

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE DEPOSITOS DE URANIO (*)

MANUEL ALVAREZ JR. (**)

INTRODUCCION

El uso de uranio para explosivos atómicos y la posibilidad de usarlo como fuente de energía industrial como resultado del afortunado desarrollo de la fisión controlada del uranio en diciembre de 1942, ha incrementado en forma notable la demanda de este elemento. Antes de 1940 el uranio se usaba principalmente para colorear algunos productos cerámicos y sus minerales eran extraídos principalmente por su contenido de radio. Las vetas de Pitchblenda en el Congo Belga, Canadá y Checoslovaquia y las vetas de minerales secundarios de uranio en Portugal, constituían los principales minerales explotados, aunque los minerales de carnotita del altiplano del Colorado habían sido la principal fuente de mineral antes del descubrimiento de los depósitos del Congo Belga y se había produci-

-
- (*) Original recibido en enero de 1955.
Trabajo presentado en la Convención Geológica Nacional.
(**) Presidente de la Sociedad Geológica Mexicana.
Vocal de Recursos Geológicos del I.N.I.C.

do un poco de Pitchblenda y algunas vetas de minerales preciosos y básicos del frente de la Cordillera de Colorado. En los depósitos de la altiplanicie de Colorado solamente se habían explotado algunas bolsas de carnotita de alta ley para obtener uranio en los años que inmediatamente precedieron al de 1940. Se sabía que pequeñas cantidades de uranio se presentaban en otras rocas.

Las fuentes americanas de uranio conocidas en 1940 eran adecuadas para suministrar el aumento de demanda por algún tiempo; pero se vió claramente que sería necesario encontrar nuevas fuentes para complementar a las ya conocidas si la potencialidad de los nuevos usos se efectuara durante un extenso período de años. Además, nuevas reservas serían necesarias en forma imperativa si se cortara el acceso a fuentes extranjeras. Por lo tanto se ha hecho una búsqueda intensa de uranio en los últimos diez años. Esta investigación ha modificado considerablemente la idea que de las reservas de uranio y petróleo se tenía en 1940. Los depósitos de veta siguen siendo aún las principales fuentes de mineral de uranio y las arenas de playa, la fuente de torio; pero la carnotita es una fuente de uranio mucho más importante de lo que era en 1940. Además se han encontrado grandes reservas de uranio en otras rocas, incluyendo algunas tales como lignita, que antes no se sabía que fueran uraníferas.

RASGOS GENERALES

Quizá el rasgo más notable de los depósitos minerales de uranio es la gran variedad de medios geológicos en los cuales se han encontrado concentraciones de mineral de uranio, así como la variedad de tipos de minerales que se están estudiando y desarrollando. Se sabe que los depósitos de mineral de uranio se presentan en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas y en muchos tipos de rocas diferentes dentro de cada una de estas clasificaciones.

En las rocas ígneas y metamórficas que van desde el Pre-

CONSIDERACIONES SOBRE DEPOSITOS DE URANIO

cámbrico hasta el final del Terciario, los depósitos primarios de uranio se distribuyen por lo menos en cuatro grandes rasgos geológicos principales de la corteza de la tierra. La faja de la Cordillera de Norte y Sudamérica, las áreas marginales occidentales del Escudo Canadiense, las áreas de intrusiones ígneas en Europa y el área del Espinazo Continental del centro y sur de Africa. Los depósitos de uranio en las rocas sedimentarias también tienen una amplia distribución en el mundo. Por ejemplo, en los Estados Unidos se encuentran ampliamente distribuidas en las areniscas y lodolitas de la altiplanicie de Colorado y porciones adyacentes de Colorado, Utah, Arizona y Nuevo México, concentraciones de carnotita y conjuntos minerales cuprouraníferos. Las rocas encajonantes varían desde el Pérmico al Cretácico. Formaciones marinas fosfatíferas del Mioceno y Plioceno que contienen apreciables cantidades de uranio se presentan en una amplia área en Florida Central y capas de fosfato-uraníferos han sido también estudiadas en las formaciones pérmicas de Idaho, Montana y Wyoming. Calizas jurásicas del levantamiento Zuni en Nuevo Mexico contienen algunos de los depósitos de uranio recientemente descubiertos. Bajas concentraciones de uranio existen en varias formaciones de lutitas carbonosas de edad paleozóica en las regiones central y de las grandes llanuras y en las capas salinolacustres de California. Depósitos semejantes en rocas sedimentarias correlativas han sido descritas en todo el mundo.

CLASIFICACIONES DE LOS DEPOSITOS.

Pocos o ningunos depósitos se concentran bajo un grupo más variado de condiciones que el uranio. Sus minerales incluyen los formados bajo todos los tipos de procesos ígneos, sedimentarios y de intemperismo. Para simplificar los diferentes depósitos y medios en los cuales se presenta el uranio como resultado de la operación de estos procesos, se agrupan en cinco clases un tanto arbitrarias, como sigue: 1.—rocas ígneas, pegmatitas, vetas y depósitos relacionados; 2.—depósitos de carno-

tita en arenisca, cobre, uranio y otros minerales; 3.—otras rocas sedimentarias consolidadas; 4.—placeres; 5.—flúidos naturales.

