

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

## CURSO REGIONAL DE CAPACITACIÓN EN LA PROSPECCIÓN DE URANIO

BUENOS AIRES, 8 de setiembre - 31 de octubre 1969

---

### V. EVALUACION Y CALCULO DE RESERVAS

#### 2. PRINCIPIOS BASICOS SOBRE CONCENTRACION DE MINERALES. COSTOS FABRILES MEDIOS.

Ing. OMAR VALENTINUZZI  
Dr. EDMUNDO G. MACCHIAVERNA

PRINCIPIOS BASICOS SOBRE CONCENTRACION DE MINERALES DE URANIO

COSTOS PROMEDIO

EDMUNDO G. MACCHIAVERNA - OMAR VALENTINUZZI

Comisión Nacional de Energía Atómica

I. INTRODUCCION

El uranio se obtiene actualmente por técnicas hidro metalúrgicas según el siguiente esquema:

MINERAL  
↓  
OBTENCION DE CONCENTRADO  
↓  
REFINACION DE CONCENTRADO  
↓  
PRODUCTO NUCLEAR  
↓  
ELEMENTO COMBUSTIBLE

Las distintas etapas para la producción de concentrados pueden ordenarse así:

MINERAL  
↓  
TRITURACION Y MOLIENDA  
↓  
BENEFICIO FISICO  
↓  
LIXIVIACION  
↓  
SEPARACION SOLIDO-LIQUIDO  
↓  
RECUPERACION DEL URANIO DEL LIXIVIADO  
↓  
OBTENCION DEL CONCENTRADO

dependiendo el proceso a utilizar, lógicamente, de las carac-

terísticas de la mena.

## II. CLASIFICACION DE LOS MINERALES

Los minerales uraníferos pueden clasificarse:

- a) por su composición química,
- b) por su forma de tratamiento.

La primera ya ha sido vista y entre otras formas de enunciación recordaremos la siguiente:

- 1) Oxidos simples (uraninita o pechblenda).
- 2) Silicatos simples (coffinita, uranothorita, etc.).
- 3) Oxidos múltiples (microlita, brannerita, pirocloro, etc.).
- 4) Oxidos hidratados y sales hidratadas (gummita, autunita, torbernita, carnotita, tyuyamunita, uranofano, etc.).

Desde el punto de vista de su tratamiento se los clasifica teniendo en cuenta la influencia que tienen el proceso a usar:

- a) la valencia o estado de oxidación del uranio,
- b) las condiciones geológicas de formación,
- c) que en la mineralización el uranio sea constituyente esencial o sustituyente parcial de algún otro elemento.

Así generalizando, puede expresarse:

- que las menas de uranio hexavalente son más fácilmente lixiviables que las que lo contienen como tetravalente.

- que los minerales formados en altas condiciones de presión y temperatura son normalmente refractarios al tratamiento químico, pero pueden ser beneficiados físicamente.

- que el grado de sustitución de otro elemento (apatita, monazita, titanita, etc.) condiciona que el procesamiento

to se realice por el uranio o sea él un subproducto, como es el caso del tratamiento de ciertos fosfatos.

Pueden seguirse diversos criterios para realizar la clasificación según la forma de tratamiento, entre las cuales adoptaremos la siguiente:

MINERALES DE U <sup>IV</sup>	(	De tratamiento normal
(negros o primarios)	(	Refractarios al tratamiento
	(	Asociaciones carbonosas

MINERALES DE U<sup>VI</sup>  
(amarillos o secundarios)

Se deberá tener muy en cuenta que estas clasificaciones no son rígidas pues en la misma mena pueden participar minerales de distinto tipo.

## II.1. MINERALES DE U<sup>IV</sup>, NEGROS O PRIMARIOS.

En ellos el uranio se encuentra al estado tetravalente. Como características normales de tratamiento han de considerarse:

a) la existencia de condiciones oxidativas durante toda la etapa de lixiviación, ya que el U<sup>IV</sup> es insoluble en ácido sulfúrico diluido o en carbonato de sodio, que son los reactivos normalmente empleados en la hidrometalurgia nuclear;

b) exigir generalmente una molienda fina para exponer el mineral al lixivante y permitir una adecuada cinética de disolución, siendo ésto más necesario en las condiciones de ataque por vía alcalina.

Mencionaremos dentro de este tipo a la uraninita o pechblenda, que es predominante en la mayoría de los depósitos, acompañada con frecuencia por minerales secundarios. Puede encontrarse en masas relativamente importantes que permiten la obtención de un concentrado por selección manual, radi

métrica o gravitacional (Congo Belga), o hallarse como una fina diseminación (Lake Athabasca en Canadá).

Refractarios al tratamiento: responden a la estructura de óxidos múltiples. Existen en pegmatitas o depósitos de tipo pegmatítico y como derivados de la meteorización de las mismas y ocasionalmente diseminados como constituyentes de granito.

Cuando esa transformación no se ha realizado, estos óxidos múltiples son extremadamente resistentes a la disolución. En relación con la fórmula general de los mismos  $A_m B_n O_x$  y sus constituyentes, se puede expresar que cuanto mayor es la concentración de Tantalio y Columbio ( $B_n$ ) más refractarios son, y que esa característica disminuye en presencia de Titanio o Hierro.

Las razones que hacen que integren un grupo aparte no derivan de problemas ligados con la oxidación del uranio, sino con su resistencia al ataque químico, requiriendo para la puesta en solución, además de las condiciones oxidativas normales, el empleo de ácido concentrado y alta temperatura.

Podemos mencionar entre otros a la brannerita (se la encuentra en Blind River en Canadá, acompañando a uraninita) y a la davidita (Radium Hill en Australia).

La primera se caracteriza porque cuanto menos alterada se encuentra, tanto más difícil es su tratamiento, necesitando ataque en caliente, sulfúrico o aún nítrico.

La davidita puede contener también vanadio, tierras raras y thorio, requiriendo un ataque con ácido sulfúrico concentrado en caliente. Para que el tratamiento sea económico puede ser necesario realizar una concentración física previa, como en Port Pirie.

También debemos mencionar a la coffinita (Utah, New Mexico, Colorado, etc.), que es uno de los minerales más re-

fractarios al tratamiento desde el punto de vista estructural, aunque se conocen manifestaciones que la contienen y que aceptan un tratamiento normal, como en Ambrosia Lake en New México y en Big Indian Wash en Utah.

Asociaciones carbonosas. En esta categoría se encuentran las especies en las cuales, como se ha sugerido, las condiciones orgánicas reductoras del medio han provocado la precipitación del  $U^{IV}$  a partir de las soluciones uraníferas migratorias.

Se deben distinguir:

- a) las asociaciones de uraninita u otro mineral con materia orgánica fósil, y
- b) las asociaciones con materia orgánica formando un complejo urano-orgánico.

En el primer grupo encontramos a la tucholita. Su extracción por vía ácida o alcalina, requiere molienda fina.

En el segundo grupo es difícil poder definir algún tipo de mineral y en ellos el uranio no siempre se encuentra como tetravalente. Mencionamos entre otros a las asfaltitas, los esquistos y los lignitos. En los últimos se encuentra sorbido y la extracción puede realizarse por simple desorción. En otros casos es necesario efectuar una tostación y molienda fina para lograr resultados económicos.

## II.2. MINERALES DE $U^{VI}$ , AMARILLOS O SECUNDARIOS.

El uranio disuelto, meteorizado, etc., de los minerales primarios, puede ser redepositado como óxidos, hidratos o no, o bien combinarse con elementos provenientes de otros minerales y formar finalmente una gran variedad de fosfatos, arseniatos, vanadatos, sulfatos, carbonatos, etc.

La alta extractabilidad del uranio en estos casos y el hecho de estar acompañado de otros elementos recuperables como subproductos, hacen muy importante su explotación.

✓ Entre ellos mencionaremos la carnotita, tyuyamunita, autunita, torbernita, uranofano, etc.

### III. TRATAMIENTO DE LAS MENAS

Para la obtención de concentrados uraníferos se sigue el esquema ya mencionado en 1.

#### III.1. TRITURACION Y MOLIENDA

Las menas son sometidas normalmente a un tratamiento de trituración y molienda para lograr una buena liberación del uranio y permitir el ataque por las soluciones lixiviantes. Excepciones a este caso son:

a) el empleo de la lixiviación "en pila", que requiere solo una trituración grosera,

b) aquellos casos en que el uranio es subproducto de otros tratamientos u operaciones y en los que el mineral se provee en forma de pulpa, como en Sud-Africa.

En esta etapa ha de tenerse muy en cuenta la tendencia de las menas uraníferas de dar lamas, con sus consecuentes problemas de separación sólido-líquido. Además, el tipo de lixiviación, que también la condiciona. El ataque alcalino exige un grano más fino que el ataque ácido.

En forma sucinta puede expresarse que los factores que rigen la molienda son:

- Accesibilidad a los lixiviantes.
- Cinética de la disolución.
- Viscosidad de las suspensiones que se originen.
- Características de sedimentación de la pulpa.
- Condiciones de separación sólido-líquido.

Puede operarse en seco o en húmedo.

#### III.2. TRATAMIENTO FISICO

Han sido realizados muchos estudios tendientes a la aplicación de las técnicas de beneficio físico a las me-

nas nucleares, pero la mayoría de éstas no responden positivamente a tales metodologías. Por esta razón, en general, luego de la trituración y molienda son enviadas directamente al tratamiento químico.

Los motivos principales del empleo de las técnicas mineralúrgicas pueden clasificarse así:

a) Para producir un concentrado de uranio que permita lograr un menor costo de acarreo hasta la planta de tratamiento hidrometalúrgico y consecuentemente un menor dimensionamiento de la misma o un aumento correlativo de la capacidad ya instalada.

b) Para eliminar componentes no uraníferos de la mena en el caso que ellos puedan afectar algunas de las operaciones durante el tratamiento químico. Tenemos así el ejemplo de componentes muy consumidores de reactivos lixiviantes tales como los calcáreos o los sulfuros, pudiendo éstos a su vez transformarse en materia prima para la obtención del ácido necesario para el ataque.

c) Para dividir el mineral en dos o más fracciones con lo que puede ser posible realizar un tratamiento diferencial de cada una de ellas. Por ejemplo la obtención de un concentrado procesable bajo condiciones económicamente normales y un residuo de menor ley al que se aplique un tratamiento de mena pobre.

d) Para beneficiar algún otro mineral no uranífero contenido en la mena y que puede obtenerse como subproducto y hacer de ese modo más económica la recuperación del uranio.

