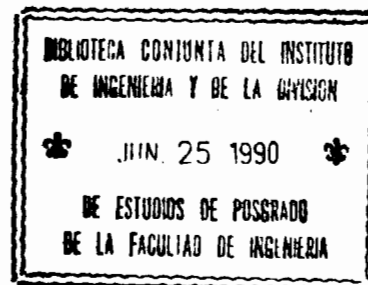


# **GEOLOGIA DE LOS YACIMIENTOS DE URANIO**

**Dr. José María Chávez Aguirre**  
**Ing. Rafael Chávez Aguirre**



**D-86**



DEPFI

1-  
D-86  
1910  
1-1

## GEOLOGIA DE LOS YACIMIENTOS DE URANIO

Dr. José María Chávez Aguirre

Profesor de la Sección de Exploración de Recursos Energéticos del Subsuelo, DEPMI, UNAM.

Ing. Rafael Chávez Aguirre

Profesor de Geología de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua.



## P R O L O G O

Estos apuntes se elaboraron con la idea de que constituyan un apoyo para la mejor comprensión del curso de "Geología de los yacimientos de uranio", que se imparte en la Maestría en Exploración de Recursos Energéticos, Op-  
ción Uranio, de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Inge-  
niería de la U.N.A.M.

Los temas que se tratan procuran cubrir el programa de la materia; en --  
ellos se exponen las propiedades del mineral, sus métodos de exploración y  
algunas teorías acerca de su origen, ilustrándose además los principales --  
depósitos en el planeta.

Las areniscas y los conglomerados son consideradas como las rocas almacena-  
doras más importantes, describiéndose los yacimientos de Texas y de la Me-  
seta del Colorado en los Estados Unidos y los de Witwatersrand en Sudáfri-  
ca y Blind River en Canadá; también destacan los cuerpos intrusivos de --  
Rössing en Africa Suroccidental y los granitos hercinianos que alojan ve--  
tas como los del Macizo Central en Francia; depósitos de Australia son de  
interés porque actualmente están en investigación como el de Yeelirrie, --  
donde la mineralización ocurre en un material calcáreo superficial denomi-  
nado "calcrete".

Las rocas volcánicas revisten una gran importancia en México debido a que  
uno de nuestros principales yacimientos, el de la Sierra Peña Blanca en --  
Chihuahua, se localiza en ignimbritas y tobas, siendo un indicio del poten-  
cial que debe existir en las grandes áreas volcánicas que nuestro país po-  
see en abundancia.

Deseamos expresar nuestro agradecimiento al M. en C. Juan Brandi Purata, --  
Coordinador de la Maestría en Exploración de Energéticos, por su apoyo --  
siempre entusiasta para llevar a buen término este trabajo. Igualmente re-  
conocemos la ayuda desinteresada del Ing. Raúl Cruz Ríos, Subgerente de Ex-  
ploración del Consejo de Recursos Minerales, por su valiosa intervención --

en la elaboración de figuras. Por último, agradecemos a las Sras. Mariza -  
Hernández de Chávez y Guillermina Monterrosas Martínez su paciente labor de -  
mecanografía.

DR. JOSE MARIA CHAVEZ AGUIRRE

ING. RAFAEL CHAVEZ AGUIRRE

México, D.F. Agosto de 1988

## C O N T E N I D O

|                                                                                                                              | Página |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| CAPITULO 1. Uranio en la producción de energía, presente y futuro -----                                                      | 1      |
| 1.1. Países productores de uranio -----                                                                                      | 1      |
| 1.2. Fundamentos básicos de las diferentes plantas de energía nuclear -----                                                  | 6      |
| A) Reactor de Agua a presión (PWR) -----                                                                                     | 8      |
| B) Reactor de Agua hirviente (BWR)-----                                                                                      | 10     |
| C) Reactor PHWR-CANDU (Reactor de agua pesada uranio natural) -----                                                          | 11     |
| <br>CAPITULO 2. Métodos de prospección geológicos, geofísicos- y geoquímicos -----                                           | <br>13 |
| a) La prospección geofísica -----                                                                                            | 13     |
| b) Perfilaje de sondeos -----                                                                                                | 14     |
| c) Estudios radiométricos aéreos -----                                                                                       | 17     |
| d) Estudios radiométricos de superficie -----                                                                                | 17     |
| e) Estudios con radón -----                                                                                                  | 20     |
| f) Estudios geoquímicos -----                                                                                                | 23     |
| <br>CAPITULO 3. Fuentes fundamentales del uranio y torio -----                                                               | <br>29 |
| 3.1. Generalidades -----                                                                                                     | 29     |
| A) Análisis químicos y radiométricos de meteoritos, considerados como representativos de diferentes capas de la tierra ----- | 29     |
| B) Análisis químicos y radiométricos de rocas de la superficie de la Tierra -----                                            | 30     |
| C) Estimación de los valores de flujo de calor y conductividad de la roca en el interior de la Tierra -----                  | 31     |

|                                                                                                                                      | Página |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 3.2. Uranio en las rocas ígneas -----                                                                                                | 33     |
| 3.3. Uranio en las rocas sedimentarias -----                                                                                         | 39     |
| <br>CAPITULO 4. Migración de radioelementos en la corteza -----                                                                      | 41     |
| a) Introducción -----                                                                                                                | 41     |
| b) Cuencas oceánicas -----                                                                                                           | 43     |
| c) El cratón -----                                                                                                                   | 43     |
| d) Areas orogénicas -----                                                                                                            | 47     |
| e) Areas pasivas de depositación -----                                                                                               | 47     |
| f) Zona de subducción -----                                                                                                          | 48     |
| g) Arcos de islas -----                                                                                                              | 49     |
| h) Antearco -----                                                                                                                    | 50     |
| i) Continental encorvado -----                                                                                                       | 50     |
| j) Zonas geopresurizadas -----                                                                                                       | 51     |
| k) Margen tafrogénico continental -----                                                                                              | 51     |
| <br>CAPITULO 5. Ejemplos típicos de yacimientos uraníferos aso-<br>ciados a rocas ígneas, metamórficas y sedimenta-<br>rias -----    | 52     |
| 5.1. Introducción -----                                                                                                              | 52     |
| 5.2. Generalidades -----                                                                                                             | 53     |
| 5.3. Yacimientos en conglomerados con materia carbo-<br>nosa y a veces oro. Witwatersrand, Sudáfrica; -<br>Blind River, Canadá ----- | 58     |
| a) Witwatersrand, Sudáfrica -----                                                                                                    | 59     |
| b) Blind River, Canadá -----                                                                                                         | 62     |
| 5.4. Yacimientos en areniscas -----                                                                                                  | 66     |
| a) Depósitos orientados. Ambrosia Lake (Distrito -<br>Uranífero Grants, E.U.A.) -----                                                | 66     |
| b) Depósitos Tipo Rol. Area de Texas, E.U.A. -----                                                                                   | 71     |



## INDICE DE FIGURAS

| <u>Figura</u>                                                                             | <u>Página</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 1.- Países productores de uranio -----                                                    | 2             |
| 2.- El reactor como fuente de calor -----                                                 | 7             |
| 3.- Tipos de reactores -----                                                              | 9             |
| 4.- Diagrama esquemático de una sonda de rayos gamma -----                                | 15            |
| 5.- Registro de rayos gamma y resistividad -----                                          | 16            |
| 6.- Contador de centelleo para la exploración del uranio ----                             | 18            |
| 7.- Perfil radiométrico e isorradadas correspondientes -----                              | 19            |
| 8.- Método de medición del gas radón -----                                                | 21            |
| 9.- Principio de la dispersión geoquímica secundaria del ura<br>nio -----                 | 25            |
| 10.- Geología histórica y ciclos del uranio y torio -----                                 | 42            |
| 11.- Geología histórica y ciclos del uranio y torio -----                                 | 44            |
| 12.- Depósitos de uranio del mundo occidental y su distribu<br>ción metalotectónica ----- | 55            |
| 13.- La Cuenca Witwatersrand -----                                                        | 60            |
| 14.- Depósitos de uranio del área Blind River en Canadá -----                             | 63            |
| 15.- Uranio en conglomerado -----                                                         | 65            |
| 16.- El distrito Ambrosia Lake, E.U. -----                                                | 67            |
| 17.- Mapa del distrito uranífero Grants, Noroeste de Nuevo Mé-<br>xico, E.U. -----        | 70            |
| 18.- Relaciones entre las formaciones del distrito uranífero -<br>Grants -----            | 70            |
| 19.- Formas típicas de cuerpos de uranio -----                                            | 72            |
| 20.- Mineralización de uranio tipo "roll" -----                                           | 74            |
| 21.- Sección idealizada de un depósito de uranio tipo "roll"--                            | 74            |
| 22.- Mapa de la provincia uranífera del sur de Texas -----                                | 75            |

|                                                                                                | Página |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 5.5. Yacimientos en rocas carbonatadas -----                                                   | 77     |
| a) Mina Shinkolobwe, Katanga, Africa -----                                                     | 77     |
| 5.6. Yacimientos periplutónicos en filones -----                                               | 79     |
| a) Joachimsthal - Checoslovaquia -----                                                         | 79     |
| 5.7. Yacimientos intraplutónicos (depósitos asociados<br>a intrusivos) -----                   | 87     |
| 5.8. Depósitos tipo calcreta -----                                                             | 85     |
| 5.9. Depósitos controlados por estructuras o fractu<br>ras (vetas y depósitos similares) ----- | 88     |
| a) El Macizo Central francés -----                                                             | 88     |
| b) Otros ejemplos -----                                                                        | 92     |
| CAPITULO 6. Uranio en México -----                                                             | 95     |
| a) Introducción -----                                                                          | 95     |
| b) Yacimiento de uranio "Peña Blanca", Chihuahua, Mé<br>xico -----                             | 97     |
| c) Depósito de uranio "Los Amoles", Sonora, México- 101                                        |        |
| d) Yacimiento de uranio "La Coma - Buenavista",<br>Nuevo León, México -----                    | 104    |
| B I B L I O G R A F I A -----                                                                  | 109    |

| <u>Figura</u>                                                                                       | <u>Página</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 23.- Rocas almacenadoras de uranio en el sur de Texas -----                                         | 75            |
| 24.- Sección longitudinal de las rocas de la Serie Mine,<br>Shinkolobwe, Congo Belga -----          | 78            |
| 25.- Sección vertical a través de una veta lenticular de<br>pechblenda -----                        | 78            |
| 26.- Yacimiento de uranio intraplutónico -----                                                      | 83            |
| 27.- Mapa de Sudáfrica con el depósito de uranio Rössing --                                         | 84            |
| 28.- Geología del depósito de uranio Rössing -----                                                  | 84            |
| 29.- Mapa de Australia con los mayores distritos uranífe-<br>ros -----                              | 86            |
| 30.- Génesis de la carnotita en un depósito tipo calcreta                                           | 86            |
| 31.- Depósito de uranio tipo "calcrete" -----                                                       | 87            |
| 32.- Mineralización de uranio en calcreta -----                                                     | 87            |
| 33.- Depósitos de uranio en vetas en la Cadena Herciniana<br>de Europa Central -----                | 89            |
| 34.- Depósito de uranio en vetas, Macizo Central -----                                              | 90            |
| 35.- Mineralización de uranio en la Mina Margnac, Francia                                           | 91            |
| 36.- Tipos de yacimientos emplazados en rocas volcánicas --                                         | 96            |
| 37.- Ubicación del yacimiento de uranio Peña Blanca, Chihua-<br>hua, Mex. -----                     | 98            |
| 38.- Columna estratigráfica de la Sierra de Peña Blanca,<br>Mpio. de Aldama -----                   | 98            |
| 39.- Sección idealizada de la parte central de la Sierra de<br>Peña Blanca, Edo. de Chihuahua ----- | 100           |
| 40.- Ubicación del yacimiento de uranio "Los Amoles", Son.-                                         | 102           |
| 41.- Sección esquemática del yacimiento de uranio "Los Amo-<br>les" -----                           | 102           |
| 42.- Columna estratigráfica de la Sierra de Aconchi, Son. -                                         | 103           |

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 43.- Localización de anomalías radiométricas y proyectos ura<br>níferos en la Cuenca de Burgos ----- | 105 |
| 44.- Sección de un rol mostrando el desarrollo del mineral<br>en roles secundarios -----             | 105 |

## CAPITULO 1

### Uranio en la producción de energía, presente y futuro.

#### 1.1 Países productores de uranio (fig. 1).

El uranio producido en los Estados Unidos proviene principalmente de depósitos en areniscas, conglomerados y calizas de la región de la Meseta del Colorado (Colorado Plateau); otra parte la aportan áreas adyacentes, especialmente en Wyoming; además, algo de la producción de la Meseta del Colorado se encuentra en vetas (Lamey, 1966).

La producción de uranio en Canadá proviene de Port Radium y Raycock en -- los Territorios del Noroeste (Northwest Territories), Beaverlodge en el -- extremo NW de Saskatchewan, y Blind River y Bancroft en Ontario. La distribución de propiedades o denuncios mineros de uranio de todos los tipos a través de Canadá, cubre un área extensa pero cerca del 80% de las propiedades están en tres provincias. Entre ellas, la de Ontario aportó el 77% de la producción total de Canadá en 1961 y 1962, la de Saskatchewan -- cerca del 20% y el 3% restante fue de Northwest Territories.

Los depósitos de Canadá se agrupan en tres grandes tipos: conglomerático, pegmatítico y vetas, además de los depósitos relacionados. El depósito -- conglomerático productivo está totalmente en el área de Blind River, Onta-- rio; el yacimiento pegmatítico está principalmente en Saskatchewan, Que-- bec y Ontario; las vetas y depósitos relacionados están exclusivamente en Saskatchewan, los Northwest Territories y Ontario.

El uranio de Africa ocurre exclusivamente en los depósitos de oro de --- Witwatersrand, República de Sudáfrica y en los yacimientos de cobre de la mina Shinkolobwe en Katanga, República del Congo.



Todo el uranio producido en la República de Sudáfrica es un subproducto del oro extraído, excepto en muy pocos lugares como los conglomerados - uraníferos donde el uranio existe en mayor cantidad que el oro.

La mina Shinkolobwe, actualmente agotada, se encuentra en la parte central del sinclinorio de Katanga, cerca de 20 Km al Oeste de Jadotville. Aunque es uno de los depósitos de cobre de Katanga no tiene relativamente importancia como productor de este mineral.

Los depósitos comerciales de Australia están en los territorios del Norte y Sur. Los yacimientos de Rum Jungle de la región de Darwin Katherine en el Norte de Australia, aproximadamente 60 millas al sur de Darwin, ocurren en pizarras, lutitas y esquistos fallados y plegados de edad precámbrica. Los depósitos consisten en reemplazamientos y vetillas de cuarzo, en los cuales la uraninita se asocia con calcopirita, - pirita y algunos otros sulfuros, y en otros la autunita es el mineral dominante. Minerales secundarios están presentes en la mayor parte de los depósitos. En Radium Hill, Sur de Australia, cerca de 90 Km al SW de Broken Hill, varias vetas contienen davidita que ocurre a lo largo - de fracturas en gneises y otras rocas del Precámbrico.

Los depósitos de uranio de Francia ocurren principalmente en tres áreas: el Macizo Central (Francia Sur-Central), el Macizo de Bretaña (Oeste -- Centro de Francia) y el Vosges (NE de Francia). Entre los yacimientos productivos, seis están en el Macizo Central y dos en el Macizo de Bretaña. En el Distrito Vendee, del Macizo de Bretaña, la mayoría de los depósitos se encuentran en los bordes del granito Mortagne o a lo largo del contacto granito-esquistos. En la región de Limousin, al W del Macizo Central el depósito más importante parece ser el de La Crouzille que se sitúa a 18 Km al N de Limoges; la pechblenda se localiza en fracturas en los diques de lamprófidos (mineta) que cortan el granito. La -- pechblenda está en cuerpos concrecionales y esferulíticos, algunos de los cuales tienen varios centímetros de espesor y están acompañados por pequeñas cantidades de varios sulfuros, especialmente pirita y marcasi-

ta.

En Checoslovaquia, el depósito Joachimsthal es de interés histórico porque sus vetas produjeron el material usado por Pierre y Marie Curie cuando descubrieron el radio; este yacimiento fue una de las primeras fuentes de ese elemento, aunque las vetas se explotaban principalmente por otros metales. El depósito es del tipo níquel-cobalto-plata nativa.

Entre 1949 y 1958 se publicó información sobre los depósitos de uranio de la Unión Soviética. Los dos más importantes eran el área de Fergana-Valley y el área alrededor del Lago Baikal. En el área del Valle Fergana la producción comercial empezó en Tyuya Muyun en 1908.

El depósito en 1933 consistía en, por lo menos, 5 vetas de barita y más de 30 vetas sin barita. Las vetas productivas están cerca del centro del depósito, extendiéndose hacia afuera 1500 m. La veta principal profundizó hasta 500 m. Las vetas ocurren en calizas metamorfizadas del Paleozoico, que fueron modificadas fuertemente por solución; algunos depósitos se encuentran en cavidades de disolución. Algunas de las vetas de barita sin uranio contienen radio y tienen la composición  $(Ba, Ra) SO_4$ . Los minerales son secundarios de cobre, vanadio y uranio. El principal mineral de uranio es la Tyuyamunita, la cual recibió este nombre del yacimiento.

Los depósitos de uranio se presentan también en otras partes del Valle Fergana. En 1923 se descubrió uno en Vigar-Sai o Atbash, en el lado norte del Valle, el cual se parece mucho a los depósitos de carnotita de la Meseta del Colorado.

Cerca de Slyudyanka, en el área del Lago Baikal, los yacimientos productivos contienen niobio, tantalio, y uranio en el mineral betafita (localmente llamado mendelyevite o mendeleyevite). Actualmente es un depósito de mica (flogopita), la betafita aparentemente ocurre sólo en vetas en pegmatita.



Se conocen otras áreas que posiblemente sean productivas en el norte y - sur de Siberia y en el centro de Kamchatka. Las reservas actuales de la Unión Soviética se desconocen (Lamey, 1966).

Recursos Razonablemente Asegurados del Mundo Occidental ( 1 9 7 7 ).

Reservas económicas a Dls 30/lb  $U_3O_8$ .

| País                      | Tons. cortas $U_3O_8 \times 10^3$ | Tipo principal del depósito. |
|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Argelia                   | 3 1                               | Vetas                        |
| Argentina                 | 2 0                               | Areniscas                    |
| Australia                 | 3 1 8                             | Vetas                        |
| Brasil                    | 2 0                               | Igneo                        |
| Canadá                    | 1 8 4                             | Conglomerados, Vetas         |
| Francia                   | 4 1                               | Vetas                        |
| Gabón                     | 2 2                               | Areniscas                    |
| India                     | 3 3                               | Vetas                        |
| Nigeria                   | 1 7 6                             | Areniscas                    |
| Sudáfrica (incl. Namibia) | 3 3 6                             | Conglomerados, Vetas         |
| Estados Unidos            | 5 7 5                             | Areniscas                    |
| Otros                     | 5 4                               |                              |
| <hr/>                     |                                   |                              |
| T o t a l                 | 1 , 8 1 0                         |                              |

Quince naciones pertenecientes a la OECD reportan recursos razonablemente asegurados menores de 5,000 tons. cortas de  $U_3O_8$ ; cuatro reportan de 5,000 a 10,000. Otras, en el rango de \$ 30 a 50 la libra, son generalmente pequeñas porque la mayoría de los países no hacen estimaciones en esta categoría. 13 países reportan un total de 600,000 tons. cortas de  $U_3O_8$  dentro de la categoría de más alto costo. (OECD/IAEA, 1977).

## 1.2 Fundamentos básicos de las diferentes plantas de energía nuclear (Ponce, 1980).

Una planta nucleoelectrica es fundamentalmente igual a una termoelectrica convencional; la única diferencia importante es que el vapor, que en el caso de la convencional es suministrado por una caldera, en el de la nuclear lo provee un reactor con un generador de vapor (fig. 2).

En la planta convencional tenemos un recipiente con agua (llamado caldera), abajo del cual quemamos un combustible fósil, ya sea combustóleo o carbón, o incluso gas natural. Al calentarse el agua del recipiente, se genera vapor que conducimos por una tubería hacia el turbogenerador. Al entrar en la turbina, el vapor que se encontraba a presión se expande, - haciendo girar a la turbina como si fuese un reguilete. El vapor ya sin presión pasa a un condensador en el que se enfría lo suficiente para - que se condense y vuelva a ser agua, que se bombea para que regrese al - recipiente y se vuelva a convertir en vapor a presión. De esta forma se establece un circuito continuo.

Si regresamos a la turbina que está girando, apreciaremos que está acoplada a un generador eléctrico, de tal suerte que estamos generando electricidad.

Haciendo un balance global de la planta convencional vemos que por un lado estamos quemando combustible fósil (energía fósil) y por el otro lado estamos obteniendo una corriente eléctrica (energía eléctrica). O sea - que nuestra planta convencional es un aparato que transforma energía acumulada en el combustible fósil en energía eléctrica.

En la planta nucleoelectrica el proceso es el mismo, sólo que en lugar de quemar el combustible fósil estamos produciendo fisiones en el uranio de los elementos combustibles (mostrados como pequeñas barritas negras - en la figura) que están siendo enfriados por agua que circula alrededor de ellos, llevándose el calor (energía térmica) hacia fuera del núcleo -

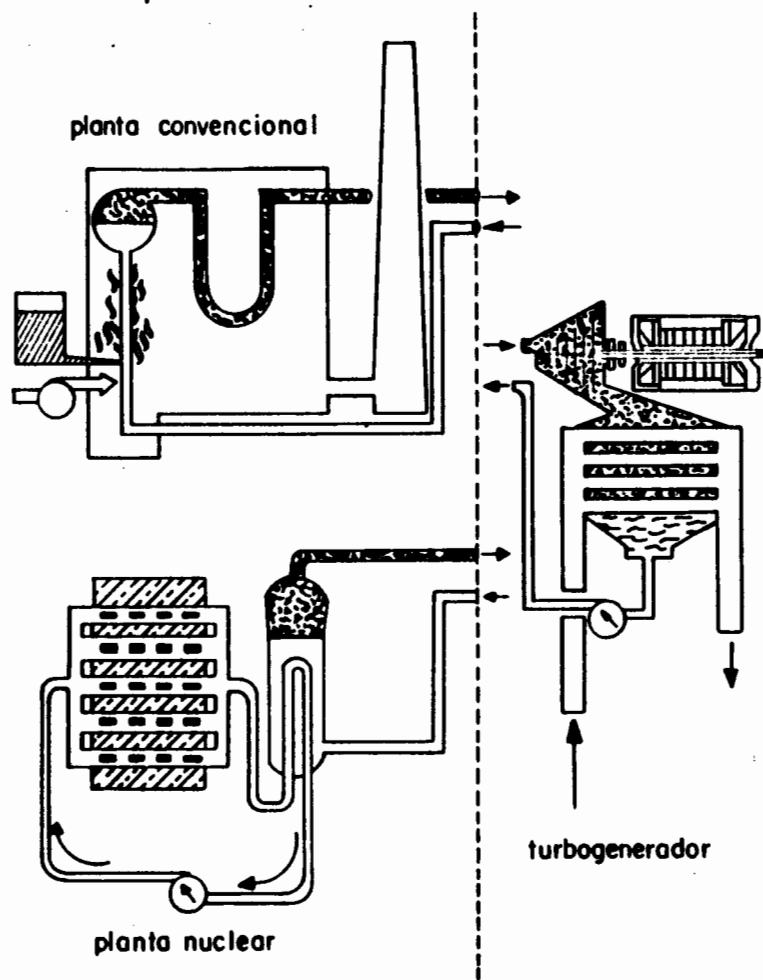


FIG.2.-EL REACTOR COMO FUENTE DE CALOR  
(Ponce M;1980)

del reactor.

El agua que se calienta en el núcleo no hierve porque se mantiene a una presión muy alta dentro de un circuito que se llama primario. Sin embargo, el agua pasa por un generador de vapor en donde transmite energía a un circuito secundario que, estando a una presión menor, permite que el agua que contiene se transforme en vapor. De ahí en adelante el proceso se repite, el vapor mueve la turbina, se condensa y regresa al generador de vapor.

El balance global en la nucleoelectricidad sería el siguiente: por un lado, estamos quemando uranio (extrayendo energía nuclear) y por el otro lado, estamos obteniendo energía eléctrica. Esto significa que la planta nucleoelectrica es un aparato, mediante el cual transformamos la energía nuclear de las fisiones en energía eléctrica.

A partir de los años 50, además de los países que habían comenzado a desarrollar la nucleoelectricidad, varios otros empezaron a probar conceptos diferentes de reactores de potencia. Son tres los tipos de reactores que actualmente se consideran comerciales y probados; es decir, que en la práctica han demostrado que generan electricidad a costos competitivos con las termoeléctricas convencionales y que además ya han trabajado un número suficiente de años para demostrar que operan satisfactoriamente sin problemas importantes de diseño.

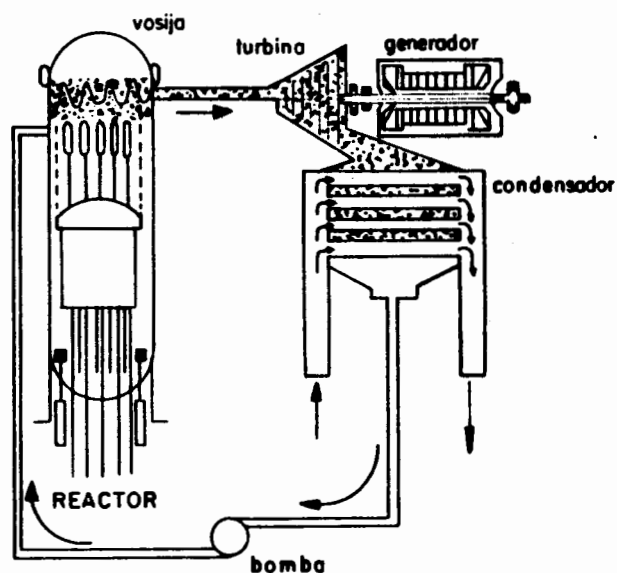
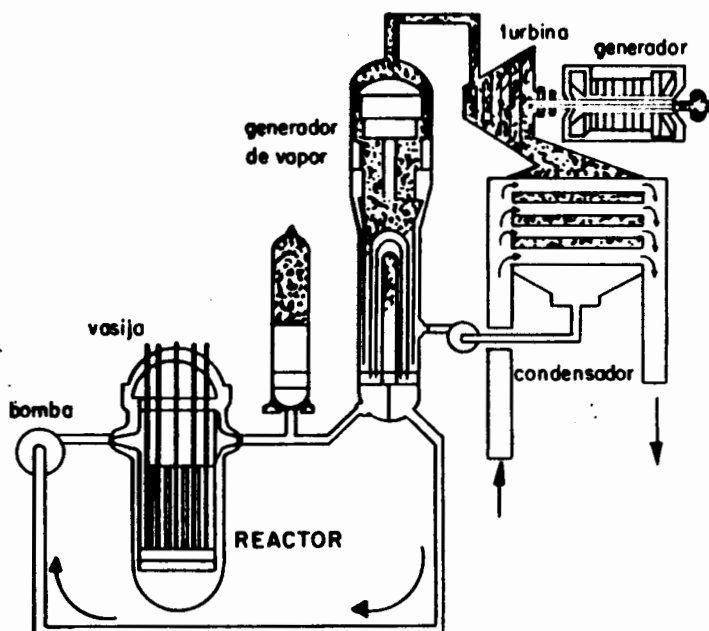
Los tres diseños comerciales y probados utilizan la combinación de uranio y agua, como combustible y moderador-enfriador, respectivamente. (Fig. 3):

#### A) Reactor de Agua a Presión (PWR).

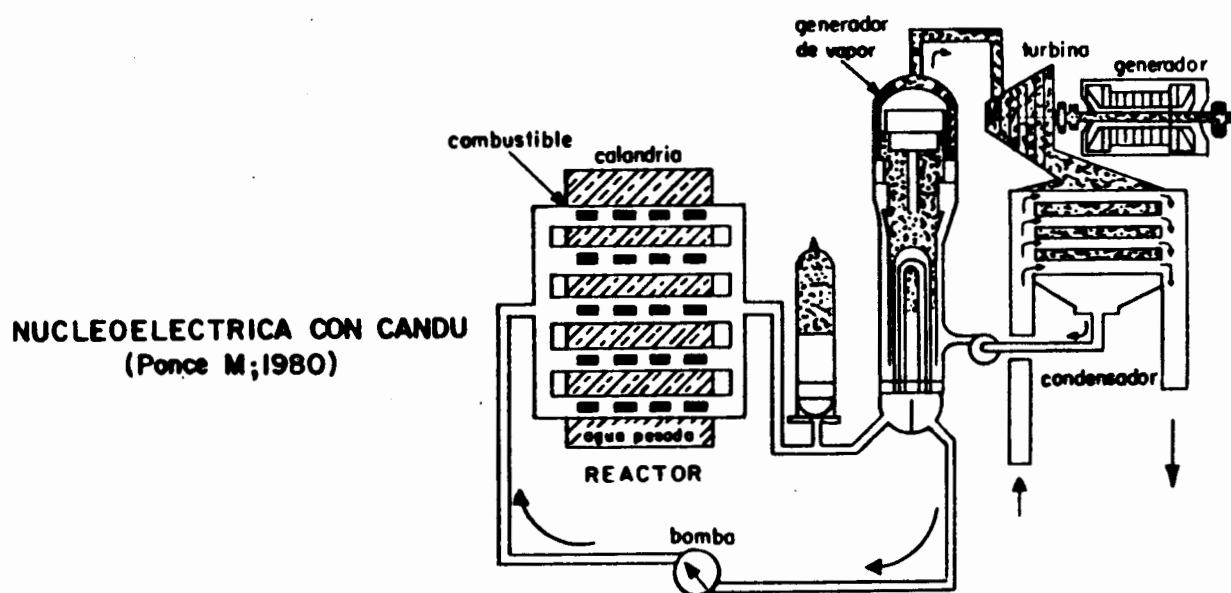
En este reactor se utiliza la combinación uranio enriquecido-agua ligera. (Para poder utilizar agua ligera como moderador de un reactor que sea crítico, es necesario aumentar el porcentaje de U-235 en el combus-

**FIGURA 3**

**NUCLEOELECTRICA CON PWR  
(Ponce M; 1980)**



**NUCLEOELECTRICA CON BWR  
(Ponce M; 1980)**



tible, esto es, enriquecerlo; con ello cambiamos el porcentaje de U-235 de 0.711% que tiene el uranio natural, hasta un nivel de aproximadamente 3%; si no es así, no se podría mantener una reacción nuclear en cadena). En la figura correspondiente se muestra un esquema de una planta nucleoelectrica con reactor PWR. En estos reactores, el combustible en forma de barras se agrupa en ensambles que se alojan dentro de una gran vasija de presión. Para un reactor de 600 MW, esta vasija de acero tiene unos cuatro metros de diámetro y más de diez metros de altura. La vasija está llena de agua ligera (agua común) que cumple la función de moderador, es decir, de frenar a los neutrones que nacen en las fisiones para que se termalicen y puedan causar nuevas fisiones. Conforme se van produciendo las fisiones, el porcentaje de U-235 va disminuyendo en el combustible, de tal suerte que si no se renovara, la reacción crítica en cadena no se podría sostener después de un cierto tiempo. Por esta razón, los reactores cada año deben recargar combustible.

#### Ventajas y desventajas.

- a) La tecnología de este reactor es la más avanzada. La mayoría de las plantas nucleoelectricas del mundo funcionan con estos reactores. Cuenta con mayor número de fabricantes.
- b) Permite el acceso de personal ya que, comparado con el BWR, el nivel de radiación es mínimo.
- c) Dependencia de los países industrializados debido a la necesidad de uranio enriquecido para fabricar combustible.
- d) Pérdida de tiempo al hacer el cambio anual de combustible (de un mes a mes y medio).

#### B) Reactor de Agua Hirviente (BWR)

En términos generales es igual al PWR. La diferencia es que el circuito

de enfriamiento del núcleo opera a una presión mucho más baja, con lo cual el agua hierve al recibir el calor de las fisiones. Al hervir el agua dentro del núcleo y por lo tanto, producir vapor, ya no es necesario tener un generador de vapor ni un circuito secundario.

Ventajas y desventajas.

a) Mayor eficiencia ya que la producción de vapor directamente en el núcleo, sin necesidad de generadores de vapor y de un circuito indirecto, significa menores pérdidas de calor y menor consumo de energía para bombeo.

b) Los generadores de vapor son equipos que suelen provocar problemas en los reactores a presión.

c) No permite el acceso libre de personal ya que los niveles de radiación en el área de turbinas son altos debido a que no existe barrera a la contaminación radiactiva como en el caso de los reactores PWR donde el generador de vapor cumple esta función secundaria.

d) Dependencia en la operación debido a que se necesita uranio enriquecido.

e) Pérdida de generación por varias semanas al hacer el cambio anual de combustible.

C) Reactor PHWR-CANDU (Reactor de Agua Pesada-Uranio natural)

Candú = Canadian Deuterium Uranium.

La diferencia más importante reside en que, aprovechando que el deuterio casi no absorbe neutrones, utiliza la combinación agua pesada ( $D_2O$ )-uranio natural.

CANDU utiliza tubos de presión en lugar de una gran vasija. Los elementos combustibles se colocan dentro de los tubos de presión; éstos están contenidos dentro de un gran cilindro horizontal llamado calandria, cuyo eje principal es paralelo a los tubos de presión. El agua pesada, que cumple la función de moderador, está contenida en la calandria, rodeando a los tubos de presión. Esta agua, que hace las veces de enfriador, circula a través de los tubos, es decir, entre los elementos combustibles, de los que recoge el calor de las fisiones.

La utilización de tubos de presión en lugar de vasija de presión permite que el combustible se cambie en potencia, o sea, sin apagar el reactor y sin bajar su potencia.

Por lo demás, el sistema es similar al PWR, en el sentido de que la presión al operarlo no permite la ebullición del agua en el núcleo del reactor, de ahí que también cuenta con generadores de vapor y circuito secundario.