El agrupamiento anterior es inconsistente en la medida en que se basa en los rasgos principales del ambiente de un depósito y algunos de los grupos citados incluyen depósitos de diverso modo de origen. Todos los depósitos relacionados con los rasgos estructurales que atraviesan las rocas encajonantes ya sean vetas en sentido estricto, fracturas cubiertas con una capa de minerales de uranio o cuerpos de reemplazamiento y depósitos diseminados en las rocas ígneas y metamórficas se han combinado en el primer grupo citado. Los depósitos de uranio, especialmente las vetas portadoras de Pitchblenda, han sido la principal fuente de mineral que contienen más del medio por ciento de uranio. Algunas rocas graníticas contienen 0.02% de uranio en minerales diseminados a través de la roca pero generalmente las rocas ígneas contienen mucho menos. Actualmente ninguna es fuente de uranio.

Los depósitos de carnotita en arenisca, los de cobre-uranio y otros minerales, incluyen: a) depósitos de uranio-vanadio, en los cuales la carnotita es el principal mineral de uranio y la cantidad de vanadio generalmente excede al uranio por algo menos que una orden de magnitud; b) los depósitos de vanadio de tipo roscoelita en los cuales el uranio está notablemente subordinado al vanadio; c) los depósitos de cobre-uranio; d) los depósitos de carnotita-asfaltita; e) los depósitos de carnotita-óxido de uranio y f) los depósitos de schroekingerita en rocas arenoso arcillosas. La mayor parte de estos depósitos no tienen una relación clara con las estructuras transversales o posibles fuentes de rocas ígneas. Los depósitos de vanadio-uranio se encuentran principalmente en la formación Morrison de edad Jurásica de la altiplanicie de Colorado. El mineral que actualmente se explota generalmente contiene de un décimo a cinco décimos de por ciento de uranio. Estos depósitos han sido la principal fuente de este elemento en los Estados Unidos.

CONSIDERACIONES SOBRE DEPOSITOS DE URANIO

Los depósitos de tipo roscoelita se encuentran principalmente en la arenisca citada, de edad Jurásica, en Placerville y Rifle, Colorado. Estos han constituido una importante fuente de vanadio; pero contienen mucho menos uranio que los depósitos de tipo carnotita. Los depósitos de cobre-uranio y carnotita-asfaltita se encuentran principalmente en las formaciones anteriores a la Morrison en la altiplanicie de Colorado, principalmente en el conglomerado Shinarump pero se presentan también en otras formaciones y en otras partes.

El contenido de uranio es semejante al de los depósitos de tipo carnotita. Se han explotado pocos depósitos de cobre-uranio en épocas pasadas porque se encuentran en lugares relativamente inaccesibles. La producción de estos depósitos ha sido pequeña. Muchos depósitos, sin embargo, han sido descubiertos en los años recientes y los de esta clase son una importante fuente potencial de uranio. Los depósitos en la caliza Todilto cerca de Grants, Nuevo Mexico, son ejemplos de depósitos de carnotita-óxido de hierro. Su contenido de uranio es comparable al de los de carnotita. Fueron encontrados en 1950 y aún se siguen explorando. Un depósito en el Red Desert, al norte de Camsutter, Wyoming, es el único depósito en el cual la schroenckingerita es el mineral de uranio predominante. Contiene de un centésimo a un décimo por ciento de uranio. Las fosforitas marinas y las lutitas negras son las principales rocas sedimentarias uraníferas después de las areniscas. Sin embargo, se ha encontrado uranio en algunas calizas y en algunas lignitas no vecinas, asociadas con rocas sedimentarias carbonosas. El contenido de uranio varía desde unos cuantos milésimos hasta dos centésimos de por ciento en las lutitas negras y fosfatos y localmente hasta veinticinco centésimos de por ciento en lignita en la Meseta La Ventana, de Nuevo México. La mayor parte de las otras rocas sedimentarias no contienen concentraciones apreciables de uranio. Este elemento en las rocas sedimentarias marinas está en general distribuido más bien uniformemente en unidades estratigráficas relativamente delgadas que se extienden en áreas de algunos cuantos a varios miles de kilóme-

tros cuadrados en magnitud. Es posible que fueran depositados sincronológicamente con los sedimentos. Sin embargo en las lignitas y rocas relacionadas la distribución del uranio es mucho más restringida, aunque estas rocas son de origen sedimentario y los depósitos en ellas están incluidos en las rocas sedimentarias. Algunos presentan evidencias que sugieren que el uranio puede haber sido introducido por procesos supergenéticos.

Los placeres incluyen depósitos de ríos y playas de arena y gravas en su mayor parte de edad geológica relativamente reciente, aunque se conocen algunos placeres fósiles. Los depósitos de playas de minerales uraníferos están confinados casi con exclusividad a las acumulaciones de zirconio y monazita. En general ambos contienen algunos cientos a algunos décimos de por ciento de uranio. Son primordialmente una fuente de torio aunque es posible que algún uranio pueda recuperarse como producto secundario en el tratamiento de minerales portadores de torio o zirconio derivados de los placeres.

Los fluidos naturales incluyen aguas de manantial, ríos, lagos y mares, salmueras de pozos petroleros, petróleo, asfalto y gas natural. Algunos de ellos son radioactivos pero la radioactividad de muchos de ellos proviene de productos derivados del uranio. Ninguno es fuente de uranio en la actualidad. Las fuentes de elementos radioactivos y su significación con sus posibles concentraciones en el subsuelo presentan interesantes problemas geológicos aún no resueltos.

Otra clasificación interesante de los depósitos de uranio es la que los dispone en dos tipos principales: los regidos por estructuras y los regidos por factores estratigráficos; aunque ambos tipos no se excluyen mutuamente.