Atenta contra la aplicación de las técnicas de beneficio físico, la tendencia a la friabilidad y a la producción de lamas, la diseminación que exige una molienda fina y el poseer estos minerales densidades semejantes a las de la ganga.

Algunas de las técnicas que han dado, a veces, re-

sultado son:

- Selección electrónica.
- Atricionado.
- Concentración gravitacional.
- Flotación.

- Selección electrónica: La radiactividad de los minerales de uranio permite realizar la separación de las fracciones ricas, ergo la obtención de concentrados.

La técnica es aplicable cuando en la explotación minera la fracción uranífera es acompañada por una proporción importante de material estéril y no existe otra actividad que falsee los valores obtenidos. Un detector adecuado permite la selección trozo por trozo, o aún por conjuntos, por laboreo manual o automatizado.

En los casos en que ha sido posible su aplicación, ha permitido separar 20 - 30% o aún más de material de rechazo, con pérdidas de uranio de un orden de 10%.

- Atricionado: En este caso se aprovecha la tendencia de estas menas a dar lamas. En la trituración y molienda, el uranio tiende a acumularse en los finos procedentes del cemento de las areniscas o de las pátinas superficiales de minerales de aquel elemento depositadas sobre las rocas silíceas constituyentes de la ganga. Por lo tanto ésta es una técnica aplicable a una mena friable, pulverizable por atrición y con ganga dura que resista la reducción a que está sometida.

Puede operarse en seco o en húmedo, separándose las lamas de las arenas en clasificadores o en hidrociclones. Sin embargo puede ocurrir que se obtengan buenos resultados en la acumulación selectiva en las lamas, pero que posteriormente se presenten graves problemas para la separación sólido-líquido que sigue al procesamiento químico.

- Concentración gravitacional: ha sido en general

muy poco aplicada dada la tendencia, ya expresada, de pasar los minerales de uranio a la fracción de lamas. Pocas veces se presentan con grano grueso y además los minerales secundarios tienen poca diferencia de densidad con la ganga. Puede emplearse con minerales primarios no muy diseminados (pechblenda).

Se ha tratado de utilizar, con resultados generalmente pobres, la separación con ciclones, por mesas vibratorias, espirales de Humphrey, y por medios densos. Esta técnica, por ejemplo, ha sido aplicada en combinación con flotación a un mineral de davidita en Radium Hill en South Australia con buenos resultados.

- Flotación: Se conocen muy pocas aplicaciones industriales de esta técnica. Ella requiere una liberación muy fina y además no existen por el momento reactivos específicos para el uranio. En cambio, ha sido aplicada en Moab (Utah, U.S.A.) para la separación de la fracción de sulfuros de cobre, acompañada de parte de los minerales de uranio que se procesa luego por vía ácida. Se obtiene así un concentrado de sulfuros que se comercializa. En Canadá se ha separado por flotación el carbonato de calcio presente en algunas menas y el uranio contenido en esa fracción se recuperó por extracción alcalina, en tanto que la cola de flotación se trató por vía ácida.

Asimismo en la C.N.E.A. argentina se han obtenido resultados promisorios en la flotación de la calcita contenida en concentrados gravitacionales de menas arcilloso-calcareas de baja ley (Yacimiento Cosquín, Pcia. de Córdoba).

- Tostación: La aplicación de esta metodología la consideramos como un tratamiento físico y químico complementario.

Previo a la etapa hidrometalúrgica, puede ser nece-

sario someter al mineral a una tostación, cuyos objetivos fundamentales son:

a) Eliminar algún elemento perjudicial para la lixiviación o la recuperación.

b) Transformar en compuesto soluble o lixiviable al uranio o algún elemento acompañante de interés.

c) Mejorar las condiciones de separación sólido-líquido de la suspensión del mineral lixiviado.

En todos los casos ha de prestarse atención a la temperatura y al régimen de calentamiento para evitar efectos adversos en lugar de mejoras.

El primer caso lo podemos ejemplificar con la eliminación de materias carbonosas, sulfuros, arsénico, etc.

El segundo se ha utilizado preferentemente para permitir la solubilización y recuperación del vanadio de carnotita, empleándose una tostación clorurante. Pero se ha de tener cuidado, ya que este tratamiento puede mejorar la extracción del vanadio pero interferir en la recuperación del uranio por intercambio iónico. También se ha empleado para mejorar la extractibilidad del cobre en menas cupro-uraníferas.

Del mismo modo se han desarrollado técnicas para mejorar la extracción de uranio de menas extremadamente refractarias al ataque, con gangas ácidas o alcalinas, realizándose un tratamiento a alta temperatura y con aporte de materiales sulfatantes, clorurantes y sílice, seguido por un ataque ácido inmediato. Se logra así una nueva ganga sílico-alumínica de la cual puede lixivarse el uranio.

El último caso se aplica para la deshidratación de las arcillas que acompañan a las mineralizaciones sedimentarias, mejorándose las características de sedimentación y de filtración de las menas lixiviadas. En este caso, la amplia introducción en la tecnología del empleo de agentes floculantes ha disminuído su uso.

### III.3. LIXIVIACION

Esta etapa comprende la puesta en solución del uranio y de todo otro elemento acompañante en la mineralización y que se quiera recuperar como subproducto.

El proceso de lixiviación es el eje de todas las operaciones de recuperación del uranio. Podemos decir con R.J. WOODY y D.R. GEORGE [1] que "como regla general las operaciones anteriores al circuito de lixiviación están diseñadas para producir una alimentación con tamaño de grano y densidad de pulpa óptima y las operaciones que le siguen lo están para manejar cualquiera de los productos que resulten de las condiciones de lixiviación".

Un reactivo lixivante ideal puede definirse como una sustancia que cumpla con las siguientes características:

- eficaz,
- barato,
- de fácil aprovisionamiento,
- no ser peligroso,
- no requerir materiales de construcción muy especiales o caros.

En la hidrometalurgia nuclear se ha recurrido casi universalmente a dos reactivos de ataque:

- el ácido sulfúrico para la lixiviación ácida,
- el carbonato de sodio para la lixiviación alcalina.

Se han estudiado o utilizado otros reactivos -ácidos clorhídrico, nítrico, etc.-, pero sin llegar, generalmente, a aplicaciones industriales.

La decisión sobre el tipo de lixiviación a emplear está condicionada fundamentalmente para la naturaleza de la ganga y por la mineralización uranífera.

De los dos tipos usados cada uno de ellos tiene de-

finido su campo de aplicación y también sus ventajas e inconvenientes.

Para el ataque ácido podemos indicar las siguientes:

- Los minerales son menos refractarios al ataque.
- Se logran mayores recuperaciones de uranio.
- Requiere menor grado de molienda.
- La concentración del reactivo es en general baja.
- El uranio es oxidado fácilmente.
- Requiere operar a temperatura ambiente o no muy alta.
- Para la recuperación del uranio de los lixiviados pueden elegirse varias vías (intercambiadores sólidos o líquidos).

Tiene como desventajas:

- dar lixiviados más impuros por disolución de otras sustancias y requerir eventualmente una refinación adicional de los productos obtenidos.
- necesitar materiales de construcción especiales o caros.
- exigir un tratamiento o neutralización adecuado de los estériles.

En el caso del ataque alcalino tenemos:

- La lixiviación es mucho más selectiva.
- La solución lixivante es reciclable luego de la recuperación del uranio.
- La solución es menos corrosiva y no requiere por lo tanto materiales especiales.
- El concentrado obtenido es más puro.

Tiene como desventajas:

- Requerir una molienda más fina.
- La cinética de la disolución es más lenta.

- El rendimiento de extracción es algo menor.
- El uranio es recuperable solo por precipitación directa o por resinas de intercambio.
- Requerir eventualmente mayor temperatura o aún presión para el ataque.

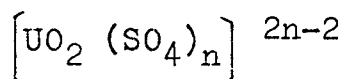
La lixiviación ácida es la más utilizada, empleándose para las menas que no tienen un alto contenido de cal cáreo o para aquellas de las que éste puede ser eliminado con un adecuado tratamiento.

### III.3.1. Lixiviación ácida:

En la misma el uranio pasa a solución como ión uranilo, pudiendo resumirse las ecuaciones que representan el proceso del siguiente modo



En realidad el uranio pasa a solución como complejo aniónico del tipo



que es fundamental para la recuperación con intercambiadores iónicos.

El proceso está determinado por

#### a) Parámetros físicos:

- Temperatura: La cinética de la disolución aumenta con la temperatura, siendo la influencia mayor en el ataque de los minerales primarios. Se trabaja normalmente entre 40 a 60°C.

- Molienda: En principio cuanto más liberado se encuentre el mineral tanto más lixiviable será el uranio. Pero

la técnica adoptada ha de ser una solución de compromiso entre esa condición y la formación de suspensiones de muy difícil separación, el mayor consumo de reactivos, la disolución de otros elementos y el costo de la molienda.

Durante el ataque, si se emplea agitación mecánica (tipo turbina) puede producirse una molienda adicional.

- Tiempo de ataque: El mismo depende de la técnica empleada. Así en ataque con agitación, se pueden lograr extracciones de un 80% en un par de horas, utilizándose normalmente 10 o más horas para obtener un rendimiento óptimo. Si la lixiviación es por percolación, los tiempos de contacto son del orden de 24 ó más horas.

Finalmente en la lixiviación "en pila" o "in situ" la duración del ataque puede involucrar largos períodos de tiempo (meses).

b) Parámetros químicos:

- Concentración de ácido: Debe ser la suficiente para poner el uranio en solución y mantenerlo en ella, evitando reprecipitaciones. Esto último es importante en el caso de presencia de fosfato o arseniato, que dan precipitados a pH bajos (de 1,9 a 2,7 y 1,1 a 1,5 respectivamente). Normalmente se opera con una concentración de 7 a 10 gramos de ácido sulfúrico libre.

Solo en casos excepcionales, o con minerales refractarios se utiliza ácido concentrado o con mucha mayor acidez libre. Desde el punto de vista económico interesa tener el menor consumo posible. El mismo es producido por la disolución de la mena uranífera, de la ganga calcárea, de otros componentes básicos, arcillas, fosfatos, óxidos, etc. Los consumos normales oscilan entre 25 a 100 kg. de ácido por tonelada de mena, aunque es mucho más representativo expresar el consumo por kilogramo de uranio puesto en solución.