#### Ventajas y desventajas.

a) Utiliza uranio natural, por lo tanto, no hay dependencia del extranjero.

b) La utilización de tubos de presión permite la recarga en potencia.

c) Nivel de radiación reducido, permitiendo el acceso de personal al área de las turbinas.

d) Inversión de 15% adicional al costo de la planta, para producción de agua pesada.

e) El combustible de uranio natural es más sencillo y mucho más barato que el correspondiente de uranio enriquecido, por lo que los costos totales de generación eléctrica son aproximadamente iguales que los del PWR o del BWR.



## CAPITULO 2

Métodos de prospección geológicos, geofísicos y geoquímicos (Barretto, 1981; Routhier, 1963; C.E.A., 1975).

- a) La prospección geofísica tiene por objeto medir las características físicas de las áreas sujetas a investigación. Los métodos geofísicos, muy empleados en la exploración petrolera, han sido adaptados a la prospección de los minerales radiactivos y son muy importantes en la búsqueda de depósitos "ciegos".

Las mediciones de la resistividad de las rocas y los sondeos eléctricos permiten detectar discontinuidades y estructuras favorables cuando no hay afloramientos en la superficie.

Se utiliza también la prospección sísmica y más raramente la prospección magnética, magnetotelúrica y la gravimetría.

Estas técnicas, empleadas en casos bien definidos, aportan valiosa información sobre la geología regional.

Como resultado de estos trabajos se obtiene una síntesis y una hipótesis sobre la profundidad que hay que confirmar; es el papel, en particular, de los sondeos. Para reconocer la extensión a profundidad de un eventual yacimiento, se deben hacer perforaciones que pueden efectuarse por percusión o rotaria.

Algunas perforaciones permiten nuclear el pozo, es decir, sacar muestras cilíndricas de roca no molida llamadas "núcleos". Sin embargo, el costo de los pozos nucleados es mucho más elevado que el de las simples perforaciones sin obtención de muestras, se busca por esto en la medida de lo posible limitar la cantidad de los primeros. Diferentes mediciones geofísicas hechas en el pozo, suplen la ausencia de muestras para conocer la na-

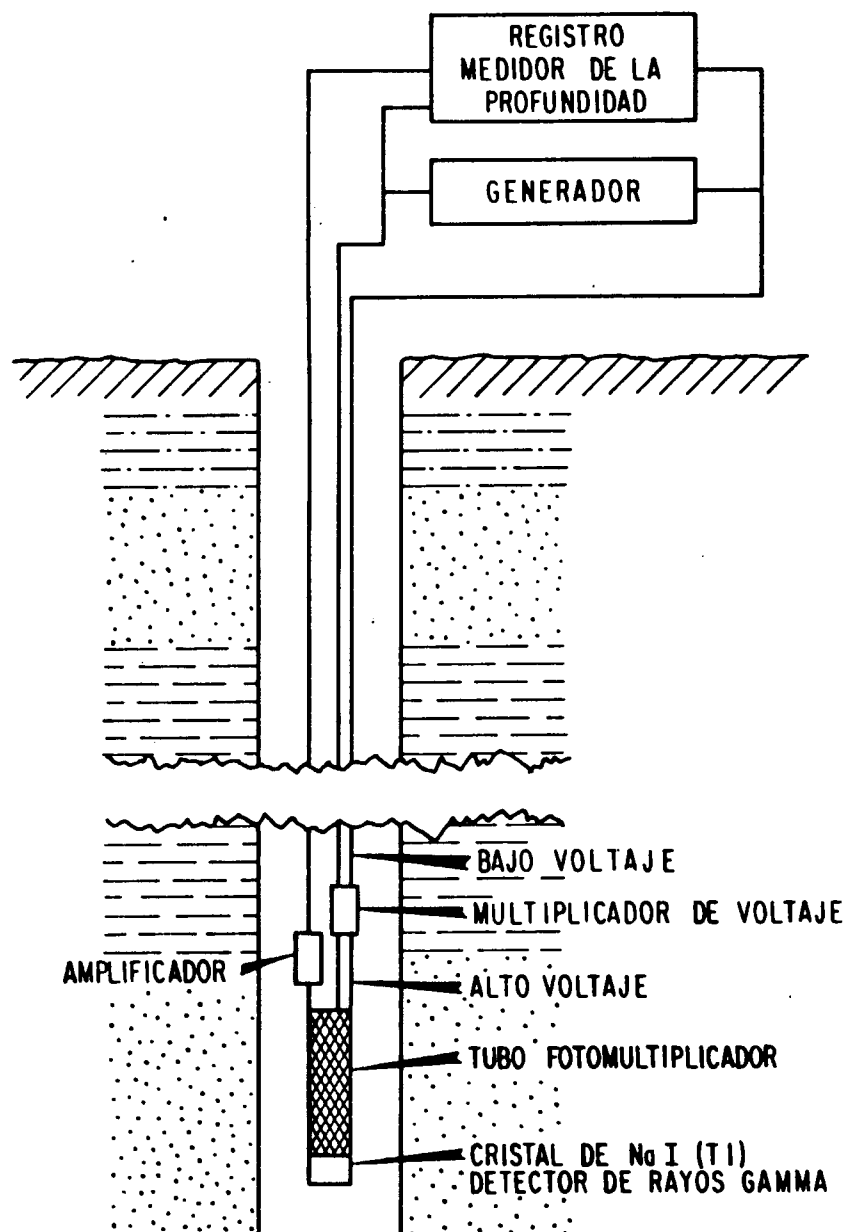
turalidad de los horizontes atravesados. Se procede entonces a un radio-núcleo del pozo, por medio de una sonda radiométrica (Fig. 4). Se obtiene así información de la radioactividad de las rocas perforadas. En rocas sedimentarias se hace también un sondeo eléctrico, es decir, que se mide la resistividad de las capas atravesadas. Todos estos datos se consignan en un registro de pozo que es la síntesis.

Los reconocimientos a poca profundidad, una treintena de metros, se hacen generalmente por percusión; para mayor profundidad se utiliza la rotaria.

La perforación suele representar del 50 al 80% del costo de un programa de exploración, por lo que, para una buena prospección del uranio, una perforación eficaz resulta probablemente más importante que cualquier otra actividad.

- b) Para el perfilaje de sondeos se hace descender un detector gamma (sonda) por una perforación y se registra la radioactividad hallada (Fig. 5). El método facilita rápida y económicamente la mayor parte de los datos del subsuelo que necesita el geólogo explorador. Permite el muestreo y análisis *in situ*, la identificación litológica, la correlación estratigráfica y con programas de sondeo más detallados, facilita parámetros petrofísicos tales como densidad y humedad y diversos datos geoquímicos. A menudo el sondeo puede reducir grandemente los costos de perforación permitiendo obtener los datos necesarios a base de perforaciones sin testigos menos costosas o perforaciones efectuadas anteriormente con otros fines. En general, mediante el perfilaje de sondeos se obtienen datos más representativos y objetivos en menos tiempo y a un costo más bajo que con la descripción de testigos, el muestreo y el análisis de testigos o cortes. El costo del perfilaje de sondeos geofísicos multiparamétricos sólo raras veces debería exceder el 10% del costo de perforación.

Las técnicas más útiles en la exploración de uranio son, sin duda alguna, las radiométricas. De hecho, combinando los estudios radiométricos aéreos con el examen de las anomalías detectadas en el terreno y el perfilaje



- a) El cristal de Na I (TI) emite diminutos centelleos de luz cuando es penetrado por un rayo gamma.
- b) El tubo fotomultiplicador contiene una superficie fotosensible adherida al cristal y que emite electrones. Estos se multiplican en etapas dentro del tubo a  $1 \times 10^6$  veces.

Fig. 4.- Diagrama esquemático de una sonda de rayos gamma (Bailey y Childers, 1977)

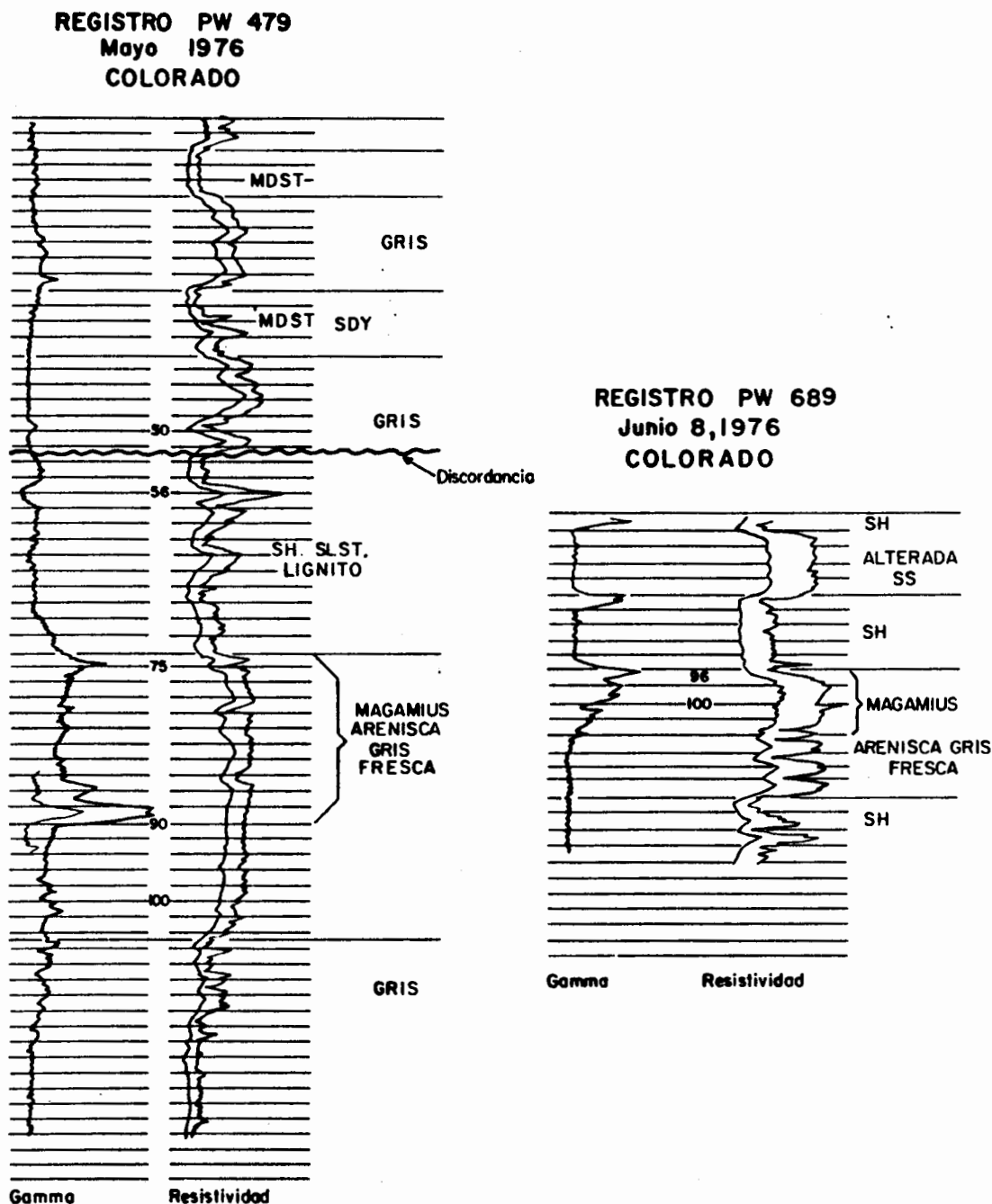


Fig. 5.- Registro de rayos gamma y resistividad mostrando las características de litologías típicas. Obsérvese en la gráfica PW 479 que el lignito del metro 56 presenta baja lectura gamma y alta resistividad. La arenisca en PW 479 de los 73 a los 91 metros es una anomalía gamma, indicando proximidad a un depósito de uranio tipo rol. Esta anomalía en arenisca no alterada (magamius) se repite a los 96 m en PW 689. Otros pozos confirmaron que ambos registros están localizados cerca de depósitos de uranio tipo rol en arenisca fresca.

(Bailey y Childers, 1977).

je gamma de los sondeos, se ha descubierto una gran proporción de los recursos uraníferos conocidos.

- c) Los estudios radiométricos aéreos se realizan en la evaluación inicial de grandes zonas. A bordo de helicópteros o de aviones de ala fija se utilizan detectores gamma muy sensibles. Una vez detectadas, las anomalías radiactivas se registran y se representan en mapas con miras a una subsiguiente verificación sobre el terreno. Para estudiar la zona suele establecerse un reticulado.

A pesar del costo relativamente elevado por kilómetro lineal, los estudios aéreos por espectrometría gamma son muy interesantes desde el punto de vista de su rentabilidad.

Los gastos totales de este método en concepto de vuelos, levantamiento de mapas, evaluación y selección de zonas para su ulterior exploración, se comparan favorablemente con los de otras técnicas. Los datos espectrométricos, si se evalúan bien, permiten reducir el volumen de costosas comprobaciones sobre el terreno, esenciales para determinar los resultados del estudio (las comprobaciones de campo son parte necesaria del estudio y a menudo cuestan más, por  $\text{Km}^2$  o por anomalía, que el estudio aéreo).

- d) Estudios radiométricos de superficie.— El estudio complementario de las anomalías uraníferas en el terreno exige el empleo de cintilómetros o espectrómetros manuales y portátiles, aparatos para el perfilaje de sondeos y emanómetros (monitores de radón).

Los contadores de centelleo (Fig. 6) se utilizan para medir los rayos gamma emitidos por elementos radioactivos naturales contenidos en las rocas (U, Th, K).

Estos instrumentos sirven sobre todo para buscar anomalías radiométricas que eventualmente permitirán descubrir yacimientos uraníferos (Fig. 7). Los instrumentos se caracterizan por una elevada eficacia de detección.

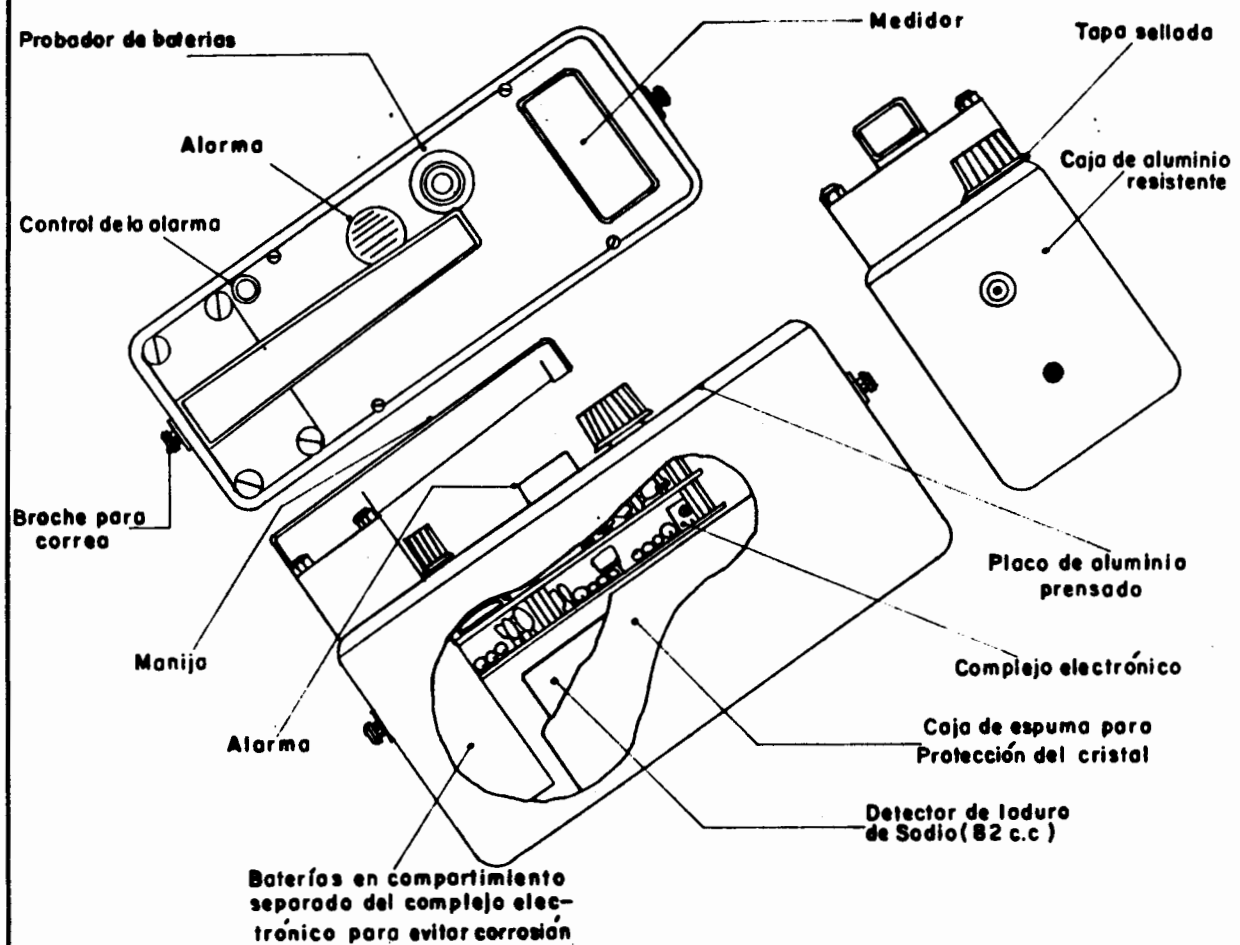


Fig. 6.- Contador de centelleo para la exploración del uranio (Modelos BGS-3 y BGS-4 de la Compañía Scintrex).

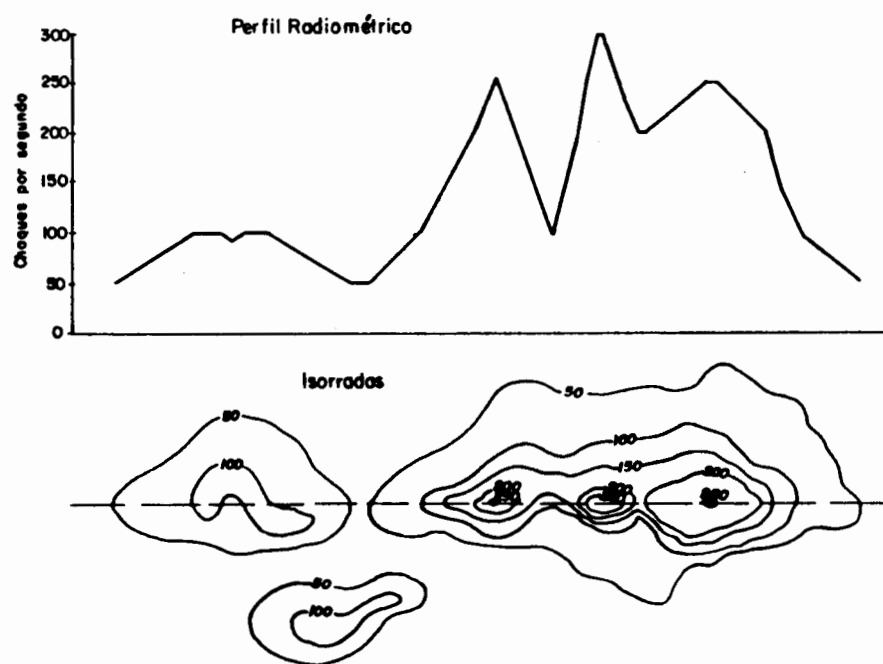


Fig. 7 : Perfil radiométrico e isorradas correspondientes.

gamma, altas tasas de cuenta y fluctuaciones estadísticas relativamente bajas. Con ellos es posible reconocer pequeños cambios en la concentración de elementos radiactivos. Los cintilómetros son los instrumentos de equipo de campo utilizados más a menudo en la exploración del uranio. Se emplean en todas las fases de dicha exploración combinándolos con estudios geoquímicos y geofísicos. Se pueden instalar en vehículos para realizar estudios radiométricos móviles. Estos estudios representan un método muy práctico de prospección de uranio a condición de que la red de carreteras y pistas sea buena.

El espectrómetro de campo es un instrumento perfeccionado del equipo radiométrico que permite determinar la energía particular de la radiación gamma y, en consecuencia, el nucleido radiactivo emisor. De esta manera se pueden detectar concentraciones equivalentes relativas de U, Th y K. El costo de adquisición de un espectrómetro de campo es varias veces más elevado que el de un cintilómetro. Entre las desventajas de los espectrómetros de campo cabe citar que las mediciones espectrales requieren más tiempo que los estudios por conteo total, que su mantenimiento es difícil en zonas alejadas y que es necesario calibrar los instrumentos con frecuencia. El valor de los resultados depende en general del conocimiento de los parámetros geológicos y geoquímicos de una zona determinada.

- e) Estudios con radón.— Esta técnica se basa en la detección del radón, gas radiactivo, en suelo, rocas y agua. La medición del radón es específica del uranio, mientras que la radiación gamma del medio ambiente natural procede de otros elementos de la serie del uranio (el radón es la emanación del radio, éste es producto de filiación del uranio y se encuentra difundido en el suelo y la atmósfera). Las mediciones de radón sirven para indicar la presencia de uranio entre 5 y 50 metros de profundidad, mientras que la emisión gamma puede quedar disimulada por una cubierta de 0.5 metros.

Los instrumentos de campo utilizados son los emanómetros (Fig. 8), deno-



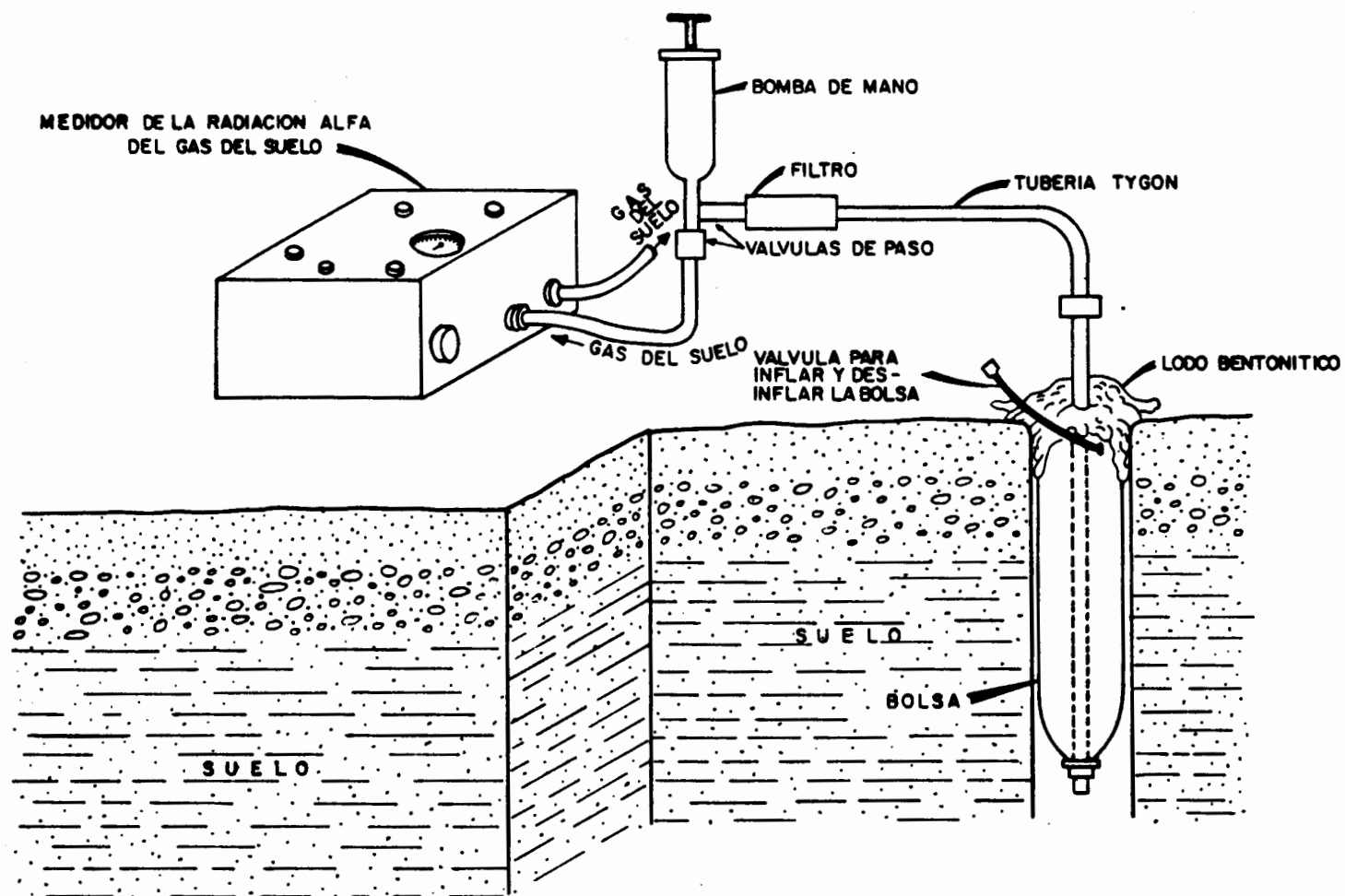


Figura. 8 - Diagrama que muestra el método de medición del radón en el gas del suelo, en el cual se hace un pozo donde la sonda muestreadora se sella bajo una bolsa inflada y lodo bentonítico (Bailey y Childers, 1977)

minados también monitores de radón, que detectan concentraciones anómalas de radón ( $Rn-222$ ) y de torón ( $Rn-220$ ), y de sus productos de desintegración inmediata. Esta técnica permite distinguir entre el radón y el torón y, a continuación, efectuar mediciones independientes de la radiación gamma de fondo. Para medir la concentración de radón existen varios tipos de instrumentos, todos ellos basados en la detección de partículas alfa emitidas como productos de desintegración del gas radón ( $Rn-222$ ) en un nucleido hijo, el polonio sólido ( $Po-216$ ).

Ultimamente se han producido algunos progresos en este tipo de detección. Una técnica utiliza los daños inducidos por la radiación alfa (trazas) en detectores de plástico de estado sólido (Track-etch). Otra emplea un detector de barrera superficial de silicio (Alpha nuclear), y una tercera (método del colector) utiliza el depósito activo resultante de la desintegración de productos de radón acumulados en un pequeño disco aluminizado de pequeño espesor ("Alpha-card").

El año 1980 se comercializó otra técnica elaborada en Sudáfrica: se denomina Roac (radon on activated charcoal) (radón en carbón vegetal activado). Se basa en la absorción del radón por el carbón vegetal activado; a continuación, se mide el radón presente con ayuda de cualquier detector de centelleo montado en el interior de una caja de plomo. Los procedimientos de campo para la colocación de los vasos Roac son idénticos a los utilizados en los sistemas de trazas alfa.

Los métodos de conteo alfa y de trazas poseen la ventaja, frente al método del emanómetro, de eliminar la variación de la señal en el tiempo que se produce en muchos medios. Además, no es necesario transportar al terreno complicado equipo electrónico.

En último término, el objetivo es ayudar a seleccionar los lugares más favorables para las actividades complementarias de exploración, tales como las perforaciones y obras mineras directas.

- g) Estudios geoquímicos.— Las técnicas geoquímicas se utilizan en estudios de zonas de extensión muy variable. Estos estudios pueden clasificarse de la siguiente manera: de baja densidad (reconocimientos), 0,1-2 muestras/ $\text{Km}^2$ , de densidad intermedia (estudios complementarios), 10-20 muestras/ $\text{Km}^2$ , y de alta densidad (estudios detallados), 200 muestras/ $\text{Km}^2$ . Las investigaciones preliminares indicarán si conviene utilizar o no métodos geoquímicos y deben facilitar también los datos necesarios para planificar y ejecutar un estudio de tipo corriente. Antes de iniciar un programa sistemático de exploración se precisa un estudio de orientación o una investigación preliminar para seleccionar el método a utilizar.

Las investigaciones preliminares deben efectuarse, siempre que sea posible, en zonas donde la mineralización es análoga al tipo que se trata de descubrir, situadas lo más cerca posible de la zona de estudio. Cuando esto no es posible, puede obtenerse orientación a base de otros estudios efectuados en regiones de condiciones geológicas y climáticas similares.

Los estudios de muestreo de baja densidad (escala 1:250,000-1:25,000) se realizan para seleccionar las zonas más favorables situadas en una región más extensa sin tratar de efectuar una delineación precisa; la experiencia demuestra que las aguas y los sedimentos de corrientes de una red hidrográfica muy dispersa se adaptan perfectamente a este tipo de prospección. El intervalo de muestreo se determina durante un estudio de orientación, de modo que los halos de dispersión de la red hidrográfica que rodea un hallazgo de significación media se indicarán con tres muestras anómalas como mínimo.

Estudios de muestreo de densidad intermedia (escala 1:20,000-1:50,000) : El objetivo de esta fase intermedia es localizar y determinar el origen de anomalías superficiales observadas en zonas de interés delineadas durante el muestreo de baja densidad. Esto se consigue aumentando la densidad de muestreo hasta 10-20 muestras/ $\text{Km}^2$ . Al mismo tiempo se procura relacionar la anomalía con la geología local. Se toman muestras de sedimentos de corrientes y aguas de todas las corrientes de la zona anómala.

Siempre que sea posible se muestrean, además del agua de pozos, las aguas de infiltración y de manantiales. Si no se conoce la geología de la zona anómala, conviene obtener más datos geológicos de la misma. Si bien con esta prospección intermedia raras veces se localizan minerales uraníferos; sin embargo se circunscribe, de modo quizás sustancial, la zona de interés, se evalúa su potencial y se conoce mejor el origen de la anomalía -- geoquímica. A continuación es posible seleccionar el método mejor adaptado a nuevos estudios, por ejemplo, técnicas geoquímicas, radiométricas o geofísicas.

Estudios de muestreo de alta densidad (escala 1:5000-1:500). El objetivo de estos estudios es localizar posibles fuentes de anomalías y/o determinar la extensión de cuerpos mineralizados asociados y evaluar el estudio radiométrico.

En términos generales, en esta fase se trata de distinguir entre anomalías resultantes de una mineralización rentable de otra que no lo sea o de otras causas. En esta etapa se prefiere la prospección geoquímica, sobre todo cuando la meteorización es importante o cuando existe una cubierta estéril (que hace ineficaces los métodos radiométricos). La experiencia ha demostrado que el muestreo de suelos es el método más adecuado en esta fase. Suele adoptarse una retícula de muestreo con intervalos que varían entre 10 y 50 m. Debe prestarse atención a la posible contaminación resultante de operaciones de minería, del empleo de ciertos fertilizantes fosfatados y de otras actividades humanas.

Los principios de Geoquímica encuentran una aplicación práctica en la búsqueda minera con la prospección geoquímica. Esta se basa en el conocimiento del fondo geoquímico regional y en la existencia, alrededor de los yacimientos, de las "dispersiones" que son zonas que presentan caracteres anormales en su naturaleza y en su composición. (Fig. 9).

Las "dispersiones" se llaman primarias si están ligadas a la formación de ciertas rocas o a los fenómenos mineralizantes primarios, en el sentido hipogénico.

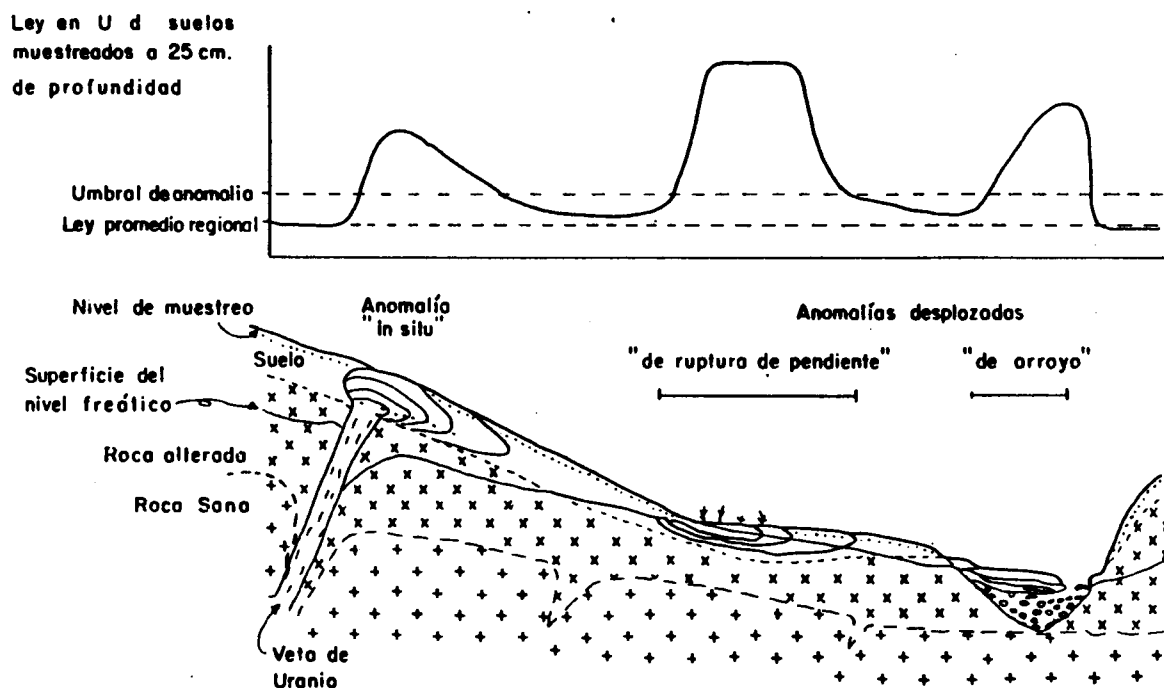


Fig.9.- Esquema del principio de la dispersión geoquímica secundaria del uranio en un suelo granítico a partir de una veta mineralizada. Se notará que la anomalía mayor no corresponde a la veta uranífera. El relieve y la circulación del agua juegan un papel importante, el cual hay que tener en cuenta en la interpretación, así como en la ubicación y en la forma de las anomalías. (A. Grimbert in Routhier 1963).

Se llaman secundarias si se producen en la superficie por la alteración, - la erosión y el transporte que redistribuyen los elementos de las mineralizaciones primarias. Esta dispersión, a la vez mecánica y química, provoca zonas de anomalías (aureolas) que engloban un mayor volumen que los yacimientos propiamente dichos, lo que favorece su detección incluso cuando no afloran (A. Grimbert in Routhier, 1963).

La prospección geoquímica consiste entonces en medir sistemáticamente ciertos caracteres químicos: concentración de un elemento o de un grupo de elementos, variación de relaciones isotópicas (por ejemplo, las del oxígeno)- en las rocas encajonantes, pH, potencial de óxido-reducción, etc. Estas - mediciones se efectúan en los materiales de la corteza terrestre fácilmente accesibles, con el fin de localizar variaciones significativas, o anomalías geoquímicas, y de dar una interpretación conveniente que conduzca al descubrimiento de un yacimiento o al mejor conocimiento de un depósito.

