hexavalentes se produce en condiciones de oxidación superficial, debido a la rotura del estado de equilibrio que manifiestan los cuerpos endógenos al salir a super-

ficie y a la necesidad de restablecer el mismo, bajo nuevas condiciones de yacencia.

A esta condición de labilidad del uranio se asocian también los conceptos de:

- Estado de desagregación o permeabilidad de la roca.
- Condiciones físico-químicas del fluido de disolución.

En general, el uranio es fácilmente lixiviable cuando estas condiciones son favorables. Hulley calculó que la radiactividad original de una roca disgregada, disminuye en un 90 % al pasaje de un ácido débil; Larsen y Phair (7) estiman que un 40 % del uranio total de las rocas disgregadas, se lixivía fácilmente frente al pasaje de soluciones débilmente aciduladas.

Esta condición permite señalar una importante participación del U en los procesos de la fase del ciclo geológico epigénico, dada la posibilidad de aportar en los mismos importantes cantidades de U en solución.

III.2. EL URANIO EN LA SEGUNDA FASE DE SU CICLO GEOLOGICO.

En este capítulo se reúnen las condiciones que rigen la distribución secundaria de este elemento en la corteza terrestre. A estos procesos asignaremos una importancia capital, pues a ellos se debe el origen de los yacimientos uraníferos sedimentarios que encierran a la fecha el mayor porcentaje del uranio comercial de la Tierra.

El uranio es liberado de las rocas ígneas y de los filones de ese elemento por factores epigénicos o exógenos, cuyos agentes -agua, viento, etc.-, originados en la atmósfera terrestre y regidos por la gravedad, tienden a modificar las condiciones externas de la corteza.

El uranio movilizado en esta etapa termina por ser:

a- Concentrado en áreas de sedimentos próximos a las de aporte de las soluciones cargadas con iones uranilo.

b- Eliminado de la provincia metalogénica, para finalizar en el agua de mar y eventualmente en sus depósitos marinos.

La lixiviación y eventual eliminación o retención del uranio de una provincia metalogénica está regida por una serie de factores entre los que distinguimos:

- Condiciones geomorfológicas.
- Condiciones litológicas, etc.

En la geomorfología debemos buscar muchas de las causas que rigen la distribución secundaria del uranio. El conocimiento de la "fisonomía" de las provincias metalogénicas en épocas pasadas, es de importancia capital para completar la interpretación del ciclo secundario del uranio y las condiciones de yacencia de muchos yacimientos actuales. Hoy en día es una de las técnicas que más asiduamente se utilizan para apoyar las hipótesis genéticas de ciertos yacimientos y para fijar condiciones de prioridad y planificación, en la prospección de determinadas áreas.

Las bases principales que utiliza la geomorfología surgen del conocimiento de las propiedades de las rocas, tales como: contenidos minerales, composición química, estructuras, colores, etc.

Un estudio paleogeomorfológico integral, debe permitir la reconstrucción de los ambientes geográficos, distinguiendo ámbitos marinos, áreas continentales, profundidades del mar, dirección de las corrientes, presencia de vulcanismo, orogénesis, climas de épocas pasadas, etc.

Dentro de los factores exógenos que mayor incidencia tienen en la liberación, transporte, etc. del uranio, de-

bemos señalar la degradación, cuyos principales procesos de meteorización, erosión y remoción se desarrollan como importantes acciones destructivas del relieve original.

La meteorización de las rocas da lugar a la descomposición de las mismas por procesos físico-químicos, encontrándose influenciada en su desarrollo por:

- Factores climáticos.
- Condiciones litológicas.
- Posiciones topográficas.
- Características de la vegetación.

Si bien la interacción de los procesos físico-químicos son los que determinan las condiciones óptimas para la liberación del uranio de su posición original, es indudable que los procesos químicos representan el papel más importante en dicho ciclo. Los minerales de rocas ígneas y metamórficas que se encontraban en equilibrio en profundidad, al ingresar a la superficie terrestre se ven sometidas a procesos de hidratación, oxidación, carbonatación, disolución, etc., modificando su condición original y buscando posiciones de nueva estabilidad en dicha superficie.