-Oxidante: ya hemos visto en las ecuaciones I y II la necesidad del empleo de oxidantes para poner en solución los minerales tetravalentes.

El potencial normal del par  $U^{+4}/UO_2^{+2}$  en medio sulfúrico es de 410 mV.

Se emplean para ese fin pirolusita, permanganato, clorato, hipoclorito, agua oxigenada, etc. Pero la oxidabilidad es función primordial de la presencia del ión férrico. El mismo es el vehículo para la oxidación a  $U^{VI}$  y la acción del oxidante sirve para mantener una relación  $Fe^{+++}/Fe^{++}$  correcta. En principio ella debe ser igual o superior a uno y la concentración de hierro férrico de 0,5 a 2 g/l. La actividad real del ión puede estar afectada por la presencia en la solución de aniones complejantes como fluoruro, arseniato o fosfato.

La presencia del ión férrico se origina por incorporación a partir del mineral, o en la molienda. En este caso y para disminuir el consumo de reactivos, puede convenir retardar la adición del oxidante respecto a la del agente lixivante.

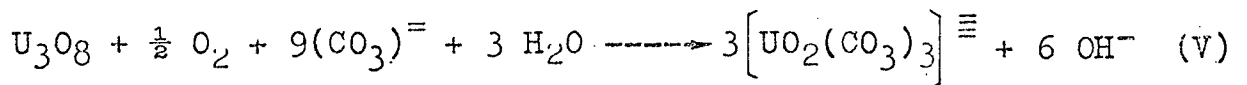
El empleo de uno u otro tipo de oxidante ha de depender de las características del proceso a utilizar, y de las disponibilidades de cada uno de ellos.

### III.3.2. Lixiviación alcalina.

El uranio hexavalente es soluble en las soluciones carbonatadas con formación de un complejo muy estable y soluble.

Las ecuaciones que pueden representar este proceso son:





En realidad el uranio forma en medio alcalino una serie de compuestos de los cuales, en las condiciones de lixiviación y en exceso de reactivo, el más estable es el uranil tricarbonato. Su solubilidad es función de la concentración de los otros co-solutos.

El proceso está determinado por:

a) Parámetros físicos:

- Temperatura: el proceso se realiza a la mayor temperatura posible, aumentando la extractabilidad con el aumento de aquella.

- Molienda: en general ha de recurrirse a una granulometría más fina que para el ataque ácido, sobre todo en el caso en que se encuentre muy diseminado.

- Tiempo de ataque: Existe una relación inversa entre la temperatura y el tiempo de ataque. Disminuye al aumentar aquella, y normalmente es más extenso que para la lixiviación ácida.

- Presión: La extracción es favorecida operando a presión. Esta es indispensable si se emplea como lixivante carbonato de amonio y se opera a alta temperatura.

b) Parámetros químicos:

- Agente lixivante: los reactivos normalmente empleados en la lixiviación alcalina son el carbonato y el bicarbonato de sodio. El último, como se demuestra en las ecuaciones de disolución (IV a VI), es necesario para neutralizar la alcalinidad generada, evitando así la reprecipitación del uranio.

Se ha utilizado igualmente el carbonato y el bicarbonato de amonio.

Las concentraciones oscilan entre un 4 al 8% de carbonato y de 1 al 2% de bicarbonato.

- Oxidante: dado que en este caso el potencial de oxidación es de 320 mV para el  $UO_2$  y de 340 mV para el  $U_3O_8$ , es posible emplear el oxígeno o el aire como oxidante. El proceso es favorecido por la presencia de catalizadores, siendo el más eficaz el cobre en solución amoniacal.

Se ha ensayado igualmente el uso del permanganato, con buen resultado. Han sido estudiados muchos otros agentes, obteniéndose resultados pobres.

### III.3.3. Técnicas de lixiviación

Pueden clasificarse del siguiente modo:

1. Lixiviación con agitación.
2. Lixiviación por percolación.
3. Lixiviación "en pila".
4. Lixiviación "in situ".
5. Otras formas de lixiviación.

Lixiviación con agitación: Es la forma más empleada. Puede realizarse en recipiente abierto o a presión.

Se tiende a operar con suspensiones lo más concentradas posible. Esto está condicionado por el grado de molienda y por la reología de la suspensión.

Con menas silíceas se puede trabajar con pulpas con un 65% de sólidos. En presencia de arcillas las suspensiones son viscosas y obligan a operar con solo un 35-40%.

La lixiviación a presión puede emplearse en circuito alcalino o ácido. En este caso, de existir sulfuros en la mena se puede generar el agente lixivante, con la consiguiente economía para el proceso.

Lixiviación por percolación: Para esta técnica se acumula el mineral en piletas adecuadas y se realiza la per-

colación del lixiviante. Se efectúa así en una sola etapa la extracción y la separación sólido-líquido. Requiere una molienda mediana o gruesa para permitir la circulación de las soluciones, obteniéndose merced al mayor tiempo de contacto la penetración de la solución. No puede emplearse con menas que rinden altos porcentajes de finos o con materiales arcillosos que impiden la circulación de los líquidos.

Lixiviación "en pila": En esta técnica el mineral es apilado según cierta geometría y regado con la solución lixiviante que se recicla continuamente hasta obtener una concentración aceptable de uranio. Se diferencia de la percolación en que no requiere un "receptáculo" para la operación y fundamentalmente porque el mineral no está "inundado" por el lixiviante sino solamente "empapado". La lixiviación se puede efectuar con cualquiera de los reactivos clásicos o aún realizarse una lixiviación "natural" aprovechando la meteorización u otros factores. Es una técnica mucho más suave y por ello más selectiva.

Los parámetros que rigen este sistema, aún no perfectamente esclarecidos, pueden resumirse como una relación entre la porosidad, la superficie específica, la permeabilidad, la difusibilidad y la tensión superficial, además de las características químicas propias del lixiviante.

Lixiviación "in situ": Se aplica para la recuperación del uranio contenido en paños mineralizados con leyes marginales que no pueden pagar su extracción minera. En estos casos con o sin demolición previa de los mismos y aprovechando canalizaciones o apoyos impermeables naturales, se realiza un regado con el lixiviante (fresco, proveniente de la recuperación de otras etapas de tratamiento, o agentes naturales).

Otras formas de lixiviación que interesan son:

Lixiviación bacteriana: que participa de modo importante en la lixiviación "in situ" y "en pila", así como en la producción de aguas de minas con concentraciones importantes en uranio. En esta forma de lixiviación actúan sobre los sulfuros el Thiobacillus thiooxidans, Ferrobacillus ferrooxidans, Thiobacillus ferroxidans y Thiobacillus concretivorus. Tiene aplicación en escala importante en Canadá.

Lixiviación con curado: En ella el mineral triturado y humedecido es mezclado con ácido concentrado, formando gránulos. Se lo deja actuar varias horas y finalmente se lo extrae por percolación con agua.

#### III.4. SEPARACION SOLIDO-LIQUIDO

Es ésta una operación que se repite en varias ocasiones durante el procesamiento. Su importancia es fundamental, ya que si la separación sólido-líquido es dificultosa puede llegar a invalidar la aplicación de alguna técnica de extracción ya desarrollada. Se utiliza:

a) luego de la molienda húmeda, para aumentar la relación de sólidos en la pulpa que va al ataque. Se realiza con espesadores o aún filtrando parte de la descarga del espesador,

b) luego de la lixiviación, para separar el mineral estéril de la solución portante. Se completa con varios pasos de repulpado y lavado para evitar pérdidas de uranio. En esta etapa se incluye igualmente la clarificación del lixiviado previa a su recuperación,

c) en la etapa final de recuperación del uranio como concentrado. Podría incluirse igualmente alguna aplicación intermedia, como sería el caso de realizar una precipitación fraccionada para mejorar la calidad del concentrado.

Cabe destacar aquí el interés que puede presentar el empleo de la lixiviación por percolación, en pila, o con

curado previo, que evitan alguna de las etapas de separación sólido-líquido.

Las técnicas utilizadas son las clásicas en hidrometalurgia y las podemos resumir así:

- a) Decantación y lavado en contracorriente.
- b) Filtración en etapas con lavado en contracorriente.
- c) Combinación de los anteriores.

La elección de los métodos se funda en:

- a) El tipo del mineral, su ley y la molienda.
- b) Las características de decantación y filtrabilidad de la pulpa.
- c) El tonelaje a tratar.
- d) Costos de equipos, disponibilidad local de los mismos y su mantenimiento.
- e) Factores personales de elección.

Todas estas operaciones son hoy facilitadas por el empleo de floculantes naturales o sintéticos. Ellos posibilitan operaciones que eran antes de realización dificultosa o imposible, o que requerían un tratamiento previo como la tostación.

Su selección requiere un cuidadoso estudio para emplearlos solos o combinados y de modo que se logre un máximo aprovechamiento de sus propiedades.

#### III.4.1. Decantación y lavado en contracorriente

Se aplica a menas con buenas características de sedimentación o que las tienen por agregado de floculantes. Los lixiviados sufren una gran dilución, por lo cual la aplicación es dificultosa para menas de baja ley. En el caso de aplicarse la técnica de "resina en pulpa" (R.I.P.) puede operarse con lixiviados sin clarificar.

#### III.4.2. Filtración

Involucra también una serie de pasos intermedios de lavados repulpados y filtración. La dilución en estos casos se minimiza. Puede aplicarse a pulpas poco arcillosas. Se utiliza igualmente en la separación final del concentrado con o sin agregado de floculante, y de acuerdo con las características propias del precipitado obtenido. Se requiere la realización de lavados para eliminar las aguas madres que pueden afectar las especificaciones que deben cumplir estos productos.

#### III.4.3. Combinación de decantación y filtración

Muchas veces es útil realizar una combinación de las dos técnicas. Así en cualquiera de las etapas de filtración puede recurrirse con ventaja a un espesamiento previo, que ha de mejorar la alimentación y operación del filtro. Del mismo modo, luego de una serie de espesadores en contracorriente puede efectuarse una filtración.