Nos podemos también servir de elementos químicos indicadores asociados a - los elementos buscados, cuando el fondo geoquímico es tan débil como para- que sus anomalías sean notables, o porque ellos son más fáciles de detectar. Por ejemplo, se podrá utilizar el molibdeno en la búsqueda del cobre (de tipo porfirítico en particular), el arsénico en la exploración del oro, del cobalto e incluso en la del tungsteno.

Los elementos en trazas, contenidos alrededor o sobre los depósitos, permiten delimitar los sectores interesantes, incluso si estos elementos se presentan en los minerales que no son los que constituyen la porción interessante de los yacimientos.

Por ejemplo, las trazas de Hg, Sb, As, Zn en la pirita periférica de los - yacimientos de antimonio y de mercurio.

La medida de las características químicas puede hacerse por vía química o por vía física, como por ejemplo el promedio de ciertos radio-elementos - por conteo de radiaciones  $\alpha, \beta, \gamma$  que ellos emiten.

Las posibilidades de aplicación de la prospección geoquímica en la búsqueda de un elemento particular están ligadas:

- A la existencia de dispersiones geoquímicas, sometidas estrechamente a la movilidad del elemento y a su abundancia en las condiciones del medio-estudiado.
- A la sensibilidad de los métodos de medición que deben permitir descubrir las anomalías geoquímicas que el elemento provoca.
- A los conocimientos que se poseen sobre su comportamiento geoquímico.

Las anomalías geoquímicas primarias en las rocas se traducen en:

- Provincias geoquímicas en el interior de las cuales la composición química de las rocas puede relacionarse con la existencia de determinadas mineralizaciones.
- Modificaciones de las rocas encajonantes provocadas por los fluidos durante sus desplazamientos.

Los gases que se dispersan a baja temperatura (hidrocarburos volátiles, - radón, torón, etc.) a través de los poros de las rocas o de los accidentes tectónicos, dan lugar en la superficie del suelo a anomalías que, aunque están sometidas estrechamente a las condiciones climáticas, se consideran como primarias.

Las anomalías secundarias se utilizan en la prospección más frecuentemente que las dispersiones primarias, en razón de la mayor movilidad de numerosos elementos en las condiciones superficiales y de las facilidades para muestrear y analizar que ofrecen los materiales superficiales tales como los suelos, los aluviones, las cubiertas eólicas o glaciares, las aguas superficiales o subterráneas y los vegetales.

En los suelos, no obstante el gran número de factores que entran en juego, las anomalías pedogeoquímicas traducen, teniendo en cuenta el relieve, los fenómenos locales y son de una interpretación relativamente fácil.

En las cubiertas no residuales, las anomalías tienen características menos regulares que en los suelos y son de interpretación más delicada.

Las aguas superficiales tienen una dispersión "arrastrada", si bien una muestra es característica de toda la zona situada río arriba del punto de muestreo.

Como consecuencia de la relativa homogeneidad del medio, la muestra tomada es muy representativa, pero la interpretación de las anomalías hidrogeoquímicas se torna difícil por la variabilidad de los factores que intervienen en la dispersión.

Se debe tomar en consideración: la forma bajo la cual los elementos están contenidos en las rocas y los minerales, las características de las soluciones acuosas, la distancia del lugar de muestreo al yacimiento, las condiciones climáticas, las variaciones estacionarias de caudal y las particularidades morfológicas de las áreas de drenaje.



## CAPITULO 3

### Fuentes Fundamentales del Uranio y Torio

#### 3.1. Generalidades (Gabelman, 1977).

Los tres radioelementos naturales cuantitativamente significativos son, en orden de abundancia decreciente, potasio, torio y uranio. Todos los isótopos de torio y uranio son radiactivos, pero el  $K^{40}$  (0.0118% de todo el K) es el único isótopo radiactivo del potasio. El verdadero promedio y las abundancias litológicas específicas de los radioelementos - en toda la Tierra probablemente nunca se conozcan a partir de mediciones directas, pero estos elementos pueden ser medidos en la superficie e interpretarse el interior por medio de evidencias indirectas.

Las tres fuentes de datos son:

A) Análisis químicos y radiométricos de meteoritos, considerados como representativos de diferentes capas de la Tierra.

Se piensa que los meteoritos son fragmentos de planetas que explotaron.

Los diferentes tipos de meteoritos han sido exhaustivamente analizados y correlacionados con capas profundas de modelos de planetas sólidos diferenciados o indiferenciados. El modelo del planeta diferenciado se considera representativo de la Tierra.

El núcleo y el manto de la Tierra componen su mayor parte.

El manto constituye el 67% de su masa total y el 30% de su volumen y, por lo tanto, puede considerársele lo más representativo de su composición promedio; el núcleo y la corteza representan extremos diferenciados, metálicos y siálicos respectivamente. Sin embargo, la composición del manto es desconocida, y la mayoría de los petrólogos prefieren un modelo en el cual las condritas se aproximan más estrechamente al manto; en forma particular, se considera a la condrita carbonácea como la más-

aproximada al material primitivo y, por lo tanto, a un planeta no diferenciado, del cual puede ser típica la tierra original.

Las proporciones de torio y uranio en las condritas carbonáceas y en ---- otras condritas son casi iguales.

Haciendo comparaciones, el torio se enriquece aproximadamente 200 veces - en la corteza y 7 veces en el manto superior, y decrece 2 veces en el manto inferior y 50 veces en el núcleo. El uranio aumenta 230 veces en la - corteza y 3 en el manto superior, pero decae 3 veces en el manto inferior y 25 veces en el núcleo.

#### B) Análisis químicos y radiométricos de rocas de la superficie de la Tierra.

Los métodos más prácticos y directos para la determinación de la distribución de radioelementos son los de análisis químicos y radiométricos. Las fuentes de datos para el manto son inclusiones de peridotita y eclogita - encontradas en chimeneas explosivas de peridotita y kimberlita. La parte inferior de la corteza está representada por rocas máficas y ultramáficas.

No obstante la escasez de datos de zonas profundas, son evidentes un fuerte fraccionamiento y una concentración hacia la superficie de los tres radioelementos, aunque los valores y los lugares de depósito sean diferentes. Las cantidades menores para los tres elementos ocurren en la peridotita del manto superior o pirolita. Partiendo de esta base, el torio alcanza un enriquecimiento máximo de cerca de 400 veces en el granito cortical.

El uranio logra un enriquecimiento máximo de 500 veces en el granito y de 650 veces en la sienita. El potasio llega a su máximo enriquecimiento de 53 veces en la sienita.

C) Estimación de los valores de flujo de calor y conductividad de la roca en el interior de la Tierra.

Los únicos radioelementos productores de calor en cantidad significativa son el torio, uranio y potasio. Si prácticamente todo el calor del planeta se atribuye a estos elementos, la cantidad de calor y su repartición se determinan por su distribución relativa dentro de la Tierra.

Las mediciones de flujo de calor en la superficie de la Tierra demuestran que el de las cuencas oceánicas es aproximadamente igual al de los continentes. Esto no es lógico ya que los radioelementos se concentran en mucho mayor cantidad en la corteza continental siálica.

Aun cuando el uranio tiene una capacidad de producción de calor cercana a 30000 veces mayor que la del potasio, éste es 15000 veces más abundante,-- lo cual significa que la capacidad del potasio para producir calor para toda la Tierra es de aproximadamente la mitad.

El incremento de 500 veces la concentración de uranio y torio en la corteza hace pensar que la mayor parte de estos elementos deben estar concentrados en ella; la diferencia astronómica en volumen entre la corteza y el manto tiende a compensar el efecto de la concentración.

En general se pueden hacer las siguientes conclusiones :

- 1.-Los elementos radiactivos fueron movilizados en la tierra primitiva y concentrados en la corteza por diferenciación.
- 2.-Cada uno de los tres elementos actuó, al menos en parte, independientemente, como lo indican las diferencias de proporciones en las cuales fueron concentrados. Sin embargo, el potasio puede ser considerado como un agente de transporte del uranio y el torio ya que comúnmente están asociados con él.

- 3.- Probablemente más de la mitad de uranio, y posiblemente del torio, - fue transferida a la corteza.
- 4.- El proceso de transferencia no ha terminado ya que aún continúa activo.
- 5.- La transferencia es global más que local; esto lo indican las similitudes litológicas en el planeta.
- 6.- El proceso de transferencia y concentración en determinado tipo de rocas puede ser el mismo, o estar estrechamente asociado, que el de la formación de las rocas en la corteza, porque la abundancia en cierto tipo de rocas es constante.
- 7.- Las concentraciones máximas de uranio y torio en cualquier tipo de roca son a nivel de partes por millón, mientras que las concentraciones en los yacimientos son cercanas al nivel de porcentaje. Esta diferencia de tres órdenes de magnitud sugiere que la concentración por procesos formadores de rocas puede ser completamente diferente a la concentración por procesos de mineralización.
- 8.- Las concentraciones de uranio y torio en partes por millar en tipos de rocas no comunes como algunas carbonatitas y sienitas, sugieren -- que el uranio y torio pueden representar la transición de los procesos de formación de las rocas. Siendo primarios y derivados del manto, estos tipos de roca sugieren que la concentración de elementos -- por mineralización también puede representar un proceso significativo de diferenciación global.
- 9.- La tendencia del torio y uranio de seguir a los silicatos claros hacia la corteza, en lugar de seguir a otros metales hacia el núcleo, - es anómala considerando su alta gravedad. Este comportamiento se atribuye a su incompatibilidad con las redes de los silicatos comunes; también puede ser causado por (1) su tendencia a volatilizarse o de for-

mar combinaciones de volátiles a temperaturas mucho más bajas que otros metales del núcleo como el fierro y el níquel, y (2) su fuerte tendencia a combinarse con fluorita, clorita y oxígeno.

10. La dirección del flujo de calor y probablemente de la diferencia-  
ción elemental y de la transferencia de radioelementos, es aproxima-  
damente vertical.
11. La semejanza del flujo de calor en los continentes y en las cuencas  
oceánicas, junto con la desigualdad en las abundancias de elementos  
radioactivos en sus respectivas rocas, indica que el manto bajo las  
cuencas oceánicas contiene una mayor concentración de radioelemen-  
tos que el manto bajo la corteza continental. Se considera esta di-  
ferencia asumiendo que bajo los continentes hay un mayor espesor de  
manto peridotítico y que los radioelementos faltantes migraron a -  
la corteza en el basalto o como volátiles.
12. La semejanza de flujo de calor en la superficie de los continentes-  
y en las cuencas oceánicas actualmente resulta de una combinación -  
de (1) los componentes de la corteza en la cual la contribución con-  
tinental es dos veces mayor que la que tienen las cuencas oceánicas  
y (2) los componentes del manto en el cual la contribución continen-  
tal es la mitad de la que tienen las cuencas oceánicas.

### 3.2. Uranio en las rocas ígneas.-

Se trata por una parte de U tetravalente. Su radio iónico es  $0,97 \text{ \AA}$ . Esto hace posible su asociación, por ejemplo y en forma notable con el calcio ( $0,99 \text{ \AA}$ ), con el Ytrio ( $0,92 \text{ \AA}$ , uranotorianita). El radio y la - carga del uranio le impiden entrar en las redes de los minerales más co-  
munes del granito (con excepción de la biotita); pero puede esconderse-  
o estar camuflado en las redes de ciertos minerales accesorios como-  
el zircón, la esfena, el pirocloro, la allanita y el apatito; o, con el  
torio, en los silicatos cálcicos de las piroxenitas (ej. Madagascar). -  
(Routhier, 1963).

Por otra parte, además de U en las redes de ciertos minerales, se han encontrado fracciones importantes (de 50 a 90%) en los intersticios. Algunas de estas fracciones están ligadas tan ligeramente a los minerales - que se les puede remover lavando con ácidos diluidos la roca pulverizada.

Son de interés, el U tetravalente incluido en minerales submicroscópicos tales como la uraninita, y el U hexavalente bajo la forma tanto de minerales desarrollados (ej. autunita en las laminillas de las micas) como - de mineral simplemente llevado a la superficie de los minerales principales de la roca.

En los depósitos filonianos de pechblenda, se consideran generalmente a las masas coloformes de pechblenda como el resultado de la coagulación - de las propiedades dispersivas por un electrolito apropiado.

Las rocas ígneas son consideradas como la fuente de la mayoría de los de depósitos de uranio, casi directamente cuando los depósitos se forman de - fluídos expelidos durante la cristalización del magma, o indirectamente - cuando el contenido primario de uranio es redistribuido por soluciones - hidrotermales o meteóricas.

El uranio y el torio se enriquecen generalmente en los miembros más jóvenes, félsicos, silícicos y potásicos de las fases comagmáticas de rocas - ígneas.

El uranio y el torio son finalmente dispersados en los vidrios volcáni--cos ácidos ricos en halógenos y son retenidos a menudo en vidrios hidra--tados. Esto muestra una fuerte preferencia del uranio por los niveles - ricos en fluorita, calcita y clorita. Esto puede también explicar la escasa o tardía precipitación de uranio en algunos granitos.

El uranio y los halógenos son expelidos durante la cristalización de los vidrios (rocas volcánicas, ignimbrita, tobas) mientras que el torio es - retenido. Consecuentemente, los minerales de uranio están asociados con

fluorita en muchos depósitos. Las vetas ricas en torio tienen, a menudo, una ganga de carbonatos (minerales carbonatados (calcita)). Está bien documentado el hecho de que el uranio fué removido con la fase gaseosa durante la consolidación del magma (Bohse, 1974).

La fuente inmediata del uranio concentrado en ambientes de intrusivos de poca profundidad es el intrusivo mismo.

Antes de la solidificación del magma aparentemente el uranio está relativamente disponible, suponiendo que está presente un medio de colección y transporte. Se supone que este medio es de fluidos magnéticos en estado gaseoso. Se ha observado que aquellos magmas o porciones de magma que han sufrido desgasificación tienden a liberar hacia el fluido una parte del uranio contenido. Este gas se mueve a través del magma, colectando los elementos solubles disponibles y penetra la roca huésped por distancia de entre unas decenas hasta miles de metros (Tilsley).

Los gases involucrados en el proceso están hechos de componentes volátiles del magma. El vapor de agua parece ser el mayor contribuyente, con mayores cantidades de  $\text{CO}_2$ , flúor ( $\text{F}_2$ ) y cloro ( $\text{Cl}_2$ ).

En el medio ambiente de intrusivos poco profundos, los gases son emitidos desde un magma por ebullición retrógrada o por una liberación abrupta de la presión que los confina.

La ebullición retrógrada es la separación de una fase gaseosa en un magma que se está enfriando como el resultado de su enriquecimiento residual en los componentes gaseosos disueltos por la cristalización progresiva del magma.

La liberación abrupta de presión ocurre cuando las rocas que están siendo intrusionadas se rompen por falla o el magma se dirige a la superficie a través de un conducto volcánico.

Los fluidos, cuando son liberados por un magma, debido ya sea a ebullición retrógrada o a reducción de la presión confinante, tienden a migrar hacia la superficie, a menudo a lo largo de zonas preexistentes de debilidad tales como fallas y juntas o contactos entre los tipos de rocas contrastantes.

La matriz de la brecha está compuesta de salbanda de roca, producida durante la abrasión de los fragmentos más grandes y es representativa de la composición original de los tipos de roca atravesados por la estructura de fluidización (falla). Sin embargo la matriz es la fracción más intensamente alterada y mineralizada de la brecha. Es significativo que la mayor parte de la mineralización, probablemente arriba del 90%, está confinada a la matriz de las brechas de fluidización.

Las estructuras de fluidización que llegaron hasta la superficie, tienen una probabilidad algo más baja de estar mineralizadas. A menudo se encuentra que no tienen mineralización metálica pero las capas piroclásticas asociadas con el "vent" a veces están notablemente enriquecidas en torio y zirconio.

El uranio y otros minerales disueltos en los gases responsables de la formación de las brechas de fluidización, se precipitan con reducción en la temperatura y presión del solvente.

Mucho del contenido de metal de los fluidos magmáticos se deposita directamente de los gases hacia dentro de la matriz de la brecha.

En resumen, la concentración del uranio en los sistemas desgasificantes es principalmente una función de caída de presión y temperatura. Algunas vetas hidrotermales e impregnaciones menores son posibles encima de un conducto y en la pared de roca cercana a la parte superior de una estructura de fluidización.

Hay alguna evidencia para sugerir que los primeros fluidos liberados en -



evento de desgasificación son los más ricos en mineral. Los fluidos liberados subsecuentemente pasan a través de un magma en el cual el metal disponible ha sido agotado fácilmente y por lo tanto tienden a ser medios de mineralización pobre.

La ley promedio de estructuras de interés económico varía de alrededor de 500 ppm de U hasta un poco más de 2500 ppm; el tamaño del depósito de U - en este tipo de estructuras es variable; diques o "pipes" individuales - pueden contener desde unas pocas toneladas hasta más de 1000 toneladas de U.

Las áreas de actividad volcánica, particularmente aquellas en las que han sido extruídas rocas altamente diferenciadas, son también medios ambientes favorables y a menudo son señalados por flujos anómalamente radiactivos y capas piroclásticas (Tilsley).

Las dos rocas que han recibido mayor atención como fuentes posibles del uranio en areniscas son el granito y las tobas.

Los depósitos de uranio en rocas tobáceas fueron examinados por el United States Geological Survey, principalmente por el método "fission-track". El uranio está presente en zircones, ausente en los feldespatos, algunas veces distribuido en los vidrios y ocurre con la hematita a lo largo de las fracturas. Varios experimentos interesantes están en camino para --- cuantificar el posible movimiento del uranio, por medio de exámenes que se hacen a ejemplares de roca en laboratorio (Wright, 1978).

Las tobas juegan un importante papel en el depósito "Los Ochos" del Oeste de Colorado, el cual fué descubierto al principio de la década de los -- años cincuentas. Está localizado en la Formación Morrison del Jurásico, la cual contiene los depósitos de Carnotita de Colorado; el yacimiento - tiene varios indicios de hidrotermalismo: la pechblenda emplazada con la pirita a lo largo de una estructura con echado hacia el E conteniendo algunas zonas de brecha.

En el depósito, la Formación Morrison está expuesta por la erosión de una toba más joven. El mapeo de las rocas volcánicas eocénicas de los alrededores muestran que el cuerpo de uranio está a cerca de 70 m abajo de la superficie de erosión sobre la cual las rocas del Eoceno fueron depositadas. Además, el depósito parece estar directamente abajo de la línea topográfica de la antigua superficie. Se sugiere una alternativa de deposición hidrotermal: el uranio pudo haber sido movilizado hacia abajo de las tobas dentro de una estructura pre-existente en la Formación Morrison donde fue precipitado por agentes reductores (Wright, 1978).

Desde hace algunos años, un tipo de yacimiento ligado a las paleosuperficies de las áreas continentales se dió a conocer a través de las ideas de geólogos de diversos lugares: se trata de los yacimientos formados por infiltración de las aguas de la superficie a través de las fracturas de un tipo particular, es decir de los yacimientos denominados "*per descensum*", este modelo se opone al hidrotermal clásico.

Los granitos ricos en uranio (fértiles) que forman zonas continentales elevadas sujetas a alteraciones de su superficie (intemperismo y desgajamiento pseudo-laterítico), son el blanco de las acciones tectónicas (líneas de sutura miloníticas y fracturas de tensión). Los elementos liberados por la alteración meteórica (Si, Fe y U en particular) percolan a través del granito gracias a las redes de fracturas, y si ciertas trampas como heterogeneidades litológicas o estructurales lo permiten, hay concentraciones de uranio (Barbier, 1972).

La hematización muy general que se observa en asociación con los yacimientos de uranio "*per descensum*", bajo la forma de una verdadera aureola primaria, con un ancho de una decena de metros a un lado y otro de la mineralización uranífera, parece emparentarse a los fenómenos de la zoneación, conocidos por los especialistas de la alteración meteórica incluso si ella se encuentra a lo largo de las fracturas permitiendo una percolación vertical y no a lo largo de una superficie topográfica. La semejanza entre los fenómenos de superficie y los que se observan en los filones mine

realizados es incluso mucho más fuerte: En las fracturas graníticas se produce el mismo fenómeno siguiendo un plano vertical, que el que ha tenido lugar en un plano horizontal en el seno de las series sedimentarias con depósitos de uranio en "rol" (rollos) a saber: la sucesión pechblenda-marcasita-pirita-hematita-calcita. (Barbier, 1972).

### 3.3. Uranio en las rocas sedimentarias.-

El uranio hexavalente es mucho más móvil que el uranio tetravalente, y está, sin duda, bajo esta forma en todas las soluciones. En condiciones oxidantes es probable que el U se desplace bajo la forma de ion uranilo ( $\text{UO}_2$ )<sup>2+</sup> ya sea en forma de complejos sulfúricos :  $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2^{-2}$ , estables de PH 1.5 a 5; o más probablemente bajo la forma de complejos carbonatados tales como  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{-4}$  estables de PH 4.5 a 11. Solamente las soluciones casi neutras, con un PH de 5 a 8.5 no contendrán U en solución. Sin embargo, incluso en las aguas circulantes con PH 6.5, las leyes de algunos microgramos por litro son frecuentes, lo que representa una cantidad total desplazada bastante importante. La ausencia de concentraciones de U sedimentario en las calizas parece deberse precisamente al hecho de que las condiciones son tales que el U se queda en solución.

El U hexavalente en solución puede precipitar por procesos diferentes, por ejemplo en presencia de materia carbonosa que actúa de dos maneras : 1°. creando un medio reductor con producción de  $\text{SH}_2$  durante la descomposición, lo que modifica radicalmente el PH y lleva al U a la valencia 4; 2°. por su gran capacidad de absorción que le permite fijar al U a partir de varios tipos de solución.

Así, el uranio se fijará en carbones, turbas, lignitos, esquistos bituminosos y asfaltitas. También puede ser fijado por arcillas que intercambian iones. (Routhier, 1963).

Son también receptores los conglomerados y las areniscas.

Los depósitos en los primeros pueden ser singenéticos o epigenéticos y de ambientes continentales o marinos muy someros, ocurriendo en las formaciones del Precámbrico.

En las segundas los yacimientos son generalmente epigenéticos, controladados por la litología, la hidrología y las estructuras; la mineraliza---ción sigue el contacto entre areniscas oxidadas y no oxidadas. Estos - depósitos pueden ser peneconcordantes, en forma de rollo (rollfront) o pueden rellenar estructuras como zonas de falla; el medio ambiente es - principalmente fluvial pero puede ser también de caracter deltaico o lagunar. Su edad abarca el Mesozoico y parte del Cenozoico.

## CAPITULO 4

### Migración de radioelementos en la corteza. (Gabelman, 1977).

#### a) Introducción

Los 3 aparentemente mejores medios de transporte de uranio y torio, derivando del manto hacia la corteza, son los magmas máficos y ultramáficos, magmas alcalinos sobresaturados y volátiles. Cada tipo constituye un desarrollo geológico y geoquímico para radioelementos.

De alguna manera estos desarrollos se encuentran relacionados con movimientos tectónicos y son regidos por la dinámica de acción de los materiales presentes en el manto, pudiendo éstos ser emplazados en la corteza a partir de las corrientes de convección para posteriormente sufrir diferenciaciones en las capas corticales superiores (una parte) y luego ser conducidos hacia la superficie (otra parte). Finalmente los que logran llegar hasta la superficie, pueden ser erosionados y transportados hasta que se depositan en áreas topográficamente bajas (Fig. No. 10).

Los radioelementos como el uranio y el torio, cumplen con todo un ciclo - que pasa por diversas etapas como son:

- Su presencia en las celdas convectivas del manto.
- Emplazamiento del manto a la corteza en crestas oceánicas.
- Emplazamiento en zonas orogénicas activas.
- Intrusión en zonas orogénicas pasivas.
- Levantamiento asociado a emplazamiento y/o intrusión.
- Erosión de afloramientos superficiales rocosos.
- Transporte de materiales.
- Depositación en áreas topográficamente bajas.
- Enterramiento y/o subsidencia.
- Metamorfismo asociado.
- Subducción y regreso a zonas orogénicas.
- Regreso al manto en zonas de subducción.

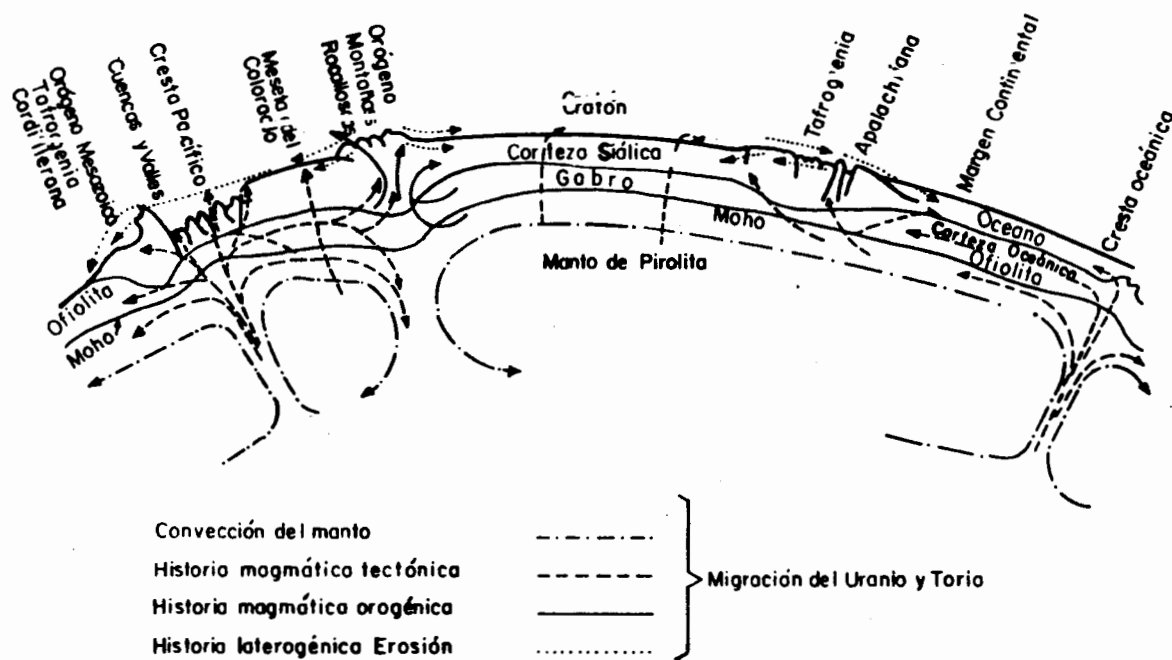


Fig. 10 -Geologías históricas y ciclos del uranio y torio :Sección de Norteamérica generalizada (Gabelman, 1977).

b) Cuencas oceánicas.- El magma derivado del manto ha penetrado cuencas oceánicas a lo largo de las crestas (Fig. No. 11) y en plumas. Debido a lo irregular de su distribución exterior, las plumas aparecen controladas por factores tectónicos regionales, los cuales incluyen lineamientos a intersecciones.

Los magmas en las crestas oceánicas tienen variaciones en su composición, desde toleítas de olivino hasta basáltos alcalinos (ricos en calcio y nefelina, con abundancia de álcalis como  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  y sílice). Estos materiales se supone que se generan en el manto superior como pirolita o eclogita y bajo procesos de fusión parcial produce del 20 al 40% del magma basáltico en una zona gravitacionalmente inestable (menos de 200 a 300 kilómetros de profundidad), donde la masa pirolítica sube en forma diapírica. De 0 a 15 Kilómetros, la pirolita tiene olivino, ortopiroxenos, clinopiroxenos, plagioclasas y cromita, produciéndose un magma toleítico y dando origen a una serie de elementos característicos como : K, Ti, P, U, Th, Ba, Rb, Sr, Cs, Zr, Hf, etc. y se les llama incompatibles por estar en la fracción más baja de fundido de la pirolita. Sin embargo, lo más común es que los magmas sean toleíticos con muy bajos contenidos de torio y uranio, así como de los demás radioelementos.

c) El cratón.- Los magmas intracratonales derivados del manto son masas basálticas que comúnmente se expresan sólo como diques enjambrados, en los cuales el uranio y el torio están contenidos. Las diabasas (doleritas y andesitas) ocurren similarmente en diques enjambrados y pipas, los cuales ocupan líneas de debilidad de la corteza profunda. Además, pueden haberse diferenciado o inclusive pudieron haber recibido cantidades adicionales liberadas de la propia corteza enriqueciendo dicho magma en uranio y torio.

Se cree que las rocas alcalinas han sido enriquecidas en volátiles y álcalis. Lo anterior ocurre a lo largo de diatremas complejas con diques en anillo alrededor de cuerpos pegmatíticos y diques simples. La penetración a la superficie ocurre en la cercanía de algunas pipas, produciendo

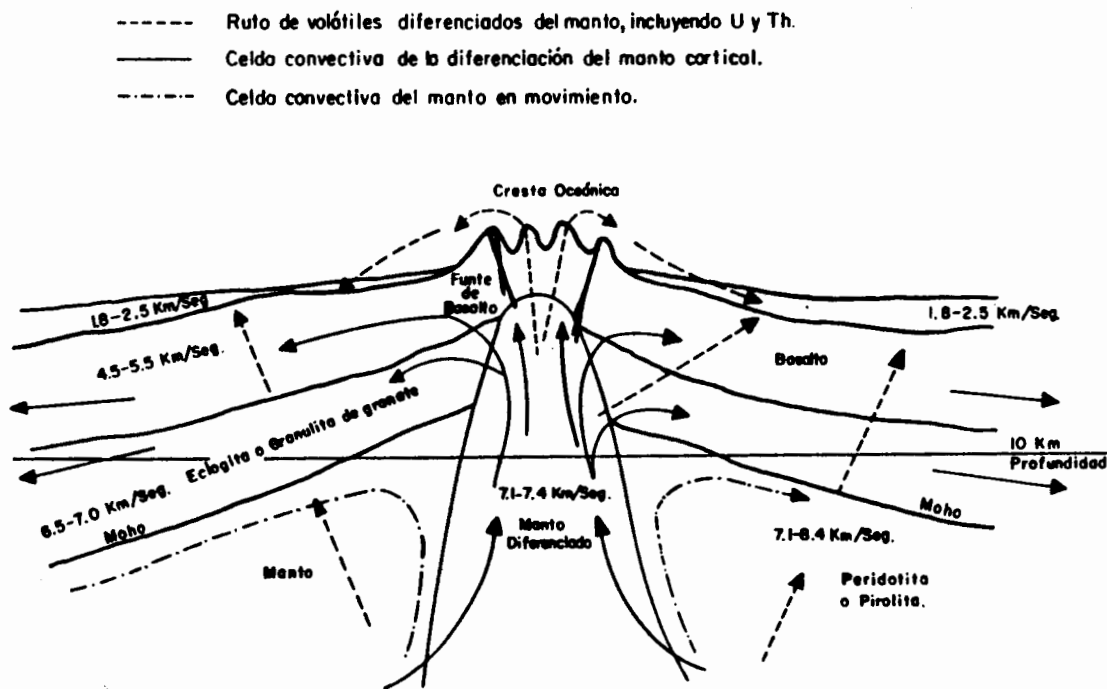


Fig. 11 - Geología histórica y ciclos del uranio y torio: Sección hipotética mostrando las trayectorias de la convección y de los volátiles y el eje de la cresta oceánica. (Gabelman, 1977).



formas volcánicas exóticas clásicas (láminas cónicas, diques en anillos y pipas monominerálicas) de rocas alcalinas. Igualmente, en escudos profundos erosionados, la geometría de estos cuerpos es disectada a profundidad por pipas volcánicas. Por ejemplo: El complejo intrusivo alcalino de Bancroft, Ontario, probablemente es equivalente al profundo de Mopi Buttes, en Arizona. Los altos contenidos alcalinos y volátiles facilitan rápidamente la diferenciación en la corteza superior o cuando una igual variedad de rocas es producida teniendo desde lavas ultramáficas hasta granitos alcalinos.

Existen dos amplias categorías para rocas alcalinas sobresaturadas que se distinguen composicionalmente como siguen:

Agpatitas alcalinas o fonolitas.- Los álcalis y el Na existen en mayor cantidad que el aluminio y potasio. Los elementos accesorios son el Ti, Zr y Nb, además de tierras raras. Los constituyentes volátiles son el F, Cl y  $H_2O$ .

Miaskitas alcalinas (Kimberlitas y Carbonatitas).- En este caso los álcalis y el Na están en menor proporción que el aluminio y potasio, en este caso el calcio y el magnesio son significativos. Los elementos accesorios son : Ti, P, Ba, Sr y Nb. Los minerales accesorios son: esfena, ilmenita, rutilo, titano-magnetita, zircón, apatito y pirocloro. Sus componentes volátiles son:  $H_2O$  y  $CO_2$ . Las carbonatitas son típicas de las miaskitas y representan más enfáticamente el alto emplazamiento de estas rocas, porque el  $CO_2$  se desarrolla siendo el más explosivo vehículo transportador, aunque al enriquecerse algún nivel de la corteza, el  $CO_2$  se combina con  $CaO$ , expeliéndose la combinación a partir del manto o derivado desde rocas de la pared de la corteza, para formar un magma líquido de composición calcítica.

Existen muchas otras rocas del manto. Las carbonatitas proveen la presencia de mineralización de volátiles y álcalis en sus series, las cuales producen en las rocas de la corteza una variedad de depósitos metálicos -

consistentemente encerrados en matrices de roca alterada. Estos volátiles pueden ser colectados cerca de capas sólidas del manto. Las agpatitas y las miaskitas tienen diversos órdenes de magnitud de enriquecimiento de uranio y torio y en un momento dado pueden ser tan ricos como la pirolita.

Este factor está bien demostrado por muchos análisis radiométricos y químicos de complejos sieníticos.

El contenido de torio en las rocas alcalinas ultramáficas se incrementa durante la diferenciación desde 1 a 2 ppm. en olivinitas, hasta alrededor de 95 ppm. en el extremo más alcalino de pegmatita, para después caer alrededor de 5 ppm. en carbonatita. Generalmente la razón Th/U para carbonatitas es grande, hasta 1 y puede llegar inclusive hasta 16. La concentración de uranio y torio en estos volátiles del manto suponen el modelo de flujos calientes, lo cual sugiere que la concentración de radioelementos puede estar en el manto estableciendo un balance entre el contenido de radioelementos de las rocas de la corteza y la serpentina residual del manto.