III.2.1. Factores climáticos

El grado de evolución de los procesos químicos que afectan a las rocas, está influenciado fundamentalmente por el clima, el que representa uno de los factores al cual más se liga el ciclo secundario del uranio.

Ya hemos visto que el U, por sus condiciones geoquímicas, no permite prever su participación importante en la formación de yacimientos detríticos (se citan como posibles excepciones Witwatersrand y Blind River) y solo se han encontrado trazos de pechblenda detrítica, formada en climas muy fríos.

El U tetravalente endógeno estable, pasa por oxida-

ción a U hexavalente, el que es muy soluble en condiciones climáticas favorables. Esta solubilidad le permite integrarse como ión uranilo a los clásicos medios de movilización hidráulica, los que permiten la formación de importantes yacimientos sedimentarios epigénicos. La liberación de este elemento depende en consecuencia del clima del área de aporte y del que existió en las zonas que atraviesan las soluciones portadoras de mineralización.

En general las distintas condiciones climáticas en las áreas de aporte pueden dar lugar:

- Clima húmedo y cálido. Predomina una gran meteorización con formación de minerales arcillosos, un nivel freático alto, etc.; todo lo cual determina un estado de permanente disolución y eliminación del uranio en soluciones superficiales o adsorbido por las arcillas.

- Clima árido y seco, predomina la disgregación física sobre las modificaciones químicas; existe en consecuencia poca meteorización y un nivel freático muy bajo.

Las precipitaciones pluviales en este último clima determinan que se lixivie uranio en ambientes de rocas "fértilas", pasando esta solución a integrar aguas subterráneas, que al circular bajo condiciones favorables de depositación, llegan a precipitar su contenido en uranio.

Existen en la naturaleza una serie de termómetros geológicos que permiten llegar a conocer las condiciones paleoclimáticas de una determinada zona. Por ejemplo:

- El grado de desilicificación por efecto de meteorización química, determina la formación de suelos sialíticos bajo temperaturas frías y suelos alíticos bajo temperaturas cálidas.

- El valor en cal de los sedimentos permite deducir condiciones de temperaturas en su depositación, pues la preci

pitación de ese compuesto se incrementa con la elevación de la temperatura.

III.2.2. Condiciones litológicas

Lo mismo que el clima, las condiciones litológicas del área de pasaje de soluciones portadoras de mineral presentan relaciones estrechas con las posibilidades de su mineralización en uranio. De ahí que su consideración y estudio detallado sirvan de base a muchas definiciones en la selección de áreas favorables para la prospección uranífera.

Consideraremos a nuestro objeto dos grupos litológicos, principales, a los que se asocia preferentemente la mineralización secundaria del uranio.

- Formaciones detríticas (conglomerados, areniscas, etc.).

- Formaciones de esquistos, pelitas, etc. más o menos carbonosas o bituminosas.

En general los primeros sedimentos se han formado en ambientes continentales o plataformas epicontinentales, como productos de aportes de origen fluvial, deltaico o eólico. La presencia de materia orgánica en estas formaciones, cumple un papel de importancia fundamental para establecer la posibilidad de precipitación del ión uranilo, llevado en solución por las aguas subterráneas.

Normalmente estos sedimentos se presentan con una tonalidad roja -"red beds"-, originada en condiciones de deposición de clima árido y seco que determina la formación de sedimentos de color rojo original, correspondiente a óxidos ferrosos, que intervienen como cemento-matrix, etc. en la roca. Entre estas zonas rojas se distinguen los niveles de color gris-verdoso que están relacionados directamente con las áreas mineralizadas. La decoloración -que tanto se utiliza en estos casos como guías de la prospección del uranio-, co-

responde a fenómenos de reducción del ión ferroso a férrico, provocado por soluciones mineralizadoras que circulan controladas por ciertas propiedades estructurales de los sedimentos y que terminan por precipitar sus componentes en el proceso reductor, provocado por presencia de materia orgánica, etc.

