

MINE WATER. GRANADA, SPAIN. 1985

CAPTACION Y DESCONTAMINACION DE LAS AGUAS PLUVIALES EN
UNA EXPLOTACION A CIELO ABIERTO DE MINERALES DE URANIO

Juan Ramón Serrano Pillet
EMPRESA NACIONAL DEL URANIO, S. A. (ENUSA)
Santiago Rusiñol, nº 12
28040 - Madrid

RESUMEN

En este trabajo se describen las medidas adoptadas por ENUSA para la captación y descontaminación de las aguas pluviales y de escorrentía que inciden en su explotación a cielo abierto del yacimiento FE. Estas aguas, al entrar en contacto con el mineral, provocan fenómenos de lixiviación natural que las hace adquirir una acidez, un contenido en uranio y una actividad que imposibilita su evacuación directa a los cauces naturales de la zona.

Entre las medidas adoptadas para la captación de estas aguas destaca la construcción de un canal perimetral que evita el acceso a la corta de las aguas de escorrentía y la construcción de dos grandes calderas en las que pueden recogerse unos 300.000 m³ de agua. Se dispone, asimismo, de una balsa de almacenamiento con una capacidad de 430.000 m³.

Para la descontaminación de las aguas se ha previsto una instalación de cambio iónico en columnas de lecho fijo. Estas columnas contienen una resina de carácter básico fuerte que, en una primera fase, retiene el uranio contenido en las aguas. En una segunda fase tiene lugar el desplazamiento del uranio adsorbido por la resina mediante su tratamiento con una solución acuosa de ácido sulfúrico. Los efluentes estériles procedentes de la fase de carga son neutralizados con lechada de cal y descontaminados con cloruro bórico, siendo sometidos finalmente a un proceso de sedimentación hasta su clarificación total, lo que permite efectuar su vertido controlado a los cauces naturales de la zona.

1. Introducción

España ocupa el segundo lugar en cuanto a sus recursos de uranio en Europa occidental. Las reservas explotables económicamente ascienden a unas 30.000 t U_3O_8 y la mayor parte se encuentran en la provincia de Salamanca. Desde 1974 ENUSA explota, en las proximidades de Ciudad Rodrigo, el yacimiento FE, el más importante de todos los conocidos en la provincia de Salamanca.

El yacimiento FE ocupa una superficie de unas 110 Ha. Está situado en una ladera y la profundidad de la mineralización, que es muy irregular, no sobrepasa, en general, los 70 m. El recubrimiento de este yacimiento, tipo stockwork, es poco importante por lo que su explotación se realiza a cielo abierto.

Las reservas totales ascienden a unas 9.000 t U_3O_8 . Para una ley de corte de 200 g/t la ley media es de 640 ppm.³⁸

Ante leyes tan bajas ha sido necesario establecer una operación minera basada en la selectividad y en impedir el ensuciamiento del mineral. El banco de explotación tiene una altura de tan sólo 3 m y se lleva a cabo un riguroso control radiométrico en barrenos de voladura, mineral arrancado y cazo de pala cargadora.

El mineral del yacimiento FE, del que se arrancan unas 400.000 t/año, se tritura hasta un tamaño máximo de 50 mm y se dispone sobre láminas de polietileno extendidas en un terreno preparado cuidadosamente. Los montones o eras de lixiviación tienen una altura de 7 m y se riegan con agua acidulada que percola a través del mineral y lixivia el uranio. Los líquidos fértiles ceden su uranio, en una batería de extracción con disolventes, a los líquidos orgánicos y éstos posteriormente, en la fase de reextracción, a una solución acuosa. El proceso de extracción-reextracción permite una concentración de uranio 30 veces superior a la del líquido fértil. La solución acuosa se precipita con amoníaco gas obteniéndose una pulpa de concentrados de uranio constituida por diuranato amónico que se seca y que constituye el producto comercial o yellow-cake.

Dos terceras partes de los efluentes líquidos, procedentes de extracción, se reciclan y el tercio restante se trata en la etapa de neutralización con lechada de cal y cloruro bórico con lo cual precipitan los contaminantes químicos y radiactivos. El producto procedente de neutralización (yesos) se confina en un dique de estériles y los líquidos claros, neutralizados y descontaminados, se vierten a cauces públicos cumpliendo especificaciones rigurosas requeridas por el Consejo de Seguridad Nuclear.