Las kimberlitas son híbridas de las peridotitas, agpatitas y miaskitas emplazadas explosivamente. Ellas pueden ser consideradas como peridotitas alcalinas o carbonáticas y han sido descritas como peridotitas porfiríticas con fenocristales de olivino y flogopita. Composicionalmente, las kimberlitas se caracterizan por bajo  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , alto  $\text{MgO}$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , bastante alto  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  y la presencia de  $\text{CO}_2$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$ . El bajo silicio y la baja razón de magnesio/hierro y la alta razón de K/Na distinguen a las kimberlitas. El rasgo físico más distinguible es el brechamiento y la alteración hidrotermal, lo cual implica explosión de peridotita con contenidos extremadamente altos de volátiles.

Se reconocen tres estados formativos; 1) Cristalización de olivino, ilmenita, piropo, cromita y diamante en el manto. 2) Fuerte y súbita reducción de presión y temperatura causando un transporte explosivo con cristalización de la matriz en ruta. 3) Alteración deutérica hidrotermal formando serpentina, calcita y sulfuros en ruta.

Los análisis de torio y uranio en kimberlitas son raros, sin embargo se pueden inferir las abundancias relativas; la generación de rocas alcalinas y carbonáticas enriquecidas en volátiles en el manto, se muestra - siendo mezcladas ambas teniendo altos contenidos de uranio y torio en la fase fluida y volátil.

Otro proceso para la transferencia de U y Th del manto a la corteza, - son las perforaciones explosivas de pipas acompañadas por volátiles, pero sin magma ni abundantes xenolitos. Los rasgos producidos son pipas-brechoides o diatremas, conteniendo predominante o solamente rocas trituradas corticales.

d) Áreas orogénicas.- En estas porciones se producen las llamadas peridotitas alpinas, las cuales es muy probable que provengan del manto. Algunas pipas son raramente brechoides y ocurren a lo largo de lineamientos curvos que implican zonas de fractura, las cuales pueden estar permitiendo el acceso pasivo del manto. Sus contenidos de uranio y torio en realidad son bajos como en las cuencas tectónicas.

e) Áreas pasivas de deposición.- El uranio es generalmente móvil en estado hexavalente y puede estabilizarse por precipitación como arsenato, fosfato o vanadato, preferentemente en climas áridos actuales con el desarrollo de silicatos, carbonatos y sulfatos de uranilo. Para su reducción y precipitación primaria en silicatos u óxidos, requiere de un agente externo que comúnmente es la materia orgánica de la cual los carbones o bitúmenes de más bajo rango son los más eficientes.

El uranio que se transporta en las aguas subterráneas continentales tiene relativamente poca oportunidad de fijarse. El mecanismo exacto de reducción y fijación por materia orgánica ha sido muy estudiado, basándose en la precipitación de pechblenda en laboratorio con  $H_2S$  y materia orgánica a temperatura de superficie.

Muchos han observado concentraciones inoxidadas de uranio en arenas con

constante migración echado abajo por medio de oxidación frecuentemente repetida y reducción en acuíferos favorables y cerca del final de la zona saturada.

Se encontraron bacterias anaeróbicas en algunos depósitos de uranio observándose reducción por complejos orgánicos de cierto carácter, probablemente responsable de la fijación del uranio, lo cual supone que las impregnaciones de uranio en las arenas se debe a esto.

f) Zona de subducción.- Cubiertas por pilobasaltos, las ofiolitas oceánicas generadas en las dorsales oceánicas con condiciones locales a través de plumas volcánicas y fallas de transformación, cabalgan en mantos convectivos hacia los márgenes convergentes de placas, siendo éstas subducidas a lo largo del plano de Benioff.

Fluidos juveniles y volátiles, silicatos derivados del manto y minerales metálicos incluyendo torio y uranio y aguas oceánicas entrampadas y fijadas en la corteza oceánica, migran al piso oceánico durante la orogenia.

Pueden ser removilizados y alguna porción de estos materiales probablemente está enteramente en el océano. Cuando los remanentes se estabilizan, se efectúa un proceso de carácter selectivo por sedimentación química. Una gran proporción de fluidos y metales pueden removerse hacia la corteza oceánica y hacia el plano de subducción y los elementos móviles pueden retraerse para después penetrar en la cubierta cortical después de las ofiolitas al manto.

Las proporciones relativas de elementos móviles son adicionadas al orógeno y regresadas al manto, aunque esto último es meramente especulativo.

Durante su viaje a la superficie, el magma puede ser de tipo granítico, calcoalcalino, pudiendo generarse de esta manera un gradiente metalo-magnético con deformación intensa y posiblemente metamorfismo. Los contenidos de uranio y torio que viajan junto con este tipo de materiales a la corteza pueden variar entre 0.04 a 15 %.

g) Arcos de islas.- Cuando existen arcos de islas en márgenes continentales orogénicos, están compuestos esencialmente de rocas volcánicas máficas intercaladas con fliish. Estas no están corrientemente en el presente, sino sólo a lo largo del Oeste de América, evidenciando que han existido antiguamente pero han sido incorporados dentro del continente.

Las rocas sedimentarias-volcánicas son típicas de desarrollos eugeosinclinales y como cualquiera, están presentes en algunas rocas orogénicas.

La presente interpretación de placas tectónicas, descarta el concepto de una grauvaca filítica de eugeosinclinal y adopta uno de simple volcánica edificada arriba de grandes espesores durante la sedimentación vulcanogénica desde el arco y hasta las nacientes rocas orogénicas.

Las rocas volcánicas no son popularmente interpretadas como derivados a partir de ofiolitas oceánicas subducidas, las cuales son calentadas y tienen a diferenciarse por calentamiento friccional de arrastre cerca del final de los continentes siálicos y al principio de otras placas oceánicas.

Estudios recientes de arcos de islas, han descubierto la presencia de grandes volcanes o intrusivos diferenciados de las rocas calcoalcalinas, presentándose desde anfibolitas y gabros hasta granitos, los cuales pueden estar asociados con depósitos minerales hidrotermales y hexalogénicos, deduciéndose un típico desarrollo eugeosinclinal o desarrollo mineralizador en un arco de isla. Además, se han detectado temperaturas de mineralización altas que indican que el calor magmático generado fue cerca de la superficie.

Los depósitos metálicos en arcos de islas modernos y antiguos son similares con Cu, Zn, FeO y Au. El torio y el uranio se presentan en desprendimientos de la corteza oceánica, siendo en promedio derivados del manto en penetraciones a la corteza y sugieren igualdad de flujos calientes en las cuencas oceánicas y continentales.

h) Antearco.- Se caracteriza por rocas preorogénicas plegadas moderadamente, con escasas fallas de ángulo alto representadas por cuencas post-orogénicas molásicas y terrazas con escasas rocas intrusivas y leve vulcanismo.

Presenta zonas metalíferas en secuencias decrecientes de temperaturas paragenéticas con zinc, fluorita, barita, cobre, vanadio y uranio. Preferentemente Cu, Va y U en areniscas y los demás en lutitas, por generación magnética hidrotermal o metamórfica o por emanaciones del manto o sedimentación-local.

Aquí, la baja estabilidad de los elementos, particularmente del uranio, hace que sean movilizados formando depósitos poco significativos en rocas inferiores. Si se tiene una remoción completa de elementos móviles, se pueden reconocer los sistemas superficiales de drenaje y pueden migrar por fuera del antearco.

i) Continental encorvado.- Se cree que son formados simplemente por la convección en el manto, siendo una fase inicial de movimiento de rocas, las cuales se han investigado intensamente para aceite y gas, considerando sin importancia otro tipo de mineralización.

Si la cuenca representa orogenia incipiente y subsidencia, esta última puede ser el inicio de la subducción, trayendo ajustes isostáticos y transfiriendo material del manto o dando efectos suplementarios en el basamento fallado que no se refleja en la superficie; por ejemplo, el arco antillano puede ser candidato a subducción. Aquí se tiene una dorsal de alta velocidad sísmica al final de la plataforma del golfo.

El grupo Catahoula contiene agua y oxígeno en la composición de tobas riolíticas que han sido acarreadas desde volcanes en el NE de México y libremente mezcladas con aluvión derivado de las montañas rocosas y tienen un contenido de 6 a 10 ppm. de uranio. Los lentes de arena de playa de este grupo contienen uranio detrítico refractario.

j) Zonas geopresurizadas.- El agua salada escapando de zonas geopresurizadas ha migrado por grandes fallas y por los acuíferos. Si no están impedidas por flujos artesianos, éstos migran echado arriba hasta la superficie. Junto con éstos el uranio puede ser acarreado y depositado. Se supone que va en estado fluido, pudiéndose presentar vetas a lo largo de fallas contemporáneas. Se asocia a la sílice, barita, pirita y otros minerales exóticos y se impregna generalmente en arenas.

k) El margen tafrogénico continental.- Los bordes modernos del Atlántico del Este de Norteamérica, son típicos de este caso.

Se pueden presentar estructuras como intrusivos y rocas minerales con rasgos tafrogénicos. En estas áreas las temperaturas de mineralización son moderadamente altas. Los metales Base presentes son sulfosales y plata - debidos a exhalaciones vulcanogénicas del piso marino.

En el Mioceno, se tiene zinc de reemplazamiento además de hierro y manganeso.

El uranio ocurre en venas de baja temperatura en el precretácico que se relacionan a complejos intrusivos hipabisales alcalinos o plutónicos.

En la costa del Brasil, se tuvieron temperaturas de mineralización bajas y los minerales consistieron en : pirita, galena, barita, uranio primario y secundario, óxidos de hierro y manganeso. El uranio ocurre en rocas --cretácicas de la región tafrogénica de la Cuenca Tucano. Se han relacionado a procesos laterogénicos en depósitos acuosos particularmente el uranio.

La cofinita fué identificada en un núcleo a 1800 mts. y la carnotita en impregnaciones locales de la misma arena en el margen de la cuenca. Un Stock cerca de una zona de falla contenía venas de carnotita bordeadas por óxido de manganeso y hematita en otras zonas.

## CAPITULO 5

### Ejemplos típicos de yacimientos uraníferos asociados a rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias.

#### 5.1 INTRODUCCION.

Los yacimientos uraníferos se reparten en dos clases:

1.- Depósitos donde el uranio se encuentra en estado tetravalente y que se forman en medio reductor, profundo o rico en materias orgánicas.

Sus minerales son generalmente de color negro o café oscuro, por ejemplo - la uraninita ( $UO_2$ ) y la pechblenda (combinación natural de  $UO_2$  y de  $UO_3$ ); - la cofinita o silicato de uranio; la branerita o titanato de uranio que - juega un papel esencial en los grandes yacimientos estratiformes de Canadá. También están entre éstos los materiales carbonosos o hidro carbonosos uraníferos, carbones o hidrocarburos bituminosos en los cuales el uranio existe en formas a veces mal definidas y que constituyen grandes yacimientos - en los Estados Unidos (Routhier, 1963).

2.- Depósitos donde el uranio se encuentra bajo la forma hexavalente, hidratados, que se forman en medios oxidantes, ya sea en depósitos recientes de carácter superficial, o bien por oxidación de los minerales "negros" - cuando éstos afloran en la superficie. Sus colores van del amarillo al rojo-naranja, verde cuando el cobre se une al uranio. Los mas importantes - son los fosfatos como la autunita (uranio y calcio), torbernita (uranio y cobre), vanadatos, hidróxidos y silicatos diversos, en los cuales las combinaciones amorfas forman las gunitas.

Estos minerales constituyen a menudo depósitos independientes. Se trata - generalmente de yacimientos recientes, formando comúnmente la costra superficial, distinguiéndose las siguientes formaciones (Routhier, 1963):



-Filonianas con pechblenda, donde impregnan las rocas alteradas, justificando a veces las explotaciones a cielo abierto. Los fosfatos y los silicatos dominan, por ejemplo: el yacimiento de Margnac en Limousin, Francia.

-Estratiformes, conteniendo a profundidad materiales carbonosos, uraníferos, o combinaciones de pechblenda, cofinita, etc... con ellos; en los afloramientos dominan los vanadatos siendo posible recuperar el vanadio del mineral "negro" que se encuentra a profundidad así como del mineral "amarillo" superficial, por ejemplo: los depósitos del Oeste de los Estados Unidos y los de Gabón en Africa.

## 5.2. GENERALIDADES.

Los yacimientos económicos de uranio ocurren en una gran variedad de ambientes geológicos, reflejando así el carácter móvil y litófilo de este elemento: en rocas intrusivas o extrusivas, en rocas metamórficas y en depósitos sedimentarios estratiformes y no estratiformes. Las mayores reservas de uranio conocidas se encuentran en sedimentos.

La variedad de ambientes geológicos en los cuales aparece mineralización de uranio se debe a la alta solubilidad del ión uranilo ( $UO_2^{2+}$ ), a su isomorfismo con ciertos elementos tales como Ca, Fe, Zr y Th y al rango de estabilidad de la uraninita.

Las rocas ígneas ácidas en promedio contienen cerca de diez veces más uranio que las ultrabásicas. El contenido de uranio en rocas ígneas es como sigue:

| <u>T i p o</u> | <u>Uranio, ppm.</u> |
|----------------|---------------------|
| Ultrabásica    | 0.3                 |
| Básica         | 1                   |
| Intermedia     | 1.5-3               |
| Granítica      | 4                   |

El uranio puede ser considerado como un constituyente accesorio normal de las rocas plutónicas, principalmente ácidas.

El examen del planisferio de los recursos calculados (Fig. 12) muestra - que el número de provincias uraníferas conocidas es bastante limitado y - que cada una de ellas tiene dimensiones muy reducidas. Sin embargo, los recursos de numerosas partes del mundo están aún poco explorados y las oportunidades para descubrir nuevas provincias están lejos de ser uniformes (Ziegler, 1980).

Mundialmente, el ambiente más importante en cuanto a concentración de uranio es aquel constituido por sedimentos clásticos continentales. El 48 % de las reservas de uranio ocurren en conglomerados de cuarzo en Canadá y Africa del Sur. El 35 % se encuentra en areniscas y el 15 % ocurre en vetas y contactos con rocas ígneas intrusivas. Sólo un escaso porcentaje - de las reservas mundiales de uranio se encuentra en otros tipos de depósitos.

Los conglomerados de cuarzo fueron depositados en grandes áreas cuando - los mares del Precámbrico invadieron la tierra original. El oro y los minerales pesados, incluyendo la uraninita, se concentraron hacia la playa- o en placeres marinos de poca profundidad en un ambiente deficiente en - oxígeno.

En Elliot Lake, Ontario, Canadá, las menas conglomeráticas contienen uraninita, branerita, abundante pirita, cantidades menores de óxidos de to- rio y tierras raras, con un promedio en la ley de uranio de 0.12 %.

Las menas conglomeráticas de uranio de Sudáfrica contienen uraninita con oro (del cual dependen económicamente), abundante pirita y cantidades menores de otros sulfuros. La ley promedio de uranio es de alrededor de - 0.025 %.

Las menas de uranio en areniscas se encuentran en áreas de relativa esta-

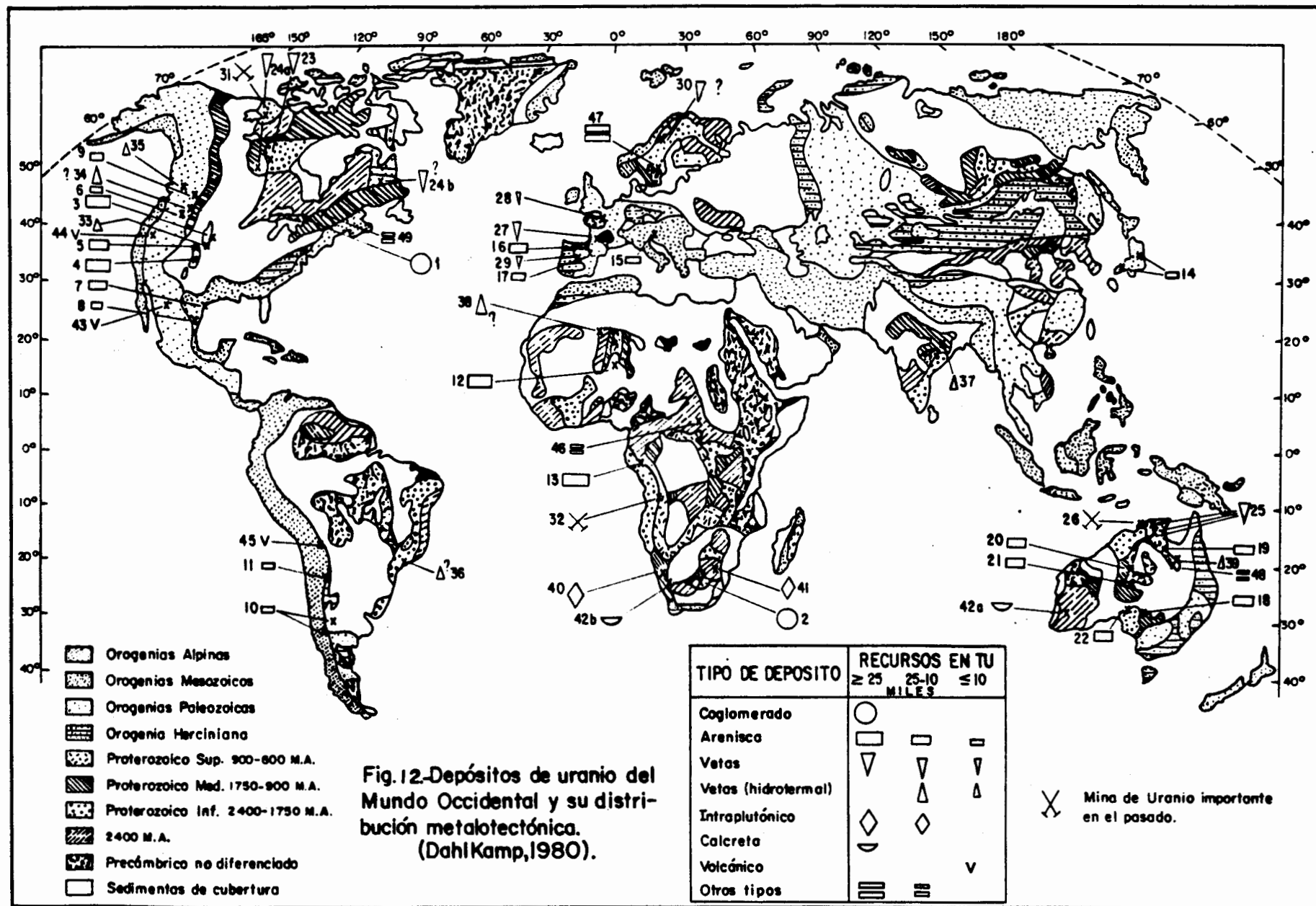


TABLA I.- INDICE DE LA FIGURA 12

| No. | DEPOSITO DE URANIO<br>DISTRITO | P A I S   | No. | DEPOSITO DE URANIO<br>DISTRITO | P A I S   |
|-----|--------------------------------|-----------|-----|--------------------------------|-----------|
|     | <u>TIPO CONGLOMERADO</u>       |           | 29  | Meseta Ibérica                 |           |
| 1   | Distrito Elliot Lake,          | Ont. Can. | 30  | Pleutajokk                     |           |
| 2   | Witwatersrand                  | S. A.     |     | <u>VETAS HIDROTERMALES</u>     |           |
|     | <u>TIPO ARENISCA</u>           |           | 31  | Port Radium, T.N.O.            | Can.      |
| 3   | Distrito Wyoming               | U S A     | 32  | Shinkolobwe                    | Zaire     |
| 4   | Distrito New Mexico            | U S A     | 33  | Schwartzwalder, Col.           | U S A     |
| 5   | Resto de la Meseta -           | U S A     | 34  | Distrito Spokane, Wash         | U S A     |
|     | del Colorado.                  |           |     | Mina Sunshine (?)              |           |
| 6   | Sherwood, Wash.                | U S A     | 35  | Mina Midnite (?)               |           |
| 7   | Distrito Costa del --          | U S A     | 36  | Rexspar, C.B.                  | Can.      |
|     | Golfo, Texas.                  |           |     | Pocos de Caldas                | Brasil    |
| 8   | Cuenca de Burgos, --           | Mexico    |     | Agostinho (?)                  |           |
|     | Nuevo León,                    |           |     | Cercado (?)                    |           |
| 9   | Blizzard C.B.                  | Canada    | 37  | Distrito Singbhum              | India     |
| 10  | Malargue, Sierra Pinta         | Argentina | 38  | Hoggar (?)                     | Argelia   |
| 11  | Salta                          |           | 39  | Maureen, Qu.                   | Australia |
| 12  | Cuenca Agades                  | Nigeria   |     | <u>TIPO INTRAPLUTONICO</u>     |           |
| 13  | Cuenca Franceville             | Gabon     | 40  | Rössing                        | Namibia   |
| 14  | Ningyo Toge, Tono              | Japón     | 41  | Palabora                       | A. S.     |
| 15  | Zirovski Vhr                   | Yug.      |     | <u>TIPO CALCRETA</u>           |           |
| 16  | Cuenca Lodeve                  | Francia   |     |                                |           |
| 17  | Mazarete                       | España    |     |                                |           |
| 18  | Cuenca Lake From               | Australia | 42a | Yeelirrie, A.O.                | Australia |
| 19  | Distrito Westmoreland          | Australia | 42b | Longer Heinrich                | Namibia   |
| 20  | Cuenca Ngalia, T.N.            | Australia |     | <u>TIPO VOLCANICO</u>          |           |
| 21  | Cuenca Amadeus, T.N.           | Australia |     |                                |           |
| 22  | Roxby Downs, A.S.              | Australia | 43  | Sierra Peña Blanca, Chih.      | México    |
|     | <u>TIPO VETAS</u>              |           | 44  | Mc Dermitt, Nev.-Oreg.         | U S A     |
|     |                                |           | 45  | Cotaje                         | Bolivia   |
| 23  | Distrito Beaverlodge,          | Can.      |     | <u>OTROS TIPOS</u>             |           |
|     | Sask                           |           |     |                                |           |
| 24  | Distrito Athabasca,            | Can.      | 46  | Bakouma (fosfato de            | A. C.     |
|     | Sask                           |           |     | Uen Karst)                     |           |
|     | Rabbit Lake, Horseshoe,        |           | 47  | Ranstad (lutitas negras)       | Suecia    |
|     | Ruvon, Collins Bay, -          |           | 48  | Mary Kathleen, Qu.             |           |
|     | Cluff Lake, Midwest -          |           |     | (metasomatismo de con -        | Australia |
|     | Lake, Key Lake                 |           |     | tacto)                         |           |
| 24b | Makkovik, Labrador             | Can.      | 49  | Madawasca, Ontario             | Can.      |
| 25  | Distrito Alligator Rivers      | Australia |     | (Pegmatita)                    |           |
|     | Jabiluka, Koongara, -          |           |     |                                |           |
|     | Ranger, Nabarlek               |           |     |                                |           |
| 26  | Rum Jungle, T.N.               | Australia |     |                                |           |
| 27  | Macizo Central                 | Francia   |     |                                |           |
| 28  | Vendée                         | Francia   |     |                                |           |

bilidad tectónica, frecuentemente en cuencas no muy profundas, cerca de rocas graníticas o volcánicas erosionadas. La encajonante es una típica arenisca continental, alternando con espesores variables de lutita que fué depositada en un ambiente fluvial o marino marginal. La arenisca es moderadamente permeable, generalmente arcósica y contiene material carbonoso. Puede contener salpicaduras de lodo, canales de disolución o irregularidades, así como otras trampas estratigráficas, químicas o tectónicas que localizan la deposición del uranio e impiden su migración.

El ambiente de areniscas es el mejor conocido; los objetivos son grandes y moderadamente fáciles de encontrar; asimismo su exploración y desarrollo son relativamente económicos.

El distrito más grande de uranio en areniscas en el mundo está en Grants, - Nuevo México, E.U.A. con 200,000 tons. de  $U_3O_8$  en producción y reservas; - 24 distritos en el mundo tienen más de 2000 tons. cada uno.

Las vetas que contienen mineralización de uranio son principalmente rellenos de fisuras relacionados a intrusivos alcalinos. Estas pueden armar en rocas ígneas o metamórficas. Generalmente se encuentran fuera de distritos de metales base o metales preciosos, a pesar de que ellos pueden contener fierro, cobre, níquel, cobalto o plata en cantidades apreciables. La veta más rica y más grande conocida constituyó la mina Shinkolobwe en el - Congo Belga, la cual produjo varias decenas de toneladas de  $U_3O_8$  antes de que se acabara el mineral y se cerrara en 1960. Vetas de tamaño mediano - ocurren en Beaverlodge, Saskatchewan y Joachimsthal, Checoslovaquia. Minas con vetas pequeñas conteniendo más de 2000 tons. de  $U_3O_8$  se encuentran en Colorado y Utah, U.S.A. y en Francia, Portugal y España.

En los nuevos descubrimientos del norte de Australia, el uranio ocurre como depósitos peneconcordantes en esquistos brechados y metamorfizados de mica y clorita bajo una discordancia mayor en la base de sedimentos del - proterozoico superior. La uraninita es el principal mineral de mena con - menores cantidades de pirita y raramente calcopirita.

En Australia Occidental existe otro tipo de depósito actualmente en investigación, conocido con el nombre de Yeelirrie; en éste la mineralización ocurre en un material calcáreo superficial denominado "calcrete" - (caliche) que se encuentra en amplias llanuras bajo condiciones climáticas áridas, caracterizadas por una intensa evaporación y en terrenos generalmente graníticos que pueden haber sido la fuente del uranio.

5.3. YACIMIENTOS EN CONGLOMERADOS CON MATERIA CARBONOSA Y A VECES ORO, WITWATERSRAND, SUDAFRICA; BLIND RIVER, CANADA (Dixon, 1979; Lamey, 1966).

Este tipo de depósitos ha sido designado como "tipo de conglomerado", - "depósitos precámbricos de conglomerados" o "depósitos de guijarras de cuarzo". Se formaron después del desarrollo de una voluminosa corteza de naturaleza ácida... pero antes de la formación de una atmósfera oxidante. El intervalo de tiempo involucrado en edades absolutas es entre 2800 y 2200 M.A.

Existen áreas en Canadá, Brasil, al Oeste de Australia y Sudáfrica con estas características. Los depósitos precámbricos de minerales pesados de uranio constituyen actualmente el 48% de las reservas mundiales como mineral de bajo costo. Los más importantes se encuentran en el área - del Lago Elliot, Ontario, Canadá y en el Witwatersrand en Sudáfrica.

El espesor de los lentes mineralizados va de centímetros a varios metros. El ancho es de algunos cientos de metros y la longitud de varios miles de metros. Los depósitos son explotados a profundidades de hasta 3000 m.

La génesis del uranio es causa de discusión, pero la mayoría de los geólogos opinan que el uranio fue transportado como mineral pesado y depositado singenéticamente con las litofacies que lo encierran. Para que este proceso se realice, se requiere una atmósfera sin o con poca cantidad de oxígeno, un ambiente que no es común en la tierra.

Aunque existen numerosas ocurrencias de conglomerados oligomícticos uraníferos en escudos precámbricos, solamente el estrato Arcaico Superior del - Proterozoico, con más de 2200 millones de años, contiene concentraciones - significativas de uranio. Geográficamente, sólo dos distritos se conocen como económicamente explotables:

a) Witwatersrand, Sudáfrica (Fig. 13).

Geología.- Estos importantes depósitos se forman en numerosos horizontes - de conglomerado de guijarros de cuarzo alrededor de lo que es probablemente la mayor y más antigua cuenca sedimentaria.

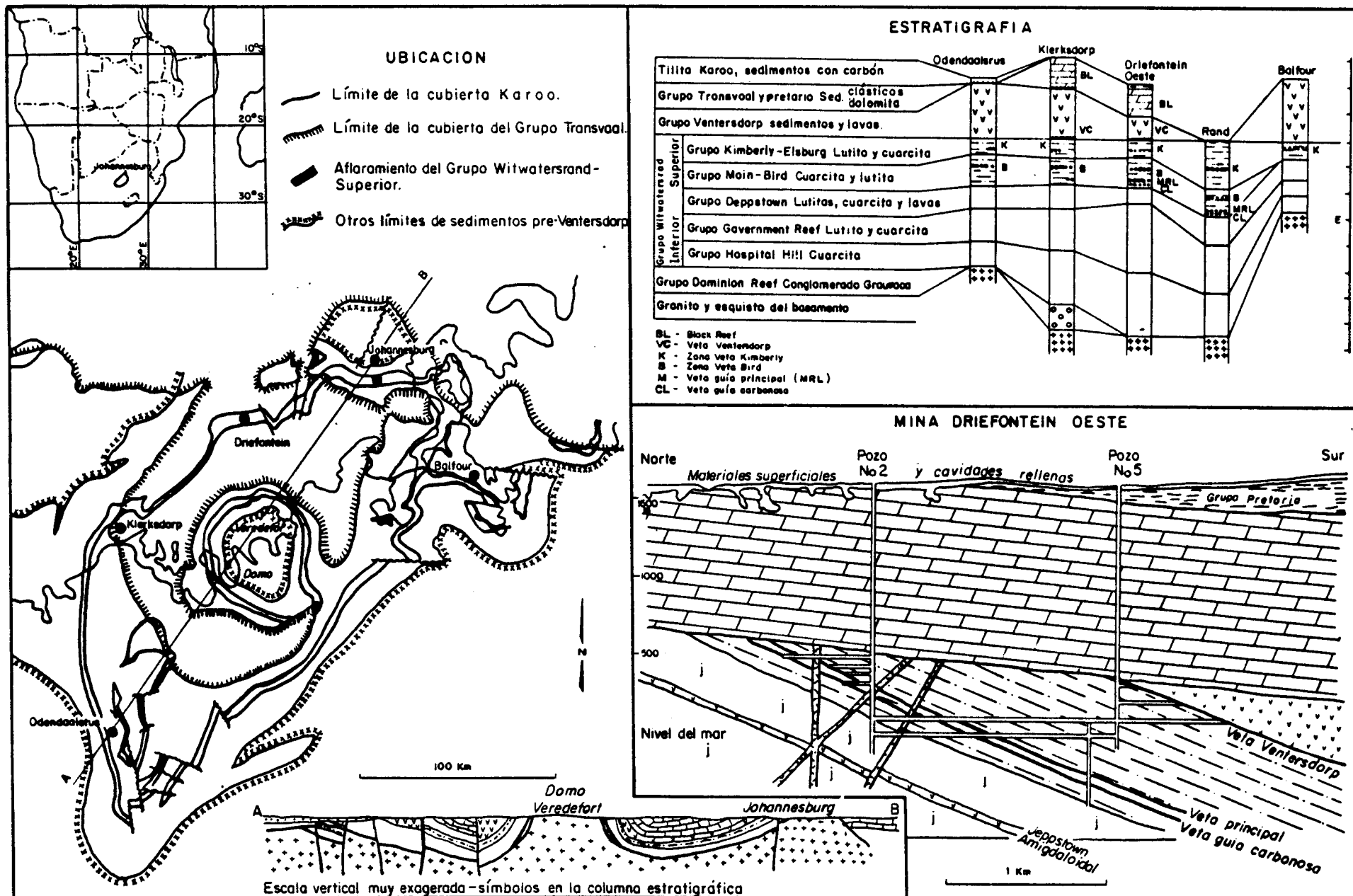
La Cuenca Witwatersrand tiene 260 Km de largo y poco más de 100 Km de ancho con una latitud aproximada de 27°S y 27°30'E, parte en el Transvaal y parte en el Estado de Orange Free de la República de Sudáfrica. Se empezó a explotar con obra minera por oro a partir de 1892.

El Supergrupo de Witwatersrand incluye una secuencia de cuarcitas, conglomerados y lutitas con volcánicas interestratificadas, con un espesor ---- aproximado de 7500 m y edad de 2500 M.A.

El oro y/o el uranio ocurren en niveles estratigráficos específicos localmente denominados "bancos". En general son de dos tipos; conglomerado o - bancos y bancos con lentes de carbón.

El primer tipo consiste en conglomerado limpio con guijarros de cuarzo -- bien redondeados, pero incluyendo en ocasiones pedernal, cuarcita y otros materiales duros. La matriz usualmente contiene abundante pirita, algunas veces en forma de pequeños guijarros o fragmentos semejantes a guijarros - llamados "postas de pirita" y, junto con ella, minerales micáceos finos y granos de cuarzo muy pequeños.

El uranio se presenta generalmente en pequeños granos redondeados de uranita, pero también es común la tucolita, uranio asociado a carbón. Los -





conglomerados destacan por la falta de minerales pesados, con mucho, el mineral traza y ocurre como granos intersticiales pequeños en la matriz o como "manchas" en la superficie de los guijarros.

El segundo tipo son bandas semicontínuas de un material carbonoso, a menudo de solamente algunos milímetros de espesor, conocidas como "carbón guía". El "carbón" es un hidrocarbón, de alta calidad, fibroso, complejo que contiene uranio y oro submicroscópicos.

Hay muchos horizontes de bancos, comienzan en el Grupo Dominion Reef y ocurren en el Grupo Government Reef, pero están mejor desarrollados en dos niveles; uno en el Grupo Main Bird y el otro en el Grupo Kimberley-Elsburg. Un banco adicional ocurre en la discordancia con el Grupo Ventersdorp conocida como el Contacto del Banco Ventersdorp y además, uno menos importante llamado Black Reef en la base del Super Grupo Transvaal.

Dentro de los horizontes de bancos, el oro y el uranio tienden a concentrarse en clavos, los cuales son alargados y orientados hacia el centro de la Cuenca y en la misma dirección que la orientación de varias estructuras sedimentarias y rasgos tales como la distribución del tamaño de los guijarros, orientación de éstos, etc.

Tonelaje y Ley..- Es casi imposible dar cifras significativas sobre las reservas de estos depósitos. La ley promedio de Au de los yacimientos que se explotan actualmente es de cerca de 9 g/t pero algunos operan a leyes tan altas como 31 g/t. La Cuenca ha producido más de 30000 tons. de oro en lingotes; es decir, cerca de las 3/4 partes del total de la producción mundial de toda la historia, y probablemente produzca mucho más todavía. El uranio es subproducto del oro. El contenido de los "bancos" es de alrededor de 0.025 %. En varias minas, el uranio puede ser el principal mineral a explotar.