#### III.4.4. Clarificación

Las técnicas empleadas para la recuperación del uranio de las soluciones portantes requiere excepto en el caso de emplear la de "R.I.P.", una clarificación de los lixiviados.

Se emplea para ello filtros de arena, de precapa, de hojas o prensa.

#### III.5. RECUPERACION DEL URANIO DE LOS LIXIVIADOS

Esta etapa ha recibido especial atención, habiéndose logrado métodos selectivos y económicos para la obtención de concentrados de uranio de la mayor pureza posible. En los lixiviados (ver tabla nº 1) el uranio se encuentra en concentraciones del orden del gramo por litro y además en presencia de otros iones que superan su concentración. Por otro la-

do la calidad del concentrado a obtener es función del procesamiento a que será sometido posteriormente (ver tabla 2).

Las técnicas más utilizadas son:

- 1) Precipitación directa del uranio de sus lixiviados.
- 2) Recuperación con extractantes selectivos.
  - a- Resinas de intercambio iónico.
  - b- Solventes.

La primera técnica fué empleada en los principios de esta industria, época en la que se trataban menas ricas que rendían lixiviados de alta concentración. La necesidad de recuperarlo de otras de mucha menor ley provocó el empleo de las demás.

### III.5.1. Precipitación "directa" en los lixiviados.

Se puede emplear según dos objetivos:

- 1) La obtención de un concentrado comercial.
- 2) La obtención de un "preconcentrado".

#### III.5.1.1. Obtención de un concentrado comercial

La precipitación "directa" tiene el inconveniente de rendir productos de menor calidad, con recuperaciones que no siempre pueden ser cuantitativas, y con un consumo alto de reactivos. Cabe distinguir aquí la precipitación en los lixiviados alcalinos de los ácidos. Dada la selectividad de la primer forma de extracción, sus concentrados son más puros que los del segundo.

En soluciones alcalinas se ha ensayado:

a) la precipitación con soda cáustica a alto pH, que rinde concentrados de alta ley. Por otra parte las aguas madres se recarbonatan y son recicladas a la etapa de lixiviación, con la consecuente economía del reactivo.

b) la precipitación por reducción del uranio con

TABLA 1

COMPOSICION DE LIXIVIADOS (g/l)

	<u>Lix.Acida</u>	<u>Lix.Alcalina</u>
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> .....	0.2 - 3	0.2 - 2
Fe .....	0,5 - 10	0 - 0.03
Fe <sup>+++</sup> /Fe <sup>++</sup> .....	≥ 1	-
Al .....	0,5 - 15	-
Mn .....	0.2 - 7	-
Mg .....	0.1 - 3	-
Mo .....	0 - 0.5	-
Cu .....	0 - 40	0 - 10
Ti .....	0.1 - 0.5	-
Th .....	0. - 0.5	-
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> .....	10 - 200	0 - 50
PO <sub>4</sub> <sup>=</sup> .....	0 - 12	0 - 1
Cl <sup>-</sup> .....	0 - 15	0 - 20
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	0 - 2	0 - 2
S <sub>x</sub> O <sub>6</sub> <sup>=</sup> .....	0 - 0.06	-
Co(CN) <sub>6</sub> <sup>=</sup> .....	0 - 0.004	-
CO <sub>3</sub> <sup>=</sup> .....	-	30 - 70
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	-	10 - 30
SiO <sub>2</sub> sol. ....	0 - 3	0 - 1
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> libre.....	3 - 15	-
pH .....	0.5 - 1,8	10 - 10.7

TABLA 2  
CARACTERISTICAS DE CONCENTRADOS

	<u>TIPO A</u>	<u>TIPO B</u>
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> min. ....	75.00 %	75 %
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> max. ....	2.00 " del cont. U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> .....	0.10
PO <sub>4</sub> " .....	4.00 " .....	0.10
Mo " .....	0.60 " .....	0.10
Fe " .....	- " .....	0.15
B " .....	0.20 " .....	0.0050
Cl, Br, I (como Cl) " .....	0.30 " .....	0.05
F " .....	0.10 " .....	0.01
As " .....	2.00 " .....	0.05
CO <sub>3</sub> <sup>=</sup> " .....	4.00 " .....	0.20
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> " .....	10.00 " .....	3.00
Ca " .....	1.50 " .....	0.05
Th " .....	2.00 " .....	-
Zr " .....	2.00 " .....	-
Na " .....	- " .....	0.50
K " .....	- " .....	0.10
Sm " .....	0.015 " .....	-
Eu " .....	0.015 " .....	-
Gd " .....	0.015 " .....	-
Dy " .....	0.015 " .....	-
Ins. HNO <sub>3</sub> " .....	0.10 " .....	-
Perd. 110°C " .....	0.10 " .....	2.00
Mat. Org. " .....	0.10 " .....	
# < .....	1/4" " .....	1/4"

Tipo A para refinación (U.S.A.E.C. 1968)

Tipo B para conversión (Allied Chem.)

hidrógeno en presencia de catalizadores (siendo el  $UO_2$  generado, también un catalizador). El  $UO_2$  se separa por filtración. El método es de gran interés porque se obtiene un producto de alta pureza y se relaciona con las etapas posteriores de obtención de combustible nuclear.

En soluciones ácidas se ha empleado:

a) a precipitación directa con soda cáustica, magnesia, amoníaco o cal. Tiene el gran inconveniente de rendir productos muy impuros, por lo cual se recurre de práctica a una precipitación fraccionada, donde por riguroso control del pH se separan primeramente los metales pesados lixiviados, sulfato, fosfato, etc. y luego a mayor pH se precipita el diuranato.

De existir fosfato o arseniato en la solución se presenta el inconveniente de que también precipita el uranio. En estos casos es necesario realizar un complejamiento previo de esos aniones.

b) Se ha recurrido también a la precipitación como fosfato uranoso y como peróxido en soluciones nítricas, pero estas técnicas han sido abandonadas.

### III.5.1.2. Obtención de preconcentrados

Es prácticamente el único caso en que se sigue empleando la precipitación directa y es un complemento de las lixivitaciones "en pila", "in situ", o a veces para la recuperación de aguas de minas con alta concentración de uranio.

Puede realizarse también en una o dos etapas, y con los reactivos ya mencionados. Se obtiene preferentemente preconcentrados cálcicos o magnésicos, por economía o existencia local de los correspondientes reactivos. Se logran productos con una ley de 2 al 10% en  $U_3O_8$ , que luego se envían a plantas de tratamiento ortodoxo.

### III.5.2. Recuperación con extractantes selectivos

El empleo de esta tecnología ha sido el punto de partida real de la hidrometalurgia nuclear actual. Los engorrosos procesos de precipitación directa han sido superados por estas técnicas, que permiten de modo económico y tecnológicamente elegante, obtener concentrados que cumplan con las especificaciones vigentes.

El primer método introducido fué el de las resinas de intercambio iónico, y al promediar la década del 50 se comenzó a aplicar la de extracción con solventes selectivos.

Ambas tienen un fundamento químico semejante y su realización puede resumirse en las siguientes etapas:

- a) Extracción o transferencia del uranio del lixiviado al extractante.
- b) Tratamiento intermedio de lavado (no obligatorio).
- c) Reextracción o elución del uranio del extractante a una nueva solución. Tiene en ella mayor concentración y ha sido ya separado selectivamente en gran parte de los otros elementos que lo acompañaban en el lixiviado original. En algunos procesos puede combinarse esta etapa con la de separación por precipitación o por cristalización del uranio.
- d) Reacondicionamiento del extractante (no obligatorio).

#### III.5.2.1. Resinas de Intercambio iónico

Son sólidos granulados, que sobre una matriz orgánica tienen fijados grupos funcionales ionizados que permiten el intercambio de los iones móviles que balancean sus cargas. Participan de las características de diversos productos naturales intercambiadores de iones, como las zeolitas,

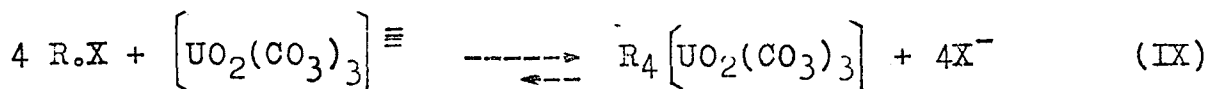
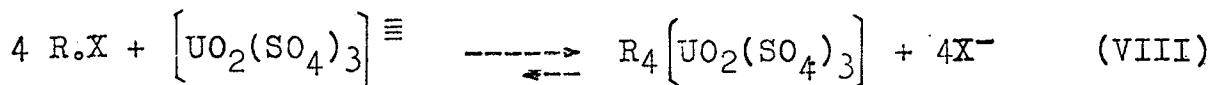
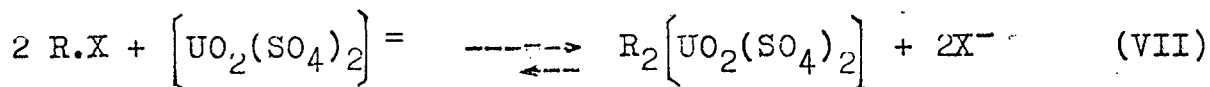
montmorillonitas, arcillas, etc.

Se los produce en tres tipos: para realizar intercambio aniónico, catiónico o aún mixto.

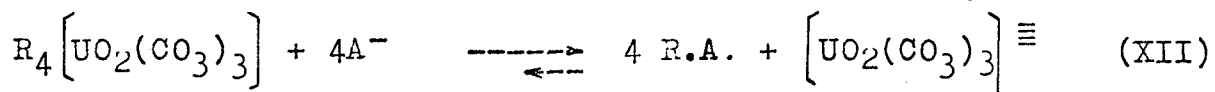
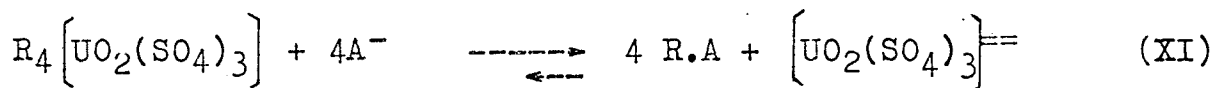
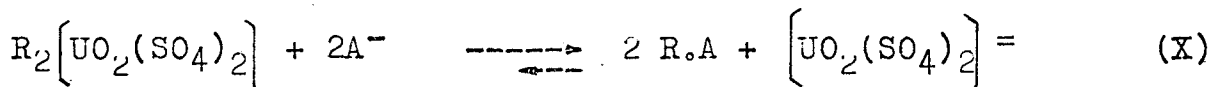
Dado que el uranio en sus lixiviados se encuentra como complejo aniónico (ecuaciones I a VI) se utilizan para su recuperación resinas aniónicas.

