



OPERACIÓN Y DESMANTELAMIENTO DE UNA PLANTA DE BENEFICIO DE URANIO EN CHIHUAHUA

M. en C. Marco A. Ruiz Cristóbal
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ)
E mail: marc@nuclear.inin.mx

RESUMEN

Se describe la disposición de los residuos generados por la operación de una planta de beneficio de mineral molibdeno uranífero de tipo alcalino en rocas calizas, el cual era tratado por un proceso alcalino a base carbonato y bicarbonato de sodio para disolver el molibdeno y obtener como subproducto al uranio. La planta operó por dos años a partir de 1969 cerca de la población de Villa Aldama Chihuahua (Hoy Ciudad de Aldama). Una vez procesado el mineral para obtener el molibdeno y el uranio se generaban residuos o estériles de uranio (jales) los cuales eran almacenados a la intemperie a un lado de la planta (presa de jales). En estos estériles se encontraban los productos de decaimiento del uranio. Todos ellos radiactivos a excepción del último que es estable.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Entre 1969 y 1971 la Comisión Nacional de Energía Nuclear y la Comisión de Fomento Minero operaron conjuntamente una planta de producción de concentrados de uranio y molibdeno en Villa Aldama, Chihuahua (hoy Ciudad Aldama). La planta tenía una capacidad nominal de 80 toneladas métricas/día de mineral y operaba con un proceso alcalino convencional con carbonato y bicarbonato de sodio como lixiviantes. El mineral provenía de la Sierra de Gómez. Durante los dos años de operación se produjeron unas 45 toneladas de concentrados de uranio y aproximadamente 35,000 toneladas de estériles de uranio (jal). Estos últimos se almacenaron en una presa a 120 m al poniente de la planta.

La presa de jales original no tenía ninguna membrana de protección en la parte inferior ni una cubierta en la parte superior. Se consideró por lo tanto que los jales constituían un riesgo radiológico potencial para la población vecina.

1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL

Debido a la cercanía de la población con respecto a lo que fue la planta de beneficio y sobre todo a la presa de jales, la descripción de este trabajo tiene dos vertientes. Por una parte, el ejecutar los trabajos de descontaminación radiológica de la planta de beneficio de uranio, según la normativa establecida por el órgano regulador en materia de seguridad radiológica y protección radiológica para la población y los trabajadores. Por otra parte, determinar el sitio donde se pudieran almacenar los desechos radiactivos generados por la descontaminación y movilización del jal, así como su traslado y almacenamiento definitivo en beneficio de la población actual y el de las futuras generaciones, dado los radionúclidos que se encuentran en el jal.



2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE BENEFICIO DEL URANIO

La planta de beneficio de Villa Aldama, Chihuahua, procesó durante dos años a partir de Junio de 1969, 32,137.589 toneladas de mineral Molibdeno-Uranífero del tipo "Alcalino". El mineral se encontraba en rocas calizas principalmente y por esto, su tratamiento era del tipo "alcalino" o sea que se usaba carbonato y bicarbonato de sodio como reactivos para disolver Uranio y Molibdeno.

La localización de la planta en ese entonces, se hizo en Villa Aldama, por encontrarse aproximadamente a la mitad del camino entre Sierra de Gómez y Sierra de Peña Blanca, que eran los lugares de donde se estaba alimentando a la planta, además de otras facilidades como el suministro de agua, energía eléctrica, materiales y reactivos, mano de obra, etc.

Para su operación, la Planta se dividía en cuatro secciones que fueron: 1- Trituración. 2- Molienda y Clasificación. 3- Lixiviación y lavado a contracorriente, y 4- Precipitación, filtración, secado (de Molibdeno) y envase. El diagrama de flujo se presenta en la figura 1, así como su equipo principal.