Hipótesis genéticas.- Existen dos teorías, una que dice que los depósitos son esencialmente sedimentarios, y otra que indica que esto es imposible. La mas moderna teoría propone que el uranio y oro fueron introducidos por soluciones a lo largo de los horizontes de guijarros.

Parece haber existido oro y uranio en depósitos en vetas en granitos y esquistos arcaicos que fueron erosionados para aportar sedimentos a la Cuenca. Las opiniones parecen favorecer la hipótesis de que el oro aluvial y los granos de uraninita fueron atrapados entre los guijarros o en alguna - vegetación primitiva, y fueron progresivamente reconcentrados conforme se fué desarrollando la secuencia sedimentaria en un ambiente parecido al nerítico o de litoral. Se puede sugerir que la atmósfera relativamente desoxigenada, permitió a la pirita y uraninita soportar el transporte mecánico mejor que en la atmósfera actual.

b) Blind River, Canadá (Fig. 14).

Geología.- Es una de las mayores fuentes de uranio del mundo. Los yacimientos ocurren en conglomerados de la base de la primera secuencia de sedimentos epicontinentales depositados después de la estabilización del Escudo Arcaico (Precámbrico) de Canadá. Se encuentra en la orilla Norte del Lago Huron. Se le conoce también con el nombre de Elliot Lake. Está dentro de la Provincia de Algoma de Ontario.

El Grupo Elliot se dividió litológicamente; en éste las zonas con depósitos de uranio están en la Formación Matinenda, constituida por una grauvaica conglomerática.

La economía del distrito se basa solamente en el uranio; algunas minas producen además cantidades menores de elementos radioactivos. El espesor de los intervalos mineralizados varía entre 1.2 m y 10 m; el ancho y largo de los cuerpos individuales está entre 100 y 1000 m.

Los depósitos consisten de conglomerados moderadamente compactos con gui-

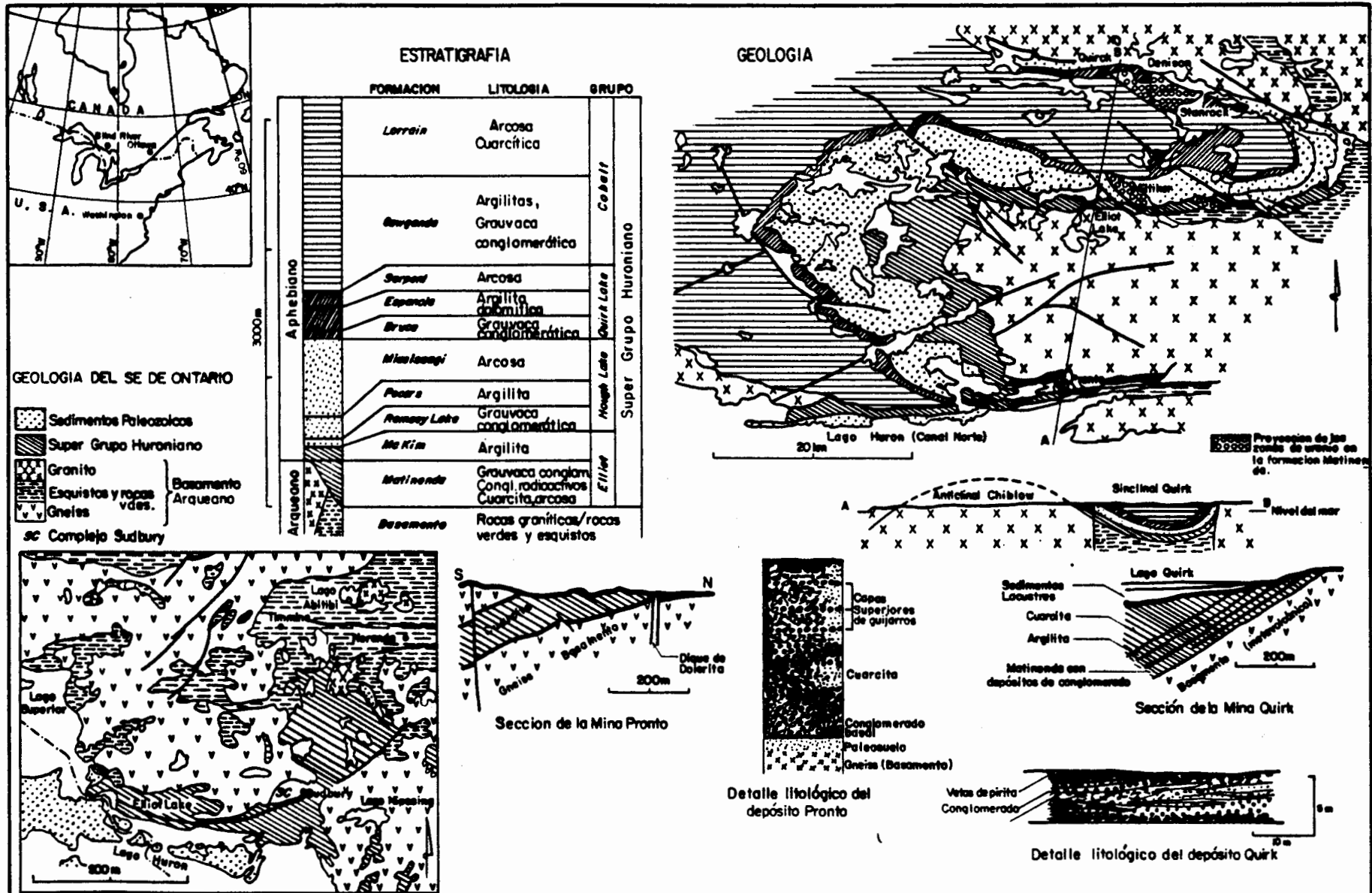


Fig.14. Depósitos de Uranio del área Blind River en Canadá (Según Holmes (1957), Plengar (1963), Roscoe (1968), Hart et al (1955) in Dixon, 1979).

jarros de cuarzo o pedernal de tamaños de 25 mm a 60 mm, en una matriz arenosa y arcillas; la pirita euhedral o subhedral constituye el 20% de la roca. En la matriz hay granos usualmente redondeados de uraninita, uranotorianita, branerita y tucolita. Los diámetros de los granos de uraninita están entre 0.2 mm y 0.5 mm; representando frecuentemente un componente, en pequeña escala, de las estructuras sedimentarias en la matriz. Los minerales de titanio, rutilo y anastasa se encuentran junto con granos de monacita, zircón y muchos otros minerales traza (incluyendo galena formada por plomo radiogénico). El oro se presenta a menudo pero en cantidades de 0.2 g/t y cuando más de 1.5 g/t.

Los conglomerados están interdigitados con areniscas cuarzo-feldespáticas (Fig. 15). Las lentículas de pirita a menudo se encuentran en los frentes y concentraciones locales de granos de uraninita, se relacionan claramente con las estructuras sedimentarias.

Tonelaje y Ley. - Las reservas oscilan entre 300,000 y 400,000 tons. de  $U_3O_8$  incluyendo reservas inferidas.

Las leyes publicadas en 1958 para 11 minas en el área varían de 0.09% a 0.14%  $U_3O_8$  con una ley promedio de 0.1% de  $U_3O_8$ .

Hipótesis genéticas. - Todas las evidencias indican que se trata de sedimentos fluviales o deltáicos, pudiendo formarse durante un período húmedo que precedió a una era glacial. El color de las rocas sugiere deposición en condiciones sin oxígeno (anóxicas). Los granos de mineral de uranio parecen detríticos, pero algunos geólogos piensan que son pseudomorfos de algún antiguo detrito mineral reemplazado por la acción de aguas subterráneas cargadas de uranio. La fuente del uranio parece ser las rocas graníticas del Precámbrico.

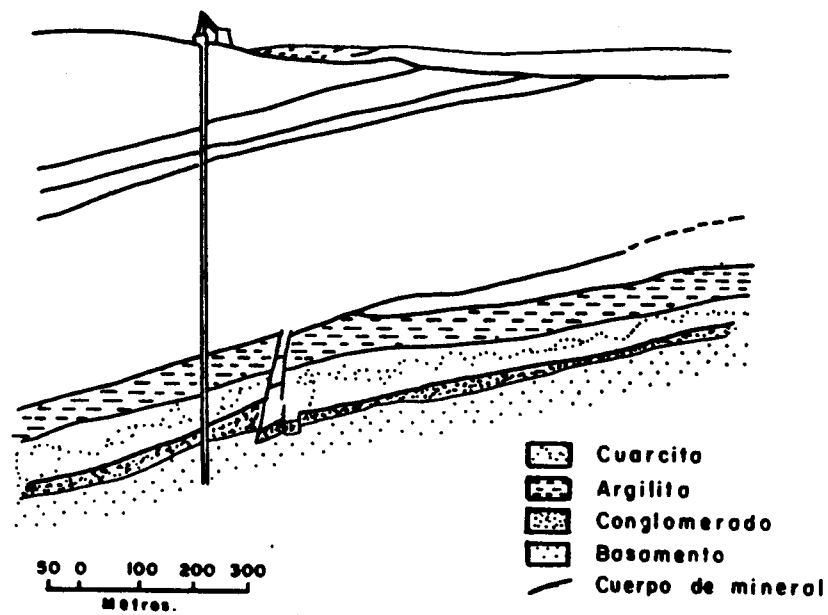


Fig. 15.-Uranio en Conglomerado ( Quirke Lake, Ontario)  
(Según Griffith, 1967 in Dahlkamp, 1980)

#### 5.4. YACIMIENTOS EN ARENISCAS

##### a) DEPOSITOS ORIENTADOS. AMBROSIA LAKE (DISTRITO URANIFERO GRANTS, E.U.A.) (Dixon, 1979; Bailey y Childers, 1977) (Fig. 16).

El Distrito Grants es el mayor de los campos uraníferos de la Meseta del Colorado. Es típico de los depósitos llamados de "Tipo arenisca" que ocurren en la Meseta en varios niveles estratigráficos de sedimentos del Mesozoico, así como en otras cuencas sedimentarias adyacentes.

El área de Ambrosia Lake está compuesta por una serie de sedimentos con inclinación general al NE. Los primeros descubrimientos de depósitos de uranio-vanadio fueron en zonas de la caliza Todilto, pero los mayores yacimientos se sitúan alrededor del Domo de Ambrosia Lake que es una estructura anticlinal oculta por la Lutita Mancos y la Arenisca Dakota. El depósito ocurre en la Formación Morrison, la cual se divide en tres miembros. El miembro basal Recapture es a menudo estéril y está compuesto por limolitas ocasionalmente con canales rellenos de arena. Los principales cuerpos mineralizados ocurren en el Miembro Westwater Canyon que sobreyace al anterior, consiste de grandes lentes o lengüetas de arenisca con partes delgadas de lutita o limolita. La arenisca es de color café rojizo, amarillo o gris oscuro, donde el contenido de materia orgánica es alto. La arena no está bien clasificada y contiene una cierta cantidad de feldespato y otros materiales, probablemente de origen volcánico. Los lentes de arenisca Westwater Canyon dentro del Miembro Brushy Basin sobreyacente, aunque similares a los del Recapture, contienen varias lengüetas grandes de arenisca que forman un miembro distinto de la secuencia, localmente llamado Arenisca Poison Canyon. La mayor parte de los cuerpos mineralizados ocurren en las lengüetas arenosas Westwater y Poison Canyon.

Hay tres tipos de depósito. Los primeros son cuerpos alargados lenticulares paralelos a la estratificación conocidos localmente como "runs" y "rolls"; están en ocasiones desplazados por fallas, y se conocen como -

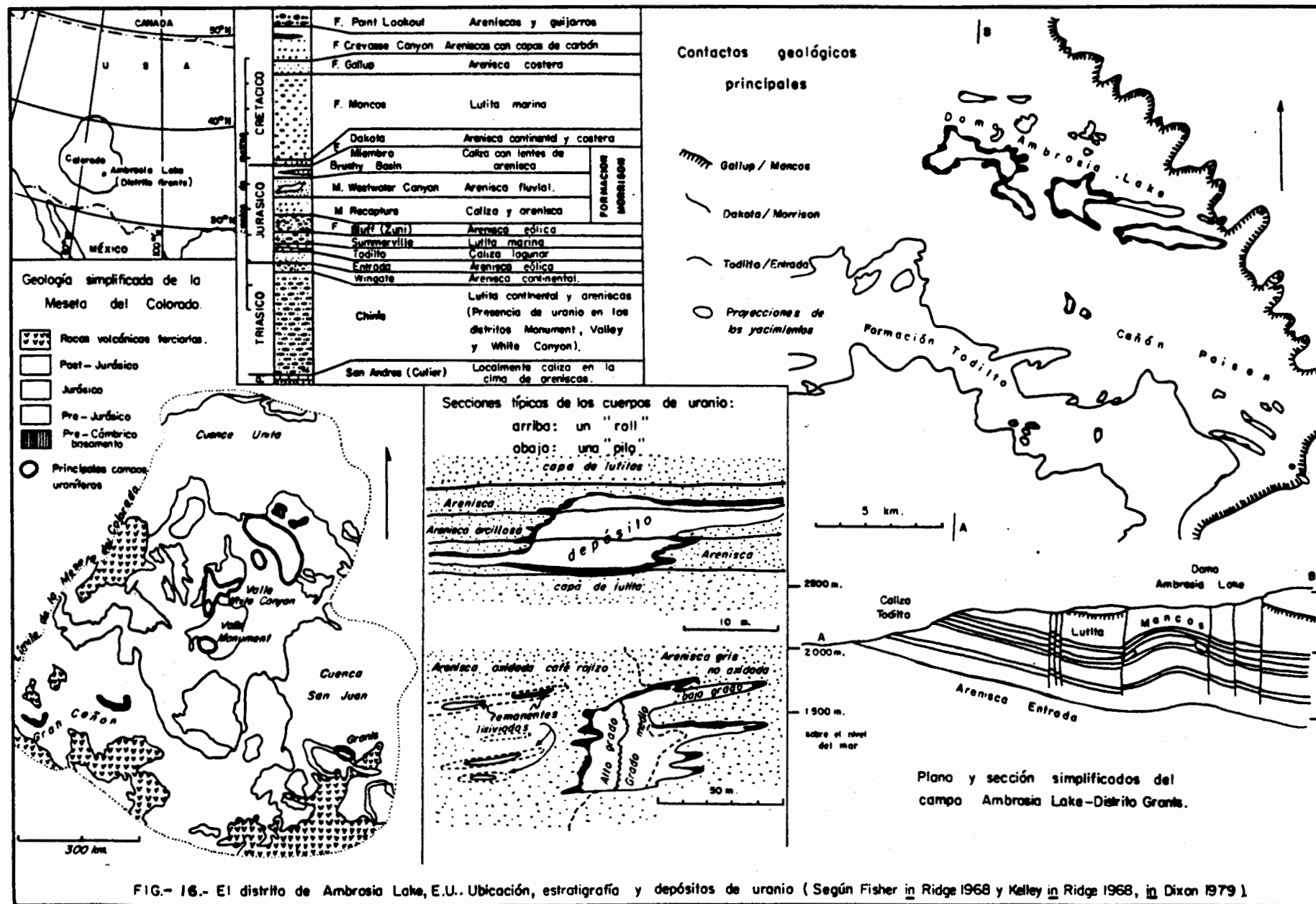


FIG.- 16.- El distrito de Ambrosia Lake, E.U. Ubicación, estratigrafía y depósitos de uranio (Según Fisher in Ridge 1968 y Kelley in Ridge 1968, in Dixon 1979).

cuerpos "pre-fallas". Los cuerpos "post-fallas" son mas irregulares, transgresivos y asociados con fallas. Algunos cuerpos se conocen como "pilas" - ("stacks"), que son claramente transgresivos y muestran evidencias de removilización de los "runs" o "rolls" originales. El tercer tipo corresponde a cuerpos secundarios, en los cuales el mineral primario cambió a una nueva mineralogía.

El mineral primario consiste en zonas de arenisca gris en las cuales los granos de arena están revestidos por materia hidrocarbonosa y co finita. Se encuentran fragmentos de madera fósil reemplazados por co finita. Ocurren también capas de pechblenda. El vanadio se presenta como roscoelita y mon-troseita. La pirita se observa generalmente junto con pequeñas cantidades de otros sulfuros y minerales de selenio. Los minerales secundarios impregnan la arenisca con su brillo amarillo como la carnotita, tyuyamunita y metatyuyamunita.

El término "depósitos orientados" se aplica a los yacimientos de uranio que ocurren en areniscas y conglomerados que tienen las siguientes características :

- 1.- Los depósitos están distribuidos a lo largo de cinturones mineralizados o trenes, los cuales pueden ser de varios kilómetros de ancho y de decenas de kilómetros de longitud.
- 2.- Los cuerpos son comunmente lenticulares, casi paralelos a la estratificación.
- 3.- Generalmente el tren de la mineralización está controlado por el paleodrenaje.
- 4.- La mineralización de uranio ocurre en rocas depositadas en ambiente-reductor, donde adquieren un color gris a negro, las cuales son carbonosas en la mayoría de las ocasiones.



Gran parte del material carbonoso es amorfo y se encuentra finamente diseminado, generalmente cubriendo granos y rellenando parcialmente los intersticios entre los granos de arena.

5.- Los cuerpos de uranio normalmente forman el núcleo de grandes volúmenes de roca gris, depositadas en ambiente reductor.

Las zonas con mineralización han sido interpretadas como alteraciones por muchos geólogos debido a que están íntimamente asociadas al mineral y porque son diferentes en su apariencia de las rocas típicas oxidadas y no mineralizadas en puntos distantes de la mineralización.

Los cuerpos mineralizados generalmente siguen sistemas de paleodrenaje en donde las corrientes fluyeron al Este. El miembro Westwater Canyon contiene cuerpos mineralizados de forma lenticular que frecuentemente se encuentran elongados paralelos a la estratificación; ésta también constituye la dirección en que el conjunto de cuerpos minerales se concentran (Figs. 17 y 18).

Los "depósitos orientados" de la región de Grants varían desde cuerpos pequeños y angostos hasta cuerpos de 9 m de espesor, 240 m de ancho y 2 Km de longitud; éstos incluyen algunos de los depósitos más grandes y de mejor ley de uranio en rocas sedimentarias en todo el mundo.

La cofinita (silicato hidratado de uranio), es el más importante mineral en éstos depósitos. Es extremadamente fina y puede identificarse plenamente por medio de difracción de rayos X. La uraninita sólo se ha identificado esporádicamente.

En muchos lugares, marginales a los cuerpos uraníferos, se presentan masas de mineralización no uranífera, de color gris oscuro. Estos contienen un sulfuro de molibdeno amorfo, posiblemente jordisita, junto con minerales de vanadio y manganeso.

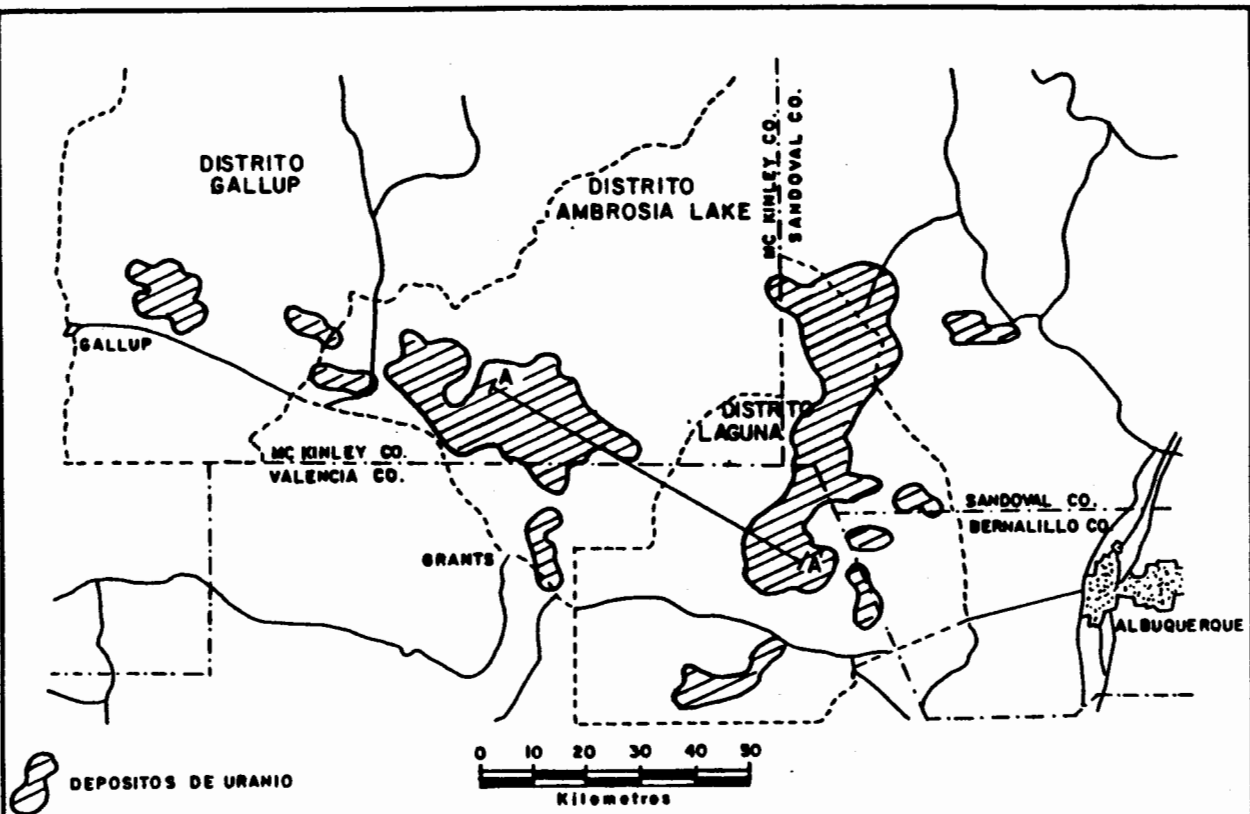


FIG.17.-MAPA DEL DISTRITO URANIFERO GRANTS, NOROESTE DE NUEVO MEXICO, E.U.

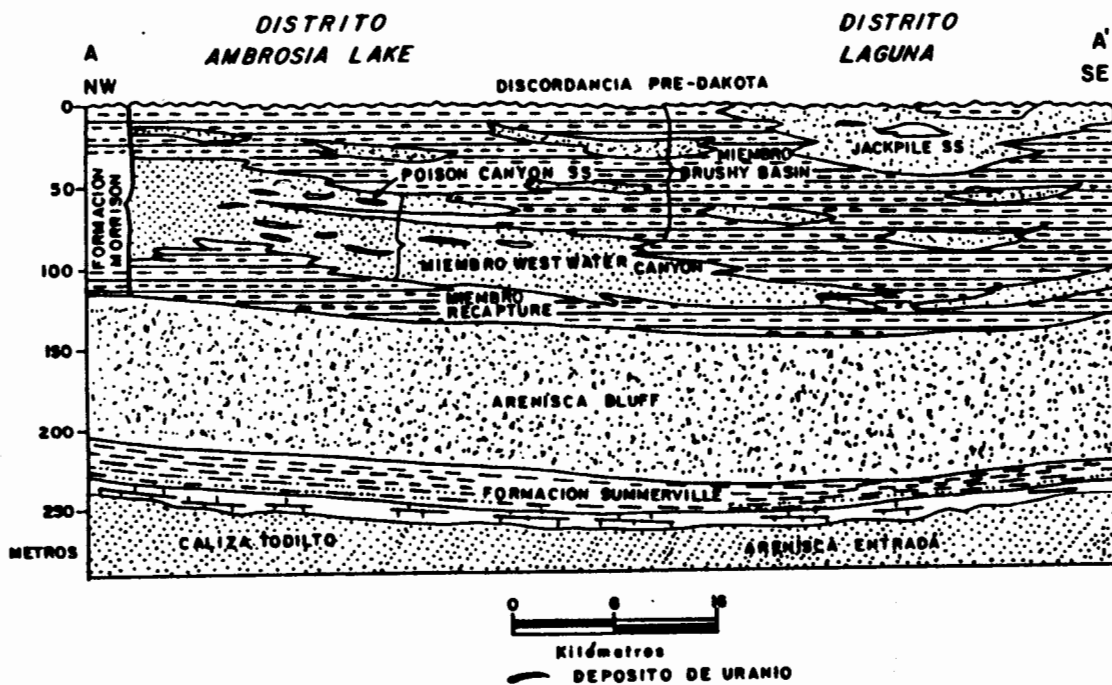


FIG.18.- SECCION DIAGRAMATICA QUE MUESTRA LAS RELACIONES ENTRE LAS PRINCIPALES FORMACIONES QUE CONTIENEN URANIO Y AQUELLAS QUE SON EQUIVALENTES Y CON LAS QUE SE ENCUENTRAN INTERSTRATIFICADAS EN EL DISTRITO URANIFERO DE GRANTS, NUEVO MEXICO. HILPERT (1963)

Estas masas negras pobres en uranio también son deficientes en su contenido de material carbónoso. En algunas ocasiones se ha reportado selenio concentrado con la jordisita.

Los límites de los cuerpos mineralizados en los "depósitos orientados" de la región de Grants son frecuentemente bien marcados. A menudo el límite inferior de estos cuerpos descansa sobre planos de estratificación, sin embargo el límite superior es generalmente gradacional. Otros controles estratigráficos incluyen superficies de erosión o discordancias, capas de arcilla y conglomerados arcillosos. Existe una tendencia del mineral a concentrarse paralelamente a discordancias intraformacionales y a lo largo de contactos entre areniscas y lutitas. En algunos casos el mineral termina abruptamente contra superficies curvas bien definidas llamadas "rols" (Fig. 19).

Las áreas que son favorables para la mineralización de uranio están restringidas a aquellas localidades en donde se encuentran cuerpos de areniscas depositadas en ambiente reductor.

Fuera de los cuerpos mineralizados, el miembro Westwater Canyon tiene un promedio de 100 ppm. de uranio.

Hacia 1971 Grants contaba con 200,000 tons. de  $U_3O_8$  en producción y reservas.

b) DEPOSITOS TIPO ROL. AREA DE TEXAS, E.U.A. (Bailey y Childers, 1977).

Los mineros en los depósitos de uranio-vanadio en el Altiplano de Colorado, acuñaron el término "rol" para describir la geometría de algunos cuerpos minerales, los cuales parecían estar enrollados a medida que el minado procedía (Fig. 20). El término fué posteriormente adoptado en 1942 para definir depósitos de vanadio-uranio que tenían límites combados, los que se encontraban en el Altiplano de Colorado. Los depósitos tipo rol en la Meseta de Colorado son secundarios en importancia en comparación con los depósitos -

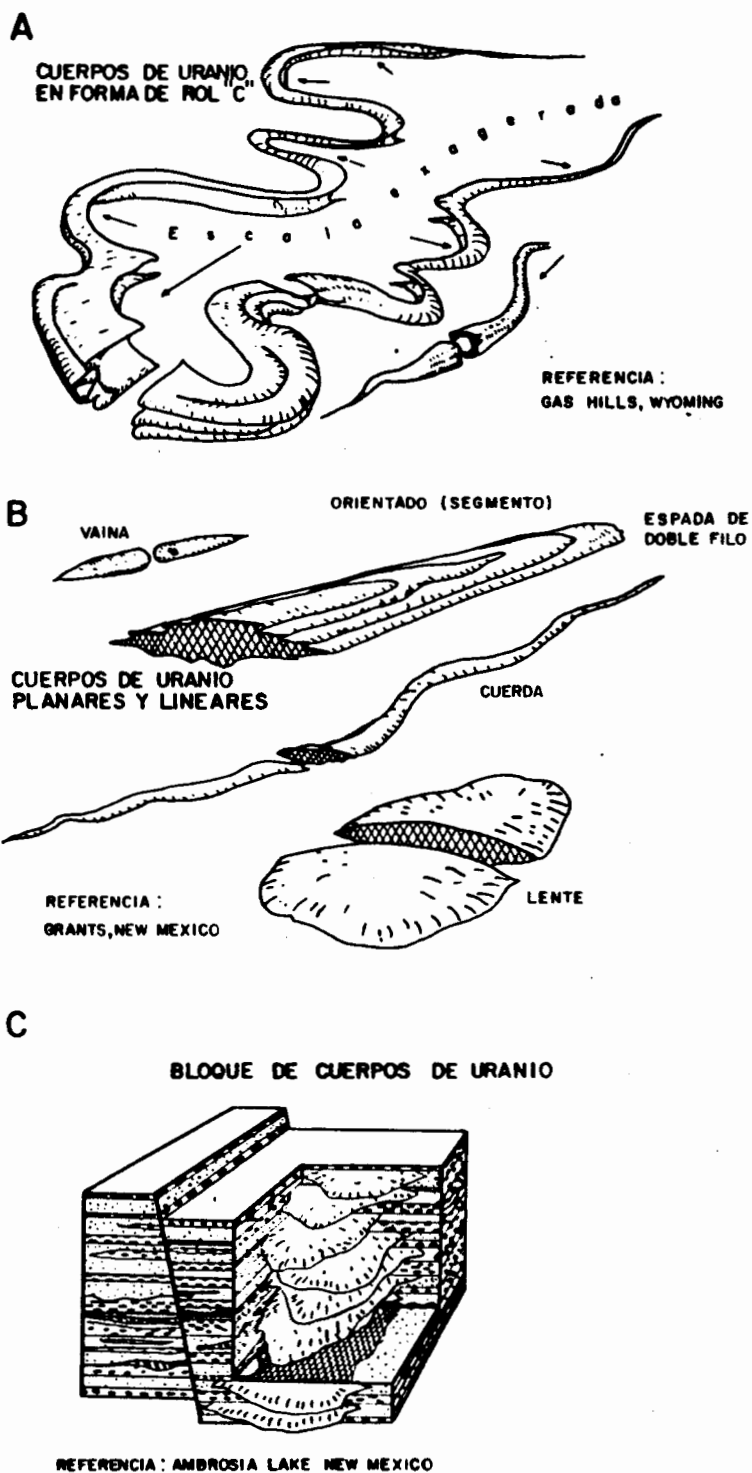


Fig. 19.- Formas típicas de cuerpos de uranio : Geometría idealizada. A) Rol en "C", B) Formas lineares y planares, C) Composición en bloque de cuerpos de uranio. (Gabelman, 1977).

orientados anteriormente descritos, aunque yacimientos de este tipo en las cuencas de Wyoming y el Sur de Texas representan los cuerpos minerales de mayor importancia en estas regiones.

En el área de Wyoming, se han usado varios términos intercambiables con el de "rol"; de éstos no existe definición formal. Estos términos incluyen - "interfase geoquímica", "rol", "rol subsidiario", "cuerpos uraníferos tipo rol", "celda geoquímica", y "frente de solución".

El término "rol" debe ser formalizado para describir el margen de alteración externo dentro de un cuerpo de areniscas (Fig. 21).

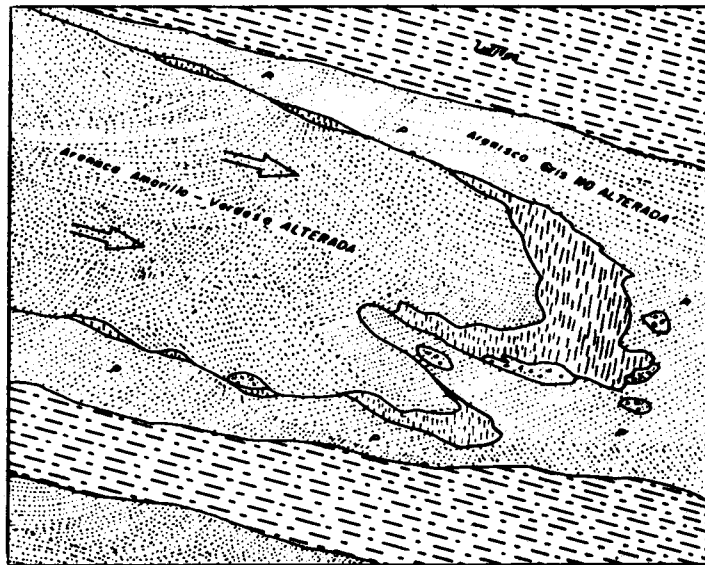
En el área de Texas, E.U.A., los depósitos uraníferos se presentan en franjas marginales a los complejos de alteración en areniscas del Eoceno Superior, Oligoceno, Mioceno y Plioceno del Sur de Texas (Fig. 22). La Formación Whitsett del Eoceno contiene varios miembros de arenisca, los cuales tienen depósitos de uranio de este tipo (Fig. 23). La Formación Whitsett se presenta uniformemente reducida y contiene tanto depósitos marinos como continentales. La Toba Catahoula (Mioceno) traslapa los depósitos de la Formación Whitsett discordantemente hacia el NW.

Los estratos del Mioceno y Plioceno que contienen yacimientos en rol tienen un origen principalmente fluvial y fueron depositados por corrientes - que fluían al SE.

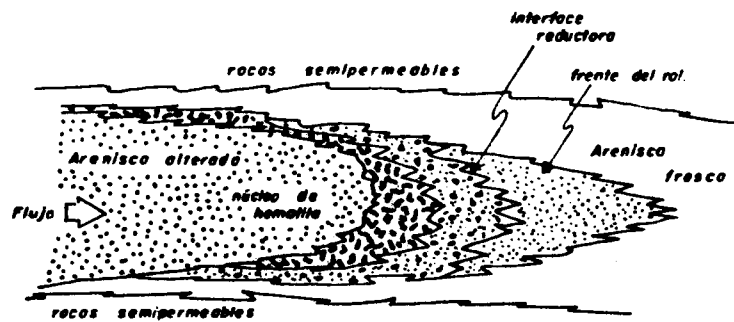
Los cuerpos de uranio se presentan a lo largo de los frentes de oxidación-reducción que se formaron en areniscas permeables donde el movimiento de agua subterránea era aparentemente activo. Algunos de estos cuerpos de areniscas contienen pequeñas cantidades de carbón. Muchos de los depósitos de uranio conocidos ocurren cerca de campos petroleros y asociados a estructuras falladas.