La producción de esta planta de tratamiento ha evolucionado desde 112 t U_3O_8 en 1976 hasta 210 t obtenidas en 1984. Además se ha conseguido un sustancial aumento de la productividad, una notable disminución en el consumo de reactivos y un continuo aumento en la recuperación del uranio contenido en los minerales.

Las aguas pluviales y de escorrentía que circulan por la explotación a cielo abierto del yacimiento FE disuelven los minerales de uranio por lo que es necesario neutralizarlas y descontaminarlas radiactivamente antes de que lleguen a cauces públicos.

Para conseguir este objetivo se han tomado medidas de diferente alcance durante la explotación del yacimiento FE entre las que destacan la construcción de un canal perimetral para evitar el acceso de aguas de escorrentía en la corta y la construcción de dos grandes calderas en las que pueden recogerse unos 300.000 m³. Posteriormente se hizo un tratamiento de esas aguas consistente en una neutralización desde su pH inicial 3-3,5 hasta alcanzar valores próximos a 7,5 mediante la adición de un álcali (cal o sosa). La variación del pH provocaba la precipitación del uranio y del hierro del que se separaban de los líquidos claros por un proceso de sedimentación. Los líquidos claros presentaban características que los hacían aptos para su vertido a cauces públicos. Los lodos se redisolvan mediante adición de ácido sulfúrico y las soluciones se mezclaban con los líquidos fértiles procedentes de lixiviación estática para su tratamiento en la sección de extracción con disolventes. Este proceso se utilizó durante algún tiempo pero se decidió sustituirlo ya que se podían tratar volúmenes reducidos y se añadían al producto final componentes indeseables por la escasa selectividad del proceso hidrometalúrgico.

Para disponer de un almacenamiento suficiente de aguas de mina se construyó una balsa con capacidad de 430.000 m³ y unos 100.000 m² de superficie en la que es posible conseguir una importante evaporación. Esta balsa se alimenta por una instalación de bombeo formada por cuatro bombas, con sus correspondientes tuberías que pueden elevar 520 m³/h a una altura de 70 m. El agua recogida en esta balsa tiene un pH del orden de 3 a 3,5 y un contenido medio en U_3O_8 de 50 mg/l (50 ppm). Con este agua se atiende el riego de las eras de mineral, pero también es necesario someterla a descontaminación y neutralización ya que la capacidad de almacenamiento de aguas se va reduciendo puesto que la evaporación y el consumo de agua para la lixiviación de eras representa un volumen inferior a la pluviosidad que incide sobre la explotación minera. Con la finalidad de efectuar la adecuada descontaminación de estas aguas acumuladas, ENUSA ha proyectado la instalación de tratamiento que se describe a continuación.

2. Capacidad de la Instalación de Tratamiento de Aguas de Corta

La capacidad de esta instalación se ha definido con el criterio de poder tratar anualmente las aguas pluviales que inciden, también durante un año, en la superficie de la explotación a cielo abierto del yacimiento FE, deduciendo las que se utilizan para el riego de eras de mineral y la evaporación natural que se da en la balsa de recogida (430.000 m³) y en las calderas de la corta (300.000 m³).

En un año de pluviosidad alta se pueden recoger anualmente unos 800.000 m³ en la superficie de la corta.

La evaporación media anual en la balsa de recogida de aguas de corta y en las calderas de la explotación es de unos 150.000 m³/año.

Las necesidades de aguas ácidas para el riego de las eras son algo superiores a los 150.000 m³ anuales pero, teniendo en cuenta la conveniencia de reciclar dos terceras partes de los efluentes líquidos procedentes de la etapa de extracción, tendremos una utilización de unos 50.000 m³/año procedentes de las aguas de lluvia recogidas en la balsa.

En consecuencia, es necesario prever el tratamiento de 600.000 m³ anuales.

El proceso general de tratamiento de aguas de corta e ingeniería básica, realizados por ENUSA, prevé la incorporación de líquidos uraníferos en la fase de extracción de la Planta de tratamiento de minerales, por lo que esta instalación debe funcionar en continuo y con el mismo régimen que la Planta. Considerando que estadísticamente la Planta, deduciendo las paradas programadas para mantenimiento, funciona 332,2 días/año, se deduce una capacidad diaria de diseño de 1.806 m³.