Los depósitos regidos por estructuras pueden, a su vez, subdividirse en los siguientes grupos: (1) vetas, brechas y chimeneas; (2) depósitos diseminados; (3) depósitos pirometasmáticos y (4) pegmatitas. Los depósitos regidos por factores estratigráficos pueden subdividirse en: (1) fosfatos; (2) lutitas negras; (3) calizas y dolomitas; (4) lignitas, (5) depósitos en areniscas y (6) depósitos superficiales o de caliche.

CONSIDERACIONES SOBRE DEPOSITOS DE URANIO

Finalmente, los depósitos de uranio se pueden clasificar como sigue, de acuerdo con el tipo de roca encajonante: A) Depósitos en rocas ígneas y metamórficas y B) Depósitos en rocas sedimentarias.

Los depósitos en rocas ígneas y metamórficas se subdividen a su vez en a) depósitos hidrotermales en vetas; b) depósitos diseminados en rocas ígneas y c) pegmatitas. Los depósitos en rocas sedimentarias también se subdividen en: a) depósitos de carnotita; b) depósitos cupro-uraníferos; c) depósitos uraníferos en asfalto; d) depósitos uraníferos en calizas; e) depósitos uraníferos en fosforitas; f) depósitos uraníferos en lutitas negras; g) depósitos aluviales y placeres, y h) depósitos salinos lacustres. Esta clasificación, de la que aquí se hará uso, es la menos arbitraria ya que importantes características de los depósitos están relacionadas con las rocas a las cuales están asociados.

DEPOSITOS DE URANIO

Depósitos en rocas ígneas y metamórficas

Los depósitos de uranio en rocas ígneas y metamórficas se presentan principalmente en vetas hidrotermales; pero también se conocen cuerpos diseminados de menor importancia comercial actual, y cantidades dispersas de uranio en pegmatitas.

Los principales yacimientos del mundo, en vetas uraníferas hidrotermales, son típicamente de carácter mesotermal, aunque algunos cuantos indiquen temperaturas de depósito que se aproximan a los depósitos epitermales. En la mayor parte de ellos la Petchblenda es el principal mineral de uranio, acompañado por varios productos secundarios de alteración.

Las rocas encajonantes de los depósitos primarios de uranio en vetas incluyen tipos ígneos, sedimentarios y metamórficos, de los cuales los más favorables parecen ser intrusivos felsíticos y metasedimentos arenáceos. Las rocas sedimentarias no metamorfozadas parecen ser rocas encajonantes relativamente pobres. Dentro de las vetas mismas los minerales asociados que en orden decreciente de abundancia contienen hierro, cobre, co-

balto, plomo, plata, níquel y bismuto, indican ambientes geológicos favorables para minerales primarios de uranio. El tepetate incluye los siguientes minerales típicos asociados: sílice en varios tipos de carbonatos, fluorita, barita, y en unos cuantos lugares turmalina e hidrocarburos. De ellos, el cuarzo cristalino beta, la calcita y la dolomita, son los más comunes. En la secuencia de depósito dentro de las vetas, los óxidos de uranio parecen ocupar una posición temprana o intermedia, aunque hay notables excepciones. En varias ocasiones la pitchblenda ha sido depositada evidentemente después de los tempranos sulfuros de altas temperaturas y antes de los minerales de plata y plomo. En otras ocasiones los óxidos de uranio fueron depositados antes que todos los sulfuros asociados, bajo condiciones de temperatura relativamente alta. En otras ocasiones aún, la pitchblenda fue obviamente la última en depositarse en la veta, siguiendo hasta a los carbonatos. Estructuralmente las vetas de pitchblenda tienden a formar rellenos en espacios abiertos, aunque hay un caso notable de reemplazamiento de cuarzo previamente existente en la veta; fuera de este caso, el reemplazamiento ha sido relativamente poco importante, y restringido a unos cuantos tipos de roca silicosa encajonante.

Todavía no se conoce bien el efecto complejo de la solución de donde proviene la pitchblenda sobre las paredes de la roca. En muchos casos, las soluciones portadoras del mineral han producido una alteración señalada de rojo hematítico que, en el Escudo Canadiense, es un guía valioso para la exploración del mineral. En otras partes, notablemente en las rocas graníticas encajonantes en las áreas de las Montañas Rocallosas de los Estados Unidos, la pared de la roca ha sido en parte alterada a arcillas con una gran capacidad de intercambio catiónico junto con caolinita y además han sido afectadas por cloritización, sericitización y silicificación.

La Mina de Shinkolobwe.—Los depósitos primarios de vetas en la mina Shinkolobwe del Congo Belga son con mucho los más grandes y ricos que se conocen en la actualidad. Las for-

CONSIDERACIONES SOBRE DEPOSITOS DE URANIO

maciones que se encuentran en Shinkolobwe han sido agrupadas en tres unidades estratigráficas: el complejo basal, el sistema Katanga de edad pre-Cámbrica y el sistema Carroo superyacente. Cerca de la base del sistema Katanga se encuentra una serie de cinco formaciones que comprenden las series de La Mina y consisten de: una dolomita superior dura, una lutita dolomítica, una cuarzita celular, una cuarzita en capas delgadas y una dolomita talcosa. Las estructuras características son una serie de pliegues cerrados y recostados con planos axiales que buzan hacia el norte y cobijaduras de considerable desplazamiento. Las cobijaduras de la serie de La Mina se han desplazado desde el noreste, sobre la serie superyacente Kundelungu, que pertenece a la parte superior del mismo sistema Katanga. La mina de Shinkolobwe ha permitido el conocimiento de una serie de estructuras complejas de falla. Las fallas de empuje constituyen la dirección principal de las fallas y forman un pequeño ángulo con el rumbo de la serie de La Mina. Asociadas a este sistema hay numerosas fallas, irregulares, transversales, con rumbo y echado variables. En estas fallas transversales los cuerpos minerales están localizados donde las fallas interceptan a las cuarzitas en capas delgadas, a las cuarzitas celulares y a las lutitas dolomíticas de la serie de La Mina y las zonas brechosas adyacentes a las fallas.