Muchos geólogos están de acuerdo en que los depósitos de uranio de tipo rol se formaron por medio de agua subterránea en condiciones oxidantes -

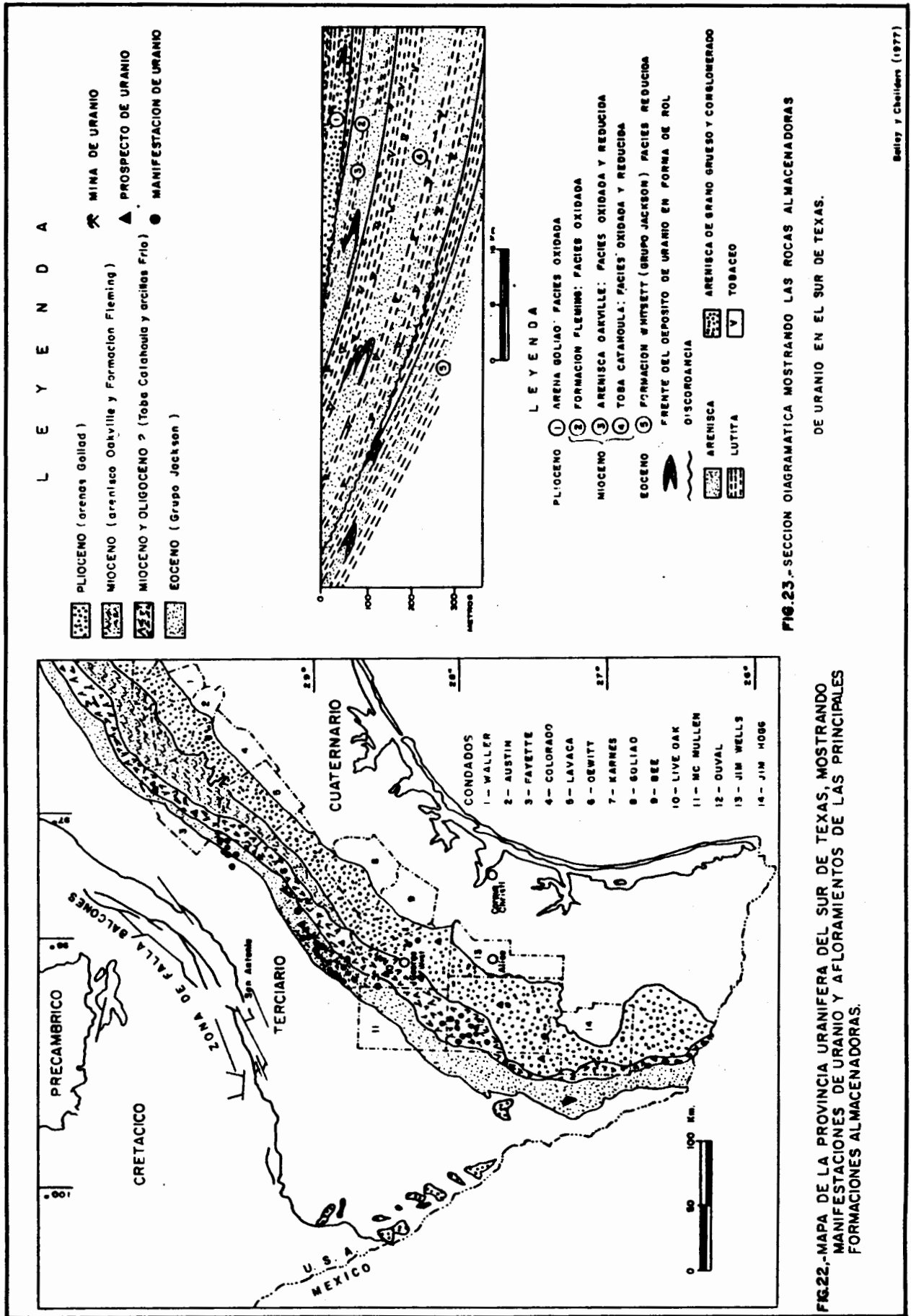
**FIG.20-MINERALIZACIÓN DE URANIO TIPO "ROLL"**  
**SHIRLEY BASIN, WYOMING USA. (Horsman, 1972)**



**E X P L I C A C I Ó N**



**FIG.- 21.- Sección idealizada de un depósito de uranio "Tipo rol"**  
**(Según H.C. Granger y C.G. Warren, 1974 ).**



transportando iones de uranilo hexavalentes en solución.

El uranio se lixivió durante el intemperismo y erosión de rocas graníticas, las cuales fueron también la fuente de suministro para la formación de los cuerpos de arenisca.

Los datos reportados en la literatura indican que muchas de las rocas graníticas en Wyoming y el Norte de Colorado tienen contenidos anómalos de uranio. Las condiciones favorables para el desarrollo de depósitos de tipo rol se presentan en Wyoming en las facies reductoras o en las arenas de grandes ríos tales como las Formaciones Wind River, Wasatch y Battle Spring.

El uranio en la forma del ion uranilo se transportó corriente abajo a través de medios ambientes oxidantes; esta agua altamente oxidante continuamente invadió el medio reductor de las arenas aluviales de los grandes ríos.

Las condiciones de transporte más favorables fueron donde habían grandes movimientos de agua subterránea, especialmente bajo condiciones de clima de sabana del Eoceno y Oligoceno Inferior, siendo esto más notable que en cualquiera de las épocas subsecuentes.

Los depósitos de tipo rol de Texas se formaron en unidades sedimentarias del Mioceno y Plioceno, las que presentan tanto facies oxidadas como reducidas; también se encuentran en estratos del Eoceno que son solamente de facies reductoras (Fig. 23). Muchos de los geólogos que han publicado sobre la materia sugieren que la Toba Catahoula del Mioceno es la principal fuente del uranio de aquellos depósitos que ocurren en estratos más jóvenes y más viejos que la misma Toba. La evidencia de campo indica un clima de tipo sabana en el sur de Texas durante el Mioceno y Plioceno, y las condiciones eran favorables para la lixiviación de uranio de las unidades tobáceas y su transporte subsecuente tanto en aguas superficiales como subterráneas hasta los medios reductores.



## 5.5. YACIMIENTOS EN ROCAS CARBONATADAS

### a) MINA SHINKOLOBWE, KATANGA, AFRICA (Lamey, 1966; Heinrich, 1958).

Se encuentra a 20 Km al W de Jadotville y a 20 Km al S de Kambove, en Katanga. La mina se empezó a explotar por Cu en 1902; el uranio se encontró en 1915. Los estudios sistemáticos y la explotación por U comenzaron en 1921. En los primeros 15 años se obtuvieron 100 000 tons. de minerales radiactivos.

El área está constituida principalmente por rocas sedimentarias precámbricas plegadas y afalladas (Grupo Katanga), que consisten en los siguientes sistemas : Kundelungu (800 a 2500 m), el Grand Conglomerate y Mwashya ( 500 a -- 1000 m) y el Schisto-Dolomitique en orden descendente (Fig. 24).

La mineralización ocurre principalmente en la Serie Mine, en la cual la silicificación es un rasgo común; muchos de estos estratos muestran los efectos del metamorfismo de bajo grado, conteniendo talco y clorita; aparentemente no hay discordancia entre las capas Kundelungu y las unidades más viejas.

Los estratos de la Serie Mine, del Sistema Mwashya y del Sistema Kundelungu fueron plegados en un tren general al NW de pliegues anticlinales y sinclinales asimétricos. Este anticlinario Katanga tiene 320 Km de longitud y 104 - de ancho en su parte media.

La mineralización, tanto de cobre como de uranio, está restringida en Katanga a las rocas de la Serie Mine. Los depósitos de sulfuros de cobre son -- principalmente diseminados en estratos dolomíticos afallados. El uranio se encuentra en vetas de espesores significativos solamente en Shinkolobwe y Kalongwe. En Shinkolobwe los minerales de uranio y sus numerosos asociados ocurren como vetas a lo largo de fracturas, planos de estratificación, juntas y fallas menores, como cemento de brechas; como masas de reemplazamiento, -- como nódulos; y como granos diseminados en pizarra dolomítica y en dolomita-silicificada principalmente. Las vetas individuales carecen de continuidad, pero localmente son tan numerosas que el agregado puede parecer un "stock---

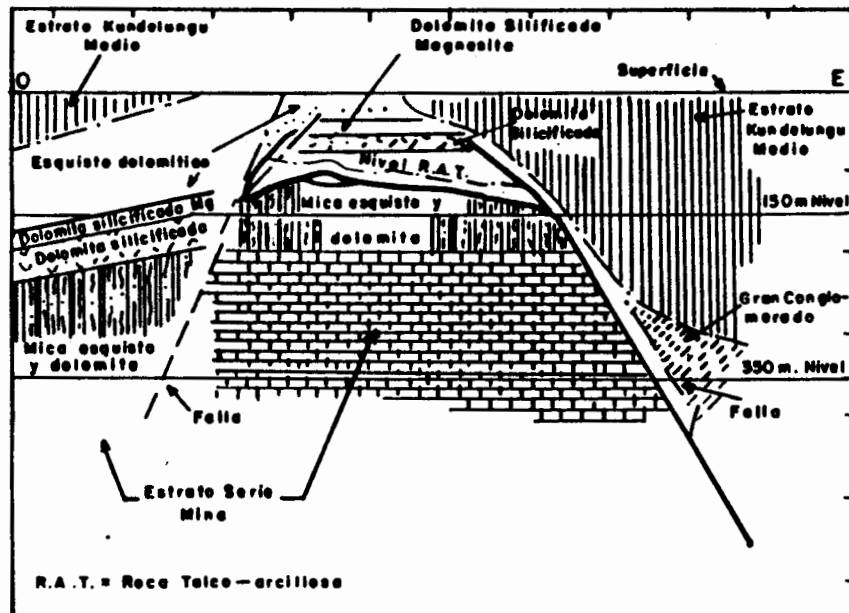


Fig. 24.-Sección longitudinal de las rocas de la Serie Mina con sus fallas, mostrando direcciones inferidas de las soluciones uraníferas. Yacimiento de ShinKolobwe, Congo Belga (Derriks y Voets, 1956 in Heinrich, 1958).

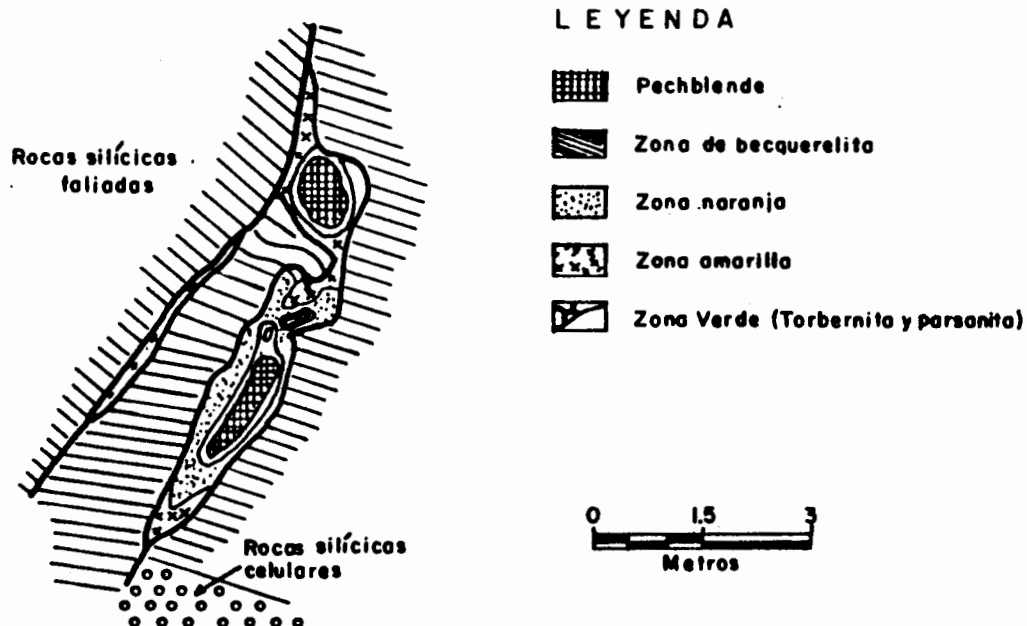


Fig. 25.-Sección vertical a través de una veta lenticular de pechblenda, mostrando copas sucesivas de minerales de uranio. ShinKolobwe, Congo Belga (Thorcau y du Tricu de Terdonck, 1933 in Heinrich, 1958)



work". Las vetas varían en espesores de varios centímetros a un metro. Algunas se extienden hasta dos metros, otras son continuas por 10 m (Fig. 25). Las fallas principales no están mineralizadas pero están rellenas de brechas talco-arcillosas.

La mineralización comienza a desaparecer a partir de los 220 m de profundidad. Cerca de la superficie los depósitos consisten principalmente de minerales oxidados, pero abajo del nivel freático predominan la pechblenda y los sulfuros metálicos. La veta mejor conservada con más alto contenido de sulfuros fue encontrada a 79 m.

Los minerales hipogénicos consisten principalmente de uraninita, sulfuros y seleniuros de cobalto y níquel con molibdenita, pirita, sulfuros de cobre, oro y monazita diseminados en gangas de dolomita, magnesita, clorita y poco cuarzo. La uraninita ocurre en vetas masivas o en vetas con sulfuros de Co-Ni.

Los minerales supergénicos precipitaron en puntos lejanos de sus fuentes de origen, debido al movimiento de soluciones, especialmente torbernita y meta-torbernita. La kasolita ocurre preferencialmente en pizarras dolomítico-grafíticas, mientras que la torbernita se forma especialmente en cavidades en la dolomita silicificada. Las rocas cercanas a la superficie, con especies de uranio diseminado, están fuertemente silicificadas y con cavernas.

#### 5.6. YACIMIENTOS PERIPLUTONICOS EN FILONES

- a) JOACHIMSTHAL- CHECOSLOVAQUIA (Heinrich, 1958; Lamey, 1966; Marquina, 1978).

Este depósito es de interés histórico porque sus vetas aportaron el material usado por Pierre y Marie Curie cuando descubrieron el radio, siendo una de las primeras fuentes de este elemento; sin embargo, las vetas fueron explotadas principalmente por otros minerales. El depósito es del tipo Ni-Co-Ag nativa.

Joachimsthal está en Bohemia, a 4 Km al E del batolito de Eibenstock del Paleozoico Tardío, el cual corta al esquisto precámbrico Joachimsthal. Las vetas forman dos sistemas separados: uno norte-sur (Midnight), y otro este-oeste (Morning), éstas continúan sin interrupción, pero las primeras se desvían. El sistema este-oeste es más antiguo que el norte-sur, el cual generalmente contiene los más altos valores en uranio. Comunmente se forman clavos ricos en pechblenda donde se intersectan las vetas de los dos sistemas.

Las vetas se pueden seguir por 2 Km y a profundidades de 500 m con espesores hasta de 1 m. Algunas vetas atraviesan el granito a profundidad, donde se piensa que la mineralización de uranio decrece. La mayor producción de uranio vino de las vetas Midnight con 0.1 a 1 m de espesor.

La pechblenda está acompañada por calcita y dolomita, coloreadas de rojo por hematita finamente diseminada. Se presenta en lentes o masas irregularmente distribuidas que usualmente terminan en la roca esquistosa encajonante, y están separadas de una brecha por una delgada veta de cuarzo. Algo de la pechblenda impregna a los esquistos. Rocas encajonantes escapolíticas en la mina Edelleut contienen 0.265%  $U_3O_8$ . Cerca de las vetas la muscovita es abundante en las rocas encajonantes. Algunas de las vetas Midnight muestran capas de 1) un delgado revestimiento de cuarzo en las paredes, 2) dolomita con pechblenda, 3) dolomita y arseniuros. En general, la pechblenda es más joven que el cuarzo y el carbonato y algunos de los minerales de Co-Ni y más vieja que otros minerales de Co-Ni-Ag.

Con la profundidad, los minerales cambian de Ag a Co-Ni y a U. Aún cuando esto se achacó a zoneamiento termal, se puede relacionar a la presencia de diferentes tipos de roca encajonante, y la más ricas concentraciones de pechblenda ocurren donde las vetas atraviesan mármol intercalado con esquisto.

La mineralización se encuentra cerca del contacto de las rocas graníticas hercinianas con un complejo metamórfico de edad Proterozoico y Paleozoico Inferior, compuesto por micaesquistos, filitas, gneiss, calcosilicatos y anfibolitas. El granito es de dos tipos, el primero es un granito normal que no mues-

tra alteraciones post-magmáticas y el segundo, más joven es un granito automórfico que presenta fenómenos de albitización, muscovitización y greisenitización, a la cual se refiere la etapa hidrotermal de la mineralización.

Las rocas encajonantes favorables a la mineralización son los esquistos de moscovita-biotita, pirítico y grafitico; mientras que los granitos, el --- gneis-cuarzo-sericítico y de moscovita son más bien desfavorables.

La secuencia hidrotermal es la siguiente :

Sulfuros precoces-Cuarzo-Pechblenda-Arseniuros con Ag-Arseniuros con Bi-Sulfoarseniuros-Sulfuros Tardíos.

Durante la etapa de pre-mineralización, la alteración de las rocas metasedimentarias y graníticas se manifiesta por: piritización, cloritización y grafitización en las primeras y greisenitización, albitización y silicifica---ción en los granitos.

Durante la mineralización hubo silicificación, carbonatación y hematización de los metasedimentos y sericitización del granito. Durante la etapa post-mineralización los metasedimentos fueron sericitizados, silicificados y caolinizados, mientras que en los granitos hubo sericitización y caolinización.

El principal mineral de uranio es la pechblenda, que se presenta en vetas - de 20 cm. de espesor promedio. que se alejan del contacto con el granito de 150 a 400 m; se asocian a una ganga dolomítica con una coloración rojiza, - sin hematita y presentando una estructura de intercalaciones continuas bastante visible.

Las edades determinadas para estos depósitos son :

Granito normal ..... 320 M.A.

Granito automorfo ..... 260 a 280 M.A.

Principal etapa de mineralización uranífera ..... 220 - 230 M.A.

Etapas de mineralización uranífera posteriores ... 5 a 160 M.A.

Entre 1854 y 1914, se produjeron 500 tons. de concentrado con 50% de  $U_3O_8$ . La producción de radio entre 1909 y 1915 fue de 7.8 gr.; entre 1915 y 1921 se obtuvieron 13 gr. de 110 tons. de concentrado con 50%  $U_3O_8$ . La ley promedio es de cerca de 0.2%  $U_3O_8$  excepto para las ricas vetas Gester y --- Schweizer (0.6 a 1.16%  $U_3O_8$ ).

### 5.7. YACIMIENTOS INTRAPLUTONICOS (DEPOSITOS ASOCIADOS A INTRUSIVOS)

La mayor parte de los depósitos relacionados a intrusivos se presentan en rocas ígneas félsicas tales como las alaskitas y sienitas de nefelina (Fig. 26).

La mayoría de las ocurrencias de uranio conocidas de este tipo son pequeñas en pegmatitas o de gran tonelaje y baja ley. Los depósitos asociados a intrusivos pueden ser buenos productores en el futuro.

El yacimiento de uranio intraplutónico más importante es el de Rössing en el sur del Africa Occidental (Fig. 27). Este depósito contiene 90,000 a - 140,000 tons. de  $U_3O_8$  en minerales de baja ley (Nash, 1978), con un promedio de 0.035% de  $U_3O_8$ . En 1979 produjo 5000 toneladas de metal de uranio.

Rössing se localiza aproximadamente a 65 Km al Ne de Swakopmund en el Desierto de Namibia. Las rocas huéspedes están intensamente plegadas y falladas y se encuentran en el cinturón orogénico Damarán del Precámbrico Superior. Este yacimiento se ubica en la porción sur de una gran estructura dómica.

Sé trata de una concentración de uraninita, betafita y minerales secundarios asociados que se encuentran diseminados en los cuerpos intrusivos de alaskita, (Dahlkamp, 1980). Esta roca es parte de una zona de migmatitas en donde el intrusivo es aplítico, granítico y pegmatítico y presenta relaciones concordantes, discordantes y de reemplazamiento con los intensamente deformados gneisses, esquistos, mármoles y calizas de las formaciones del Precámbrico Superior (Fig. 28). Los minerales primarios de uranio se

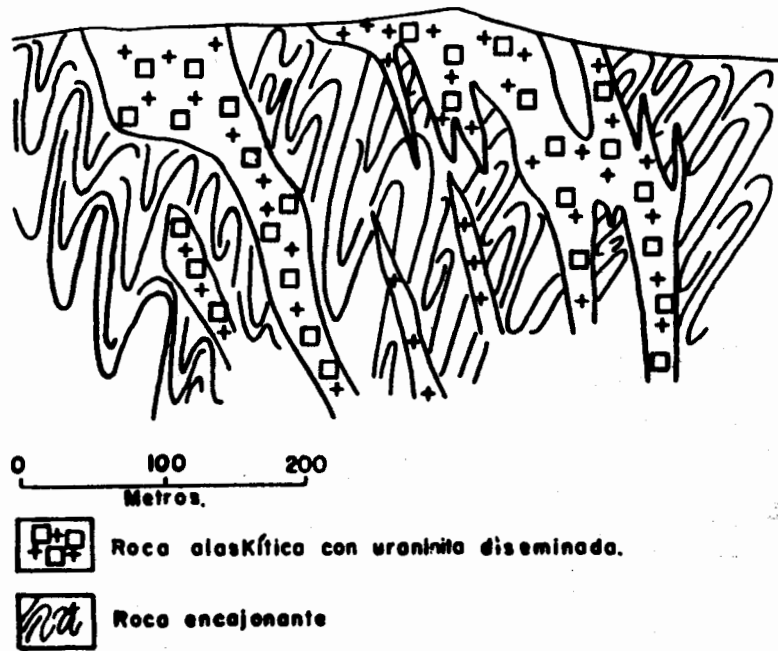


Fig. 26.- Yacimiento de uranio intraplutónico (idealizado según Dahlkamp, 1979)

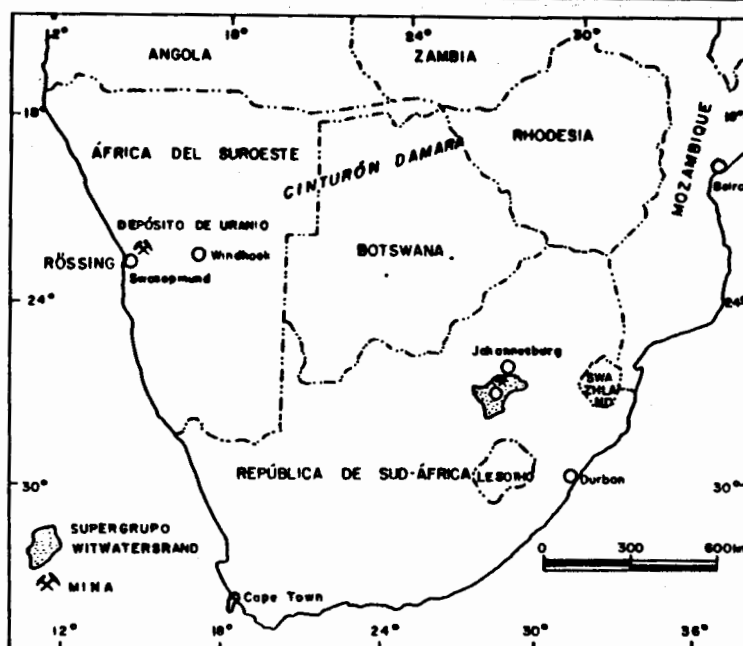


FIG.27-MAPA DE SUD-ÁFRICA QUE MUESTRA LOS DEPÓSITOS DE URANIO RÖSSING EN ÁFRICA DEL SUROESTE.

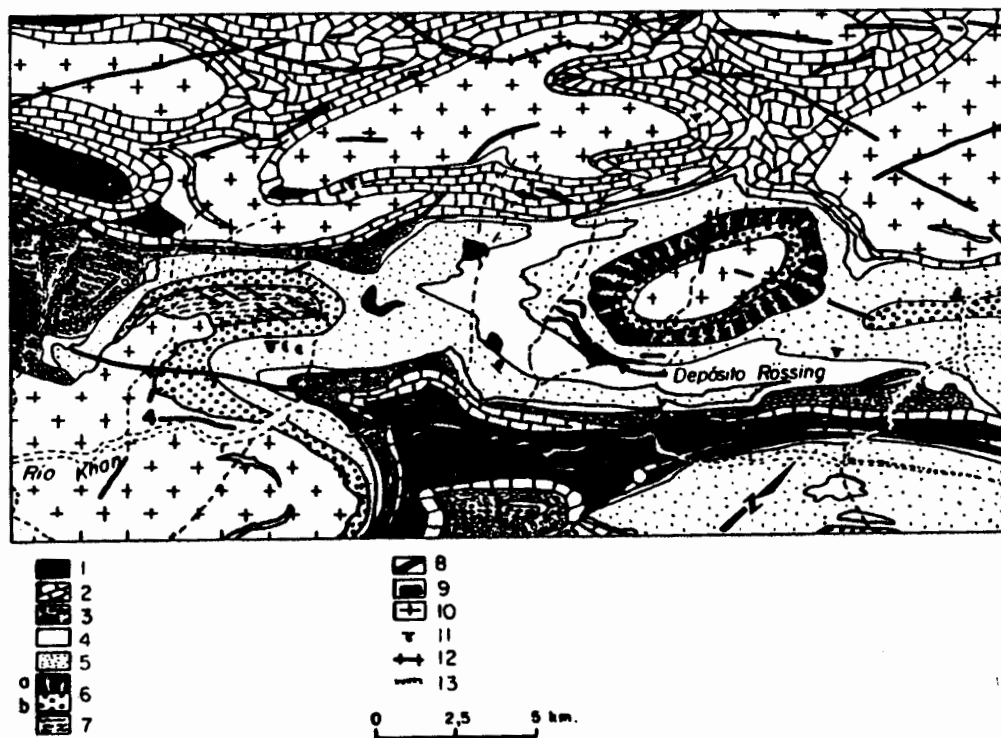


FIG.- 28.- Geología del depósito de uranio Rössing. 1-7 = Supergroup Damara: 1 = Formación Khomas; 2 = Formación Welwitch; 3 = Formación Chuas; 4 = Formación Rössing; 5 = Formación Khan; 6 = Formación Elus (a = Gneis de biotita; b = Cuarzo feldespático); 7 = Formación Abbabis; 8 = Diques de dolerita (Post-Karoo); 9 = Granito pegmatítico; 10 = Gneis-granito y granito. 9 o 10 = Sin o Post-Orogenia. 11 = Rumbo y echado de la foliación; 12 = Vías de ferrocaril; 13 = Ríos. (Berning et al, 1976 in Rich et al. 1977).



encuentran solamente en los intrusivos alasquíticos, siendo éste el único control conocido de la mineralización. La uraninita es el mineral principal de uranio. La monazita también se encuentra asociada a la mineralización uranífera.

#### 5.8. DEPOSITOS TIPO CALCRETA

Grandes depósitos conteniendo más de 46,000 tons. de  $U_3O_8$  ocurren en Calcretas (caliche) en Yeelirrie, Australia Occidental (Fig. 29) (Nash, -- 1978).

La calcreta es caliza formada por agua subterránea poco profunda (Fig. -- 30). Generalmente se encuentra bien cementada, con algunas capas laminares separadas por capas de material grueso con cavidades lenticulares. Es de grano muy fino, blanca, café clara o gris y textura de porcelana. En algunas ocasiones tiene apariencia de brecha.

Las calcretas son porosas y muy permeables como acuíferos. Estas pueden descansar sobre superficies de erosión, sobre la roca firme o sobre gravas aluviales con cemento de calcita (Fig. 31). En Yeelirrie la carnotita rellena fracturas y cubre cavidades así como también se le observa en las superficies de la calcreta.

Las calcretas con carnotita se presentan en canales aluviales donde las corrientes se obstruyen a sí mismas con su carga, a tal grado que el drenaje subterráneo y la evaporación prevalecen. (Langford, 1974).

Existen lateritas y caolinita en aquellas áreas donde se ha registrado un largo período de fuerte intemperización química bajo condiciones calientes y húmedas. Este desarrollo de lateritas se llevó a cabo a principios de la Era Terciaria. Contienen nódulos de óxidos de fierro hidratados, - con aluminio y 1120 ppm de vanadio. Estas lateritas son la fuente de vanadio para las carnotitas.

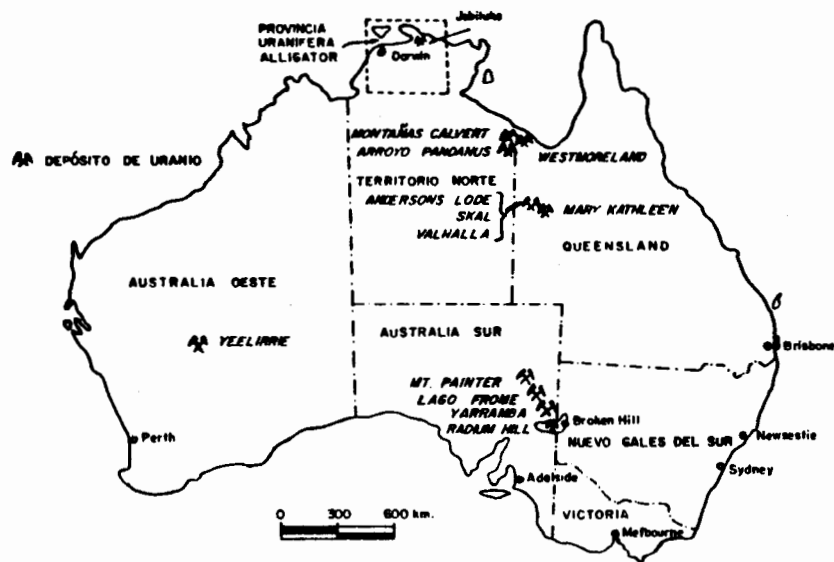


FIG.29.-MAPA DE AUSTRALIA CON LOS MAYORES DISTRITOS URANÍFEROS.  
Bailey y Childars (1977).

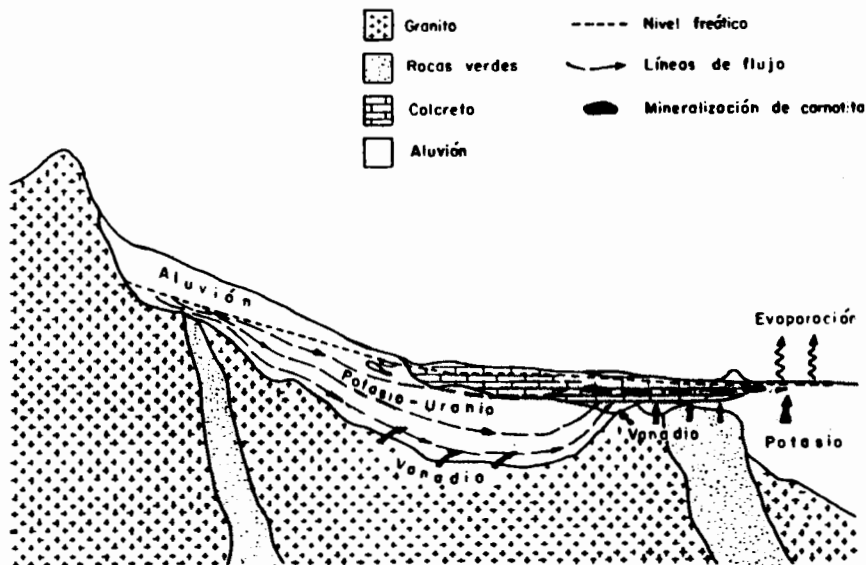


FIG. 30.- Sección esquemática siguiendo el drenaje y mostrando el control reductor en la génesis de la carnolita en un depósito tipo colcreto. (A.W. Mann and R. L. Deutscher, 1978).

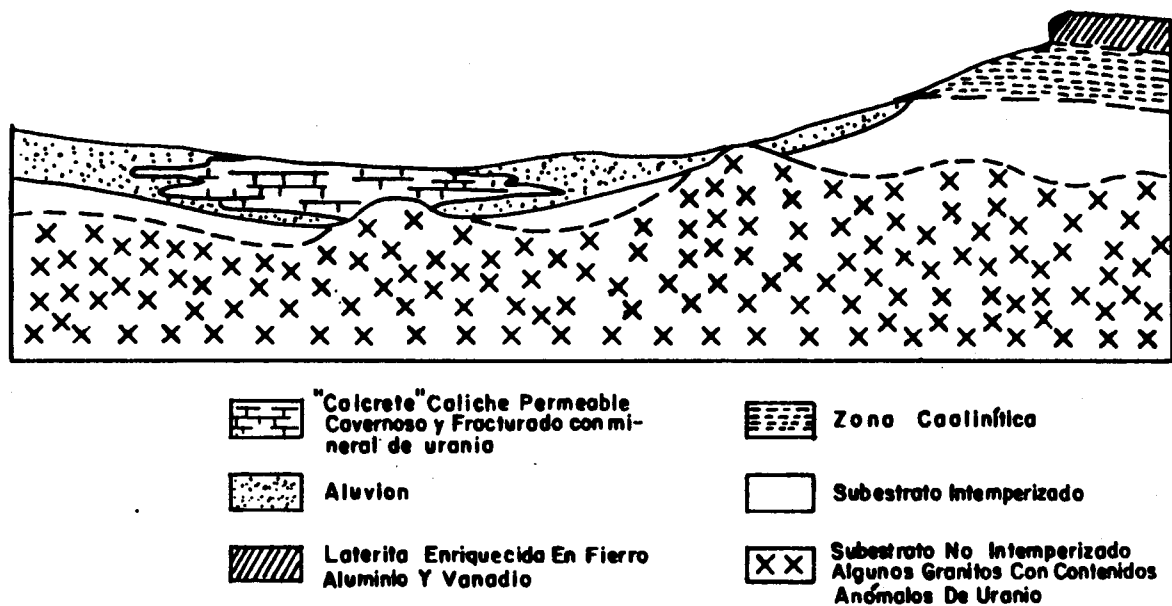


FIG. 31

Sección Esquemática De Un Depósito De Uranio Tipo "Calcrete" Típico De Yeelirrie En Australia Occidental (Langford, 1974)

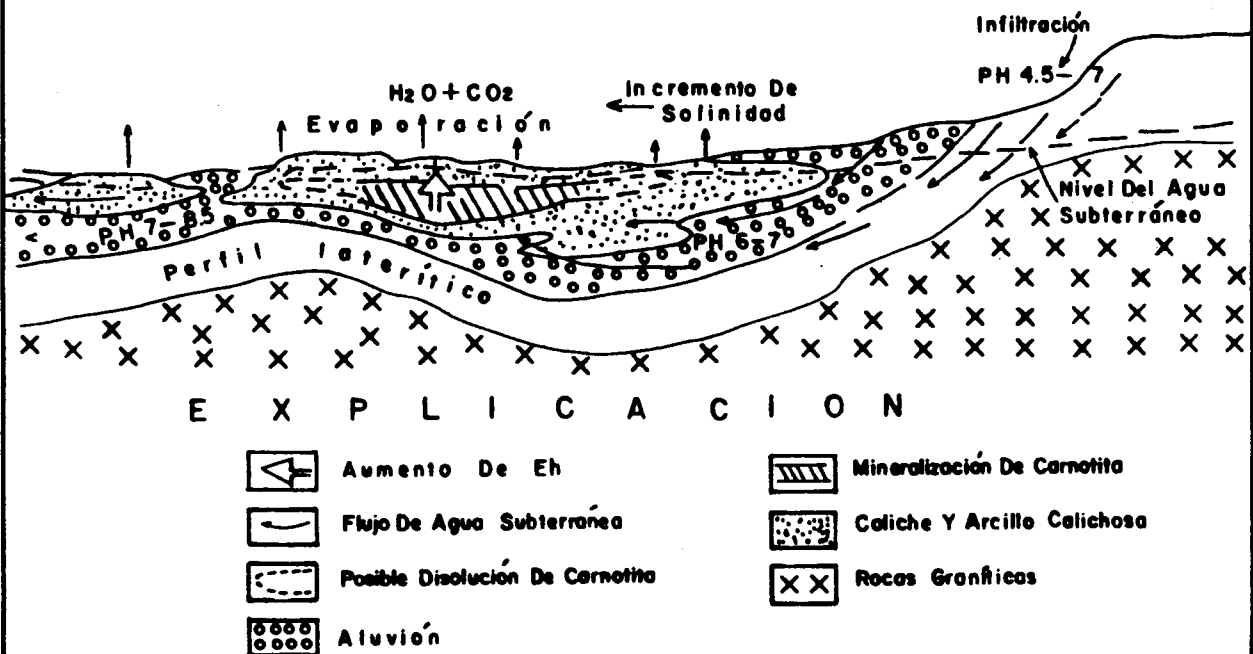


FIG. 32

Modelo Esquemático De Mineralización De Uranio En Calcreta Yeelirrie Australia Occidental (Mann, Carlisle, 1978)

Una buena fuente para el uranio y el potasio que se requieren para la precipitación de carnotita son los granitos fuertemente intemperizados del área (Fig. 32). Algunos de los granitos de Yeelirrie son anómalos en cuanto a su radioactividad.