Los datos fundamentales de diseño de la instalación son los siguientes:

- Caudal de solución fértil, m ³ /d (m ³ /a) ..	1.806 (600.000)
- Concentración de la solución fértil (kg U ₃ O ₈ /m ³)	50 x 10 ⁻³
- pH de la solución fértil	~ 3
- Concentración de actividad total inicial (pCi/l)	30.000

- Concentración de actividad en Ra-226 inicial (pCi/l)	1.000
--	-------

De acuerdo con los trabajos experimentales realizados por la Junta de Energía Nuclear, con el proceso propuesto se esperan conseguir los siguientes resultados:

- Caudal de agua de vertido, m ³ /d (m ³ /a)..	1.640 (541.200)
- Concentración del agua de vertido (µg U ₃ O ₈ /l).....	10
- pH del agua de vertido.....	8
- Concentración de actividad total final (pCi/l)	30
- Concentración de actividad en Ra-226 final (pCi/l)	6
- Uranio recuperado, kg U ₃ O ₈ /d (t U ₃ O ₈ /a).	88,494 (29,4)
- Rendimiento del proceso (%)	98

3. Descripción del proceso

3.1. Diagrama de bloques

El tratamiento de las aguas que se acumulan en las calderas de la corta FE se hace necesario, como ya se ha comentado anteriormente, con la siguiente doble finalidad:

- Producir la adecuada descontaminación química y radiactiva que permita su eliminación de dichas calderas y su vertido a los cauces naturales de la zona.
- Recuperar las considerables cantidades de uranio que contienen en disolución.

En el diagrama de bloques representado en la fig. nº 1, se pueden distinguir las distintas etapas que conforman el proceso y que son las que se relacionan a continuación:

- a) Almacenamiento de las aguas de corta en una balsa preparada a tal efecto cuya capacidad es de 430.000 m³.
- b) Filtración de las aguas y posterior recuperación del uranio contenido en ellas mediante un proceso de cambio de ión. Se

tendrá así una solución concentrada de uranio (eluido) que se llevará a continuación a la sección de extracción de la Planta de tratamiento con el fin de proseguir el proceso adecuado que permita la obtención del concentrado de U_3O_8 correspondiente.

- c) Neutralización mediante lechada de cal y descontaminación radiactiva con solución acuosa de Cl_2Ba de los efluentes estériles procedentes de la fase de carga de la etapa de cambio de ión.
- d) Separación, mediante un proceso de decantación, de los lodos presentes en los efluentes estériles. Se obtienen de esta forma, unos líquidos claros descontaminados en condiciones aptas para su vertido, controlado a través de una balsa de regulación, a los cauces naturales de la zona.

Además de estas etapas hay que considerar otras, de carácter auxiliar, que son las de preparación de reactivos. Son las siguientes:

- Preparación y almacenamiento de eluyente.
- Preparación y almacenamiento de solución acuosa de Cl_2Ba .
- Preparación y almacenamiento de floculante.

3.2. Descripción de las principales etapas

3.2.1. Recogida y almacenamiento de las aguas de corta

Las aguas acumuladas en las calderas de la corta FE serán bombeadas hasta una balsa de 430.000 m³ de capacidad construida para su almacenamiento. Como ya se ha señalado anteriormente, parte de estas aguas será utilizada para el riego de las eras de lixiviación estática de la Planta. El resto de las aguas será alimentado a la instalación para su adecuado tratamiento.

3.2.2. Recuperación del uranio por cambio de ión

En esta etapa del proceso tiene lugar la eliminación del uranio contenido en las aguas de corta, el mismo tiempo que se obtiene una nueva solución de elevada concentración en uranio y relativamente purificada.

Las técnicas que normalmente se emplean para esta operación son cambio de ión y extracción con disolventes.

La técnica de cambio de ión, que es la adoptada en nuestro ca-

so, se suele aplicar a la recuperación del uranio contenido en soluciones pobres. Es un método capaz de recuperar de forma cuantitativa (98-99%) el uranio presente en la solución, al mismo tiempo que se logra su purificación por separación de los metales que no forman complejos aniónicos y se reduce (de 20 a 30 veces) el volumen de líquido.