Las vetas varían en espesor desde unos cuantos centímetros a varios metros. Se adelgazan y engruesan tanto vertical como horizontalmente y por lo general no pueden seguirse por más de algunos metros a lo largo del rumbo. Pueden contener pechblenda con poco o ningún relleno, o pueden consistir predominantemente de cobalto o sulfuros de cobre con o sin pechblenda asociada a los minerales de cobalto. En otras partes, la pechblenda asociada con minerales de cobalto se presenta en una veta de matriz de cuarzo carbonatado. Las zonas de fisuras y de brechas en la roca silicosa han favorecido el depósito de pechblenda. Por otro lado la mineralización de cobalto no ha estado confinada a las zonas brechosas y a las fallas transversales sino que se ha diseminado a través de las paredes de las

rocas de la dolomita compacta. Además de los principales minerales de uranio y cobalto el mineral de Shinkolobwe lleva cantidades importantes de cobre, molibdeno, sulfuros de hierros, oro, platino y paladio.

La oxidación de los cuerpos minerales se ha extendido por varios cientos de pies de profundidad. En los depósitos someros hay una gran cantidad de hidróxidos complejos, fosfatos y silicatos, tales como becquerelita, urafonano, gummita y torbenita. La torbenita supergenética contiene más de la mitad de uranio en las zonas oxidadas del cuerpo mineral. Un lente de mineral típicamente alterado contiene un núcleo central de pitchblenda rodeado por zonas sucesivas de minerales secundarios amarillos, anaranjados y verdes. Los fosfatos verdes se encuentran extensamente diseminados a través de las rocas encajonantes de la serie de La Mina.

La paragénesis del yacimiento puede resumirse como sigue: La mineralización comenzó con la intrusión de vetas de cuarzo y la silicificación comenzó con la intrusión de vetas de cuarzo ceso el desarrollo de monazita, turmalina, apatita, clorita y talco. La segunda etapa es la de la uraninita que se formó por el reemplazamiento del cuarzo e impregnó las paredes de las rocas carbonatadas. Después de la uraninita vinieron los sulfuros en el siguiente orden: pirita, lineita, carrolita y calcopirita. Se desconoce la posición de la molibdenita en este grupo y la génesis de la bornita es incierta. Se han formado constituyendo vetas y reemplazando minerales anteriormente formados. La etapa final de la mineralización primaria fue la formación de abundante carbonato que reemplazó a todos los minerales anteriores, pero que en parte coincidió con la mineralización de sulfuros.

El resto de la historia del depósito es el de una alteración supergenética. La uraninita se alteró primero en jantinita y becquerelita y en su etapa final en fosfatos, uranofeno y sklodowskita, persistiendo la curita durante todo el proceso.

CONSIDERACIONES SOBRE DEPOSITOS DE URANIO

Depósitos diseminados en rocas ígneas

Varios derrames volcánicos en el suroeste de los Estados Unidos contienen concentraciones de uranio de ley baja. Algunos de estos depósitos están distribuidos a través de amplias zonas fracturadas que cubren importantes áreas, y otras parecen estar regidas por flexiones locales y fracturas complementarias en los derrames. Cuando menos en una zona fracturada en riolita silicificada, se encuentra pitchblenda dentro de los fragmentos de la roca encajonante, que constituye una brecha cementada por calcita, fluorita, galena, esfalerita y calcopirita. En otros depósitos, minerales secundarios de plomo y cobre, incluyendo piromorfita uranífera, están distribuidos sobre una amplia área en las fracturas de una zona perturbada en derrames. Los minerales de uranio diseminados en rocas volcánicas en o cerca de la superficie, generalmente incluyen minerales secundarios, tales como autunita, schroekingerita y uranofano.

Hasta la fecha ninguno de estos depósitos diseminados en rocas volcánicas ha sido productor de mineral. El promedio de los que se han investigado es menor que 0.1% y el uranio no está amplia ni bastante uniformemente distribuido para compensar la ley relativamente baja.

Muchas masas de granito contienen minerales accesorios uraníferos tales como monazita, zirconio, pirocloro, alanita, thorita y uraninita y algunos de los granitos de tipo más sódico llevan más minerales accesorios uraníferos que los demás. Los granitos de tipo Albita-riebeckita son particularmente radioactivos y masas de esta roca han sido muestreadas en las montañas White de New Hampshire, en Vermont; en las montañas San Francisco, de Arizona; en la región de Pikes Peak, en Colorado; en Alaska y en Nigeria. Sin embargo, aún los cuerpos de granito más radioactivos conocidos, contienen menos de 0.015% de U_2O_5 y hasta la fecha en ninguna parte han sido fuente de minerales.