Otros criterios básicos deben ser tenidos en cuenta al fijar las condiciones favorables para la presencia de U en algunos de estos sedimentos y ellos ya fueron citados en general en la conferencia específica para los yacimientos con control sedimentario (II.2.b., por los Dres. Stipanovic y Friz):

- Variaciones laterales de facies, variaciones de espesores, etc.
- Presencia de estructuras sedimentarias: paleocanales, estratificación entrecruzada, etc.
- Condiciones de permeabilidad y porosidad en los sedimentos, etc.

La consideración de estos principios son importantes como guías a tener en cuenta en la selección de áreas con sedimentos continentales a prospectar por uranio.

Las formaciones de esquistos o pelitas carbonoso-bituminosas corresponden a sedimentos formados en ambientes marinos o lagunares intracontinentales, con fondos ricos en hidrógeno sulfurado o medios "euxínicos". En ellos se acumulan mucha materia orgánica proveniente de los organismos del "plancton" y "necton", que al morir caen en su fondo sin que se descompongan dado el medio (reductor) en que se precipitan. Las aguas de ríos, etc., llevan en solución el uranio al mar o a los lagos, etc., donde este elemento termina por precipitarse en los fangos negros (fangos marinos actuales, revelan contenidos de hasta 60 ppm. de U), dando lugar a criaderos de

esquistos carbonoso-bituminosos, etc. con contenidos dispersos y bajos de ese elemento (promedio 200 a 500 ppm.).

III.2.3. Las posiciones tonográficas

Las posiciones topográficas de las áreas de aporte y de los sedimentos receptores deben mantener una relación que permita la acción de los factores que hemos detallado. Ello posibilitará su intervención en los complicados procesos de lixiviación, transporte y precipitación del uranio desde sus fuentes naturales -rocas "graníticas" fértiles, filones, etc.-, a los ambientes de su depositación en sedimentos continentales o marinos.

En general, las áreas "fértiles" de posibles aportes tienen que haber sufrido fenómenos de levantamientos o "uplift", que posibiliten se ejerzan sobre ellas los fenómenos de erosión que liberan el uranio.

La posición topográfica alta de estos centros facilitará también que las soluciones cargadas de ión uranilo se dirijan hacia los ambientes sedimentarios bajos, donde bajo condiciones especiales precipitarán sus contenidos metálicos. Este discernimiento permite prever, que también en esta fase del ciclo geoquímico, el uranio tenderá a una zonación epigénica, en función del grado de solubilidad de los metales presentes y de las distancias a los centros de aporte.

En general, se puede decir que bajo condiciones lito-sedimentológicas favorables, el uranio tiende a ubicarse preferentemente en proximidad de los centros de aporte, observándose un paulatino empobrecimiento de las soluciones portadoras y de las manifestaciones uraníferas a medida que las soluciones se alejan de dichos centros.

III.2.4. Características de la vegetación

Según Erchart (1956) (1), muchos sedimentos deben considerarse como suelos desplazados y redepositados.

El desarrollo de la pedogénesis está muy influenciada por la vegetación. Bajo la acción de una cobertura vegetal en clima tropical húmedo, los terrenos se alteran y dan lugar a la formación de dos fases:

-Fase residual: que resta "sin situ" y puede estar compuesta por: lateritas aluminosas, con caolinita (medio ácido) cuando los terrenos son rocas silicatadas, o por hidróxidos de hierro, alúmina y cuarzo, en el caso de rocas cuarzosas.

-Fase soluble migratoria: correspondiente a los compuestos alcalinos, sílice de silicatos, etc., que son eliminados del área o provincia metalogénica.

Esta separación de fases tiene como "filtro" a la cobertura vegetal. Mientras perdure este "filtro", la sedimentación del área será casi exclusivamente química o bioquímica pero si la misma desaparece, la fase "residual" podrá ser removida pasando la sedimentación a ser de tipo netamente detrítico.

El uranio, al igual que otros metales, se ve ligado a estos períodos de equilibrio biológico (biostasia) o de la ruptura de dicho equilibrio (rhexistasia). El creador de esta teoría, Erhardt (1) la llama BIORHEXISTASIA, y a ella deberemos adjudicar en el futuro, un papel trascendente en la historia geológica de una provincia metalogénica.