A continuación se hace una descripción del funcionamiento de las secciones mencionadas:

• TRITURACIÓN

El mineral se transportaba de las minas en camiones de 10 toneladas de capacidad, se pesaba en la báscula a la entrada de la planta, donde se tomaba una muestra para determinar la humedad y de ahí se llevaba a las tolvas de gruesos (dos), donde por medio de una parrilla se admitía el mineral menor a siete pulgadas. El mineral que pasaba a la parrilla era dosificado a una banda, por medio de un alimentador, que transportaba el mineral a una quebradora primaria de quijadas de 8" x 10" para dejarlo a un tamaño menor de 2". La descarga de la quebradora era tomada por otra banda que se encargaba de transportar el material a una criba vibratoria donde se separaba y aquel menor de 5/8" era enviado por otra banda a las tolvas de finos. El rechazo de la criba era enviado a una quebradora secundaria de 18" y la descarga de ésta se unía con la descarga de la quebradora primaria (en circuito cerrado con la criba vibratoria). Esta sección trabajaba a razón de 120 toneladas de mineral por turno, almacenándose el mineral menor a 5/8" en las tolvas de finos.

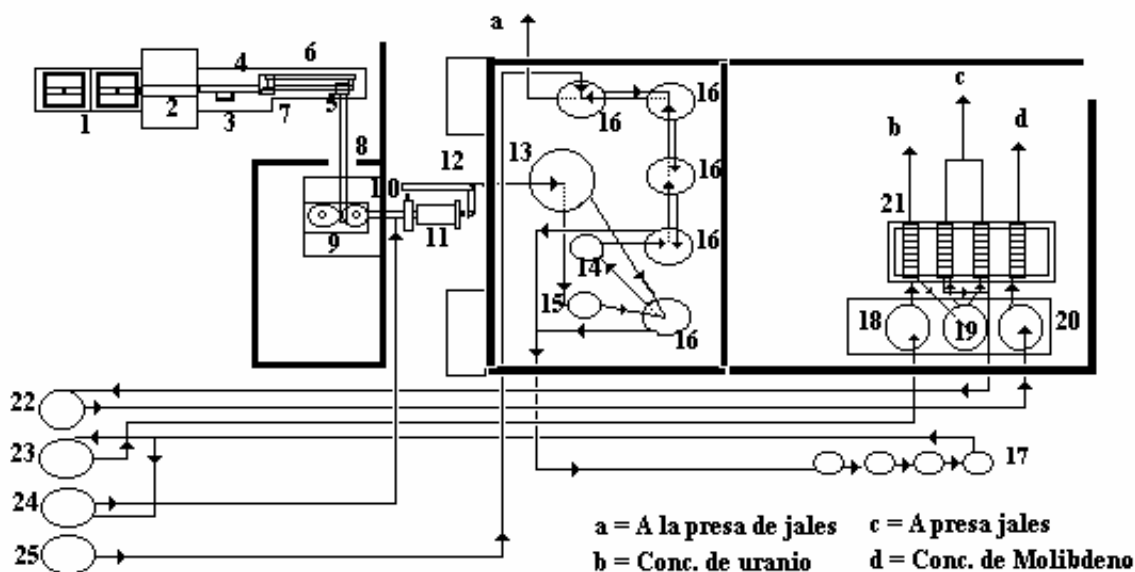
• MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN

De las tolvas de finos, por medio de un alimentador vibratorio y una banda se dosificaba al molino de bolas de 5'x 5' recibiendo el mineral a menos de 5/8" y derramando el clasificador de rastrillos donde se controlaba el derrame al 80% a 65 mallas, retornando el resto al molino. El derrame del clasificador al tamaño antes mencionado, se enviaba al espaciador primario para control de dilución.

La alimentación al molino era a razón de 1 kg/s, (pesada en la banda por 10 segundos y cada hora para control). La densidad de pulpa en el molino era de 1750 a 1850 g/l (70 a 75% de sólidos). La densidad al derrame del clasificador era de 1325 a 1383 g/l (40 a 45% de sólidos).

Generalmente con el fin de subir la concentración de uranio y molibdeno en el circuito, así como de iniciar la dilución, se agregaba solución con reactivos en el molino y clasificador, en lugar de agua.

FIGURA 1
DIAGRAMA DE PROCESO DEL
BENEFICIO DE URANIO.