Pegmatitas

Los minerales uraníferos y de tierras raras, incluyendo columbatos, tantalatos y titanatos, son minerales accesorios mas bien comunes de muchos depósitos de pegmatitas, pero en general estos depósitos no son capaces de producir uranio en una escala apreciable. Ellos son, sin embargo, fuentes de ejemplares de alta ley y podrán quizá descubrirse cuerpos pegmatíticos que contengan toneladas de minerales de uranio. Los minerales uraníferos primarios en este tipo de depósitos incluyen uraninita y, en casos especiales, thucholita, así como los columbo-tantalatos, como euxenita, samarskita, pirocloro y fergusonita.

Las pegmatitas o las zonas en ellas ricas en potasio, son las más favorables como fuente de minerales de uranio, mientras que las pegmatitas o las zonas en ellas, ricas en sodio o litio, son menos favorables.

La distribución y forma en la que se presentan los elementos raros en los granitos y en las pegmatitas graníticas, están gobernadas principalmente por los siguientes factores: (1) composición del magma, incluyendo concentraciones de iones de elementos raros; (2) condiciones de presión y temperatura durante la cristalización del magma y (3) tamaño, carga, polarizabilidad y otras propiedades de los iones de los elementos raros.

Durante la cristalización de un magma bajo un conjunto de condiciones dadas, un ion de elemento raro puede entrar en la estructura de un mineral común, o un mineral un tanto más raro puede entrar o ser atrapado por una estructura mucho menos apropiada, seguido, en algunos casos, por la transferencia a un mineral ex-soluto; puede concentrarse en el fluido residual hasta formar un mineral propio; o puede permanecer disperso en el fluido residual hasta que finalmente queda adherido a la superficie de la red cristalina más cercana.

Los tres primeros mecanismos parecen explicar satisfactoriamente la distribución del Be, Cs, Rb, Tl, Li, Nb, Ta, las tierras

CONSIDERACIONES SOBRE DEPOSITOS DE URANIO

raras, Sn, Ti, W, Mo, U, Th y otros elementos raros en las pegmatitas graníticas y algunos granitos. El cuarto mecanismo viene a ser prominente evidentemente durante la cristalización de otras rocas graníticas, especialmente aquellas formadas de magmas de viscosidad relativamente alta.

Depósitos en rocas sedimentarias

Los depósitos que parecen ser más prometedores para la producción de grandes tonelajes de mineral en los Estados Unidos, son los depósitos en areniscas, limolitas, lutitas y calizas. Actualmente las areniscas y lutitas uraníferas de la Altiplanicie de Colorado contribuyen con la mayor parte de la producción de los Estados Unidos, y formaciones de lutita y arenisca semejantes en el sur de Utah y norte de Arizona, que contienen asociaciones características de minerales de cobre y uranio, prometen convertirse en importantes productores en los próximos años. Cuando menos una faja de depósitos uraníferos en caliza, recientemente descubiertos en el área del Levantamiento Zuni de Nuevo México, contiene reservas substanciales de mineral que también contribuirá a la producción de los Estados Unidos.

Depósitos de carnotita

Concentraciones en areniscas y lutitas de carnotita y minerales afines, han sido encontradas principalmente en toda la altiplanicie de Colorado, en gruesas series de rocas sedimentarias que subyacen a unos 340,000 kilómetros cuadrados del oriente de Utah, noreste de Arizona, noroeste de Nuevo México y oeste de Colorado, al oeste de las Montañas Rocallosas. Depósitos de carnotita más pequeños han sido estudiados en el área del Desierto de Mojave, del sur de California; en partes de la formación Mauch Chunk de Pensilvania y en las rocas fronterizas de la Cadena Frontal, en Colorado.

En el área de la Altiplanicie de Colorado los depósitos de carnotita se encuentran desde la formación Coconino del Pér-

mico hasta la formación Mesa Verde, del Cretácico Superior inclusive; pero los horizontes productores importantes se encuentran en las formaciones Morrison y Entrada, del Jurásico, y en la formación Shinarump, del Triásico. La mayor parte de los depósitos minerales son irregulares, pero de forma aproximadamente tabular, con las mayores dimensiones en planos esencialmente paralelos a la estratificación, generalmente horizontal de las areniscas y lodolitas encajonantes. A pesar de esta concordancia general con la estratificación, los cuerpos mineralizados tienden en parte a atravesar la estratificación y en algunos lugares se engruesan hasta formar masas semejantes a concreciones conocidas como "bollos". Los depósitos de mineral están comunmente asociados con troncos, ramas u hojas de árbol fosilizados y algunos de los minerales más ricos consisten de leños parcialmente reemplazados por minerales de uranio y vanadio. Todos los rasgos anteriores están generalmente asociados con antiguos lechos de ríos que parecen ser el régimen estructural dominante de los cuerpos mineralizados.

Hay todavía una duda considerable entre si los minerales fueron precipitados de soluciones de aguas subterráneas después de que los sedimentos se hubieron acumulado, pero antes de la deformación y fractura de las rocas, o si las principales soluciones uraníferas formaron los depósitos en épocas post-Cretácicas. En cualquier caso, los viejos lechos de ríos se consideran como las estructuras más importantes que los rigen.

Los minerales, que incluyen principalmente carnotita, vanoxita y hewettita, están depositados como revestimientos de los granos de las areniscas o a lo largo de los planos de estratificación de las lutitas, y la mayor parte del mineral contiene de 0.2 a 0.4% de U_2O_5 y de 1.5 a 2% de U_3O_8 .