III.3. EL URANIO EN LA TERCERA FASE DE SU CICLO GEOLOGICO

El uranio, que en la segunda fase de su ciclo fué distribuido por lixiviación y concentración en sedimentos continentales, lacustres o marinos, puede culminar su proceso geoquímico en una tercera fase de metamorfismo o metasomatismo. Esta posibilidad se establece cuando los sedimentos portadores entran a constituir parte de una nueva cubeta geosinclinal y su paulatina profundización determina que esas

rocas (ya metamorfitas de profundidad) y el uranio contenido, reingresen por refusión, al ámbito de una masa fluida ("magma"), con el cual se cierra y reinicia el ciclo expuesto.

IV. CONCEPTO DE PROVINCIAS URANÍFERAS Y SU APLICACION A LA PROSPECCION DE ESTE ELEMENTO.

Se concibe como tal toda región de límites pocos definidos, en la cual abundan yacimientos y rocas con una gran variedad de tipos y concentraciones irregulares de uranio. Los límites indefinidos de estas provincias metalógicas se deben a las condiciones de extrema movilidad y heterogeneidad en la distribución primaria y secundaria de este elemento.

En general, las provincias uraníferas se caracterizan por una notoria persistencia a través de los tiempos geológicos. Ello se atribuye a las condiciones de su ciclo geoquímico, determinantes de una distribución y movilización de los ciclos primarios-secundarios, en un ámbito casi local con excepción del uranio que fuga de la provincia, para terminar en el mar o en sus sedimentos. Así se explicaría la actual persistencia de provincias uraníferas emplazadas originalmente en los viejos escudos de la corteza.

Los principios de "provincias uraníferas" y las bases antes detalladas de los ciclos de distribución original y secundaria, deben servir de fundamento a los fines de establecer los programas de prospección de dicho elemento en un país.

Si en un territorio se cuenta con algunos indicios de radiactividad, podemos estimar que los mismos pueden representar una verdadera provincia uranífera, regida por la sola existencia de una variedad de diferentes tipos de concentraciones, sin que influya en tal definición el porcentaje de U acumulado.

Estos indicios permitirán, con el conocimiento geológico del área, prever el sistema de prospección a realizar.

En tal sentido se deberá tener en cuenta:

a- Si en un ambiente o cubeta sedimentaria se ubican yacimientos o manifestaciones de uranio, es posible prever la existencia de yacimientos filonianos en los macizos montañosos próximos, siempre que en los mismos se ubiquen rocas ígneas ácidas (las que también constituyen fuentes de abastecimiento) y estructuras favorables.

b- Inversamente, si conocemos la existencia de yacimientos filonianos o un "clarke" elevado de uranio en un batolito erosionado bajo clima árido, se puede esperar ubicar:

- Nuevas vetas en otros sectores con estructuras favorables.

- Yacimientos sedimentarios en rocas detríticas continentales que se ubicarían en las zonas periféricas de los cuerpos "graníticos".

- La presencia de yacimientos sedimentarios, en determinados niveles de una formación geológica, permite presuponer la posibilidad de ubicar nuevos criaderos en otros pisos, niveles, etc. de dicha formación, o de otras infra o suprayacentes, si las mismas mantienen condiciones lito-sedimentológicas semejantes.

Si por el contrario, en un territorio no existen indicios que permitan establecer la posible presencia de una provincia uranífera, los proyectos de prospección deben comenzar por basarse en los principios geológicos teóricos, que rigen la distribución del uranio.

Con estos fundamentos se limitarán en primera instancia, una serie de zonas favorables o desfavorables a la presencia de uranio, según los siguientes considerandos:

1- Condiciones básicas favorables:

- Presencia de áreas orogénicas montañosas, con cuerpos ígneos de carácter ácido o alcalino, que incluyan rocas petrográficamente muy diferenciadas y aún presuntamente, filones de metales ligados por relación paragenética a la presencia de uranio.

- Existencia de períodos de erosión que pudiesen haber posibilitado la liberación del uranio desde esos centros primarios.

- Desarrollo de zonas sedimentarias periféricas o próximas a los núcleos graníticos, con presencia de rocas continentales, en las cuales se concentraría el U (producto de una posible lixiviación desde los granitos), bajo el imperio de ciertos factores que contribuyen a su concentración o depositación, los cuales ya fueron enunciados en la conferencia II.2.b.:

- Reducción (presencia de H_2S , bacterias, material carbonoso, asfáltico, etc.)