Esquemáticamente, el proceso consta de dos fases. La primera de ellas consiste en la fijación del uranio sobre una resina de cambio iónico al poner ésta en contacto con la solución fértil (fase de carga). En la segunda fase tiene lugar el desplazamiento del uranio adsorbido por la resina mediante su tratamiento con una solución adecuada (fase de elución). Se obtiene así un líquido (eluido) con una concentración elevada en uranio y relativamente libre de impurezas.

Entre las fases de carga y elución se somete el lecho de resina a un lavado ascendente con solución estéril de cambio de ión. Esta operación tiene como finalidad provocar el arrastre de las partículas sólidas que hayan entrado con la solución fértil y que pueden producir, al quedar retenidas por la resina, el envenenamiento físico de la misma.

Las resinas cambiadoras de anión suelen ser copolímeros de estireno y divinilbenceno con grupos funcionales de amonio cuaternario que les confieren un carácter fuertemente básico. Recientemente se han desarrollado resinas con grupos funcionales terciarios que son más selectivas y fáciles de eluir. El fundamento químico del proceso está basado en la fijación, sobre la resina, del anión complejo de sulfato de uranio presente en la solución. La operación se realiza según la siguiente reacción:



La reacción se desplaza hacia la derecha en la fase de carga y hacia la izquierda en la de elución. La elución se realiza poniendo en contacto la resina cargada con una solución concentrada de iones cloruro, nitrato o sulfato en medio ligeramente ácido. La resina queda en forma de cloruro, nitrato o sulfato, aniones que se intercambian con el anión complejo de sulfato de uranio en la siguiente fase de carga.

En nuestro caso, utilizaremos como eluyente una solución acuosa de H_2SO_4 en una concentración adecuada. Periódicamente se utilizarán también para la preparación del eluyente los efluentes iniciales (A 10 bv) que abandonan la última columna del ciclo de carga durante el período inmediato a su inclusión en el mis-

mo, ya que estos líquidos tienen, durante un cierto tiempo, un contenido en uranio superior al normal. La transferencia al eluyente del uranio contenido por la resina se ve favorecida por la temperatura, por lo que resulta conveniente efectuar en caliente la operación de elución.

El uranio contenido en los eluidos no se precipitará directamente a partir de los mismos ya que, a causa de su elevada concentración en ácido libre, se produciría un excesivo consumo de agente precipitante. Por esta razón se someterá a continuación, al eluido a un proceso de extracción con disolventes orgánicos.

En cuanto a la realización práctica de la operación el método más corriente, que es el que se ha considerado para el presente proceso, es la utilización de columnas de lecho fijo. En estos sistemas las partículas de resina están situadas en el interior de una columna ocupando, aproximadamente, el 50% de su volumen con el fin de permitir la expansión del lecho.

En la primera fase (carga) la solución fértil, previamente filtrada a través de un lecho de arena y antracita con el fin de retener las partículas sólidas en suspensión que pueda llevar, se hace pasar a través de la resina, con lo que se produce la fijación del uranio en ésta según el mecanismo descrito anteriormente, saliendo agotada por el extremo opuesto de la columna. Cuando se alcanza la saturación de la resina se detiene el flujo de solución fértil y, una vez realizada la operación de lavado ascendente, se hace pasar a través de la columna el eluyente con el fin de desplazar el uranio contenido por la resina (fase de elución). En todos los casos el líquido debe atravesar el lecho con una velocidad adecuada que impida la formación de canales preferentes o el arrastre de la resina.

Como consecuencia de esta alternancia de fase de carga y elución, cuando se utiliza una sola columna no es posible operar en continuo. Por ello, normalmente, se trabaja con un sistema formado por 3 ó 4 columnas en serie de forma tal que, mientras una columna se encuentra en fase de elución, el resto del sistema funciona en fase de carga hasta la saturación de la resina contenida en la primera columna del ciclo. Cuando se alcanza este punto, esta columna es sometida a la operación de lavado ascendente y a continuación entra en fase de elución, mientras que la que contiene la resina recientemente eluida pasa a fase de carga. Las columnas están interconectadas mediante un conjunto de tuberías y válvulas que permite efectuar todas las combinaciones necesarias para el funcionamiento previsto de la instalación.