En resumen, los depósitos de carnotita tipo calcrete de Yeelirrie parecen haberse formado como resultado de intensa intemperización química de terrenos graníticos, seguida por un cambio en el clima de caliente y húmedo a caliente y árido (con una sabana intermedia). La concentración inicial de vanadio en las lateritas pudo haber sido un factor esencial para las condiciones químicas que generaron la precipitación de carnotita en la calcreta.

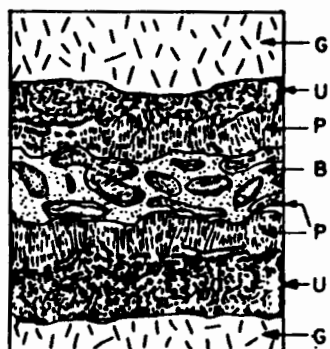
#### 5.9. DEPOSITOS CONTROLADOS POR ESTRUCTURAS O FRACTURAS (VETAS Y DEPOSITOS SIMILARES).

##### a) El Macizo Central francés.

En Francia existen importantes depósitos en vetas en intrusivos en la Provincia de Limousin, al W del Macizo Central (Fig. 33), fueron descubiertos en 1948 como filones de pechblenda, en una zona de forma más o menos elíptica constituida de intrusivos graníticos hercinianos (315 M.A.), rodeados de rocas metamórficas del Paleozoico. En ocasiones estos cuerpos están cortados por lamprófidos (Marquina, 1978).

Algunos de los granitos son fértiles (15 a 20 ppm U) y son los que tienen la mineralización de uranio. Estos intrusivos se desarrollan en series muy metamórficas, a veces migmatíticas, reactivadas durante la orogenia Herciniana.

No todos los granitos son favorables a la mineralización uranífera, solamente los que tienen dos tipos de mica o solo biotita (Figs. 34 y 35), asociados a granitos de muscovita que presentan las condiciones de mineralización. La muscovita favoreció la expresión del uranio bajo la forma de uraninita (el uranio presente en forma de uraninita en los minerales -



Veta Henriette La Crouzille,  
Haute-Vienne, Francia G = granito  
U = Uranita P = Sulfuros de fierro  
B = Barrois (Xl) (Según Gellroy y Sarcio,  
1954 in Heinrich, 1958).

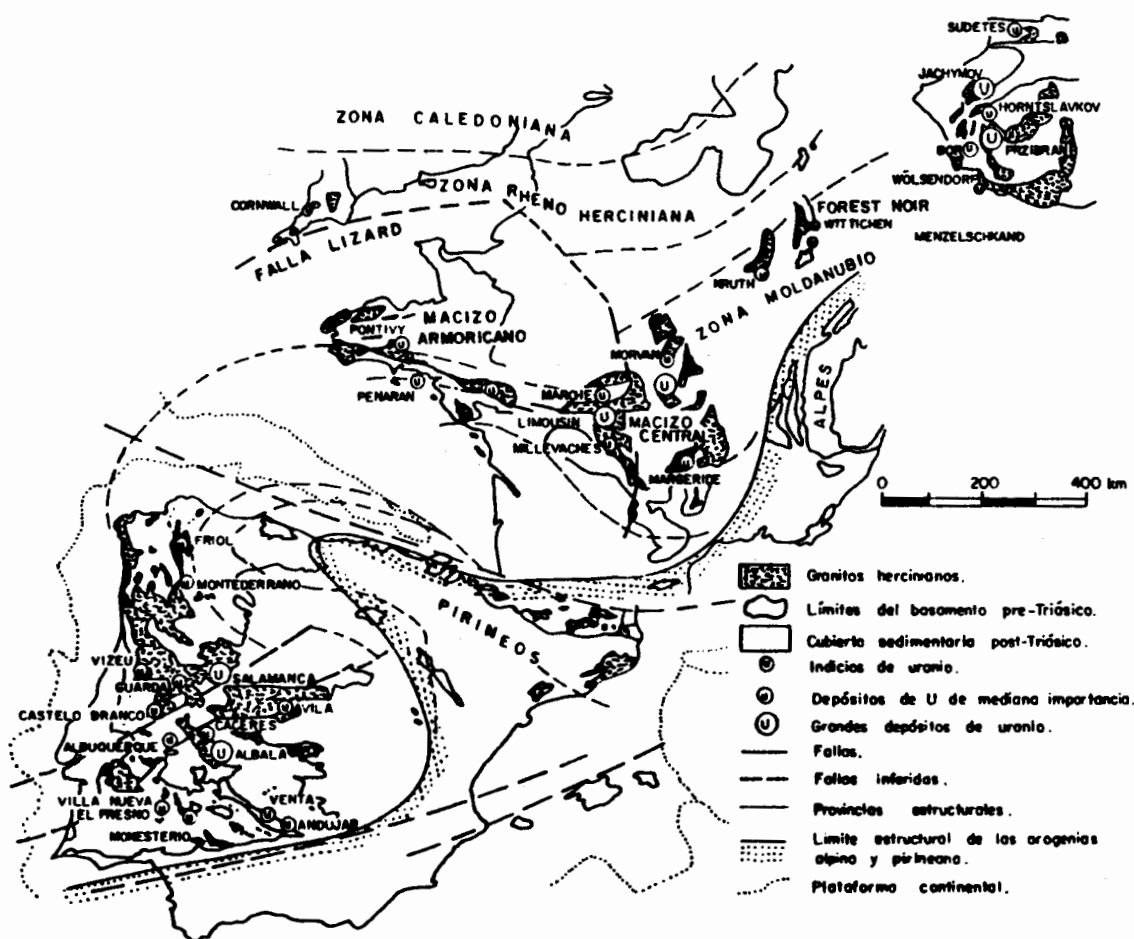


FIG- 33.- Localización de los depósitos de uranio en vetas en la Cadena Herciniana de Europa Central. Reconstrucción tectónica según Matte (1974). (Caney Michel, 1978).

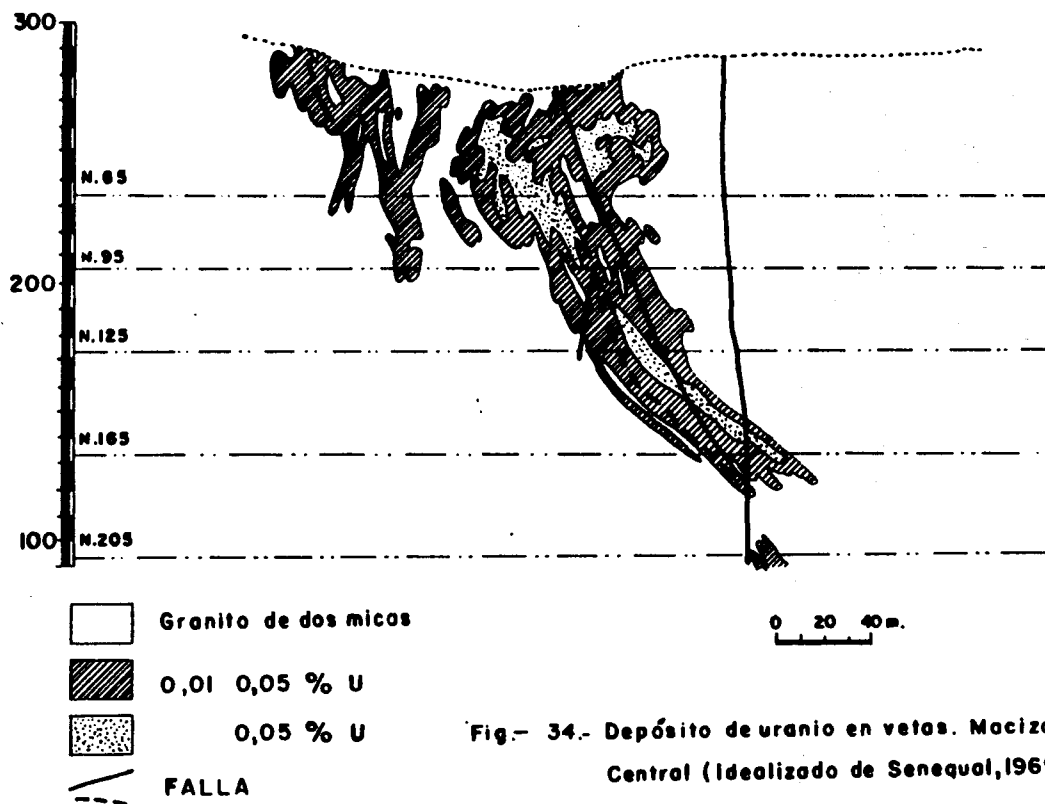


Fig.- 34.- Depósito de uranio en vetas. Macizo Central (Idealizado de Senequal, 1969 in Dahlkamp, 1980).

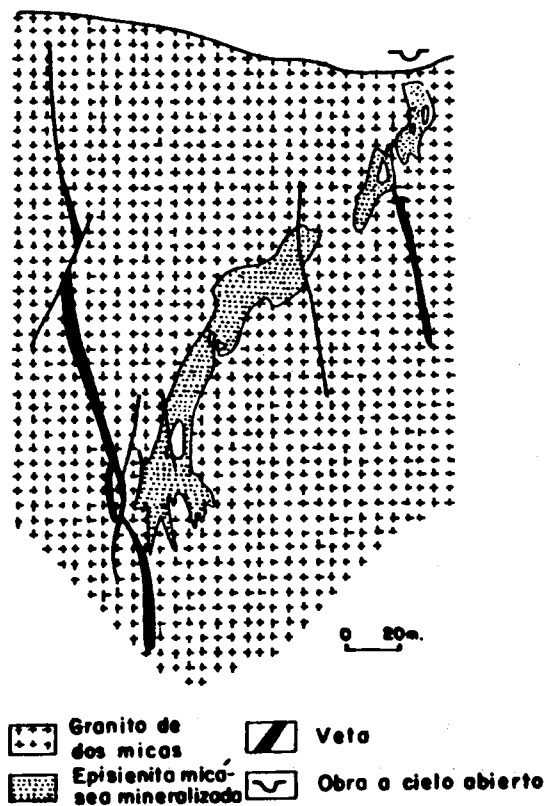


Fig.- 35.- Mineralización de uranio en la Mina Margnac, Francia: la sección muestra a la episienita micácea cortada por vetas (Le Roy, 1978).

accesorios del granito de dos micas es transportado por el fenómeno de muscovitización de los lugares refractarios a los de lixiviación).

La reconstrucción de eventos es como sigue (Leroy, 1974) :

- Solidificación del granito (360 M.A.)
- Fenómenos deutéricos precoces, muscovitización que transfiere al uranio de sitios refractarios a sitios de lixiviación (315 M.A.).
- Episienitización feldespática (desilicificación del granito).
- Filones de lamprófidos (286 M.A.) y episienitización micácea.
- Depósito de uranio (Pechblenda).

La mineralización de uranio se ubica principalmente en fracturas de dirección noroeste posteriores a las fallas mayores de carácter regional.

El depósito de uranio en el granito San Silvestre del Macizo Central, fue recientemente descubierto por Leroy (1978), en él se han probado 20 000 tons. de metal de uranio.

Este granito se emplazó en el Devónico Medio en esquistos y gneises. Consiste de : granito foliado de biotita - silimanita (Brame) y granito no foliado de dos micas y cuarzo granular (Saint-Sylvestre); se interpretan como las facies inferior y superior respectivamente del mismo granito.

La facies superior con cuarzo-biotita-muscovita-ortoclasa-albita se piensa que fue formada durante la alteración post-magmática incluyendo la muscovitización y la albitización.

La mineralización de uranio con muscovitización y silicificación asociadas, ocurre principalmente en forma de chimeneas en la intersección de los conjuntos de fallas E y N, y en las vetas NW que se relacionan con las fallas más jóvenes. La mineralización y la muscovitización se consideran de la misma edad que las intrusiones del microgranito y de los diques lamprofíricos, los cuales son paralelos al tren de fallas más antiguas y se dataron -

en  $285 \pm 10$  M.A. ó Pérmico Inferior coincidiendo con el final de la orogenia herciniana.

El uranio ocurre cerca de la base del granito San Silvestre el cual contiene 20 ppm de uranio en esta zona.

La mineralización en las vetas y chimeneas es de dos tipos, en filón y diseminada de las cuales la primera es mucho más importante económicamente. Los minerales son pechblenda, cofinita y minerales secundarios de uranio. La muscovitización asociada enmascara la transformación o solución de los minerales graníticos aparte de la muscovita, con alteración completa de biotita y plagioclasa, muscovitización parcial de la ortoclasa, y disolución de todo o la mayor parte del cuarzo.

Se considera que el uranio fue disuelto del granito por, y transportado en, soluciones no magnéticas ricas en  $\text{CO}_2$ , que circulaban como resultado del calentamiento de los diques lamprofídicos; ascendiendo a través del granito, las soluciones entraron en las vetas precipitando la pechblenda.

El emplazamiento del granito mineralizado, con el cual están asociadas pegmatitas y filones de cuarzo con estaño y tungsteno, tuvo lugar durante la etapa de mayor metamorfismo de la orogenia herciniana, y el granito es considerado como anatóctico.

El granito de San Silvestre contiene los yacimientos de Limousin.

#### b) Otros ejemplos.

Algunos de los yacimientos de uranio más grandes y de más alta ley que se han encontrado recientemente consisten de rellenos de fisuras tipo stockwork, rellenos de brechas, y reemplazamientos parciales en rocas metamórficas y en rocas sedimentarias bien consolidadas. Muchas de estas ocurrencias parecen estar controladas en parte por la litología, aunque el control más importante es estructural. Las rocas dominantes tienen bajo potencial de



oxidación, siendo similares a las de los depósitos estratiformes que se mencionaron anteriormente. Las rocas huéspedes más comunes son lutitas negras carbonosas, pizarras, esquistos y filitas. Las rocas carbonatadas con minerales arcillosos y micas también son huéspedes favorables. Además del carbón, otros agentes reductores son la pirita, marcasita y otros sulfuros.

La mayor parte de los depósitos más grandes y de mejor ley ocurren en rocas metasedimentarias del Proterozoico Inferior, sujetas a deformación intensa durante o antes de la mineralización. Los complejos de fisuras mineralizadas son generalmente alargados y tienen fuertes echados.

El fracturamiento o brechamiento y su mineralización asociada generalmente no persisten a profundidades mayores de 300 m., sin embargo hay excepciones importantes a esta regla, tal como en Schwartzwalder en Colorado, Beaverlodge en Saskatchewan, Canadá y Jabiluka en Australia.

En casi todos los depósitos controlados por fisuras, el único mineral de importancia bajo la zona de intemperismo es la pechblenda. Este mineral generalmente ocurre como rellenos terrosos negros o masivos o como cubiertas botroidales, aunque también se ha observado uraninita cristalina. Usualmente el cuarzo o calcita se presentan como mineral de ganga en las vetas, junto con cantidades menores de sulfuros tal como la pirita. La hematita es muy común en las rocas alteradas.

Los depósitos más grandes y más importantes se localizan en el Norte de Australia y en la porción Norte de Saskatchewan, Canadá.

Seis distritos uraníferos con pechblenda en fisuras y brechas se han descubierto en el territorio del Norte de Australia. La Provincia de Rum-Jungle-Alligator River (Fig. 29) incluye cinco depósitos importantes con una reserva agregada de aproximadamente 450 000 tons de  $U_3O_8$ . Todos los cuerpos importantes ocurren en esquistos cloríticos y carbonosos o lutitas carbonosas y limolitas del Paleozoico Inferior. La pechblenda rellena fisuras y cavidades a lo largo de fallas, cizalladuras y brechas.

Otros cuerpos de alta ley y tonelaje de uranio que ocurren como relleno de fisuras, stockworks, brechas de pechblenda y vetas de pechblenda ferruginosa se encuentran en las rocas del Proterozoico Inferior y del Arqueano del Norte de Saskatchewan, Canadá.

Los siguientes cuatro distritos contienen la mayoría de las reservas de uranio : Beaverlodge (Uranium City), Cluff Lake, Rabbit Lake y Key Lake.

El Distrito de Cluff-Lake incluye tres cuerpos conocidos, los cuales se encuentran localizados en la porción sur del domo Carswell en la cuenca de Athabasca. El núcleo interno de la estructura de Carswell tiene 18 Km de diámetro y consiste de rocas metamórficas leucocráticas y un poco de anfibolitas del Arqueano y Proterozoico Inferior.

La periferia de la estructura de Carswell se ha hundido a lo largo de una falla anular de aproximadamente 40 Kms de diámetro.

La mineralización de uranio en Cluff-Lake es principalmente pechblenda y uraninita, que ocurren junto con telururos de oro, oro nativo, cobalto, níquel y otros sulfuros. Algo de la mineralización ocurre tanto en el basamento de rocas metamórficas como en arenitas y pelitas más recientes (Athabasca); sin embargo la mayor parte del mineral está en stockworks, a lo largo de zonas de cizalladura armando en las rocas metamórficas leucocráticas del Arqueano y Proterozoico Inferior, cerca de la discordancia pre-Athabasca. Las zonas de cizalladura mineralizadas están generalmente cloritizadas y son grafitosas. La edad de la mineralización de uranio se ha fijado en 1100 M.A. a 1400 M.A., aproximadamente contemporánea a la deposición de la Formación Athabasca. Las reservas estimadas en Cluff-Lake son 18000 tons de  $U_3O_8$ .

La mayor parte de los depósitos de Saskatchewan se descubrieron mediante exploración radiométrica, que detectó anomalías en los depósitos glaciales sobre las ocurrencias en roca firme.

Mapeo de campo y barrenación fueron necesarios para confirmar la presencia del mineral.

## CAPITULO 6

### Uranio en México

#### a) Introducción

Inicialmente, la exploración del uranio en la República Mexicana se fundamentó en el conocimiento de algunos de los tipos de yacimientos descritos, ocasionando ésto que ciertos ambientes geológicos fueran descuidados, como es el caso de las rocas volcánicas.

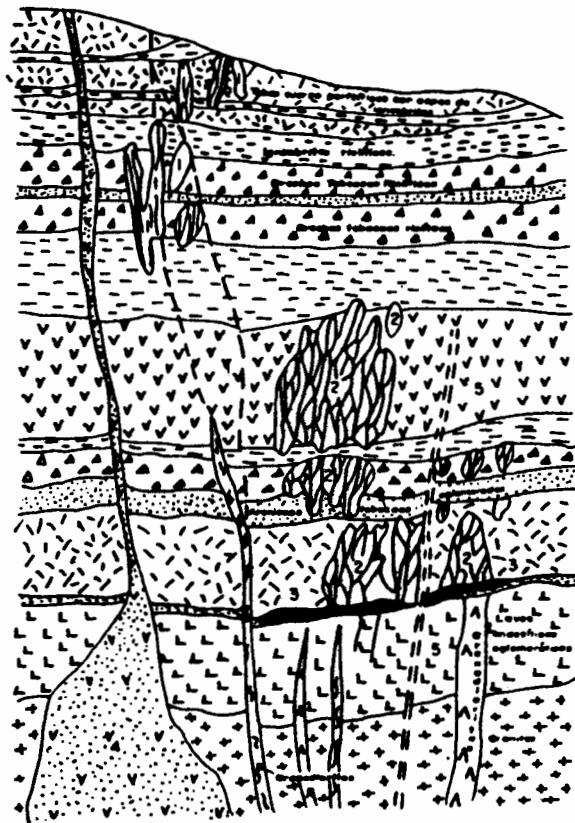
La exploración del uranio en México se orientó originalmente hacia las -- áreas que representan la continuidad hacia el Sur de los depósitos más importantes de los Estados Unidos, excepto Grants, descubriéndose así el yacimiento de "La Coma" que es una prolongación de los del Sur de Texas.

En Chihuahua fueron encontradas importantes manifestaciones como las de -- Sierra de Gómez y el Calvario, sin embargo fueron las rocas volcánicas, -- sin antecedentes hasta entonces, las que dieron mejores resultados, descubriéndose así los depósitos de la Sierra Peña Blanca que hasta el momento constituyen uno de los más grandes yacimientos de uranio en nuestro país y sirve de ejemplo o guía para la exploración en ambientes semejantes en -- otras naciones.

Para México ésto es de suma importancia, considerando que aproximadamente el 30% de la superficie del país se encuentra constituido por rocas volcánicas ácidas.

Dentro de este tipo de rocas es posible encontrar depósitos uraníferos como los descritos en la figura 36 que incluyen : vetas, fisuras, red de fisuras "stockworks", mantos y diseminaciones en intrusivos ácidos.

A continuación se hace una breve descripción de los principales yacimientos de uranio de la República Mexicana; éstos son los que hasta la fecha -- han despertado un mayor interés y han sido, incluso, cuantificadas sus reservas.



**FIG. 36.- TIPOS DE YACIMIENTOS EMPLAZADOS EN ROCAS VOLCÁNICAS**

- 1) VETAS; DESARROLLADAS EN HORIZONTES SUPERIORES
- 2) STOCKWORKS; EN HORIZONTES INTERMEDIOS
- 3) CUERPOS INTERESTRATIFICADOS, EN HORIZONTES INFERIORES
- 4) DISEMINACIONES EN INTRUSIVOS PÉLICOS
- 5) FRACTURAS MINERALIZADAS

b) Yacimiento de uranio "Peña Blanca", Chihuahua, México.

En 1928, en Placer de Guadalupe, se identificó uraninita asociada a oro, con ésto se determinó la primera localidad en la República Mexicana de dicho material radiactivo (Iparrea, V. 1969).

A partir de 1959 se descubrieron localidades uraníferas en calizas; emprendiéndose en 1968 exploración de tipo aeroradiométrico, siendo encontradas con este método 55 zonas con radioactividad anómala; de éstas el 75% fueron manifestaciones de uranio y 4 se definieron como depósitos atractivos (Díaz-Velarde, 1969).

Entre 1959 y 1964 se abrieron dos minas de importancia: Sierra de Gómez y El Calvario. Estos depósitos consisten en minerales secundarios de uranio en cuerpos irregulares de reemplazamiento a lo largo de fracturas, mantos y bolsas alojadas en calizas del Cretácico Inferior (Iparrea V., 1969).

Los depósitos de uranio de la Sierra Peña Blanca, cercanos a los anteriores, se encuentran al NE del Estado de Chihuahua, en el extremo oriental de la Sierra mencionada, en el Municipio de Aldama. Sus coordenadas geográficas son: 29°04' Latitud Norte y 106°03' Longitud Oeste del meridiano de Greenwich (Fig. 37).

La Sierra de Peña Blanca está constituida por una secuencia de rocas que abarcan desde el Paleozoico hasta el Terciario, de origen sedimentario y volcánico (Fig. 38).

Las rocas más antiguas están representadas por areniscas, lutitas y calizas del Pérmico; la Formación Edwards, del Cretácico Inferior, consiste de calizas de tipo arrecifal; la Formación Buda está constituida de lutitas, margas, areniscas y bancos de calizas del Cretácico Superior; las Tobas Cuervo sobre yacen discordantemente a la Formación Buda y están representadas por tobas de diferente composición (Rodríguez T. et al, 1976).



The authors thank the referees for their constructive comments and suggestions. This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11771371) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11771371).



The authors thank the referees for their constructive comments and suggestions. This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11771371) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11771371).

Esta secuencia está cubierta por formaciones del Terciario como la Pozos que es un conglomerado compuesto por material volcánico y sedimentario; la Corrales que está formada por derrames riolíticos, tobas y conglomerados calcáreos; la Nopal, constituida por dos miembros, uno riolítico y otro tobáceo; la Escuadra compuesta por dos miembros, el inferior consistente de tobas y conglomerado y el superior que está representado por derrames riolíticos (Rodríguez T. et al, 1976).

La mineralización uranífera se sitúa en el borde oriental de la Sierra de Peña Blanca, en donde se han identificado varios depósitos que en realidad pertenecen a uno solo, de entre los cuales resaltan: El Nopal I, II y III, La Brecha, El Puerto, Las Margaritas y otros que fueron en su mayoría descubiertos por prospección aero-radiométrica (Fig. 39).

De entre la mineralización es difícil encontrar el mineral primario de uranio (uraninita y pechblenda). En estos yacimientos son más frecuentes los minerales secundarios en altas concentraciones: uranofano, betauranofano, weckzita, carnotita, tyamunita y autunita.

El cuerpo El Nopal I, se encuentra en la Formación del mismo nombre, alojado en una chimenea vertical que corresponde a una brecha de hundimiento. La mineralización primaria se encuentran en los niveles oxidados, dispersa en la sílice de una ignimbrita riolítica muy silicificada. Los minerales secundarios, silicatos hidratados tales como uranotilo, se encuentran en la parte inferior de tobas menos consolidadas.

La mineralización tuvo lugar al mismo tiempo que el inicio de la alteración hidrotermal provocando una precipitación de sílice del vidrio y feldespatos, que concentró la mineralización primaria, rodeándola en una matriz silícea, impidiendo así su oxidación y lixiviación.

En las minas Nopal II y III el uranio está concentrado en el límite entre las ignimbritas soldadas y las tobas, en un horizonte argilitizado. La alteración hidrotermal es menos intensa, afectando únicamente la matriz vítrea -

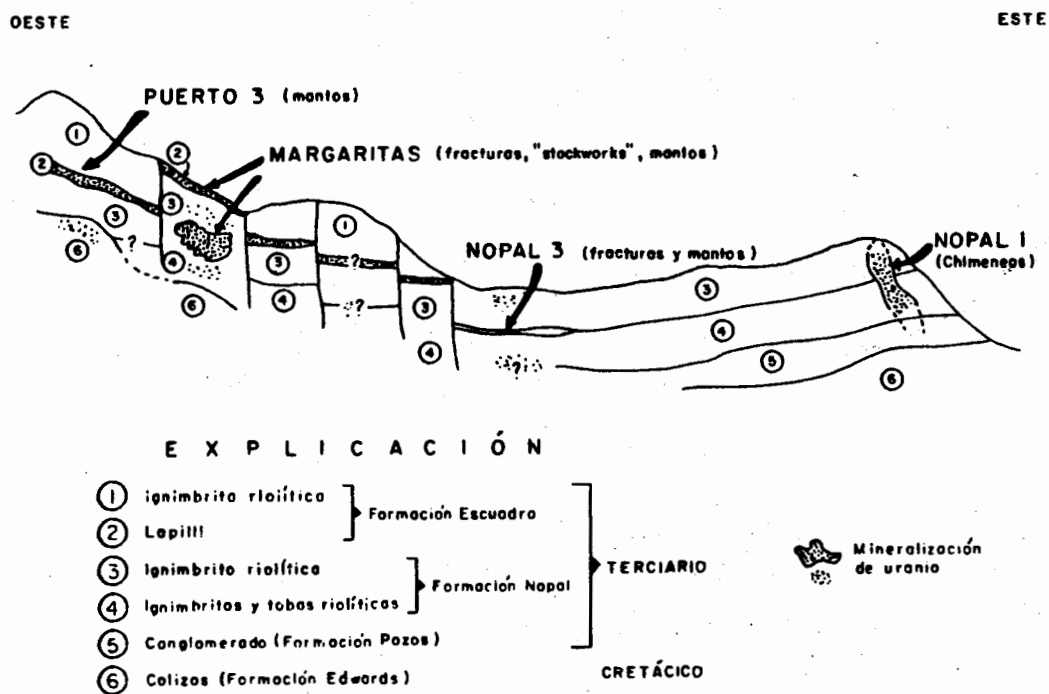


FIG 39.-SECCIÓN IDEALIZADA DE LA PARTE CENTRAL DE LA SIERRA PEÑA BLANCA, EDO. DE CHIHUAHUA.  
(Chávez, R. 1964, comunicación personal)



intersticial; el uranofano rodea a los feldespatos y puede proceder de la lixiviación de otro yacimiento cercano.

En la mina Las Margaritas la mineralización de uranio está en la base de las tobas de la Formación Escuadra, en las riolitas y tobas de la Formación El Nopal y en calizas de la Formación Edwards, a lo largo de fracturas o fallas con desarrollo de una mineralización de cuarzo - fluorita - yeso.

Las leyes son variables, de 0.09% a 0.20% de  $U_3O_8$ . Las reservas calculadas, sumando los depósitos más importantes son de 2316 tons de  $U_3O_8$  (Castillo, 1986).

c) Depósito de Uranio "Los Amoles", Sonora, México (Chávez, J.M., 1980).

Se sitúa en la vertiente occidental de la Sierra de Aconchi, aproximadamente al centro del Estado de Sonora (Fig. 40), en el borde oeste del batolito grano-diorítico de Aconchi, en contacto con una traquiandesita silicificada. La sierra pertenece a la Subprovincia conocida como de Sierras y Valles Paralelos, que está dentro de la Provincia de la Sierra Madre Occidental.

La Sierra de Aconchi está formada por un volcanismo Cretácico Superior - Terciario, de composición intermedia a ácida y por rocas de naturaleza granítica de edad Cretácico Superior que comenzaron a emplazarse en la costa occidental del Estado de Sonora, migrando hacia el E cesando su actividad durante el Terciario Inferior (Fig. 42).

La encajonante de la mineralización es una roca feldespática alterada, de edad Cretácico Superior, de composición traquiandesítica, con cantidades considerables de leucoxeno, recrystalizada y devitrificada por soluciones hidrotermales provenientes del cuerpo granítico que la intrusiónó.

La alteración de la roca es principalmente cuarzo-sericita, los feldespa-

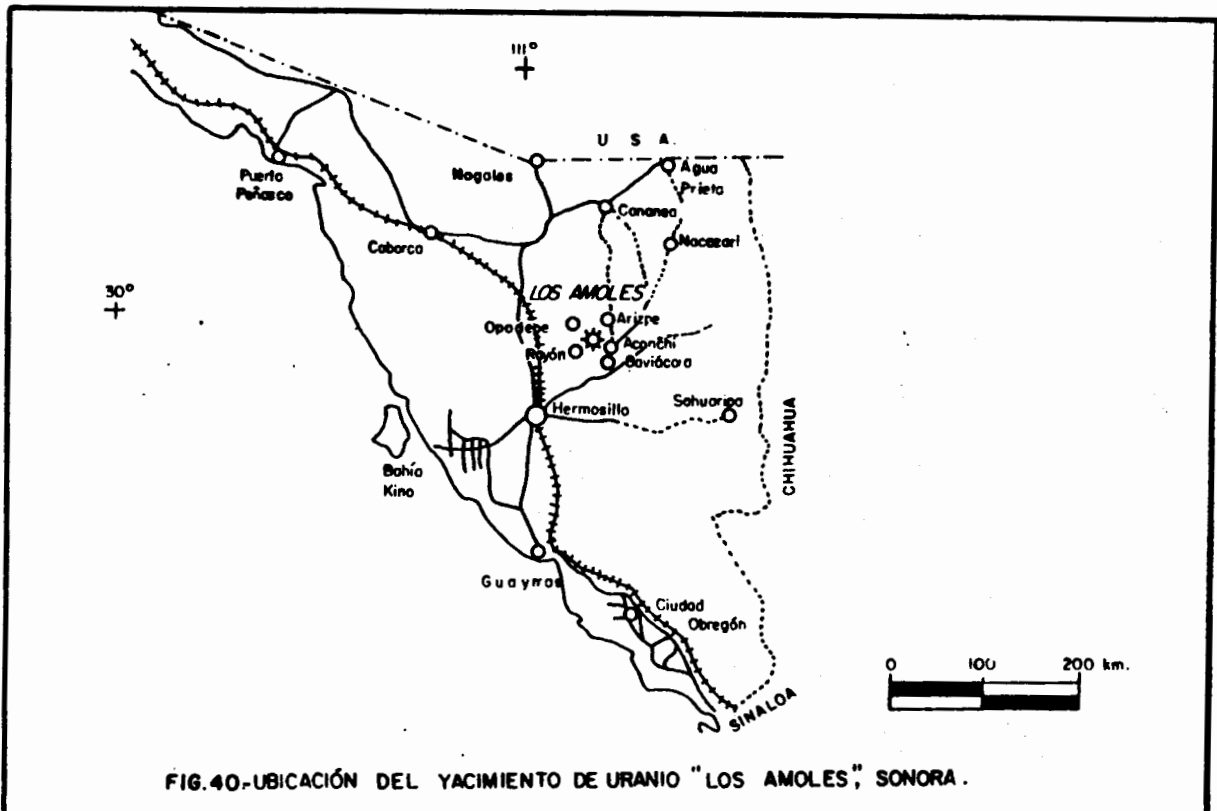


FIG.40-UBICACIÓN DEL YACIMIENTO DE URANIO "LOS AMOLES", SONORA.