- Adsorción.

- Gradiente de presión (de las soluciones portadoras de uranio).

- Influencia de otros iones.

A estos principios se debería agregar por estudios geológicos integrales de segunda instancia, todos los argumentos que necesariamente posibiliten acercar el conocimiento de las condiciones geológicas del área (litología, paleoclima, estructuras, etc.), a las características que rigen la yacencia y control de los yacimientos de uranio.

2- Condiciones desfavorables:

- Areas de eugeosinclinales recientes en cadenas montañosas de rocas básicas.

- En las zonas cubiertas por espesas series de efusiones basálticas o lávicas de meseta.

- Presencia de espesas series de sedimentos marinos, que si bien constituyen reservas importantes de este metal, no son de interés comercial hasta la fecha, dado sus bajos tenores contenidos.

B I B L I O G R A F I A

- (1) - ROUTHIER, P., Les Gisements Metalliferes, Masson et Cie, 1 (1963).
- (2) - GOLDSCHMIDT, Principles of Geochemistry, Brian Mason (1952).
- (3) - BERNIER, H. et G., Petrogenese, Masson et Cie, 1 (1956).
- (4) - KERR, P.F., Las Concentraciones Naturales de Uranio y Torio Conf.Int.Utilización Energía Atómica Fines Pacíficos (Actas Conf.Ginebra, 1956), P.1114.
- (5) - FERSMAN, Geochimie, Leningrad, P.R.G.M., 4 tomos (1933 a 1938).
- (6) - EVEHARDT, D.L., Yacimientos Filonianos en los Estados Unidos. Conf.Int.Utilización Energía Atómica Fines Pacíficos (Actas Conf.Ginebra, 1956), P.20.
- (7) - LARSEN y PHAIR, El Uranio en la Diferenciación Magnética, Conf.Int.Utilización Energía Atómica Fines Pacíficos (Actas Conf.Ginebra, 1956), P.17.
- (8) - MEYER, Z., Manual de Geología Tectónica, Omega (1963).
- (9) - RAGUIN, E., Geologie des Gites Mineraux, Masson et Cie, París (1961).
- (10) - RAGUIN, E., Geologie du Granite, Masson et Cie (1957).
- (11) - GOGUEL, J., Traité de Tectonique, Masson et Cie (1952).
- (12) - KRUMBEIN, GRAYBILL, An Introduction to Statistical Models in Geology, McGraw Hill (1965).
- (13) - KIEPPER, WYANE, Provincias Uraníferas. Conf.Int.Utilización Energía Atómica Fines Pacíficos (actas Conf. Ginebra, 1956), 6 P.14.
- (14) - CARLIER, A., Contribution aux Methodes d'Estimation des Gisements d'Uranium. Theses a la Faculté des Sciences de l'Université de Paris (1964).
- (15) - LOMBARD, J., Sur la Geochimie et les Gisements du Nickel. Chronique des mines d' Butre Mer, N° 244, París, 1954.

- (16) - NEVERBUEG, G.J., Rocas Igneas de los Estados Unidos. Conf.Int.Utilización Energía Atómica Fines Pacíficos (Actas Conf.Ginebra, 1956).
- (17) - GEFFROY, J., Generalites sur l'Uranium dans la Nature, Bulletin d'Informations Scientifiques et Techniques du C.E.A. (1964).
- (18) - HEINRICH, W., Mineralogía y Geología de las Materias Primas Nucleares, Omega, Barcelona (1966).
- (19) - AUBAGUE, M., PROUHET, J.P., SLANSKY, M., Caracterización des Milieux de Sédimentation et Recherches de Nouveaux Gites Pb-Zn Dans la Zone Caussenarde. Bureau de Recherches Geologiques et Minières, N° 1 (1966).
- (20) - TATARINOF, Conditions de Formation des Gisements de Minerais, Moscou, Trad.B.R.G.M. Paris (1959).