NOMENCLATURA:

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Tolvas de gruesos. 2. Banda de gruesos de 18". 3. Quebradora primaria de 8 x 10". 4. Banda de 16". 5. Criba de 6 x 3". 6. Banda de retorno de 16". 7. Quebradora secundaria. 8. Banda de finos de 18". 9. Tolvas de finos. 10. Banda de alimentación 16". 11. Molino de bolas de 5 x 5". 12. Clasificador de rastrillos 28". | <ol style="list-style-type: none"> 13. Asentador General 14. Lixiviador V= 21.5 m³ 15. Lixiviador V= 58.1 m³ 16. Espesador lavados contracorriente 18 x 8". 17. Filtros de arena. 18. Precipitador de uranio. 19. Precipitador 20. Precipitador 21. Filtros prensa. 22. Tanque solución rica en molibdeno. 23. Tanque solución rica en uranio. 24. Tanque solución semirrica en uranio y molibdeno. 25. Tanque de agua. |
|--|--|

• **LIXIVIACIÓN Y LAVADO A CONTRA CORRIENTE**

La pulpa que derramaba el clasificador al tamaño y densidad especificados anteriormente, se enviaba al espaciador primario, donde se subía la densidad de la pulpa, alimentando a los lixivios a razón de 1550 a 1700 g/l (60 a 70% de sólidos). En los lixivios, según la densidad, se le dejaba de 16 a 24 horas como tiempo de residencia a un régimen de agitación lenta (para conservar la densidad



únicamente). En esta parte se añadían los reactivos y se conservaba la concentración de éstos en 35 a 50 g/l de carbonato de sodio y 20 a 30 g/l de bicarbonato de sodio, dependiendo del mineral. La temperatura en los lixivadores se conservaba entre 80 y 90 grados Celsius por medio del vapor suministrado por la caldera a los serpentines de los lixivadores. De los lixivadores pasaba la pulpa a cinco espesadores para efectuarse cinco pasos de lavado a contracorriente por decantación. Para lavar se usaba agua limpia que se alimentaba en el quinto paso de lavado a razón de 87 a 130 m³/día (siempre guardando la proporción de uno de pulpa por dos de agua). El sólido lavado que salía del quinto espesador se enviaba a la presa de jal y la solución que derramaba del primer espesador pasaba por su clasificación por filtros de arena con ayuda filtro (tierras diatomeas). Para ayudar a la sedimentación se usaba regularmente COMPLEX-50 o SEPARAN-MG 200.

La solución filtrada conteniendo uranio y molibdeno disueltos a concentraciones de 1.5 a 3.0 g/l para uranio y 5 a 10 g/l para molibdeno, se enviaba a precipitación o a almacenamiento según la disponibilidad del equipo o su concentración.

• PRECIPITACIÓN, FILTRACIÓN SECADO (DE MOLIBDENO) Y ENVASE

La solución rica en uranio y molibdeno se enviaba al precipitador 1, donde se agregaba sosa en escamas para precipitar a temperatura ambiente el uranio, como diuranato de sodio ($\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$). Se dejaba asentar y se filtraba en un filtro prensa. El uranio que se quedaba en el filtro se almacenaba húmedo (50 % de humedad). La solución estéril en uranio y aún rica en molibdeno se pasaba al precipitador 2 donde se agregaba cloruro de calcio para precipitar los carbonatos procurando no precipitar el molibdeno. Después de la precipitación de carbonatos se dejaba asentar y posteriormente se filtraba. Los carbonatos se quedaban en el filtro y se enviaban a la presa de jales. La solución estéril primeramente en uranio y luego en carbonatos se pasaba al precipitador 3 donde se seguía agregando cloruro de calcio para precipitar el molibdeno como molibdato de calcio, el cual era el producto principal ya que el uranio se obtenía como subproducto. Después de precipitar el molibdeno se dejaba asentar, se filtraba, se secaba y se envasaba como molibdato de calcio en tambores de 200 l para su venta.

3. NORMATIVIDAD APLICABLE

La normativa que se aplicó para la determinación de los niveles de contaminación aceptables de superficies es los que ha establecido la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) los cuales están basados en las recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica y en la Comisión Internacional de Protección Radiológica. De manera general, dicha normativa establece los criterios que a continuación se describen a fin de garantizar que éstas no representen un riesgo indebido a la población y al ambiente, desde el punto de vista radiológico.

CRITERIO 1.

La concentración promedio de Ra-226 en un área de 100 m² de terreno, no debe exceder el nivel de fondo por más de:

- 185 Bq/kg promediados en los primeros 15 cm de suelo bajo la superficie y
- 555 Bq/kg promediado en capas de 15 cm de espesor por debajo de los primeros 15 cm bajo la superficie.