Depósitos cuprouraníferos

Asociaciones características de minerales de cobre y uranio se presentan en muchas localidades en conglomerados, areniscas y lutitas del Triásico, en las partes occidental y austral

CONSIDERACIONES SOBRE DEPOSITOS DE URANIO

de la Altiplanicie del Colorado. La mayor parte de estas localidades están en el sur de Utah y norte de Arizona, en las formaciones Moenkopi, Shinarump, o Chinle, del Triásico. La mineralización cupro-uranífera parece haber tenido lugar en un horizonte estratigráfico un tanto restringido en la base de la formación Shinarump y en los primeros metros de la cima de la formación Moenkopi, inmediatamente abajo de ella. Sin embargo, varios otros depósitos cuprouraníferos notables han sido localizados en otros diversos horizontes estratigráficos de las rocas sedimentarias del Triásico del sur de Utah y norte de Arizona.

Todas las areniscas encajonantes de los depósitos cupro-uraníferos son de carácter típicamente lenticular, adelgazándose y engruesándose notablemente a lo largo del rumbo de las capas. Este carácter se ha interpretado como indicando depósitos fluviales en los cauces de las corrientes y en las áreas adyacentes. Como en los depósitos de carnotita, las concentraciones minerales parecen estar en o cerca de las partes más gruesas y profundas de las capas de arenisca o de conglomerado; esto es, a lo largo de los antiguos cauces. Los depósitos son característicamente dispersos y erráticos en su distribución. Aunque en general los minerales de uranio y cobre ocurren juntos, los minerales de cobre visiblemente identificables no pueden considerarse como indicadores de la presencia de minerales de uranio, pues capas muy manchadas con sales de cobre exhiben poca o ninguna radioactividad y capas con un contenido despreciable de cobre pueden contener cantidades apreciables de uranio.

Uno de los rasgos característicos de los depósitos cupro-uraníferos es la diferencia mineralógica entre las porciones relativamente no oxidada y la oxidada de los depósitos. Aunque sólo han sido estudiados y explotados en algunos socavones, los minerales primarios incluyen pitchblenda, pirita, calcopirita, covelita, bornita, galena y gersdorfitas. La chalcocita también se encuentra en las zonas no oxidadas, pero puede ser secundaria, derivada de otros sulfuros. En los afloramientos marginales oxidados, los minerales primarios están típicamente alterados a

sulfatos hidratados, fosfatos, silicatos, carbonatos y arsenatos, incluyendo johannita, torbernita, uranofano, schoepita, becquerelita y zippeita, con malaquita, antlerita, brochantita, cianotriquita y eritrita. De los pocos depósitos hasta ahora estudiados, parece ser que los afloramientos marginales oxidados han sido empobrecidos de uranio y así puede esperarse una mejoría en la ley con el avance del desarrollo.

Generalmente los depósitos cupro-uraníferos, que parecen contener varios miles de toneladas, son considerados como productores potenciales de mineral si los afloramientos marginales oxidados ensayan más de 0.05% de U_3O_8 . Se cree que las porciones no oxidadas de tales cuerpos mineralizados pueden contener mineral de varias décimas de uno por ciento de U_3O_8 de promedio.

Depósitos uraníferos en asfalto

Los asfaltos uraníferos o asfaltitas se presentan en lentes, glóbulos y masas irregulares en ciertas areniscas del Triásico del sur de Utah. Estructural y litológicamente estos depósitos son semejantes a los depósitos de carnotita y cupro-uraníferos de las mismas formaciones. Sin embargo, en muchos otros depósitos asfálticos del mundo no se han encontrado cantidades de uranio de importancia económica.

Depósitos de uranio en calizas

Las concentraciones comerciales de uranio en calizas son relativamente raras; sin embargo, se sabe que ciertas capas fosfático-calcáreas contienen cantidades apreciables de uranio.

En el flanco noreste del Levantamiento Zuni, en el noreste de Nuevo México, se han encontrado depósitos de uranio en calizas. Allí los minerales de uranio se han concentrado en zonas tabulares de forma irregular principalmente en el primer metro de la cima de la formación Todilto, del Jurásico, aunque las concentraciones de mineral de uranio se extienden hacia abajo

CONSIDERACIONES SOBRE DEPOSITOS DE URANIO

a las capas inferiores a lo largo de diaclasas y planos de estratificación.

Las capas superiores de esta formación tienen un espesor que varía entre sesenta centímetros a seis metros y consisten de calizas cristalinas de textura gruesa, compactas y homogéneas y la formación generalmente cubre bancos bajo los cuales se encuentran las formaciones Entrada, Wingate y Chinle del Jurásico y Triásico.

El problema básico en la exploración de uranio en la Altiplanicie de Colorado es el siguiente: ¿Las aguas superficiales y subterráneas que depositaron el mineral obtuvieron las sales de uranio de vetas anteriores expuestas en las rocas cristalinas en las áreas marginales por procesos de intemperismo, llevándolas a los sedimentos a donde ahora se encuentra, ya sea mientras se depositaban o más tarde en el curso del desarrollo de su topografía actual? o ¿Fué introducido desde abajo el mineral de los sedimentos (y en las aguas subterráneas en ellos) por las aguas hidrotermales ascendentes elevándose a lo largo de profundas fracturas principales ocultas y utilizando las fracturas secundarias (diaclasas) para el avance rápido en los sedimentos del último millar de metros superior de las rocas?. Si la segunda hipótesis es cierta debe existir una relación demostrable entre las configuraciones principales y secundarias de fracturas en una región y los centros alrededor de los cuales está distribuido el material. Para saber si existe dicha relación es necesario saber (1) cuál es la configuración de fracturas en una región dada y (2) dónde están los centros de concentración del mineral y cuál es su forma.