3.2.3. Neutralización y descontaminación radiactiva de efluentes estériles

Los efluentes estériles procedentes de la fase de carga de la etapa de cambio de ión tienen carácter ácido ($\text{pH} = 3-3,5$) y al mismo tiempo contienen algo de uranio y descendientes de su serie radiactiva natural en concentración del orden de trazas.

El tratamiento más sencillo y conveniente de estos efluentes es su neutralización con lechada de cal hasta alcanzar un $\text{pH} = 8,5$. Esta neutralización origina la precipitación de los cationes pesados y los radionucleidos, obteniéndose una suspensión formada fundamentalmente por yeso e hidróxidos de metales pesados a los que acompañan gran parte de los componentes radiactivos.

Al mismo tiempo y para asegurarse de que la concentración de los productos radiactivos todavía presentes en la fase líquida de la suspensión sea inferior a los límites establecidos, se somete a los efluentes estériles a un tratamiento con una solución acuosa de Cl_2Ba con el fin de eliminar la radiactividad debida al Ra-226. El sulfato bórico que se genera arrastra al radio por coprecipitación.

3.2.4. Separación sólido-líquido y vertido

Los efluentes estériles que, después del tratamiento efectuado en la etapa anterior, forman una suspensión, se someten ahora a una operación de separación sólido-líquido mediante un proceso de decantación en espesador con la utilización de floculantes adecuados. Esta operación tiene como finalidad la obtención de un líquido claro descontaminado que se enviará a una balsa de regulación de 173.000 m^3 de capacidad y desde ésta, de forma controlada, se efectuará su vertido al cauce del arroyo Escaudrón. Este vertido será regulado en función de los caudales del arroyo citado y del río Agueda, de manera que su incidencia en éste sea la menor posible.

Los lodos espesados serán enviados al dique de estériles de neutralización de la Planta para su confinamiento.

4. Diagrama cualitativo

El diagrama cualitativo se ha representado mediante un diagrama de flujo (fig. nº 2) en el que se detallan los principales equipos con su denominación y características fundamentales.

El equipo recogido en el diagrama cualitativo se identifica se-

gún un símbolo alfanumérico, compuesto de letras seguidas de cifras. La letra o letras mayúsculas que encabezan el símbolo indican la clase de equipo, de acuerdo con los significados que se dan en la tabla 1. A continuación de la letra o letras iniciales aparece un número compuesto por tres dígitos cuyo significado se explica a continuación.

El primer dígito indica la etapa del proceso a la que pertenece el aparato representado, de acuerdo con la siguiente clasificación:

- Cambio de ión 1
- Neutralización y descontaminación de efluentes ... 2
- Separación sólido-líquido 3

Los dos últimos dígitos del símbolo indican el número de orden de los aparatos existentes de cada tipo en cada una de las etapas. Se ha efectuado la numeración con dígitos pares con el fin de tener la posibilidad de intercalar aparatos nuevos sin que resulte necesaria la variación de toda la numeración ya establecida.

En el diagrama de flujo se indican también los fluidos que circulan por cada línea. Los símbolos que representan a cada uno de los fluidos se muestran en la tabla 2.

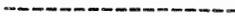
5. Viabilidad económica

Sobre la base de la producción citada de 29,40 t U_{308} /a se ha realizado un estudio de viabilidad económica del proyecto. Como precio de venta del concentrado se ha establecido el vigente en la actualidad en el mercado internacional, siendo el valor de cambio considerado de 175 Ptas/\$ USA.

En la tabla 3 se ha resumido el presupuesto total de la inversión que resulta ser de 85,9 millones de pesetas.

En la tabla 4 se detalla la distribución del presupuesto de costes de transformación correspondiente al tratamiento real de 600.000 m³/a de aguas de corta.

Teniendo en cuenta estas hipótesis y considerando un período de 10 años a partir de la puesta en marcha de la instalación, para la amortización de la inversión, se deduce para el proyecto una rentabilidad interna antes de impuestos del 332%. La recuperación de la inversión actualizada al 15% se producirá a los 4,2 meses de la puesta en marcha de la instalación.