I N D I C E

I. INTRODUCCION.....	pág.	1
II. ESBOZO GEOQUIMICO DEL URANIO.....	"	2
III. RELACION GEOQUIMICA, YACIMIENTOS DE URANIO Y GEOLOGIA DE LA CORTEZA TERRESTRE.....	"	5
III.1. EL URANIO EN LA PRIMERA FASE DE SU CICLO GEOLOGICO.....	"	6
III.1.1. Fuentes originales o singenéticas.....	"	6
III.1.2. Formas de presentarse el uranio en las rocas ígneas y filones. Uranio labil.....	"	13
III.2. EL URANIO EN LA SEGUNDA FASE DE SU CICLO GEOLOGICO.....	"	15
III.2.1. Factores climáticos.....	"	17
III.2.2. Condiciones litológicas.....	"	19
III.2.3. Las posiciones topográficas.....	"	21
III.2.4. Características de la vegetación.....	"	21
III.3. EL URANIO EN LA TERCERA FASE DE SU CICLO GEOLOGICO.....	"	22
IV. CONCEPTO DE PROVINCIAS URANIFERAS Y SU APLI CACION A LA PROSPECCION DE ESTE ELEMENTO.....	"	23
BIBLIOGRAFIA.....	"	27

O.....446 000	Zr.....220	Be.....6	Bi.....0,2
Si.....277 200	Cr.....200	Sm.....6,5	Tm.....0,2
Al.....81 300	V.....150	Gd.....6,4	Cd.....0,15
Fe.....50 000	Zn.....132	Pr.....5,5	Ag.....0,1
Ca.....36 300	Ni.....80	Sc.....5	In.....0,1
Na.....28 300	Cu.....70	As.....5	Se.....0,09
K.....25 900	W.....69	Hf.....4,5	A.....0,04
Mg.....20 900	Li.....65	Dy.....4,5	Pd.....0,01
	N.....46	U.....4	Pt.....0,005
98,59%	Ce.....46	B.....3	Au.....0,005
	Sn.....40	Yb.....27	He.....0,003
Ti.....4 400	Y.....28	Er.....2,5	Te.....0,002?
H.....1 400	Nd.....24	Ta.....2,1	Rh.....0,001
P.....1 180	Nb.....24	Br.....1,6	Re.....0,001
Mn.....1 000	Co.....23	Ho.....1,2	Ir.....0,001
S.....520	La.....18	Eu.....1,1	Os.....0,001?
C.....320	Pb.....16	Sb.....1?	Ru.....0,001?
Cl.....314	Ga.....15	Tb.....0,9	
Rb.....310	Mo.....15	Lu.....0,8	
F.....300	Th.....12	Tl.....0,6	< 0,001: Ne, Kr, Xe
Sr.....300	C.....7	Hg.....0,5	elementos radiactivos
Ba.....250	Ge.....7	I.....0,3	de vida corta.

- COMPOSICION QUIMICA MEDIA DE LA CORTEZA TERRESTRE

En gramos por toneladas o en partes por millon (p.p.m). Para -
obtener los tenores % dividido por 10⁴.