Se consideró el estudio del Levantamiento Zuni como el más apropiado para resolver este problema básico. Los objetivos de este estudio fueron determinar la naturaleza de la configuración principal de fracturas del Levantamiento Zuni; analizar esta configuración para obtener evidencia sobre el origen del levantamiento y comparar el fracturamiento en las áreas mineralizadas con el de las demás áreas del levantamiento para in-

vestigar si existían rasgos diagnósticos que hicieran posible la determinación de otras áreas favorables.

El procedimiento general fue medir las diaclasas en áreas representativas en numerosos puntos distribuidos horizontal y estratigráficamente en todo el levantamiento Zuni; dibujarlas junto con las fallas observadas y compiladas y luego comparar la configuración de fracturas resultante con las de varios levantamientos menores de origen conocido. Se estudiaron pliegues de dos tipos de origen: anticlinales largos y angostos, típicos de fajas atribuidas a compresión horizontal y amplios arqueamientos demostrablemente producidos por materiales inyectados a profundidad. De los dos anticlinales estudiados que se consideran fueron formados por compresión horizontal uno es un pliegue en la región de Marathon del oeste de Texas y el otro un pliegue de la faja plegada de los Apalaches cerca de Maysville, West Virginia. En ambos el fracturamiento más continuo se orienta formando un ángulo de setenta y cinco grados con el eje del pliegue. Solamente un ejemplo del segundo tipo se estudió en el campo: una estructura lacolítica, el Arco Maze en las Montañas Henry, en Utah. Su configuración de fracturas fue comparada con varias estructuras descritas en la literatura. Todas estas estructuras arqueadas "pasivamente" por elevaciones de masas desde abajo, están caracterizadas por tener sus fracturas más continuas paralelas a sus ejes mayores.

Una comparación de estas dos configuraciones contrastadas llevan a la conclusión de que el levantamiento Zuni tiene relaciones más estrechas con el segundo grupo que con el primero. Esto sugiere que es el resultado del arqueamiento de las rocas sobre masas que se elevan desde abajo, más bien que el resultado del plegamiento por compresión lateral. Otras características generales del levantamiento apoyan esta conclusión tales como el paralelismo de las fracturas en los flancos sedimentarios con los del núcleo cristalino, la prominencia de pilares (horsts) en el núcleo cristalino y varias estructuras que indican fracturamiento profundo bajo las rocas sedimentarias en los flancos (tales como grandes fallas monoclinales y fenómenos

CONSIDERACIONES SOBRE DEPOSITOS DE URANIO

volcánicos). Todo esto requiere que el arqueamiento sea producido por grandes pilares del basamento cristalino, que se elevan diferencialmente. La edad de este arqueamiento es principalmente Terciario, pero es posible que los movimientos de estos pilares ocurrieran tan anticipadamente como en el pre-Pensilvánico y Pérmico y puede haber continuado hasta la actualidad, imprimiendo recurrentemente diaclasas semejantes.

La área general en la cual se ha encontrado la mayor parte del mineral es una parte prominentemente fallada del levantamiento, caracterizada además por fenómenos volcánicos asociados. Allí las diaclasas siguen esencialmente dos direcciones principales, cualquiera o ambas de las cuales pueden encontrarse en algún punto y cuando menos una de las cuales tiene la dirección de las fracturas principales en las partes correspondientes del núcleo cristalino. La línea de afloramientos de las formaciones Jurásico-Cretácicas, a lo largo de este flanco noreste, muestra varios "festones" grandes. Estos son rasgos estructurales debidos al efecto combinado de flexión y fallamiento. Se demuestra que no son rasgos meramente erosionales por las curvas estructurales trazadas sobre la arenisca Entrada en una porción de ese flanco. La mayor parte de los depósitos conocidos en otras partes del levantamiento yacen sobre o cerca de monoclinales principales o de fallas.

La posición estructural del cuerpo principal mineralizado sugiere la posibilidad de que el mineral esté relacionado con el fracturamiento. Las fallas prevalecen en las áreas mineralizadas y las diaclasas parecen ser especialmente numerosas cerca de las fallas. La abundante fluorita asociada con algunos de los minerales en la caliza Todilto, sugiere una posible conexión con la presencia de espato fluor, en cantidades comerciales, en vetas o fallas en el núcleo cristalino, aunque el intervalo Pérmico y Chinle, hasta ahora estéril, separe a estas dos regiones en la superficie. Algunos mapas de los cuerpos uraníferos muestran alargamientos bien definidos en las direcciones de los fracturamientos principales. Hay también dos características generales de los levantamientos del tipo de arqueamiento pasivo que per-

miten considerar al levantamiento Zuni como una estructura favorable a la mineralización del uranio: El arqueamiento pasivo produce una dilatación lateral de las rocas sedimentarias que crea nuevos espacios abiertos, y hace que la estructura aumente en intensidad con la profundidad, permitiendo el acceso a fuentes más profundas de mineralización, si tales fueron en verdad responsables de la introducción del mineral.

El concepto estructural derivado del levantamiento Zuni se aplica a áreas más grandes. La dirección de varias flexiones y fajas volcánicas sugieren que las zonas principales de fracturas se extienden más allá de los límites del levantamiento mismo. Estas zonas pueden extenderse a levantamientos adyacentes, incluyendo grandes fracturas a lo largo de las cuales se elevaron bloques limitados por fallas, como los del levantamiento de Zuni. Si es así, podrían ser consideradas como posibles lugares de mineralización.