CRITERIO 2.

Para el caso de construcciones ocupadas o habitables debe cumplirse lo siguiente:

La concentración promedio anual de los productos de decaimiento del Radón-222, de vida media corta (incluyendo el fondo) no excedan de 0.02 Working Level (WL) .

El nivel de fondo debe disminuirse hasta donde razonablemente sea posible, pero en ningún momento excederá el nivel de fondo por más de 20 microoentgen por hora.

CRITERIO 3.

Para que las instalaciones, los equipos o cualquier otro aditamento pueda ser liberado para uso irrestricto deben cumplirse los siguientes requerimientos:

Debe realizarse un esfuerzo razonable para eliminar la contaminación residual y no rebasar los niveles especificados en la tabla 1.

NÚCLIDO	PROMEDIO	MÁXIMO	REMOVIBLE
U-nat, U-235, U-238 y productos de decaimiento	Bq/100 cm ² (5000 dpm/100 cm ²)	250 Bq/100 cm ² (15000 dpm/100 cm ²)	Bq/100 cm ² (1000 dpm/100 cm ²)

TABLA 1 NIVELES ACEPTABLES DE CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL

CRITERIO 4

El límite de dosis equivalente efectivo anual para el POE es de 50 mSv. Además el límite de dosis equivalente anual para los distintos órganos y tejidos de los trabajadores es de 500 mSv, excepto para el caso del cristalino, el cual es de 150 mSv [4,5].

El límite de dosis equivalente efectivo anual para los individuos del público es de 5 mSv. El límite de dosis equivalente anual para los distintos órganos y tejidos de dichas personas es de 50 mSv. Estos límites han de aplicarse al grupo crítico de la población.

CRITERIO 6

El límite anual de incorporación para el POE para zonas controladas y con el fin de dar cumplimiento a la aplicación del sistema de limitación de dosis, se ha establecido para el caso del Ra-226 de 7×10^4 Bq y de 2×10^4 Bq por vía oral y por inhalación respectivamente.

4. CRITERIOS DE SEGURIDAD PARA LA SELECCIÓN DEL REPOSITORIO DE ESTÉRILES.

4.1 CRITERIOS GENERALES DE SEGURIDAD

Para seleccionar el sitio de colocación de los estériles de uranio y para establecer las especificaciones técnicas del apilamiento se siguieron los criterios siguientes:

a) Los estériles de uranio y sus contaminantes asociados deben ser contenidos de modo que permanezcan aislados del medio ambiente por un periodo de tiempo tan largo como lo permita la mejor



tecnología disponible, con apoyo en las características del sitio.

b) Los estériles deben ser dispuestos de tal manera que no se requiera mantenimiento activo para preservar la eficacia de la contención.

c) La actividad económica en el sitio debe ser mínima en un tiempo previsible.

d) El sitio debe ser seco, tanto por lo que se refiere a precipitación pluvial como a acumulación de agua en mantos freáticos, ya que el agua es un medio de transporte de los radisótopos al medio ambiente humano, a través de cadenas tróficas.

e) La actividad volcánica y sísmica debe ser baja, con el fin de evitar fracturamientos, deslizamientos de tierra y exposición de los jales. Toda la zona norte del país cumple este criterio.

f) El sitio no debe estar en el curso de corrientes superficiales de agua porque pueden erosionar la cubierta protectora. La erosión por viento debe minimizarse con una cubierta de plantas en el sitio.

5. DISEÑO DEL REPOSITORIO DE ESTÉRILES

5.1 CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO

Se tomó como base para el diseño del apilamiento de los estériles de uranio los criterios generales siguientes:

El sitio y el apilamiento de los estériles deben ser estables física y químicamente, de tal manera que no requiera mantenimiento activo, de modo que permanezcan aislados del medio ambiente por un periodo de tiempo tan largo como lo permita la mejor tecnología disponible.

El apilamiento debe permitir el control de la migración de los elementos tóxicos y radiactivos de los estériles hacia el medio ambiente.