Las ecuaciones fundamentales que describen estos procesos son:

Etapa de extracción:



Etapa de elución:



(En realidad la existencia del anión uranil trisulfato es de difícil comprobación en las soluciones, habiéndose postulado la sorción del complejo disulfatado sobre la resina en forma sulfato).

Técnicas utilizadas:

a) Lecho fijo: se emplean columnas con un lecho de resina que ocupa de un 50 al 70% del volumen total, y por el cual percola el lixiviado clarificado.

Se distinguen las siguientes etapas en el proceso:

- de carga
- de lavado

- de elución
- de regeneración
- de expansión.

En la primera pasa el lixiviado por la resina, en la cual se va sorbiendo selectivamente el uranio, y el efluente cambia continuamente sus características hasta llegar a la misma concentración original.

Al llegar al punto de saturación de la resina, se realiza la operación de desplazamiento del lixiviado que empaapa el material y la de lavado.

Luego se efectúa la elución, que revierte la operación de carga, empleándose para ello un reactivo que se sorbe más que el uranio en las condiciones de operación.

Se logra así una solución con una concentración de 5 a 40 veces mayor que la concentración del lixiviado original, y en la que el uranio se encuentra con mucha mayor pureza.

Para iniciar un nuevo ciclo la resina es sometida, según el proceso lo requiera, a una etapa de regeneración. En ella se elimina el anión eluente que está fijado en la misma, siendo hoy posible y conveniente recuperarlo. Finalmente se efectúa un lavado en contracorriente para expandir el lecho que se ha apelmazado durante las etapas anteriores, eliminándose así algunos finos que se han acumulado y que pueden llegar a cegarlos.

Normalmente se opera con varias columnas en serie, lo que permite, en cierto modo, realizar una operación continua. Mientras dos o tres columnas están en la etapa de carga, una está en la elución y regeneración.

b) Lecho móvil: Para mejorar la tecnología del proceso se han desarrollado las técnicas de lecho móvil, que permiten realizar la operación en continuo. En ellas se sigue el

mismo ordenamiento de etapas que en el caso anterior. Se tiene en este caso efluentes y eluidos de composición constante.

c) Resina "en pulpa": Esta técnica permite operar con soluciones sin clarificar. En la misma la resina se coloca en cestos, que tienen un movimiento alternativo en la solución. Esta va circulando, en cierta forma, en contracorriente con la resina, que tiene en realidad una posición fija. En recientes desarrollos tecnológicos también ella circula.

Los mayores problemas que pueden presentarse en la tecnología de intercambio iónico son:

- Envenamiento de la resina en el caso de la existencia en el lixiviado de algunos aniones complejos, como politionatos, cobalticianuros, tiocianatos, ácidos húmicos y también por sílice.

- Taponamiento de la resina por envejecimiento o por cantidades excesivas de oxidante en el lixiviado.

La resina en la cual se observa una disminución progresiva o espontánea de su capacidad de fijación de uranio, puede ser regenerada y volver a condiciones de operabilidad.

- Hay una pérdida natural por atrición debida al roce y por trabajo osmótico, que oscila de un 2 al 5% anual según las condiciones de uso.

- La vida útil de la resina es función de diversos parámetros y fundamentalmente de las características del lixiviado y del modo de empleo. Puede superar normalmente los 1000 ciclos.

### III.5.2.2. Extracción con solventes

El proceso consiste básicamente en poner en contacto el lixiviado en el extractante selectivo, estando éste di-

luído en un medio adecuado y no miscible con la fase acuosa. Se distinguen las siguientes etapas en el proceso:

- de carga
- de lavado
- de reextracción
- de reacondicionamiento.

Los solventes selectivos pueden ser de naturaleza aniónica, catiónica o neutra, habiéndose empleado los tres tipos en la recuperación del uranio. Los diluentes son normalmente solventes hidrocarbonados, empleándose particularmente querosene, debiendo reunir los mismos características adecuadas. A estos sistemas se le agrega además, generalmente, un tercer compuesto que actúa como agente sinérgico.

La extracción con solventes selectivos han encontrado hasta el momento sólo aplicación a los lixiviados ácidos clarificados, con concentraciones de uranio medianas y altas. No se ha producido ninguno aplicable económicamente a lixiviados alcalinos. Además las pérdidas por arrastre pueden hacerlo inaplicable a lixiviados de baja concentración.

Los factores que se deben considerar para su elección son:

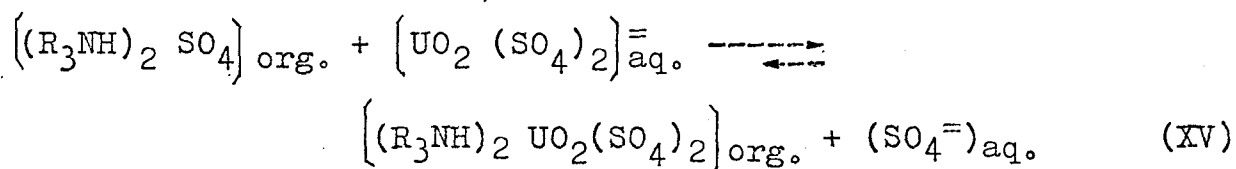
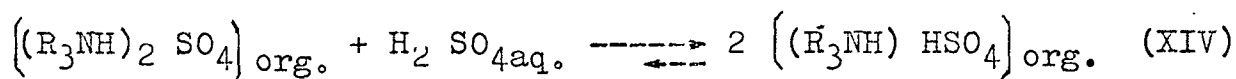
1. Coeficiente de distribución para el uranio.
2. Selectividad para el mismo.
3. Facilidad de reextracción del uranio.
4. Rápida separación de fases, sin formación de emulsiones estables.
5. Pequeña solubilidad del extractante en la fase acuosa.
6. Pequeño arrastre mecánico del extractante en la fase acuosa.
7. Diluyente barato, obtenible fácilmente y poco

inflamable.

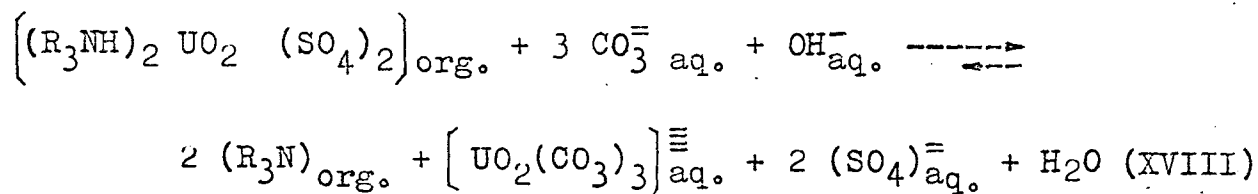
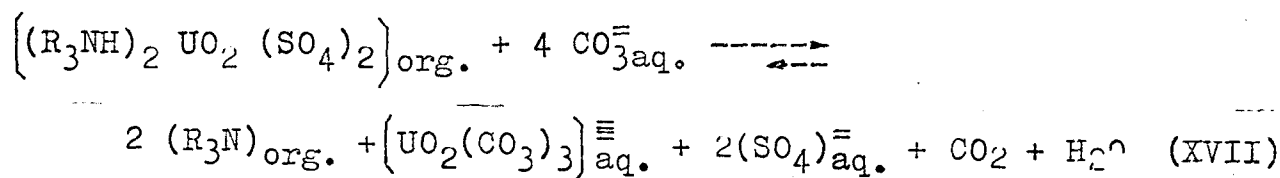
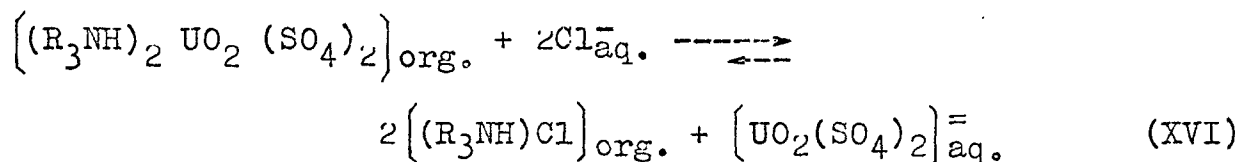
8. Estabilidad de la solución extractante-diluyente, que no requiera frecuentes eliminaciones de productos de degradación.

La química del proceso es semejante a la de resinas y puede esquematizarse así (para el caso de extractantes aminados aniónicos):

Extracción:



Elución:



Como en el caso de las resinas la recuperación se ve interferida por la presencia de otros iones que también son extraídos o que interfieren en el proceso, como los complejos aniónicos de hierro, vanadio o molibdeno, o bien cloruro y nitra

to. El pH de extracción más favorable se sitúa entre 1,5 y 2, y particularmente 1,8, pero, ante la presencia de fosfato que precipita a ese valor, se hace necesario operar a pH más alto.. Se produce al mismo tiempo una disminución en la capacidad para el uranio, fijándose otros iones y en particular el bisulfato (ecuación XIV). La extracción de esos iones depende lógicamente del tipo de solvente empleado.

La reextracción se puede realizar con soluciones de cloruro, nitrato, carbonato, etc., dependiendo la elección: del proceso posterior, la economía y disponibilidad de los mismos.

La mayor ventaja de los sistemas de recuperación por extracción líquido-líquido, respecto a las resinas de intercambio iónico, es que en ellos se opera en continuo. Los estériles y muy particularmente los eluidos son de composición constante. Los concentrados que se producen son más puros (para lixiviados ácidos), Además puede realizarse en una sola etapa la reextracción y precipitación del uranio, con la consecuente economía.

Los principales inconvenientes son:

- la posibilidad de formación de emulsiones estables,
- el arrastre mecánico del extractante por la fase acuosa.

Los equipos empleados son variados y en ellos, como se verá luego con más detalle, se trata de lograr el más eficiente contacto de las dos fases.

Se dividen fundamentalmente en:

- 1) Mezcladores sedimentadores.
- 2) Columnas.