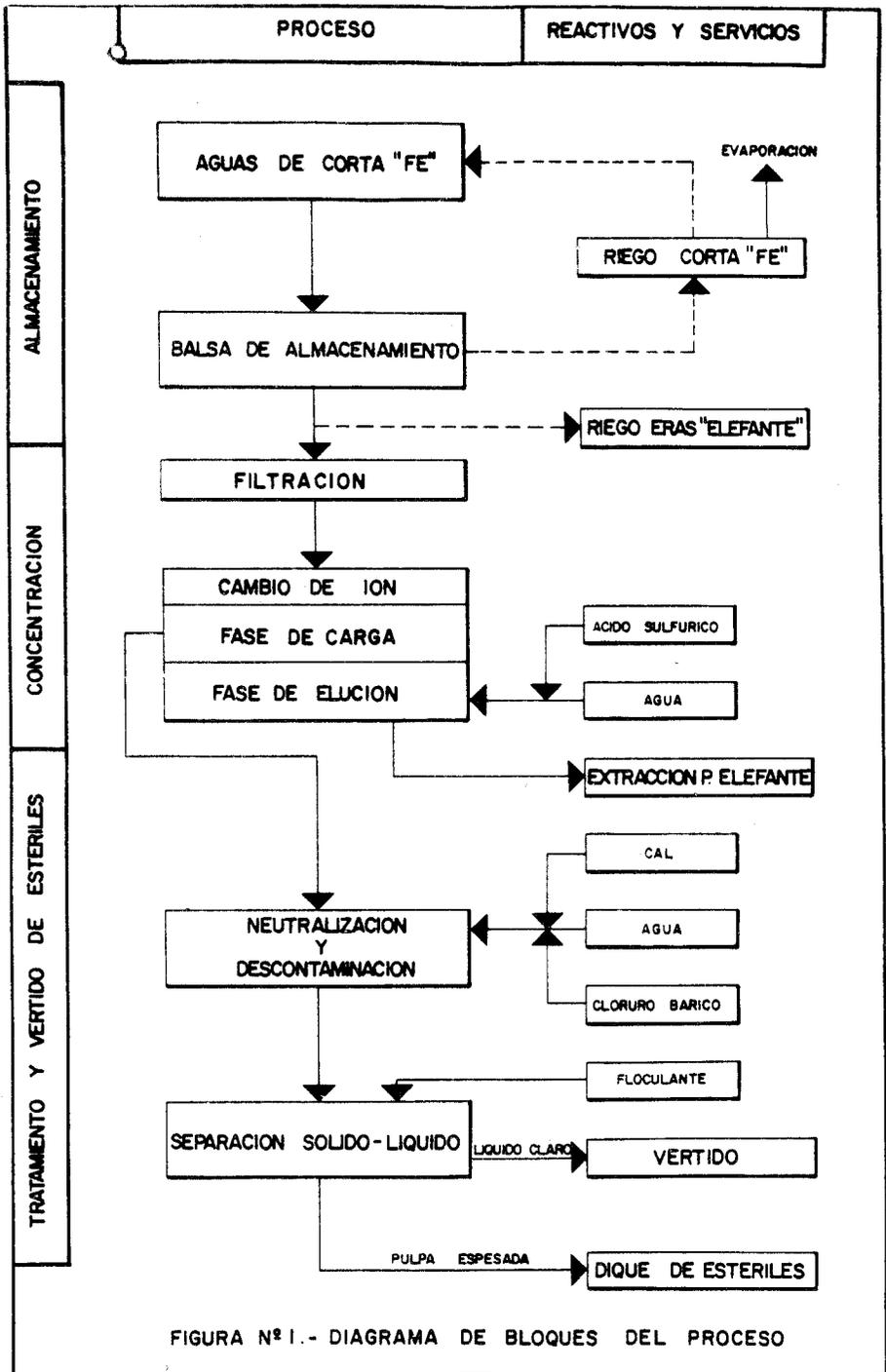
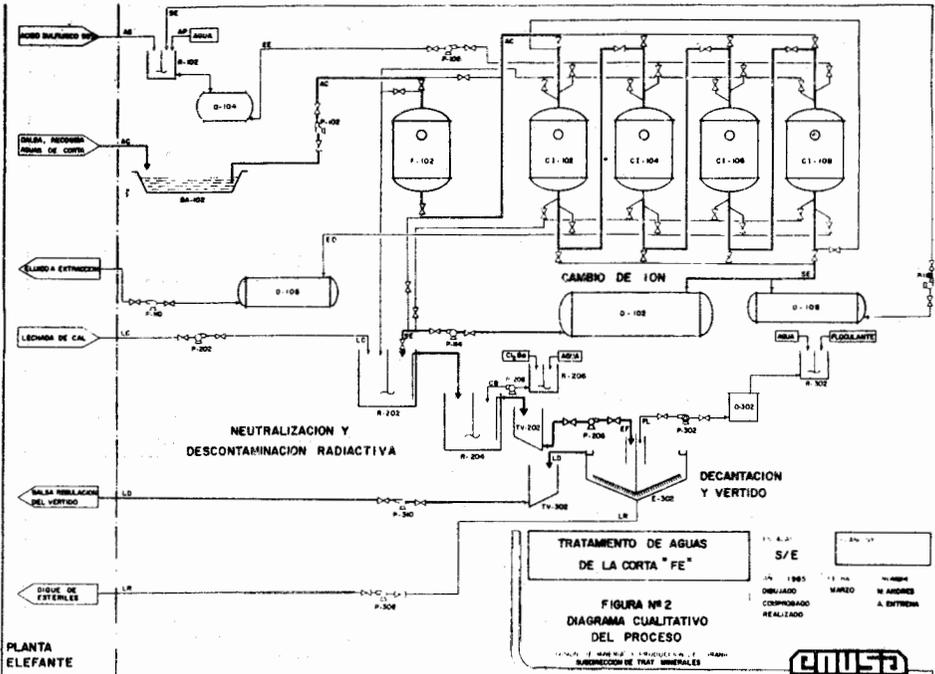