5.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTÉRILES

Los estériles que se encontraban a un lado de la Planta de Beneficio de Ciudad Aldama son los residuos de un proceso químico agresivo. El proceso que usaba la Planta de Beneficio consistía en una molienda a 60 mallas, una lixiviación con carbonato y bicarbonato de sodio a 80°C durante 24 horas, precipitación con hidróxido de sodio, filtración (en filtros prensa), secado y envasado. Ya que la alimentación de la planta sufrió variaciones importantes durante su operación, el jal también tiene una composición química variable.

Las muestras de estériles que han sido analizadas en el laboratorio indican un contenido de 300 g de U_{308} por kilogramo y 10 000 Bq de Ra-226 por kilogramo, en promedio. Como era de esperarse, tanto el uranio como el radio se encuentran en forma prácticamente insoluble. Se hizo una prueba de lixiviación del jal con agua natural (agua de la llave) a 60°C durante 50 horas. La prueba se hizo con una pulpa con una relación de sólido a líquido de 1:1, manteniendo la pulpa en suspensión total durante la prueba. El líquido resultante (una vez filtrado) contenía 2 Bq/l de actividad alfa.



Los jales de Villa Aldama son un material sumamente fino. El 50% del material pasa la malla 200. Su mismo grado de finura permite compactarlo bien, y el jal compactado a 95% de la prueba Procter standard tiene una filtración hidráulica de 7.2×10^{-6} cm/seg.

5.3 PREPARACIÓN DEL TERRENO

Después de realizar el desmonte de una ladera para la construcción de la plataforma que albergaría a los estériles de uranio, se construyó una pendiente en el terreno que fue de 7% en la dirección E-O y de 5% en la dirección N-S, por lo que se prepararon dos terrazas para reducir la pendiente a un valor entre 0.5 y 2%. La plataforma del terreno ocupó una superficie aproximada de 200 x 200 m. A lo largo del eje (N-S) se formó una doble pendiente en la forma de una V asimétrica, para que formara un canal para captar y conducir al exterior de la pila cualquier agua que lograra infiltrarse. Una vez afinado el terreno se procedió a humedecerlo y compactarlo hasta un 90%, según la prueba Procter standard.

5.4 PREPARACIÓN DE LA CAMA INFERIOR.

Sobre el terreno preparado se colocaron dos camas de arcilla compactada con un espesor de 15 cm cada una, de tal forma que quedaran cruzadas, posteriormente se compactó cada una de las camas hasta 90% de la prueba Procter standard.

5.5 CONTROL DE CALIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN DEL REPOSITORIO

Se contrató a dos empresas externas para que llevara el control de calidad en lo relativo a capacidad de carga del suelo, grado de compactación de la cama inferior de arcilla, de los estériles mismos y de la cubierta superior de arcilla.

Para la primera etapa se contrató a la empresa Laboratorios de la Construcción, S.A. (LACOSA), aplicando métodos normalizados de la American Society for Testing and Materials (ASTM), comúnmente usados en la construcción de terraplenes para carreteras.

Para la segunda etapa se contrató a la empresa CONSUCO, S.A. de C.V., la cual aplicó las mismas técnicas.

5.6 ACOMODO DE LOS ESTÉRILES

Los estériles de uranio se trasladaron desde la Planta de Beneficio de Ciudad Aldama hasta el sitio seleccionado en la Sierra de Peña Blanca de acuerdo con lo establecido en el Procedimiento respectivo.

Los estériles se colocaron sobre la cama inferior de arcilla descrita en el inciso 5.4. Los estériles se acomodaron de manera que se formara una pirámide truncada en una superficie de 100 x 100 m. Los taludes de arcilla que se formaron alrededor de la plataforma fue de 2 m de ancho la cual formaba el perímetro del apilamiento con una pendiente de 1:1.5, que es inferior al ángulo de reposo natural de los estériles secos. Los estériles se fueron apilando y compactando al 90% de prueba Procter standard.