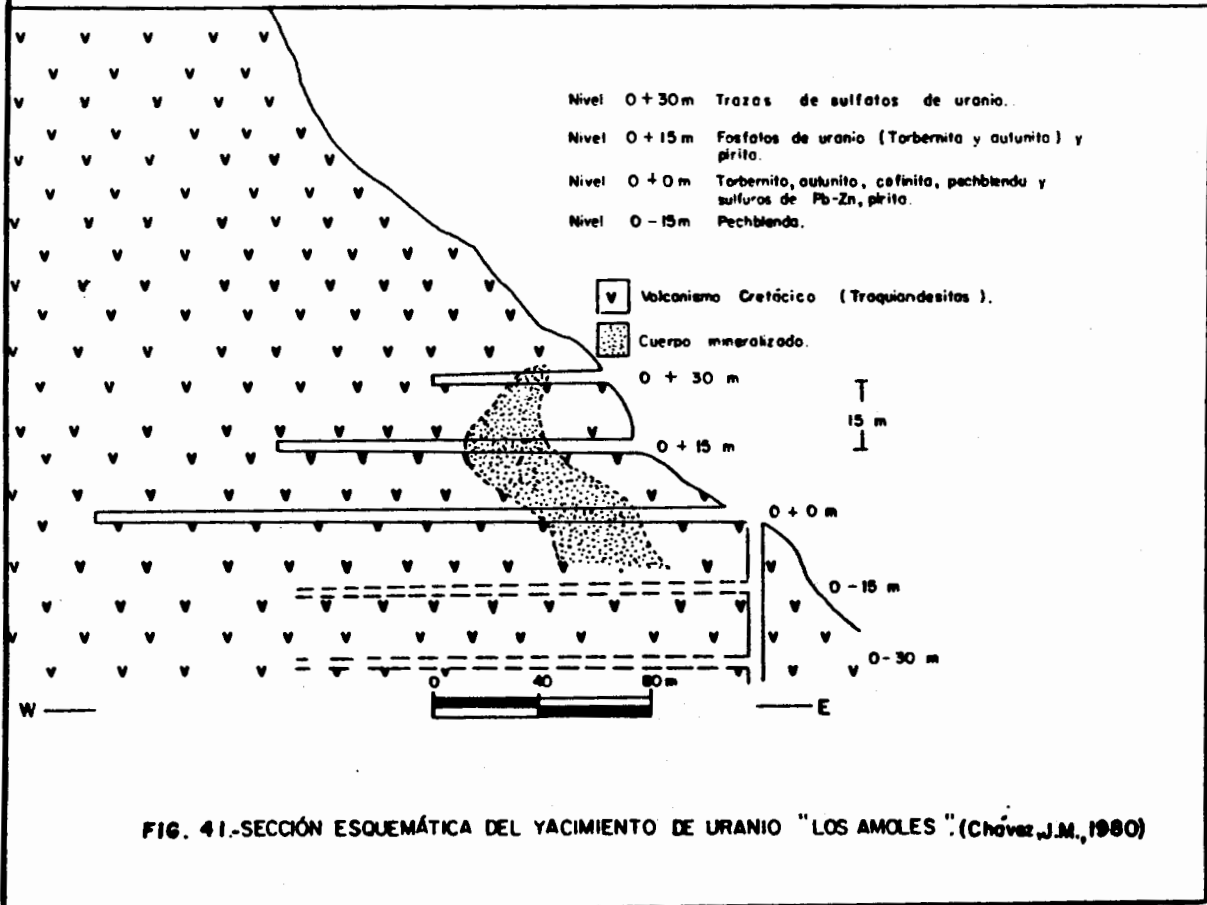


FIG. 41.-SECCIÓN ESQUEMÁTICA DEL YACIMIENTO DE URANIO "LOS AMOLES". (Chávez, J.M., 1980)

| LITOLOGÍA                                                                          | PERÍODO       | É P O C A          | DESCRIPCIÓN                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | CUATERNARIO   | PLEISTOCENO        | Aluvión                                                                                  |
|                                                                                    |               |                    | Conglomerados                                                                            |
|                                                                                    | TERCIARIO     | PLIOCENO           | Conglomerados y Talud                                                                    |
|                                                                                    |               | MIOCENO OLIGOCENO  | Lavas riolíticas                                                                         |
|                                                                                    |               | CRETÁCICO SUPERIOR | Lavas andesíticas.                                                                       |
|                                                                                    | CRETÁCICO     | MEDIO              | Calizas metamorizadas en tactitas                                                        |
|                                                                                    |               | JURÁSICO SUPERIOR  | Serie volcano-sedimentaria.<br>andesitas y calizas intercoladas.                         |
|                                                                                    | PÉRMICO       | SUPERIOR           | Calizas metamorizadas en tactitas<br>sobreyaciendo a areniscas cuarzo-<br>feldespólicas. |
|                                                                                    |               |                    |                                                                                          |
|                                                                                    | PRECÁMBRICO ? |                    | Esquistos grafitosos con cuarzo y muscovita.                                             |

- Db** Diques básicos (diorita, dolerito, andesita) (Mioceno)
- Grm** Granito de muscovita (Oligoceno)  $35,96 \pm 0,7$  m. a.
- Rp** Pórfido riolítico (Eoceno)  $50,47 \pm 1,06$  m. a.
- Grb** Granito de biotita (Paleoceno) 64 m. a.

(Chávez, J. M., 1980)

FIG42- COLUMNA ESTRATIGRAFICA DE LA SIERRA DE ACONCHI, SONORA

tos (plagioclasas) están transformados a sericita y a minerales arcillosos por las soluciones mineralizantes; el cuarzo secundario es abundante y se presenta como reemplazamiento en forma irregular en la matriz y como vetillas de cristales xenomorfos.

La mineralización se concentra fuertemente en pequeñas fracturas de la Traquiandesita y en brechas situadas en la proximidad de vetas piritosas. Los minerales asociados en la paragénesis hasta el más joven es como sigue : - blenda, pirita, galena, cobre y pechblenda en una matriz con minerales arcillosos. El cobre se encuentran en inclusiones dentro de la galena, el sulfato de uranio parece que se formó posterior al fracturamiento.

La mina Los Amoles tiene tres galerías orientadas E-W (Fig. 41) que atraviesan un cuerpo mineralizado que tiene en la parte superior sulfatos y fosfatos de uranio en débil cantidad (zippeita, uranospilita, autunita y torbenita); hacia abajo la mineralización es más fuerte, constituida por minerales secundarios y primarios de uranio. El mineral primario (pechblenda) está rodeado siempre por los minerales secundarios, principalmente zippeita y uranospilita.

El origen de la mineralización se atribuye a fluidos hidrotermales provenientes del cuerpo granítico, que afectaron fuertemente una gran parte de la región durante el Terciario Inferior y Superior.

Las reservas se calculan en 1'914.894 toneladas de mineral con una ley de 0.047% de  $U_3O_8$ , lo que da 900 toneladas de  $U_3O_8$  (Castillo, 1986).

#### d) Yacimiento de Uranio "La Coma - Buenavista".

Estos depósitos se encuentran dentro del Estado de Nuevo León, a 60 km. al Sur de la Ciudad de Reynosa, Tamaulipas; sus coordenadas geográficas son : 25°49' y 25°53' de Latitud Norte y 98°40' de Longitud Oeste; con una altitud de 100 m. sobre el nivel del mar (Fig. 43). Pertenecen a la Subprovincia Fisiográfica denominada "Cuenca de Burgos".

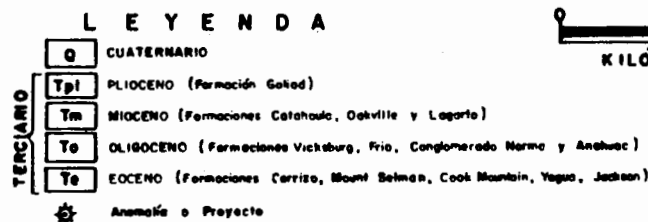
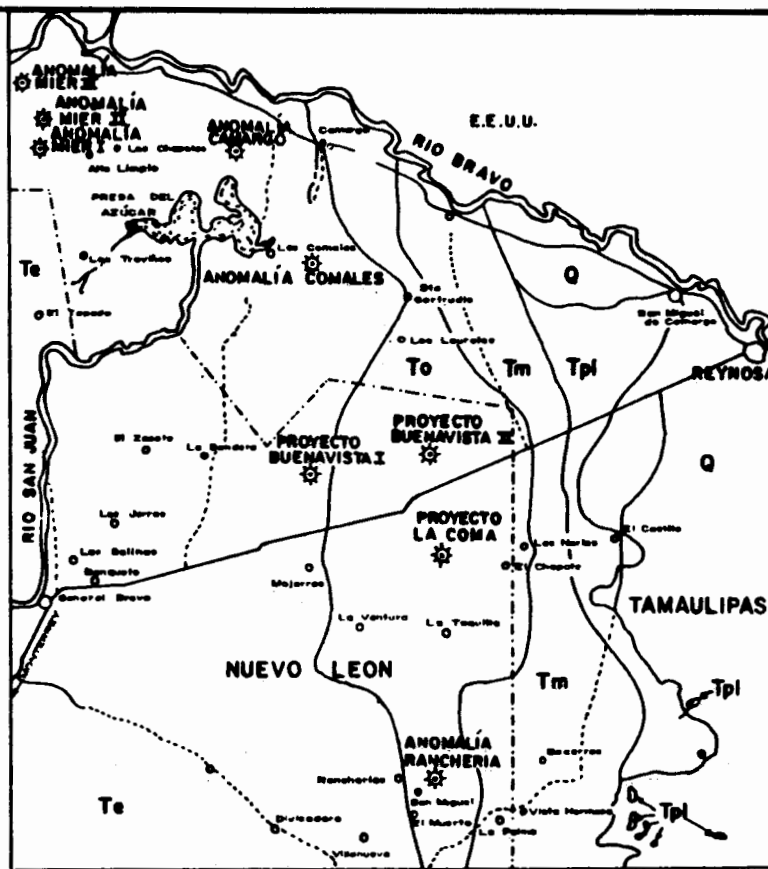


FIG. 43-LOCALIZACIÓN DE ANOMALÍAS RADIOMÉTRICAS Y PROYECTOS URANÍFEROS EN LA CUENCA DE BURGOS

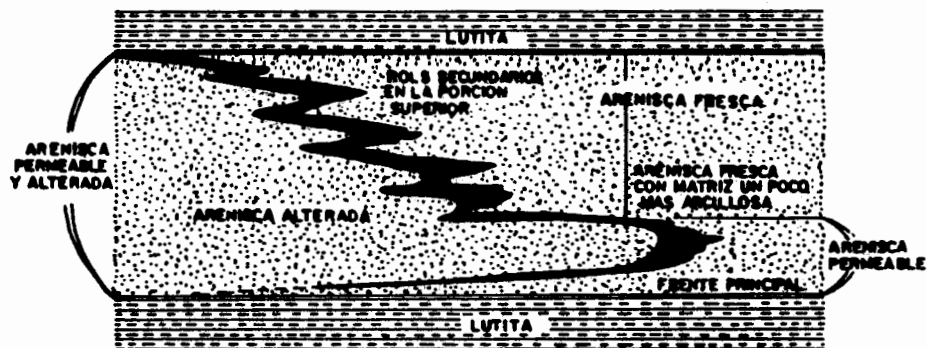


FIG. 44-SECCION DE UN ROL MOSTRANDO EL DESARROLLO DEL MINERAL EN ROLES SECUNDARIOS  
Boiley y Childers (1977)

Regionalmente la Cuenca de Burgos constituye un Geomonoclinall dentro del - cual las estructuras sobresalientes son fallas normales escalonadas, orien - tadas de Norte a Sur con buzamiento al E y anticlinales de abombamiento - muy reducido, con orientación N-S.

La Cuenca de Burgos forma parte de la provincia fisiográfica denominada - Llanura Costera, desarrollada durante el Terciario con 12,000 m de sedimen - tos aportados probablemente por la erosión de la Plataforma del Burro-Pica - chos y por actividad volcánica.

El Terciario se caracterizó esencialmente por una regresión marina con pe - queñas transgresiones, causada por levantamientos de las unidades mesozóí - cas al poniente como producto de la Revolución Laramide y el consecuente - hundimiento del Geosinclinal del Golfo; los diferentes eventos ocurridos - en este período provocaron ligeras pulsaciones en la corteza terrestre, - ocasionando transgresiones y regresiones de un mar que se estaba alejando - del continente (Chávez, J.M., 1974).

Existen manifestaciones de vulcanismo reciente en las Sierras de San Car - los, Cruillas al sur de la Cuenca de Burgos, Cerralvo al NW y en el Big -- Bend al N.

Las Formaciones del Terciario de la Cuenca de Burgos fueron originadas por el transporte de sedimentos del cauce del río Bravo, por transportación - eólica y por el material depositado durante las transgresiones y regresio - nes marinas. Estas formaciones se depositaron probablemente durante o pos - teriormente a un período de vulcanismo del Big Bend, Tex., y en el NW de - México. El material piroclástico de los volcanes migró hacia el E y cu - brió una gran parte del NE de México y Texas. Las lluvias erosionaron -- gran parte de la ceniza volcánica transportándola en forma de flujos de lo - do que siguieron la paleopendiente hacia el SE.

El yacimiento "La Coma" se descubrió en 1964 por exploración aero-radiomé - trica; tiene una longitud aproximada de 6 Km y una anchura de 5 a 500 m; -

el espesor promedio de las lentes mineralizadas es de 0.80 m, éstas se encuentran bajo la forma de cuerpos lenticulares horizontales con características semejantes a las de los depósitos de Tipo "Rol" (Fig. 44).

La mayor parte de los altos radiométricos que se han detectado en "La Coma" coinciden con bordes de flexuras cóncavas hacia el Este, que llegan a formar cierres estructurales horizontales.

Los minerales primarios de uranio están representados por la uraninita y los secundarios por la cofinita; están asociados con pirita y carbón.

Las rocas que constituyen el yacimiento son en general areniscas, lutitas y tobas de edad Oligoceno Medio al Mioceno. El depósito en sí, se encuentra en la Formación Frío, Miembro No Marino, constituido por areniscas de grano fino a medio, conteniendo trazas de pirita, anhidrita y materia orgánica. Esta formación está cubierta por el Conglomerado Norma y por la Formación Catahoula, la cual está constituida de areniscas de grano fino, lutitas plásticas de color gris verdoso a café, tobas y cenizas (Pérez, S. - 1973).

El Miembro No Marino de la Formación Frío, se considera como un depósito de ambiente deltaico, ubicado en el flanco norte de una estructura simétrica representada por un cambio gradual en sus capas de NW-SE a NE-SW, que concuerda con una distribución simétrica de las concentraciones uraníferas.

Los cambios laterales de facies de la Formación Frío están representados por acuñaamiento de algunas capas arenosas y por el comportamiento lenticular de los cuerpos de conglomerados lodolíticos, interrupción de continuidad lateral del relleno de un paleocauce. Verticalmente es posible reconocer etapas cíclicas en el depósito de esta formación.

Los cuerpos mineralizados se encuentran contenidos en un horizonte litarenítico, que presenta intercambios de delgados horizontes de arcillas; su

forma es de cuerpos tabulares peneconcordantes alargados en sentido NE-SW.

En cuanto al origen de la mineralización, los trabajos de algunos geólogos sugieren que de las rocas tobáceas miocénicas, procedentes de la región de rocas ígneas alcalinas de la zona del Big Bend y del Estado de Chihuahua, se derivó el uranio que actualmente se encuentra en el SE de Texas. El ambiente similar que prevalece en el NE de México permitiría suponer un origen semejante para el uranio de la Coma.

Es probable que el uranio fuera transportado como un carbonato complejo de Uranio. Dadas las condiciones ligeramente alcalinas y originalmente reductoras del medio, es posible pensar que se formara un tricarbonato de sodio y uranilo. Dicho compuesto es estable en un amplio rango de condiciones, pero considerando siempre un ambiente reductor, al disminuir el ambiente  $pH$  pierde estabilidad y tienden a formarse uraninita o complejos urano orgánicos. Esto puede tener lugar con concentraciones de 0.5 ppm o más de uranio. Si se compara este valor con el de 10 a 20 p.p.m. de uranio en tobas y tobas arenosas de la Formación Catahoula y con el de 45 p.p.m. de uranio en rocas alcalinas terciarias del Big Bend, es fácil pensar que dichas rocas fueron la fuente de origen del uranio encontrado en los depósitos Miogeoclinales del Golfo de México (Ferríz, H. 1978).

Las leyes varían de 0,16 a 0.17 % de  $U_3O_8$ .

Las reservas de mineral hasta el año de 1983 eran de 5075 tons de  $U_3O_8$ , - incluyendo todos los depósitos conocidos de la Cuenca de Burgos (Castillo, 1986).

En base a la edad de la Formación Catahoula, de edad Mioceno Inferior, la mineralización ocurrió durante el Plioceno - Pleistoceno.



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

AAPG, (1981). *Uranium in Volcanic and Volcaniclastic Rocks*. AAPG Studies in - Geology No. 13. Published by the Energy Minerals Division. Edited by Philip C. Goodell and Aaron C. Waters. December, 1981.

ACEVEDO, A.J.R. (1959). *Geología de yacimientos con minerales radiactivos en - algunas localidades de la República Mexicana*. Tesis Profesional. UNAM.

ADAMS, J.A.S., WEAVER, C.E., (1958). *Thorium to uranium ratios as indicators - of sedimentary processes- an example of geochemical facies*. Bull. Am Assoc. Pe - trol. Geologists 42, 387.

BAILEY, R.V., CHILDERS, M.O., (1977). *Applied Mineral Exploration With Special Reference To URANIUM*. Westview Press, Inc. 1898 Flatiron Court Boulder, Colora - do 80301. Frederick A. Praeger, Publisher and Editorial Director 1977.

BARBIER, (1972). *Recyclage Metallogenie*. Institut National Polytechnique de Lo - rraine. Ecole Nationale Supérieure de Géologie Appliqué et de Prospection Mi - nière de Nancy. Tome I, 1972.

BARNES, H.L., (1979). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. John Wiley - and Sons. 1979 p. 38-39.

BARRETTO, P.M., (1981). *Ultimas novedades en la exploración del uranio*. OIEA - Boletín, Vol. 23, No. 2. Junio, 1981.

BERLANGA, G., OBREGON, A., (1981). *Apuntes de Geoestadística UNAM*, 29 y 44; p.- 1-28.

BETEJTIN, A., (1970). *Curso de Mineralogía*. Ed. Mir, Moscú, p. 345-347.

BOHSE, H., ROSE-HANSEN, J., SRENSSEN, H., (1974). *On the behavior of uranium du - ring cristallization of magmas with special emphasis on alkaline magmas*. Forma - tion of uranium ore deposits. Proceedings of a symposium. Athens 6-10 May., - 1974. International Atomic Energy Agency. Vienna, 1974.

BOWIE, S.H.V., DAVIS, M., OSTLE, D., (1971). *Uranium Prospecting Hand book*. Proceedings of a NATO-sponsored Advanced Study Institute on methods of prospecting for uranium minerals, London, september 21 - october 2, 1971. Library of Congress Catalogue Card Number 72-87929.

BURG, A., (1980)., *La Energía Nuclear y las Centrales Electronucleares*. Revista Ciencia y Desarrollo, Nov. - Dic. 1980 pp 161 - 179.

CANTOS FIGUEROLA, (1974). *Tratado de Geofísica Aplicada*. Librería Ciencia - Industria, S.L. pl. San Juan de la Cruz, 3. Madrid 3.

CASTILLO, N.F., (1986). *Resumen de las reservas nacionales de minerales uraníferos y sus proyectos de producción*. Inédito.

C. E. A., (1975). *L'industrie minière de l'uranium*. C.E.A. Commissariat à l'énergie atomique, France, septembre.

CONNOLLY, THOMAS, J., (1983). *Fundamentos de Ingeniería Nuclear*. Editorial Limusa, México.

CRAIG, J.R., VAUGHAN, D.J., (1981). *Ore Microscopy and Ore Petrography*. A - Wiley Interscience Publication. John Wiley and Sons. New York. Chichester. Brisbane. Toronto. Singapore.

CUNEY, M., (1978). *Geologic environment, mineralogy, and fluid inclusions of the Bois Noirs-Limouzat uranium vein, Forez, France*. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists. Volume 73. December, - 1978, Number 8, pp. 1567-1610.

CHAVEZ A., J.M., (1974). *Geología y Radiometría del área al SW de Ciudad - Mier, Tamaulipas, México*. Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería, UNAM, Abril de 1974.

CHAVEZ A., R., YZA, R., (1975). *Geología de la Sierra de Peña Blanca*. Informe interno, I.N.E.N. México.

CHAVEZ A., J.M., FERRIZ, H., CHAVEZ A., R., (1981). *Geología y Metalogénia de la Caldera San Marcos, Chihuahua, México*. XIII Convención de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Acapulco, Guerrero, México. 1981.

CHAVEZ A., J.M., GARCIA Y B., J.C., (1980). *Aspectos Geológicos y Metalogénicos de las Sierras Cortadas por el Río Sonora, Sonora Centro Septentrional, México*. III Reunión Nacional de Geotecnia y Geotermia. Comisión Federal de Electricidad, México, D.F. 1980.

DAHLKAMP, F.J., (1980). *Typology and Geographic Geotectonic distribution of uranium deposits*. Revue de l'Institut Français du Pétrole. Vol. XXXV, No. 3, - Mai-Juin 1980.

DIAZ MAURINO C., (1976). *Iniciación Práctica a la Mineralogía*. Editorial -- Alhambra, S.A. R.E. 182 Madrid-1. Claudio Coello, 76. México : Edita Mexicana, S.A. México 6, D.F. Lucerna 84- Desp. 1.

DIAZ VELARDE, G., MORALES RUIZ, M., (1969). *El control estratigráfico como factor importante en la ubicación de los yacimientos de uranio descubiertos en las rocas extrusivas del Terciario, en la Sierra de Peña Blanca, Municipio de Aldama, Estado de Chihuahua*. Memoria de la VIII Convención Nacional de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México. Taxco, Guerrero 12-16 Octubre 1969.

DICKINSON, W.R., (1970). *Relación de andesitas, granitos y areniscas derivadas de la Tectónica arco-Trinchera*. Rev. Geophysics. Space Physics, V.8; pp - 813-860.

DIXON, COLIN J., (1979). *Atlas of Economic Mineral Deposits*. Cornell University Press Ithaca, New York.

DOUGLAS, R.J.W., (1970). *Geology and Economic Minerals of Canada*. Geological-Survey of Canada. Economic Geology, Report No. 1. Department of Energy, Mines and Resources, Canada 1970.

ECONOMIC GEOLOGY, (1978). *Special Issue Devoted to the Geology and Geochemistry of Uranium*. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic-Geologists. Volume 73, December, 1978, Number 8.

ERNST, W.G., (1974). *Los materiales de la Tierra*. Editorial Omega.

FRONDEL, C., (1956). *Mineralogy of thorium*. U.S. Geol. Surv. Profess. Papers 300, 567.

GABELMAN, J.W., (1977). *Migration of uranium and thorium-exploration significance*. The American Association of Petroleum Geologists. Studies in Geology-No. 3. Tulsa, Oklahoma, U.S.A., 1977.

GILLULY, J., (1971). *Tectónica de Placas y la Evolución Magmática*. Geological Society of America Bulletin., V. 82, pp. 2383-2396.

HEINRICH, E.W., (1958). *Mineralogy and Geology of Radiactive Raw Materials*. Mc Graw Hill Book Company, Inc. 1958. New York, Toronto, London.

HILPERT, L.S., (1963). *Regional and local stratigraphy of uranium bearing rocks in Kelley, V.C., chm., Geology and technology of the Grants uranium region*. New Mexico Bur. Mines and Mineral Resources. Mem. 15, pp. 6-18.

HOLMES, A., (1944). *The Machinery of Continental Drift : The Search for a mechanism*. Principles of Physical Geology. Reimpreso con permiso de Thomas Nelson and Sons, Ltd. Pp. 19-22.

HUSMANN, O., (1956). *Bestimmungen Thorium -and Uranium - Gehaltes an Genisen and magmatischen Gesteinen des mittleren Schwarzwaldes mittels der Koinzidenz-Methode*. Neues Jahrb. Mineral., Monattsh. 108.

I A E A, (1976). *Exploration for uranium ore deposits*. International Atomic-Energy Agency, Vienna.

IPARREA V., V., CHAVEZ A., R., (1969). *Descubrimientos recientes de localidades uraníferas en rocas ígneas extrusivas en la porción central del Estado de Chihuahua*. Memoria de la VIII Convención Nacional de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México. Taxco, Gro. 12-16 Octubre 1969.

JACOBS, J.A., (1974). *A Text book on Geoeconomy*. Halsted Press. Wiley and Sons, New York.

KAZANSKY, V.I., LAVEROV, J.P., (1977). *Deposits of uranium in "ore deposits of the URSS"*. Smirnof, V.I. Ed. Pitman Publishing Co., New York. 424 pags.

LAMEY, C.A., (1966). *Metallic and Industrial Mineral Deposits*. Mc Graw-Hill Book Company.

LANGFORD, F.F., (1974). *A supergene origin for vein type uranium ores in the light of Western Australian calcrete-carnotite deposits*. *Economic Geology* V.68, pp. 516-526.

LARSEN Jr., E.J., PHAIR, G., GOTTFRIED, D., SMITH, L.W., (1956). *El uranio y la diferenciación magmática*. Comisión Nacional de Energía Nuclear.- Acta de la Sesión 6B de la Conferencia Internacional Sobre la Utilización de la Energía Atómica con Fines Prácticos. pp. 277-287.

LEONARZ, E., *Metalurgia del Uranio*. Libro de Apuntes del Laboratorio de Petrología de la DEPMI/UNAM.

LEE, W.H.K., (1970). *On the global variations of terrestrial heat flow*. - *Phys. Earth Planet. Int.*, 2,332.

LEROY, J., POTY, B., (1974). *Les inclusions fluides dans les minerais des gisements d'uranium intragranitiques du Limousin et du Forez (Massif Central, France)*. *Formation of Uranium Ore Deposits. Proc. of a Symposium*. - Athens (May, 1974).

LEROY, J., (1978). *The Margnac and Fanay Uranium Deposits of the La Crouzille District (Western Massif Central, France) : Geologic and Fluid Inclusions Studies*. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*. Volume 73. December, 1978. Number 8. pp. 1611-1634.

MANN, A.W., DEUTSCHER, R.L., (1978). *Genesis Principles for the Precipitation of Carnotite in Calcrete Drainages in Western Australia*. *Economic Geology and the Bulletin of The Society of Economic Geologists*. Volume 73. December, 1978. Number 8. pp. 1724-1737.

MARQUINA, O.E., (1978). *Les Gisements d'Uranium Hydrothermaux*. Institut National Polytechnique de Nancy. Ecole Nationale Supérieure de Géologie Appliquée et de Prospection Minière. Centre d'Enseignement Supérieur en Exploration et Valorisation des Ressources Minérales.

MITCHELL, A.H.G., GARSON, M.S., (1981). *Mineral Deposits and Global Tectonic Settings*. Academic Press Geology Series. Academic Press Inc. (London) LTD.

MOREAU, M., POUGHON, A., PUIBARAUD, SANSELME, H., (1966). *L'uranium et les granites*. Chronique Mines et Recherche Minière. No. 350. pp 47-51.

MUMPTON, F.A., ROY, R., (1961). *Hydrothermal studies of the zircon-thorite group*. Geochim. Cosmochim. Acta 21, 217.

NASH, T.J., (1978). *Preface-Uranium Geology in Resource Evaluation and Exploration*. Economic Geology. Volume 73, December, 1978, Number 8.

OLADE, (1980). *Metodología para la exploración de uranio en los países de OLA DE*. OLADE Organización Latinoamericana de Energía. Segundo grupo de trabajo sobre la exploración de uranio. 20-25 Octubre 1980. Chihuahua, México.

PEREZ, S.S., (1973). *Estudio geológico económico del yacimiento uranífero "La Coma"*, Estado de N.L. Tesis Profesional. Instituto Politécnico Nacional ESIA. México, D.F., Diciembre, 1973.

PLILER, R., (1956). *The distribution of thorium and uranium in sedimentary rocks and the oxygen content of the pre-cambrian atmosphere*. M.A. Thesis. -- Rice Institute.

PONCE, M.A., (1980). *Los Reactores Nucleares*. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. 2 Serie divulgación. Marzo, 1980.

PONCE, M.A., (1980). *La Energía en México*. Revista Ciencia y Desarrollo. Marzo-Abril, 1980. pp. 108-120.

RICH, R.A., HOLLAND, H.D., PETERSEN, U., (1977). *Hydrothermal Uranium Deposits*. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam-Oxford-New York.

RICHARDSON, R.A., (1964). *Thorium, uranium and potassium in the Conway granite, New Hampshire, U.S.A.* In: J.A.S. Adams and W.M. Lowder. *The natural - radiation environment*, p. 39. Chicago: Chicago University Press.

RODRIGUEZ, T. R., YZA, D. R., CHAVEZ, A. R., CONSTANTINO, H. S., (1976). *Rocas volcánicas ácidas y su potencial como objetivos para prospectar uranio*. IAEA-SM- 208/59. *Exploration for Uranium Ore Deposits*. Symposium Vienna, 29 March - 2 April 1976. International Atomic Energy Agency.

ROGERS, J.J.W., ADAMS, J.A.S., (1969). *Thorium*. Handbook of Geochemistry, - vol. II/1, Wedepohl, K.H., ed., Springer-Verlag, Berlin, 5-90

----- (1969). *Uranium*. Handbook of Geochemistry, - vol. II/1, Wedepohl, K.H., ed., Springer-Verlag, Berlin, 5-92.

RONALD, N., (1979). *La Revolución Nuclear*. Revista Ciencia y Desarrollo. -- Nov.-Dic. 1979, pp. 125-146.

ROSHOLT, J.N., EMILIANI, C., GEISS, J., KOCZY, F.F., WANGERSKY, P.J., (1961). *Absolute dating of deep sea cores by the  $\text{Pa}^{231}/\text{Th}^{230}$  Method*. J. Geol. 69, - 162.

----- (1962).  *$\text{Pa}^{231}/\text{Th}^{230}$  dating and  $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$  temperature analysis of core 254-Br-C*. J. Geo-phys. Res. 67, 2907.

ROUTHIER, P., (1963). *Les Gisements Métallifères*. Géologie et Principes de - Recherches. Masson et Cie, Editeurs. Paris.

SACKETT, W.H., (1965). *Deposition rates by the protoactinium method*. Univ. - of Rhode Island, Grad. School of Oceanog. Occasional Publication 3-1965, 29.

SCINTREX *Technical description of the BGS-3 and BGS-4 scintillation counters*. Geophysical and Geochemical Instrumentation and Services. Uranium - Exploration Instrumentation.

SIERRA, O., BOLDWIN, J., QUIREIN, J., (1980). *Theory, interpretation and practical applications of natural gamma ray spectroscopy*. SPWLA Twenty -- first annual logging symposium, july 8-11, 1980.

SKINNER, B.J., (1974). *Los Recursos de la Tierra*. Editorial Omega.

SEYFERT, C.K., SIRKIN, A.L., (1973). *Earth History and Plate Tectonics*. - Harper and Row Publishers.

SUTIN, (1984). *La Industria Nuclear en México. Analisis de Perspectivas*. Sindicato Unico de Trabajadores de la Industria Nuclear. Septiembre, -- 1984.

TATSUMOTO, M., HEDGE, C.E., ENGEL, A.E.J., (1965). *Potassium, rubidium, - strontium, thorium, uranium, and the ratio of strontium-87 to strontium-86 in oceanic tholeiitic basalt*. Science 150, 886.

PATTERSON, C., (1964). *Characteristics of lead isotopes evolution, a continental scale in the earth*. Amsterdam North Holland Press.

TELFORD, W.H., GELDART, L.P., SHERIFF, R.E., KEYS, D.A., (1978). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. Cambridge, London, New York, Melbourne.

THURBER, D.L., (1965). *The dating of mollusc from raised terraces*. Univ. of Rhode Island, Grad. School of Oceanog., Occasional Publication 3-1965, 1.

WILSLEY, J.E., (1975). *Uranium Mineralization in shallow intrusive environments*.

WAES, (1985). *Global Energy Prospect, 1985-2000*. Ed. Mac Graw Hill.



WRIGHT, R.J., (1978). *Sedimentary basins and sandstone type uranium deposits*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1978. Technical Reports Series No. 183. Discussions of the Uranium Geology Working Groups IGC., - Sidney, 1978.

WYLLIE, P.J., (1971). *The dynamic earth*. New York, John Wiley and Sons, - 416 p.

WYLLIE, P.J., (1976). "El Manto de la Tierra". Selecciones de Scientific American. Deriva Continental y Tectónica de Placas. 2a. edición. pp.244-256 Editorial Blume, Rosario 17, Madrid.

ZIEGLER, V. *Essai de Classification metallotectonique des gisements d'uranium*. IAEA- SM - 183/16.

ZIEGLER, V., (1980). *Reflexiones sobre el aprovisionamiento mundial en uranio al año 2000 y perspectivas posteriores*. Commissariat a l'Energie-Atomique. France.



**Esta obra se terminó de imprimir el 7 de Abril de 1990,  
en los Talleres de Impresores Profesionales, A. en P.**

**Lorenzo Boturini No. 530, Col. El Parque**

**C.P. 15960 México, D.F.**

**La revisión estuvo a cargo de la Lic. Elsa Martínez.**

**Tiraje: 100 Ejemplares.**

F/DEPFI/D-86/1990/EJ.5



702500