### III.6 RECUPERACION DEL URANIO DE LOS ELUIDOS

De los eluidos de ambas tecnologías es necesario obtener los concentrados que luego han de ser refinados para producir los combustibles nucleares.

El concentrado debe cumplir con diversas especificaciones que son función del destino que se le dará al mismo.

En la tabla 2 indicamos las características del denominado "yellow cake", destinado a la refinación para la obtención de combustibles para reactores que funcionan con uranio natural. También se describe el concentrado para "conversión". Este ha de ser transformado en hexafluoruro que alimentará las plantas de enriquecimiento isotópico para los reactores que funcionan con uranio enriquecido.

Es decir que a partir de los eluidos, los más "puros" posibles, se trata de obtener esos productos, realizándose las etapas de precipitación, filtración, lavado, secado y calcinado.

Como agentes de precipitación se utiliza según las necesidades y disponibilidades: amoníaco, soda cáustica, magnesita o cal.

Para mejorar la calidad, cabe realizar en ciertos casos la precipitación en dos etapas, como ya se indicó anteriormente. A veces se favorece la operación trabajando en caliente o con agregado de floculante, pudiendo realizarse un espesamiento previo a la filtración. Como se mencionó se ha ensayado la realización de esta etapa simultáneamente con la elución.

Luego de realizados los lavados, con o sin repulsados para mejorar la calidad, se seca hasta un máximo de 7-10% de humedad. El producto obtenido se envía entonces a las plantas de refinación.

### III.7. REFINACION

Describiremos aquí muy sucintamente el procedimiento de refinación aplicado al "yellow-cake", para producir combustible para reactores a uranio natural.

El esquema es el siguiente:

Disolución nítrica del concentrado

Clarificación de la disolución

Refinación por extracción líquido-líquido con TBP

Precipitación y obtención de diuranato amónico refinado

Conversión del mismo en óxido ( $UO_3$  ó  $U_3O_8$ )

Reducción a  $UO_2$  (⌘)

Conversión en  $UF_4$

Conversión en U metálico

(⌘ el  $UO_2$  puede ser producto final, de usarse el dióxido sinterizable como combustible).

Hay otros métodos de refinación, que utilizan sistemas de extracción líquido-líquido, puros o mixtos con resinas.

El sistema empleado para el caso de "concentrado para conversión", aprovecha la posibilidad de obtener el hexafluoruro por sucesivas etapas de transformación en lecho fluidizado y refinación final por destilación del hexafluoruro.

### III.8. MUESTREO

Para terminar y antes de entrar al aspecto tecnológico de la industria del uranio, digamos algunas palabras respecto al muestreo.

El diseño, proyecto, realización y operación de una planta se basan en las condiciones y parámetros que son establecidos durante las etapas de estudio en el laboratorio y planta piloto hidrometalúrgicos. Los mismos se realizan con la muestra proveniente de la manifestación nuclear en cuestión. Por lo tanto todo el proceso tendrá una seguridad que será función de la representatividad del yacimiento que tenga la muestra enviada.

Y aquí vale la pena expresar que debe adoptarse una verdadera solución de compromiso, ya que por principio es muy difícil poder hablar de una muestra realmente representativa de un yacimiento, y por otro lado los métodos de recuperación tampoco son tan elásticos como para admitir procesar con una técnica un mineral que en la explotación minera difiera con el que se envió a estudio.

Por ello, por un lado, aquel que en el campo ha de preparar la muestra para el ensayo hidrometalúrgico, ha de tratar de lograr que la misma se aproxime lo máximo posible a lo que va a ser el mineral de explotación, con sus correspondientes diluciones y contaminaciones. Y por otro lado, quien diseñe el proceso de recuperación ha de pensarlo con las suficientes tolerancias como para que las variaciones normales de un proceso de explotación no alteren el ritmo de producción.

#### IV. ASPECTOS TECNOLOGICOS

##### IV.1. GENERALIDADES

Después de la revisión anterior sobre los fundamentos del procesamiento de los minerales de uranio, pasaremos a describir los equipos empleados. En la selección de los equipos adecuados, y en su dimensionamiento, intervienen de una manera fundamental las características del mineral a tra-

tar y de la ganga que lo acompaña.

Estas características deben determinarse por ensayos previos en escala de laboratorios y de planta piloto para que luego, con los datos obtenidos, pueda proyectarse una planta de escala comercial.

Una planta típica consta de las siguientes etapas:

- 1) operaciones preliminares (reducción de tamaño, muestreo),
- 2) lixiviación,
- 3) separación sólido-líquido,
- 4) recuperación del uranio de las soluciones,
- 5) precipitación y secado del "yellow cake",

cuya descripción haremos a continuación.

#### IV.2. OPERACIONES PRELIMINARES

##### IV.2.1. Reducción de tamaño

Antes de ingresar a la planta de procesamiento el mineral se somete a una reducción de tamaños, que se realiza en tres etapas:

1) Trituración primaria, que reduce el tamaño a 40-50 mm. Para este fin se emplean casi exclusivamente las trituradoras a mandíbulas, con aberturas de carga que llegan hasta 500 mm x 1000 mm. Para minerales húmedos la capacidad se reduce hasta la mitad, por lo cual se suelen reemplazar por trituradoras a impacto, que son más aptas para reducir los minerales húmedos y de características adhesivas, que atorarían las trituradoras a mandíbulas.

2) Trituración secundaria, que reduce el tamaño a 15-20 mm. También aquí se emplean en gran proporción las trituradoras a mandíbulas, aunque para grandes capacidades se utilizan a veces las trituradoras cónicas, del tipo Symmons.

3) Molienda fina: de acuerdo al método de lixiviación que se empleará en la planta se reduce el mineral a su tama-

ño final. Para lixiviación ácida, la mayoría de los minerales pueden extraerse con tamaños de partícula de malla 10 (1,65 mm) pero por razones mecánicas (facilidad de agitación y de transporte del mineral molido) se trabaja generalmente moliendo a menos de 28 mallas (0,5mm).

Para lixiviación alcalina, el ataque selectivo del carbonato de sodio requiere una molienda mucho más fina, a fin de que todas las partículas de mineral de uranio entren en contacto con la solución lixiviante.

Como equipos para esta molienda se emplean molinos a barras o a bolas en el primer caso y molinos a bolas en el segundo. La molienda se hace en húmedo y en circuito cerrado con algún sistema de clasificación (ciclón, clasificador a espiral o a rastrillos) que permita extraer del circuito una pulpa de mineral de densidad y granulometría constantes. Esta pulpa pasa entonces a la etapa de lixiviación, mediante bombas centrífugas engomadas.

#### IV.2.2. Muestreo del mineral

Generalmente las plantas de trituración de mineral de uranio incluyen un sistema de muestreos del mineral. Este sistema está intercalado con los equipos de trituración, de modo que después de la trituración primaria a 40-50 mm se toma una muestra primaria. Esta muestra se pasa a la trituración secundaria, que la reduce a 15-20 mm, y se muestrea nuevamente. La muestra secundaria se somete a una tercera trituración a 10-12 mm y muestreo, pasando luego a la preparación final.

Las dos primeras etapas de muestreo deben poder separar entre el 10 y el 25% del mineral en cada etapa y la tercera entre el 5 y el 40%. Así se tiene mayor grado de variación para determinar la cantidad final de muestra.

En algunos casos el primer muestreo se hace después de la trituración secundaria, y la muestra obtenida se somete

a. los siguientes pasos de preparación.

Los muestreadores empleados son de marcha automática y de capacidad de corte regulable. Los principales tipos son:

- 1) De cangilones.
- 2) Alternativos (Geary-Jennings).
- 3) Rotativos (Snyder y Vezin).

1) Muestreadores de cangilones: Formados por una cadena de cangilones que cortan una corriente de mineral que cae por gravedad. El tamaño y separación de los cangilones determinan la proporción de muestra extraída.

2) Alternativos: Una cuchara que se desplaza normalmente a la trayectoria de caída por gravedad de una corriente de mineral, con un movimiento alternativo, separa una muestra de peso proporcional al mineral muestreado. Un dispositivo automático de relojería activa el muestreador a intervalos prefijados. El ancho de la cuchara, su velocidad de traslación y el intervalo de tiempo entre movimientos determinan la proporción de muestra.

3) Rotativos: Presentan una superficie giratoria, contra la que choca la corriente de mineral que cae por gravedad, desviándose. La superficie giratoria tiene aberturas que permiten el paso de mineral, cuya sección libre en relación a la superficie total expuesta a la corriente de mineral, determina la proporción de muestra extraída.

#### IV.3. LIXIVIACION

Ya se indicó antes la posibilidad de extraer el uranio de sus minerales por lixiviación ácida o alcalina.

Veremos los equipos empleados en los métodos más comunes.

##### IV.3.1. Lixiviación ácida

Los dos métodos más utilizados, y que se emplean también en nuestro país son:

- 1) Lixiviación por agitación.
- 2) Lixiviación por capilaridad.

#### IV.3.1.1. Lixiviación por agitación

La sección de lixiviación es la fundamental de la planta de procesamiento, y tanto los costos de operación como el rendimiento de recuperación dependen del método empleado y del equipo elegido.

La pulpa procedente de la molienda, con el tamaño óptimo de partícula, se mantiene en el máximo contenido en sólidos compatible con una buena agitación. Esto permite reducir el tamaño de los equipos y economizar ácido.

Equipo utilizado: El equipo utilizado en lixiviación ácida por agitación se divide en tres clases, las cuales dan buenos resultados en cada caso:

a) Agitación mecánica: es la más empleada en los Estados Unidos, lo cual se debe a la molienda gruesa empleada para los minerales de arenisca. Los granos pueden ser de malla 20 (0,83 mm) por lo que se requiere una agitación más bien violenta para mantenerlos en suspensión. El agitador típico es un tanque cilíndrico vertical de igual diámetro que altura, de madera o de hierro revestido en goma, en cuyo eje gira una turbina de hierro engomado. La potencia consumida va de 1/2 a 3/4 de HP por metro cúbico de pulpa.

b) Agitación neumática: se emplea con preferencia en Sudáfrica, Canadá y Australia. Los tanques tienen hasta 15 m de alto y 6,5 m de diámetro, son de forma cilíndrica y fondo cónico, y están contruídos en madera o en chapa de hierro engomada. El aire utilizado como medio de agitación entra por el fondo, y a veces se emplea una columna hueca central tipo "airlift" para mejorar la acción agitadora. Las pulpas pueden tener hasta 65% de sólidos.