5.7 COLOCACIÓN DE LA CUBIERTA

La pila de estériles se protegió contra la lluvia, la erosión y la posible intrusión de animales pequeños mediante una cubierta de dos capas. La primera capa, fue de la misma arcilla usada en la cama intermedia e inferior y de un espesor similar. La segunda capa consistió de material aluvial de 40 cm de espesor, adecuado para impedir la intrusión de animales pequeños. Esta última capa se estabilizó contra la erosión plantando en su superficie especies vegetales de raíces cortas propias de la región. El esquema del repositorio se muestra en la **Figura 2, donde se indican los volúmenes almacenados en las dos etapas del proceso de almacenamiento.**

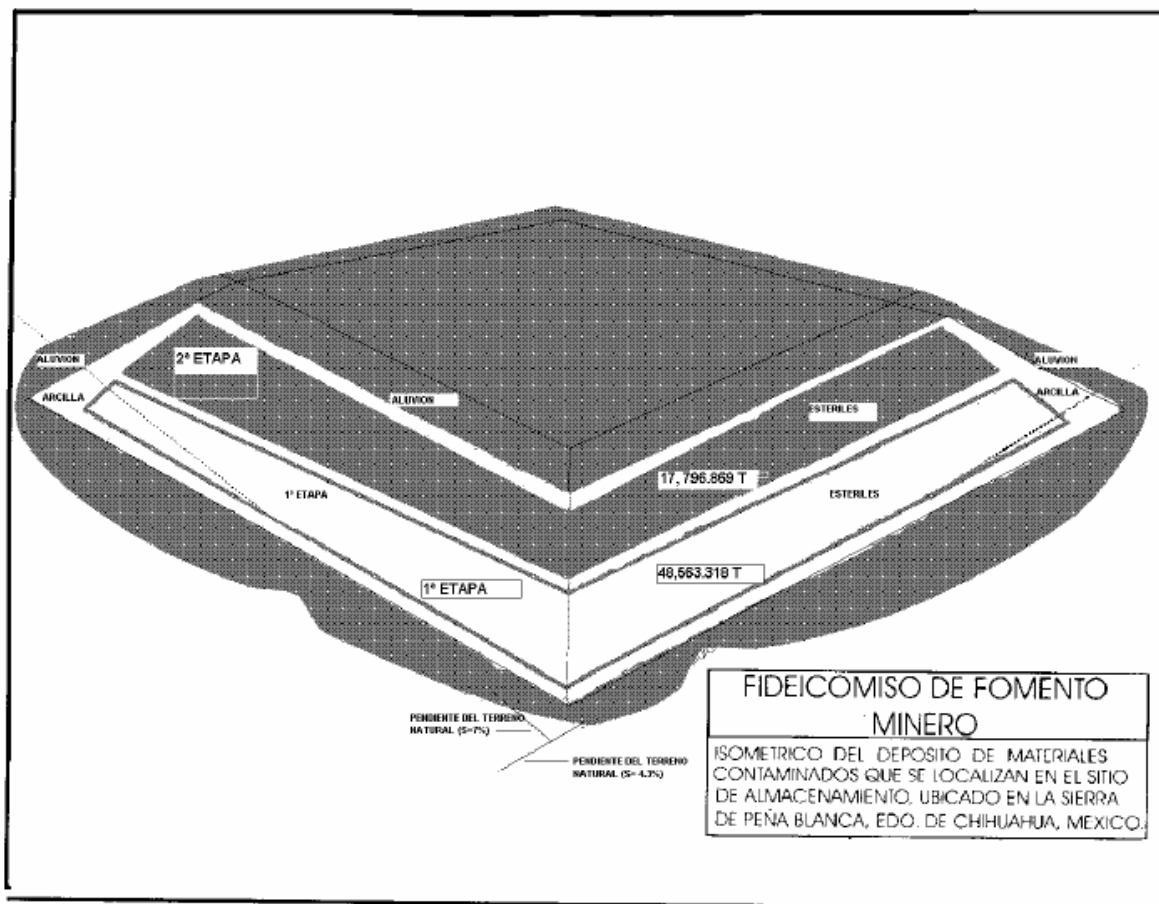


Fig. 2. Diagrama esquemático del repositorio

5.8 ZONA DE AMORTIGUAMIENTO

Se creó una zona de amortiguamiento alrededor del terreno donde se depositaron los estériles, incluyendo el apilamiento de mineral de uranio que se encuentra alrededor del repositorio de los estériles.

La zona de amortiguamiento fue cercada, con objeto de impedir el acceso de personas no autorizadas y de animales grandes ya sea silvestres o domésticos y de esta manera reducir el riesgo de desgarres en el repositorio.