FIGURA N° 1.- DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO



BLA 1. SIMBOLOS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN EL PROCESO

DESCRIPCION	SIMBOLO
Balsas	BA
Bombas	P
Columnas de cambio de ión.....	CI
Depósitos de almacenamiento	D
Espesadores	E
Filtros clarificadores	F
Reactores (tanques agitados, mezcladores, etc.)	R
Tolvas	TV
Diluidores de floculante.....	FL

TABLA 2. FLUIDOS PRESENTES EN EL PROCESO

DESCRIPCION	SIMBOLO
Acido sulfúrico concentrado	AS
Agua de corta (solución fértil)	AC
Agua de proceso	AP
Drenajes	DJ
Efluentes neutralizados	EF
Eluido	EO
Eluyente	EE
Lechada de cal	LC
Líquido claro descontaminado	LD
Líquidos de lavado	LL
Lodos radiactivos	LR
Solución cloruro bórico	CB
Solución estéril	SE
Solución de floculante	FL

TABLA 3. PRESUPUESTO DE INVERSIONES. RESUMEN GENERAL

CONCEPTO	MM Pts. 1983	%
Maquinaria y aparatos	26,80	31,20
Gastos de instalación y montaje ..	3,50	4,07
Tuberías y válvulas	6,--	6,98
Instrumentación	7,50	8,73
Electricidad	4,--	4,66
Instalaciones auxiliares	1,50	1,75
Material inicial (resina)	7,80	9,08
Ingeniería y gestión proyecto	14,30	16,65
Obra civil	14,50	16,88
TOTAL INVERSION	85,90	100,--

TABLA 4. COSTES DE TRANSFORMACION

CONCEPTO	CONSUMO ANUAL	PRECIO UNITARIO (Pts)	IMPORTE Pts/a	COSTE Pts/kg U ₃ O ₈
<u>1. Reactivos</u>				
Resina(reposición) 10% inventario, l	1.500	500,--	750.000	25,68
Cal viva,kg ..	561.000	8,50	4.768.500	163,28
Cloruro bórico,kg	14.200	78,--	1.107.600	37,93
Acido sulf.consumido(98%),kg	111.200	8,50	945.200	32,36
Floculante,kg.	310	600,--	186.000	6,37
<u>2.Repercusión costes react. en extrac.precip.y secado</u>	-	-	1.596.600	54,67
<u>3. Servicios</u>				
Agua proc.,m ³ .	13.200	5,--	66.000	2,26
Electric,kwh..	400.000	7,--	2.800.000	96,35
<u>4. Personal, (Operarios)</u>	5	1.400.000	7.000.000	239,69
<u>5. Manteni - miento</u>			3.000.000	102,73
<u>6. Generales y varios</u>			2.760.000	94,51
COSTE TOTAL				855,83