Las ventajas de este tipo de agitación con respecto...

a la agitación mecánica son: menor consumo de energía, menor mantenimiento y menos costo inicial de instalación. Sin embargo, no puede emplearse con pulpas de grano grueso y rápida sedimentación, que no serían levantadas por el aire inyectado.

c) Agitación combinada: En algunos casos se emplea el agitador tipo DORR (Canadá, E.U.), sobre todo cuando las pulpas contienen mucha arcilla. Este agitador tiene una agitación mecánica lenta, ayudada por la acción del aire en una columna central hueca, que actúa como "airlift". Si la pulpa contiene granos gruesos, que sedimentan rápidamente, debe agregarse cola para aumentar la viscosidad de la pulpa y mantener los granos gruesos en suspensión.

Los tanques o cubas de agitación trabajan en serie, de modo que la pulpa fluye de un tanque al siguiente por gravedad. Para disminuir las posibilidades de un cortocircuitado de la pulpa, que reduce el rendimiento, debe aumentarse el número de tanques en serie. El número óptimo es de seis tanques y el mínimo cuatro, pero algunas plantas tienen hasta catorce.

#### IV.3.1.2. Lixiviación por capilaridad

La creciente necesidad mundial de recurrir a minerales que por su baja ley, sus características o la ubicación de sus yacimientos no permiten su beneficio económico por el método de extracción por agitación, ha llevado al desarrollo del método de lixiviación por capilaridad o lixiviación en pilas (heap leaching).

La lixiviación en pilas se practica reduciendo el mineral a la granulometría óptima y disponiéndolo en pilas o montones según cierta forma geométrica. El mineral se riega desde la superficie superior mediante la solución lixivante, formando un depósito o "espejo" desde donde el líquido va atrave-

sando el montón de mineral por gravedad, con una velocidad de circulación que se regula con una capa de arcilla de espesor variable.

La solución que se difunde a través de la masa de mineral llega finalmente a la base de la pila, construída en material impermeable. Se reúne en tanques colectores, se acidifica y se recircula al espejo. En el transcurso de estas recirculaciones neutraliza en primer término la alcalinidad del mineral y luego inicia la extracción neta del uranio y de parte de los elementos acompañantes.

Cuando la solución lixiviante llega a la carga necesaria en uranio se separa del sistema y se recupera por un método convencional (precipitación química, intercambio iónico, extracción por solventes).

Este procedimiento presenta una serie de ventajas sobre la lixiviación por agitación, entre otras.

- Economías en equipos, consumo de reactivos y consumo de energía.
- Mayor selectividad, pues trabaja con baja acidez, mientras que en lixiviación por agitación la acidez es elevada, lo cual incorpora muchas impurezas al líquido.
- Permite una explotación minera integral, pues posibilita el aprovechamiento económico de minerales de baja ley, pudiendo en algunos casos procesar económicamente el mineral de escombreras.
- Simplifica las operaciones y medios de control, factor que reviste importancia por la calidad de la mano de obra disponible en zonas alejadas y por los problemas de supervisión que se originan.
- La pila de mineral actúa como lecho filtrante, por lo cual se obtienen líquidos limpios que pueden pa-

sar a la etapa de extracción del uranio directamente, sin ninguna instalación para la separación sólido-líquido.

Por medio de este proceso, aplicado en escala industrial, nuestra C.N.E.A. ha procesado ya más de 60.000 toneladas de mineral en el yacimiento "DON OTTO", ubicado en la provincia de Salta. Con una ley media del 0,1 % de  $U_3O_8$ , ha operado con un rendimiento de lixiviación del 85 al 90%. Hasta ahora el uranio se recupera en forma de preconcentrado cálcico, por precipitación con lechada de cal, con un 3 al 5% de  $U_3O_8$ . En la actualidad se está instalando una pequeña planta de extracción por resinas de intercambio iónico que permitirá obtener concentrados de mayor ley.

#### IV.3.2. Lixiviación alcalina

Se efectúa de dos maneras:

- 1) Por agitación mecánica, en autoclaves cerradas.
- 2) Por agitación neumática, en tanques elevados abiertos.

##### IV.3.2.1. Por agitación mecánica:

Se emplean autoclaves cerradas, que trabajan hasta 5-6 Kg./cm<sup>2</sup> de presión y 140°C, con agitadores de tipo turbina y con inyección de aire como agente oxidante. La pulpa tiene del 50 al 55% de sólidos, cuya molienda fina es esencial para permitir una buena extracción (hasta un 78% inferior a malla 200).

##### IV.3.2.2. Por agitación neumática:

Se efectúan en tanques del tipo "Pachuca" mencionado antes. La altura de los tanques (hasta 15 metros) y la densidad de la pulpa (50% de sólidos) hacen que la presión en el fondo sea superior a 2 Kg./cm<sup>2</sup>. La temperatura de trabajo es de 90° a 100°C, y el aire que se inyecta en el fondo cónico

para agitar la pulpa sirve también como agente oxidante. Una columna central hueca ayuda a canalizar la pulpa en agitación, actuando como "air-lift", e impide así la acumulación de arenas en el fondo.

Las "Pachucas" son más convenientes que las autoclaves por varias razones, pero el tiempo de retención de la pulpa puede llegar a 100 horas, mientras que las autoclaves requieren solo 16.

#### IV.4. SEPARACION SOLIDO-LIQUIDO

##### IV.4.1. En circuito ácido

Son tres las operaciones principales que pueden aplicarse a la separación sólido-líquido después de la lixiviación:

- 1) Filtración continua.
- 2) Lavado en contracorriente en espesadores.
- 3) Separación de lamas y arenas para el proceso de R.I.P.

##### IV.4.1.1. Filtración continua

Emplea filtros rotativos de tambor al vacío, y es apropiada para pulpas con poca arcilla permitiendo obtener soluciones más concentradas que por lavado en espesadores. Habitualmente se emplean dos etapas de filtración en serie. La pulpa alimentada debe tener características constantes, un mínimo de 50% de sólidos, y se debe agregar cola animal como floculante para evitar la decantación de las arenas en el filtro. El líquido de lavado empleado va de 250 l. a 1 m<sup>3</sup>. por tonelada de mineral. La torta se descarga con un 20% de líquido. Las pérdidas solubles van del 0,5 al 2%.

##### IV.4.1.2. Lavado en contracorriente

Emplea de 4 a 6 espesadores en serie. Los espesadores pueden llegar hasta 36 m. de diámetro. La pulpa alimentada

al primer espesador tiene de un 20 a un 33% de sólidos, y el líquido de lavado que circula en sentido contrario, va de 1 a 3 m<sup>3</sup>. por tonelada de mineral. El número de espesadores y el volumen de líquido de lavado dependen de las pérdidas solubles que se admiten y de la concentración requerida en los líquidos limpios. Se emplean floculantes para acelerar la sedimentación y reducir el tamaño de los espesadores. Los líquidos obtenidos son de menor ley que con los filtros y las pérdidas solubles van de 0,5 a 3%.

#### IV.4.1.3. Separación de lamas y arenas

Cuando se recupera el uranio por el método de "R.I.P." se separan las lamas y las arenas. Las lamas forman la parte fértil, y las arenas se lavan en contracorriente empleando una combinación de clasificadores y ciclones en paralelo. A la etapa siguiente, de R.I.P., pasan solamente las lamas (tamaño inferior a malla 325) suspendidas en el líquido conteniendo el uranio. Las pérdidas son muy reducidas.

#### IV.4.2. En circuito alcalino

Después de la lixiviación alcalina se prefiere el empleo de la filtración para separar los sólidos. La menor cantidad de líquido de lavado necesaria y la naturaleza no corrosiva de las pulpas alcalinas justifican esta preferencia, pues no se requieren filtros anticorrosivos, y los espesadores no presentan ventajas de menor costo.

También aquí se emplean filtros rotativos de tambor, que trabajan al vacío. La pulpa llega al 50% de sólidos y se lava en contracorriente en tres etapas de filtración, con ayuda de floculantes.

### IV.5. RECUPERACION DEL URANIO DE LAS SOLUCIONES

#### IV.5.1. Por intercambio iónico

Los equipos empleados varían según las tres alterna-

tivas principales:

- 1) Columnas para líquidos limpios.
- 2) Cestas para R.I.P.
- 3) Equipos continuos.

#### IV.5.1.1. Columnas para líquidos limpios

Son tanques cilíndricos verticales, cerrados. La resina está dispuesta sobre una capa de grava que sirve de soporte. El tanque está provisto del sistema de cañerías necesarias para el movimiento de las diferentes soluciones y de los líquidos de lavado.

#### IV.5.1.2. Cestas para R.I.P.

Para extraer el uranio de las suspensiones de lamas por este método se emplean cestas de forma cúbica, con paredes y fondo en tejido de acero inoxidable. Estas cestas están sumergidas parcialmente en tanques alargados que contienen hasta 10 cestas, y por los cuales circula la suspensión. Un dispositivo mecánico sube y baja las cestas 5 a 10 veces por minuto en la suspensión circulante. El movimiento de las cestas mantiene las lamas en suspensión y expande la capa de resina, haciendo que entre en contacto con el líquido para una eficiente extracción del uranio.

Un circuito de R.I.P. completo necesita por lo menos 14 tanques trabajando en serie, de los cuales 10 en etapa de carga y 4 en etapa de elución.

#### IV.5.1.3. Equipos continuos

La posibilidad de emplear las resinas de intercambio iónico para extraer uranio de líquidos de baja ley, obtenidos de la lixiviación de minerales pobres, hace que se haya estudiado la aplicación de sistemas realmente continuos, para facilitar la operación de los circuitos y su automatización. En estos equipos la resina y el líquido circulan en contracorriente.

#### IV.5.2. Por extracción por solvente

Aquí mencionaremos solamente dos equipos industriales: el extractor de columna y el extractor de mezcladores-sedimentadores de tipo compacto.

Este último es el más empleado en los Estados Unidos, y hemos adaptado su diseño para emplearlo en nuestra planta piloto de Córdoba, y en mayor escala en nuestra planta de Margüe.

##### IV.5.2.1. Extractor de columna

Los extractores de columna aprovechan la diferencia de densidades de la fase orgánica y la acuosa para obtener un contacto en contracorriente. La fase pesada se alimenta en la parte superior y la liviana en la inferior.