Según. Goldschmidt y otros: (Mason Brian-Principios de Geoquímica-1952-

Fig.1-

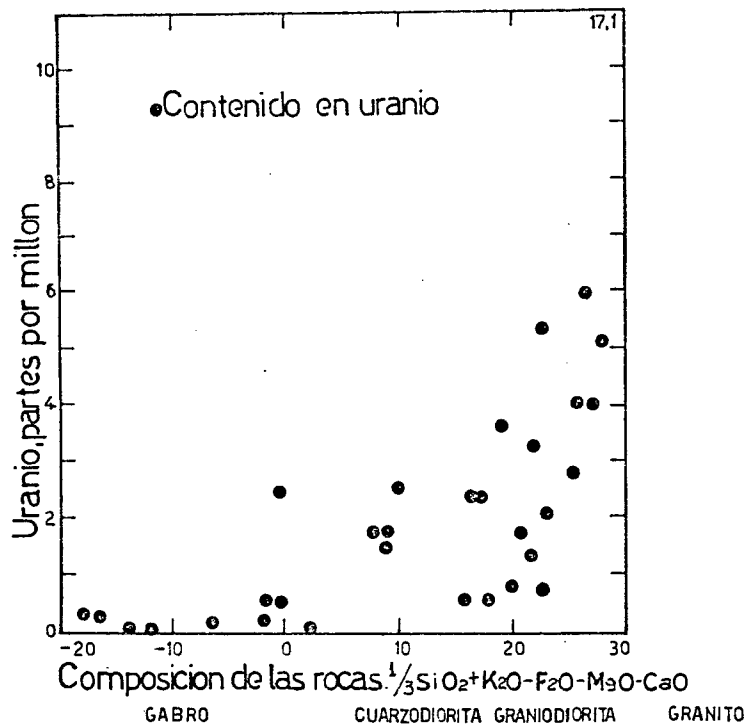
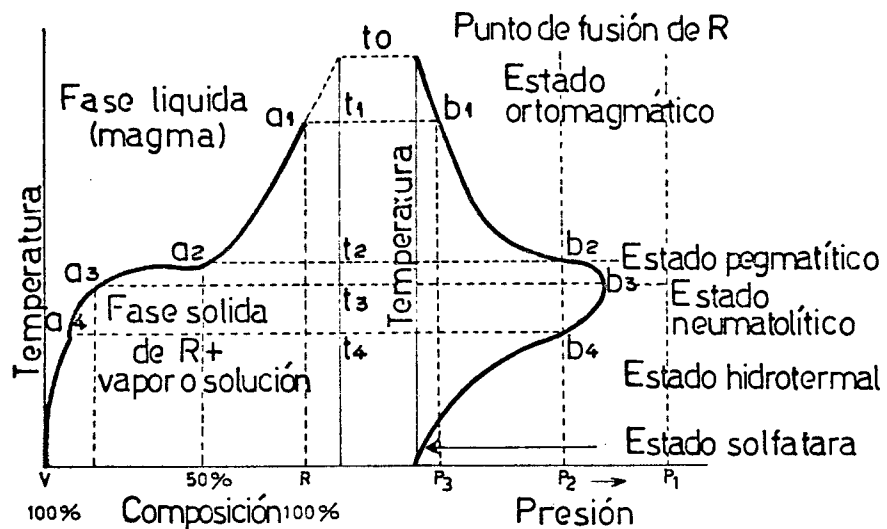


Figura 2 - El uranio en las rocas del batolito de California del Sur - según Larsen Phair, etc. P. 277. Vol. 6. Geología - Uranio-Torio-O.I.E.A. - 1955.



REFERENCIAS

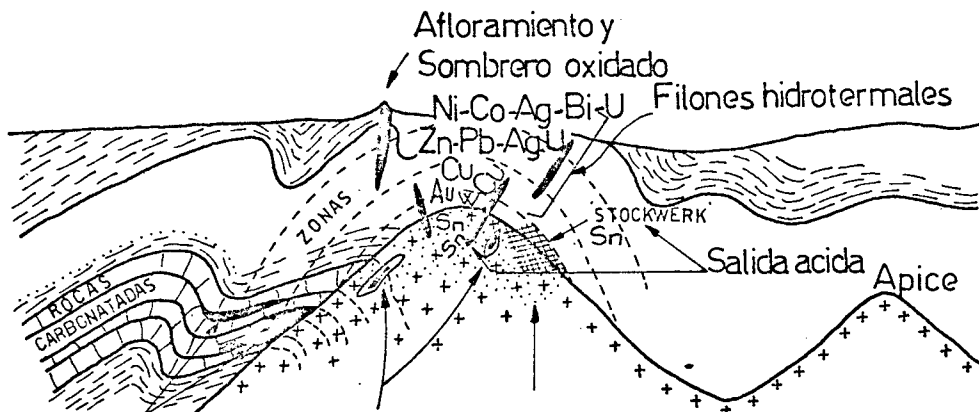
V = Volatil
 R = Refractario
 a1 = Inicio de la solidificación del magma
Figura - 3 - Diagrama de Niggli.
 Sacado de Hy G. Temier -
 (L'evolution de la Litosphere)