La zona de amortiguamiento esta debidamente señalizada con letreros indicando la presencia de material radiactivo y prohibiendo el acceso de personal no autorizado.

5.9 PROGRAMA DE MONITOREO AMBIENTAL

Antes de que se colocaran los estériles en el sitio se tomaron muestras de aire, suelo, plantas y agua y se hicieron medidas radiométricas a efecto de establecer una base de comparación para los estudios ulteriores.



6. CONCLUSIONES

a) El predio que comprende lo que fue la planta de beneficio de uranio y a la cual se le realizó la descontaminación a los niveles que de manera general no se alcanzaron los criterios establecidos por la CNSNS para considerar de uso irrestricto dicho predio, aunque los niveles de radiación externa, una vez que se cubrieron la zona I y II con aluvión inerte, no representan niveles que pongan en peligro la salud humana por esta vía. Por tal motivo, lo que fue la presa de jal (zona I) y lo que fue la zona de minerales (zona II) pueden ser utilizado como parque recreativo o como estacionamiento, ya que el nivel máximo de rapidez de exposición que se puede encontrar es de 0.1 mR/h, lo cual representaría (suponiendo una permanencia de 8 h a la semana, en el punto máximo) una dosis de 0.008 mSv/semana o 0.4 mSv al año, adicional al fondo natural, estimada en 2.6 mSv/año, resultando en 15.4% mas dicho nivel de fondo al año. Lo que es importante señalar, es que no se debe permitir ningún tipo de construcción en la zona I y II que pudiera aflorar la contaminación residual que allí permanece.

b) Es importante tomar en cuenta el estudio que se desarrolló para determinar la migración del Ra-226 hacia mantos freáticos. Dicho estudio permitió encontrar que en un lapso de 25 años el Ra-226 tan solo migró 50 cm por debajo de donde permanecieron los estériles, lo que indica que es improbable que el Ra-226 llegara al nivel freático del lugar, sin embargo por filosofía de seguridad se recomienda se efectúen análisis de muestras de agua potable de los pozos mas cercanos a lo que fue la planta de beneficio de uranio, en Aldama, dos veces al año, durante un período de 20 a 25 años, con objeto de asegurar que al haber sido retirados los estériles de uranio no exista ya migración de Ra-226 mas allá de los primeros 100 cm bajo la superficie donde permaneció dicho material. Esto se puede comprobar mediante la elaboración de catas en el lugar y el análisis correspondiente de migración, al final de dicho período.

c) Como referencia se puede considerar como no aceptable el consumo de agua potable con concentraciones mayores a 0.1 Bq/l de emisores alfa total.

d) Con respecto a las construcciones y los equipos de proceso de lo que fue la planta de beneficio, pueden utilizarse de uso irrestricto, ya que presenta como área general un nivel de radiación promedio a 1 m de la superficie de 0.04 mR/h, cumpliendo con el criterio 2b recomendado por la CNSNS.

e) Por lo que hace al control del sitio de almacenamiento en Peña Blanca, debe considerarse un compromiso con la persona física, moral o gubernamental que tenga a cargo dicho lugar, para que, de manera periódica se hagan evaluaciones de muestras ambientales (sobre todo la migración de Ra-226 a mantos freáticos o a cuencas) alrededor de la zona de amortiguamiento, ya que esto permitirá detectar de manera oportuna una posible dispersión (ya sea por fractura o migración) del material confinado y tomar las acciones correctivas necesarias. Las evaluaciones se sugiere sean efectuadas por lo menos una vez cada dos años.

f) Es importante considerar que el confinamiento de los estériles de uranio tiene como objetivo la protección del hombre y del ambiente. Una selección adecuada del sitio y un buen diseño que proporcionen las barreras naturales y de ingeniería, garantizarán en el corto y mediano plazo la no dispersión del material confinado, y que de producirse fugas a largo plazo su magnitud sea tal que el material radiactivo no alcance concentraciones de riesgo en la cadena alimenticia del hombre y en el ambiente.