Los diferentes tipos de extractores de columna varían según el dispositivo mecánico empleado para favorecer el contacto entre las dos fases, una de las cuales (la acuosa) se dispersa en la otra (la orgánica).

##### IV.5.2.2. Extractor de mezcladores-sedimentadores

En este tipo de extractor, de 4 ó 5 etapas, la solución rica en uranio y el solvente circulan en contracorriente. Cada etapa está formada por un mezclador y un sedimentador. En cada mezclador entran continuamente la solución proveniente de la etapa anterior y el solvente proveniente de la etapa posterior. Se mezcla con un agitador tipo turbina y la emulsión formada se descarga continuamente en un sedimentador, donde las dos fases se separan, continuando su circulación a las etapas adyacentes del extractor. De este modo la solución de lixiviación, que en cada etapa cede parte del uranio, se encuentra con solvente cada vez menos cargado. En cuatro etapas, generalmente, la extracción es total.

Este equipo se distingue por ser compacto, sin tener

cañerías exteriores salvo en las etapas extremas, y por utilizar como elemento de bombeo, para circular grandes caudales de líquido, el mismo agitador que mezcla las dos fases. Su operación es muy sencilla, pero requiere un líquido de alimentación de ley en uranio más o menos constante.

La reextracción del solvente cargado se hace en equipos similares de menor tamaño. Las etapas siguientes de precipitación, filtración y secado del "yellow cake" utilizan equipos convencionales, comunes a otras industrias de procesos químicos, y no se distinguen por ningún detalle especial.

#### V. ASPECTOS ECONOMICOS (COSTOS FABRILES)

Resulta difícil establecer valores promedios para los costos de operación, pues éstos son determinados, entre otros factores, por la capacidad de la planta y la ley del mineral que se procesa.

Sin embargo se pueden dar valores típicos de operación para plantas de diferentes capacidades; en los cuales se nota la influencia de la misma en el costo de procesamiento.

En la tabla que sigue se detallan los costos típicos de procesamiento por tonelada para un mineral de ley 0,25% en  $U_3O_8$  y para plantas con capacidad para 200, 400 y 1000 toneladas/día.

TABLA 3  
COSTOS TÍPICOS DE PROCESAMIENTO EN DOLARES  
POR TONELADA DE MINERAL

Detalle	Capacidad de la planta		
	200 t/d.	400 t/d.	1000 t/d.
Mano de obra	4,18 dól.	2,34	1,73
Suministros	4,14 "	4,02	3,39
Servicios	0,38 "	0,22	0,16
Otros (fletes, impuestos, etc.)	1,05 "	0,36	0,33
Total	9,75 dól.	6,94	5,61

Podemos resumir estos datos en una tabla en la que se incluye además la amortización de la planta en un término de 5 años. Para ello deben conocerse los costos de construcción, que para las plantas típicas señaladas, son los siguientes:

TABLA 4  
COSTOS TIPOS DE CONSTRUCCION EN DOLARES

CAPACIDAD t/día	200 t/d.	400 t/d.	1000 t/d.
Costo de Construcción, dólares	2.000.000	3.100.000	5.400.000

En base a las tablas 3 y 4 puede construirse la tabla 5, para la cual se ha considerado un rendimiento total

de recuperación de uranio del 94% para las tres plantas.

TABLA 5

COSTOS TOTALES DE PLANTA, EN DOLARES

Detalle	Capacidad de la planta					
	200 t/c.		400 t/c.		1000 t/c.	
	u\$s/t.	u\$s/lb. U <sub>308</sub>	u\$s/t.	u\$s/lb. U <sub>308</sub>	u\$s/t.	u\$s/lb. U <sub>308</sub>
Costo de procesamiento	9,75	2,07	7,00	1,49	5,61	1,20
Amortización en 5 años	5,56	1,18	4,31	0,92	3,01	0,64
Costo total de planta	15,31	3,25	11,31	2,41	8,62	1,84

El costo de procesamiento se distribuye en forma desigual en las distintas etapas de la planta, y resulta interesante conocer como influye cada etapa en el total. La información disponible para plantas de distintos países permite establecer estos porcentajes:

TABLA 6

PORCENTAJE DE INCIDENCIA DE CADA ETAPA  
EN EL COSTO DE PROCESAMIENTO DE PLANTA

Etapas del proceso	Canadá	EE.UU.	Australia
Operaciones preliminares	19	11	12
Lixiviación	48	43	54
Separación sólido-líquido	7	6	6
Extracción del uranio	8	8	9
Reprecipitación, secado y envasado	3	9	12
Servicios	15	23	7

BIBLIOGRAFIA PRINCIPAL

- /1/ - CLEGG, J.W. and FOLEY, D.O., 1958, Uranium Ore processing Addison-Wesley Publ. Co., Massachusetts.
- /2/ - PINKNEY, E.T., and LURIE, W., VAN ZYL, P.C.N., 1962, Chemical Processing of Uranium Ores.  
JODRA, J.G. y JOSA J.M., 1962, Tratamiento de minerales de uranio, I.A.E.A., Review Series N° 23/24, Viena.
- /3/ - GITTUS J.A., 1962, Uranium. Butterworths - London.
- /4/ - HARRINGTON, C.D. and RUEHLE, A.E., 1959, Uranium production technology, D.Van Nostrand Co. Princeton. Toronto.
- /5/ - JAMRACK, W.D., 1963, Rare Metal Extraction, Macmillan Co. New York.
- /6/ - THE ASSOCIATED SCIENTIFIC AND TECHNICAL SOCIETY OF SOUTH AFRICA, 1957, Uranium in South Africa, Vol. I y II, Johannesburg.
- /7/ - O.I.E.A., 1966, Processing of low-grade uranium ores STI/Pub/146, Vienna.
- /8/ - WADSWORTH, M.E. and DAVIDS, F.T., (Ed). 1963, Unit Processes in Hydrometallurgy, (Met.Soc.Conf.Vol.24), Gordon and Breach Sc.Pub.New York. London.
- /9/ - VAN ARSDALE, G.O., Hydrometallurgy of base metal, McGraw Hill, New York.  
Traducción al español, 1965, UTEHA- Mexico.
- /10/ - BURKIN A.R., 1966, The Chemistry of hidrometallurgical Processes, E.&F.N. Spon Ltd., London.
- /11/ - U.N., 1956, Proc.First Int.Conf.Peac.Us.At.En. Vol. VIII, Geneve.  
U.N., 1958, Proc.Sec.Int.Conf.Peac.Us.At.En. Vol.III, Geneve.  
U.N., 1964, Proc.Third Int.Conf.Peac.Us.At.En. Vol. XII, Geneve.
- /12/ - GRIFFITH J.N., 1967, The uranium Industry its history, technology and prospects. Mineral Report 12, Mineral Resource Div.,Dept.of Energy,Mines and Resources,Ottawa.

## I N D I C E

I. INTRODUCCION.....	pág.	1
II. CLASIFICACION DE LOS MINERALES.....	"	2
II.1. MINERALES DE U <sup>IV</sup> , NEGROS O PRIMARIOS.....	"	3
II.2. MINERALES DE U <sup>VI</sup> , AMARILLOS O SECUNDARIOS.....	"	5
III. TRATAMIENTO DE LAS MENAS.....	"	6
III.1. TRITURACION Y MOLIENDA.....	"	6
III.2. TRATAMIENTO FISICO.....	"	6
III.3. LIXIVIACION.....	"	11
III.3.1. Lixiviación ácida.....	"	13
III.3.2. Lixiviación alcalina.....	"	15
III.3.3. Técnicas de lixiviación.....	"	17
III.4. SEPARACION SOLIDO-LIQUIDO.....	"	19
III.4.1. Decantación y lavado en contracorriente....	"	20
III.4.2. Filtración.....	"	21
III.4.3. Combinación de decantación y filtración....	"	21
III.4.4. Clarificación.....	"	21
III.5. RECUPERACION DEL URANIO DE LOS LIXIVIADOS....	"	21
III.5.1. Precipitación "directa" en los lixiviados..	"	22
III.5.1.1. Obtención de un concentrado comercial....	"	22
III.5.1.2. Obtención de preconcentrados.....	"	25
III.5.2. Recuperación con extractantes selectivos...	"	26
III.5.2.1. Resinas de Intercambio iónico.....	"	26
III.5.2.2. Extracción con solventes.....	"	29
III.6. RECUPERACION DEL URANIO DE LOS ELUIDOS.....	"	33
III.7. REFINACION.....	"	34
III.8. MUESTREO.....	"	34
IV. ASPECTOS TECNOLOGICOS.....	"	35
IV.1. GENERALIDADES.....	"	35
IV.2. OPERACIONES PRELIMINARES.....	"	36
IV.2.1. Reducción de tamaño.....	"	36

## INDICE (2)

IV.2.2. Muestreo del mineral.....	pág.	37
IV.3. LIXIVIACION.....	"	38
IV.3.1. Lixiviación ácida.....	"	39
IV.3.1.1. Lixiviación por agitación.....	"	39
IV.3.1.2. Lixiviación por capilaridad.....	"	40
IV.3.2. Lixiviación alcalina.....	"	42
IV.3.2.1. Por agitación mecánica.....	"	42
IV.3.2.2. Por agitación neumática.....	"	42
IV.4. SEPARACION SOLIDO-LIQUIDO.....	"	43
IV.4.1. En circuito ácido.....	"	43.
IV.4.1.1. Filtración continua.....	"	43
IV.4.1.2. Lavado en contracorriente.....	"	43
IV.4.1.3. Separación de lamas y arenas.....	"	44
IV.4.2. En circuito alcalino.....	"	44
IV.5. RECUPERACION DEL URANIO DE LAS SOLUCIONES....	"	44
IV.5.1. Por intercambio iónico.....	"	44
IV.5.1.1. Columnas para líquidos limpios.....	"	45
IV.5.1.2. Cestas para R.I.P.....	"	45
IV.5.1.3. Equipos continuos.....	"	45
IV.5.2. Por extracción por solvente.....	"	46
IV.5.2.1. Extractor de columna.....	"	46
IV.5.2.2. Extractor de mezcladores-sedimentadores..	"	46
V. ASPECTOS ECONOMICOS (COSTOS FABRILES).....	"	47
BIBLIOGRAFIA.....	"	50