NEUMATOLITICOS e HIDROTERMALES		PEGMATITAS GRANÍTICAS	
Al	● REACCION CON ROCAS DE CAJA ALUMINOSAS. EJ: TOPACIO.	⊕	
Si	⊕ GANGA CUARZOSA.	+	
K	●	⊕	
Na	●	⊕	
Fe	⊕	● (FIJADA POR TURMALINA NEGRA).	
Ti		⊕ (TITANO-NIOBO-TANTALATOS).	
Mn	+	+	
Ba	⊕	●	
P	●	+	
B	+	+	
F	+	+	(ENRIQUECIMIENTO EN ELEMENTOS VOLATILES).
Cl	●	● (ESCAPOLITA MUY RARA EN LAS PEGMATITAS GRANITICAS).	
S	⊕	● (SULFUROS POCO ABUNDANTES).	
As	⊕	● (MISPICKEL).	
Sb	⊕	●	
Sn	⊕	+	
W	⊕	●	
Bi	⊕	●	
Mo	⊕	+	
Au	⊕	●	
Cu	⊕	●	
Zn	⊕	●	
Pb	⊕	●	
Li	+(ZINWALDITA).	⊕ (LEPIDOLITA-ESPODUMENO-AMBLIGONITA).	
Be	●	⊕	
Rb	●	⊕ (SIEMPRE EN TRAZOS ± IMPORTANTES).	
Cs		⊕ (RARAMENTE INDIVIDUALIZADO).	
Zr		⊕ ABUNDANTE EN LAS PEGMATITAS NEFELINICAS SIENITICAS.	
Nb		⊕ ANALOGIA DE RADIOS IONICOS NIOBATO Y TANTALATO.	
Ta		⊕ TALATOS MUY VARIADOS CON Ti, Tr y U.	
TR	(TIERRAS RARAS).	⊕	
Th	● (MONACITAS EN LOS GRANITOS).	⊕	
U	⊕	● (SIN INTERES ECONOMICO).	

REFERENCIAS

- ⊕ Elementos abundantes que se aislan totalmente en una de las lineas.
- + Abundante.
- Poco abundante.

Figura -4- Comparación geoquímica entre las pegmatitas y pneumatolitos -segun Fersman (1931).
Copiado de Routhier - 1963.-



Pirometasomáticos Pegmatitas Inclusiones
 Tactitas aW (scheelita) Be-Nb-Ta Au-Zr-Sn-W (scheelita).
 Cu-Fe.....etc. Li.. etc. Mo-Ce-Th (monazita).
 comúnmente en el
 contacto del granito. PLUTON (GRANITICO a DIORITICO)

Figura-5- YAC. METALIFEROS RELACIONADOS CON UN MACIZO GRANITICO POST-TECTONICO O "CIRCUNSCRIPTO".
 (Esquema Sintético).
Routhier-les Gisements Metalliferes - pag.48.

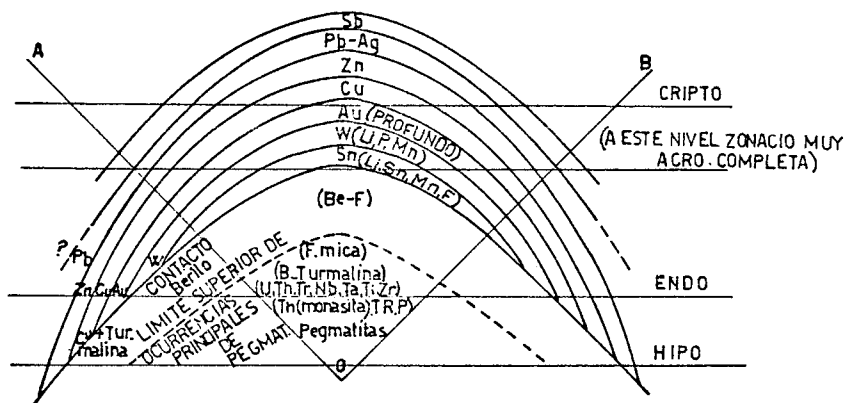


Figura.-6- ZONACION DE LAS "GEOQUIMICAS CONCENTRICAS" ALREDE DOR DE UN PLUTON GRANITICO: ZONACION NORMAL.
Segun Fersman- Geoquímica 1934. T II -Figura.75.