g) El traslado de los estériles de uranio cumplió su objetivo con seguridad para los trabajadores y público, ya que las dosis estimadas para el personal que transportó y acomodó los estériles de uranio



no pasaron el límite de dosis efectiva para el público, asimismo, se cuenta con la garantía de que todo el material que se transportó llegó al repositorio y que no se presentó incidente alguno que pudiera haber dispersado el material durante el trayecto. Esto se pudo comprobar, ya que antes de realizar el transporte del material, se analizó en varios puntos del trayecto la concentración de Ra-226, con los cuales se compararon las mediciones al final de dicha actividad.

h) Por otro lado, de los tres grupos de trabajo mencionados en el capítulo 3.6, el grupo de trabajadores que se encontró trabajando en el acomodo de los estériles en el repositorio fue el que recibió una mayor dosis individual por exposición externa, recibiendo aproximadamente 2.8 mSv en el período de 29 semanas, lo cual representó que al final de ese año este grupo de trabajadores de 10 personas, recibió el doble de la dosis por fondo natural. Con respecto a las dosis por incorporación, estas no pudieron ser cuantificadas ya que se esperaban cantidades de tierra ingerida o inhalada menores a los Límites Anuales de Incorporación (LAI) para el Ra-226, siendo estas de 7 y 2 kg respectivamente (considerando un promedio de 10,000 Bq/kg de Ra-226 en el estéril y un LAI de 7×10^4 Bq/año por vía ingestión y de 2×10^4 Bq/año por vía inhalación), situación muy improbable de alcanzar.

i) Cabe hacer notar que según el balance metalúrgico, se debieron generar aproximadamente 35,000 ton de estériles, pero al final del proceso de descontaminación de la presa de estériles, se generó aproximadamente 65,000 ton. Esto representó un incremento del 86% en la cantidad que se tuvo que remover del sitio. Esto nos debe hacer reflexionar para que en lo sucesivo, este tipo de plantas cuente con una gestión de sus desechos de acuerdo a la normativa y para no erogar esfuerzo y dinero adicionales.

7. REFERENCIAS

- D. Peña Javier, Blanco P. Benjamín, "Análisis de la operación de la planta alcalina de Villa Aldama, Chihuahua (1969 – 1971)", INEN, abril de 1977.
- ANGELES C. ARTURO "Caracterización de Radio 226 en estériles de uranio por espectrometría gamma". Tesis de la Facultad de Ciencias, UNAM, 1996.
- NOM-022/1-NUCL-1996, "Requerimientos para una Instalación para Almacenamiento Definitivo de Desechos Radiactivos de Nivel Bajo Cerca de la Superficie. Parte 1 Sitio", CNSNS, septiembre de 1997.
- Fideicomiso de Fomento Minero. "Informe de Seguridad y Protección Radiológica de la Descontaminación Radiológica de la Planta de Beneficio de Uranio en Ciudad Aldama, Chihuahua, México." Mayo de 1997.
- OIEA, "Current practices and options for confinement of uranium mill tailings", Technical Reports Series 209, Viena, Austria, Septiembre de 1981, p. 20.
- FRY, R.M., "Criteria for the long-term management of uranium mill tailings", Organismo Internacional de Energía Atómica, STI/PUB/622, Viena, Austria, Noviembre de 1992, p. 80
- BOYD, J.M., CARTER, T.G., KNAPP, R.A., CULVER, K.B., "Hydrogeological investigations and evaluation of the Stanleigh mine tailings impoundment site", en Management of Wastes from Uranium Mining and Milling, Organismo Internacional de Energía Atómica, STI/PUB/622, Viena, Austria, Noviembre de 1992, p. 141-156.



- Fideicomiso de Fomento Minero. "Informe Final de Seguridad del Transporte y Almacenamiento de Estériles de Uranio Ubicado en la Sierra de Peña Blanca, Chihuahua". Abril de 1997.
- OIEA, "Current practices for the Management and Confinement of Uranium Mill Tailings", Technical Reports Series, No. 335, Viena, junio 1992.
- Marco A. Ruiz Cristóbal "ASPECTOS DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN LA DESCONTAMINACIÓN DE LA PLANTA DE BENEFICIO DE URANIO EN CIUDAD ALDAMA Y EN EL ALMACENAMIENTO DE SUS RESIDUOS EN PEÑA BLANCA, CHIHUAHUA, MÉXICO". **Tesis de Maestría, 1998, Facultad de Química, UNAM**