Fosforitas uraníferas

Se ha informado de cantidades significativas de uranio en los depósitos de fosfatos de Rusia, Marruecos, Argelia, Tunisia y Egipto, en la formación pérmica Fosforia de Idaho, Montana y Wyoming y en las formaciones Hawthorne del Mioceno y Bone Valley del Plioceno, del centro de Florida.

Se ha encontrado que todas las formaciones de fosfatos marinos de los Estados Unidos, cuya radioactividad ha sido medida, contienen cantidades significativas de uranio. Estos fosfatos uraníferos, cuya edad va del Paleozoico al Cenozoico, generalmente contienen uranio en proporción a su contenido de fosfato, aunque ciertas capas de ley alta de fosfato tienen una ley relativamente baja de uranio y las capas más uraníferas conocidas, no son las más fosfáticas. Los fosfatos son formaciones característicamente delgadas y muchas están asociadas con discordancias.

La mayor parte del uranio en los depósitos de fosfato conocidos parece estar en los minerales fluorapatita y colofano,

CONSIDERACIONES SOBRE DEPOSITOS DE URANIO

en los cuales el uranio probablemente reemplaza en parte al calcio. El uranio también está contenido indudablemente en alguno de los minerales arcillosos de los depósitos de fosfato y es absorbido por parte de la materia orgánica.

Lutitas negras uraníferas

Desde hace varias décadas se conocen concentraciones relativamente bajas de uranio en vastos tonelajes de lutitas carbonosas y bituminosas en muchas partes del mundo. En 1893 se descubrió por primera vez uranio en las lutitas de alumbre, negras, del Cámbrico de Suecia. Desde entonces se ha descubierto uranio con una rapidez progresivamente mayor en ciertas lutitas negras en Rusia, Estonia, Alaska y en amplias áreas de la parte central de los Estados Unidos. Muchas rocas bituminosas o carbonosas no son, sin embargo, uraníferas, lo cual sugiere que se requieren características especiales en rocas de este tipo si es que han de ofrecer oportunidad para el descubrimiento de cantidades apreciables de uranio. Las lutitas uraníferas marinas importantes son negras o de color muy oscuro; tienen un alto contenido de sulfuro y de materia orgánica, poco carbonato y son relativamente delgadas, teniendo estratificación delgada y, hasta donde se sabe, tienen una edad pre-Mesozoica.

Aún no ha sido completamente resuelta la mineralogía de las lutitas negras uraníferas y en la mayoría de los casos no son identificables minerales definidos de uranio. Este se presenta en las porciones de grano fino de la roca y es soluble en ácido; puede ser incorporado en las retículas de los cristales de los minerales arcillosos y en los compuestos orgánicos.

Placeres y depósitos aluviales

Las concentraciones de minerales uraníferos en los placeres y depósitos aluviales son considerados, en general, fuentes insignificantes de producción. Sin embargo, cabe señalar una

excepción notable, si se acepta el origen aluvial de los minerales de oro y uranio asociado del Witwatersrand en Sud Africa. Se ha informado de la existencia de gran tonelaje de uraninita en los filones de oro con una ley probable del orden de 0.01% de U_3O_8 .

Depósitos salinos lacustres

Se conocen unas cuantas concentraciones débiles de minerales secundarios de uranio junto con minerales salinos en las arcillas, limos, arenas y calizas arcillosas de capas de antiguos lagos. No se ha producido mineral de este tipo de depósitos y no parece ofrecer promesa alguna en la actualidad.

CONSIDERACIONES SOBRE DEPOSITOS DE URANIO

BIBLIOGRAFIA

- George, D'Arcy, "Mineralogy of Uranium and Thorium Bearing Minerals" *United States Atomic Energy Commission*, R. M. O-563 enero de 1949.
- Everhart, Donal L., "Geology of Uranium Deposits", U. S. *Atomic Energy Commission*, R. M. O.-732, mayo de 1951.
- Butler Jr., Arthur P., "The Geological Survey's Work on the Geology of Uranium and Thorium Deposits", *U. S. Geological Survey*, T. E. I.-207, abril de 1952.
- "Selected Papers on Uranium Deposits in the United States", *U. S. Geological Survey Circular* 220, 1952.
- Gilkey, Arthur K., "Fracture Pattern in the Zuni Uplift", *United States Atomic Energy Commission*, R. M. E.-3050, junio de 1953.
- Bucher, Walter H., "Fracture Studies in the Zuni and Lucero Uplifts, New Mexico", *Annual Report for June 15, 1952 to April 1, 1953, Part I*, R. M. E.-3042, junio de 1953.
- Wright, Robert J., "Lithologic Ore Controls in Sandstone-type Uranium Deposits, Colorado Plateau", Trabajo presentado en Toronto, Canadá, en noviembre de 1953.
- Finch, Warren I., "Distribution of Uranium Deposits in the Shinarump Conglomerate of the Colorado Plateau", Trabajo presentado en Toronto, Canadá, en noviembre de 1953.
- Miller, Leo J., "Ore Textures of Uranium and Associated Minerals from the Colorado Plateau Uranium Deposits", Trabajo presentado en Toronto, Canadá, en noviembre de 1953.
- Mawdsley, J. B., "Radioactive, Pronouncedly Differentiated Pegmatite Sill, Lac La Range District, Northern Saskatchewan, Canadá", Trabajo presentado en Toronto, Canadá, en noviembre de 1953.
- Parking, L. W., "Geology of Radium Hill Uranium Mine, South Australia", Trabajo presentado en Toronto, Canadá, en noviembre de 1953.