

# "Manejo de desechos peligrosos en los laboratorios del Instituto Tecnológico de Costa Rica (III Fase)"

Fecha de recepción: 07/05/2008

Fecha de aceptación: 12/05/2008

Juan Carlos Salas Jiménez<sup>1</sup>

Hilda Quesada Carvajal<sup>2</sup>

Katsuhiko Harada<sup>3</sup>

*Se realizó un escalamiento, a nivel de planta piloto, para el tratamiento de los desechos que se encuentran almacenados en cantidades significativas en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), como son los desechos acuosos de metales pesados provenientes de los laboratorios y de las escorias del proceso de nitruración.*

## Palabras Clave

Tratamiento químico, desechos acuosos, metales pesados, planta piloto.

## Key words

Chemical treatment, watery waste, heavy metals, pilot plants.

## Resumen

Se realizó un escalamiento, a nivel de planta piloto, para el tratamiento de los desechos que se encuentran almacenados en cantidades significativas en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), como son los desechos acuosos de metales pesados provenientes de los laboratorios y de las escorias del proceso de nitruración. Se contó con la participación del Dr. Katsuhiko Harada, cooperante japonés, quien propuso una metodología de tratamiento que fue probada y adaptada

a las características de los desechos peligrosos que se generan en el ITCR y además, se propuso un procedimiento operativo para centralizar el tratamiento de los desechos que se producen en diferentes laboratorios, pero tienen características químicas semejantes, por lo cual pueden ser tratados con el mismo método químico. Para estos casos, sería más sencillo y barato concentrar el tratamiento en un solo lugar, y en el caso de desechos muy peligrosos, cuyo tratamiento y disposición final sean algo complicados de implementar, es recomendable que se establezca un laboratorio especializado con personal capacitado para su manejo. Para tal fin, se construyó un laboratorio de desechos peligrosos equipado con un reactor, un filtro de lodos y equipos de laboratorio para análisis. Los métodos probados en la planta piloto para el tratamiento de los desechos acuosos de metales pesados y de escorias con cianuro fueron efectivos.

1. Investigador, Centro Investigación Protección Ambiental. Teléfono: (506) 2550-2040. Correo electrónico: [jsalas@itcr.ac.cr](mailto:jsalas@itcr.ac.cr).
2. Investigadora, Centro Investigación Protección Ambiental. Teléfono: (506) 2550-9137. Correo electrónico: [hquesada@itcr.ac.cr](mailto:hquesada@itcr.ac.cr).
3. Cooperante Senior, Agencia de Cooperación Japonesa (JAICA). Correo electrónico: [KatsuhikoHarada@yahoo.co.jp](mailto:KatsuhikoHarada@yahoo.co.jp)

*El Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos Industriales tiene como objetivo establecer las normas y procedimientos para un manejo adecuado de los desechos que, desde una perspectiva sanitaria y ambiental, se considere peligrosos, según la definición que se encuentra en el Reglamento sobre las Características y el Listado de los Desechos Peligrosos Industriales*

## Abstract

A plant pilot scaling took place in order to treat aqueous waste of heavy metals coming from the ITCR laboratories, which is stored in significant quantities. We counted with the participation of Dr. Katsuhiro Harada, a volunteer Japanese, who proposed a treatment methodology that was proven and adapted in accordance with the characteristics of the dangerous waste that is generated in the ITCR. Also, we proposed an operative procedure to centralize the treatment of some waste that take place in different laboratories and that have the same chemical characteristics and; therefore, they can be treated using the same chemical method, which would make simpler and cheaper for these cases to concentrate the treatment on a single place, or in the case of very dangerous waste where the treatment and the final disposal are something complicated of implementing, it would be better to take care of them in a specialized laboratory with qualified personnel that carries out this disposal. A laboratory for dangerous waste was built to accomplish this. This laboratory was equipped with a reactor, a filter of mud and laboratory teams for analysis. The methods used at plant pilot's level for the treatment of aqueous waste of heavy metals and of scums with cyanide proved to be effective.

## Introducción

En 1998, el Gobierno de la República aprobó el Decreto N° 27001- MINAE “Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos Industriales”<sup>(3)</sup> y el Decreto N° 27000-MINAE “Reglamento sobre las Características y el Listado de los Desechos Peligrosos Industriales”<sup>(4)</sup>, con fundamento en los artículos 50 y 140, incisos 3 y 18, de la Constitución Política y de conformidad con lo dispuesto en los artículos 60 y 69 de la Ley Orgánica del Ambiente N° 7554.

Este último Reglamento tiene como objetivo establecer las características de los residuos peligrosos, un amplio listado de ellos y los límites de concentración máxima permisible. En este Reglamento se define los desechos peligrosos como “aquellos desechos sólidos, líquidos, pastosos o gaseosos que por su reactividad química y sus características tóxicas, explosivas, corrosivas, radioactivas, biológicas, inflamables, volatilizables, combustibles y otras; o por su cantidad y tiempo de exposición, pueden causar daños a la salud de los seres humanos y del ambiente, incluyendo la muerte de los seres vivos”<sup>(4)</sup>.

Además, se establece en los artículos 3, 4 y 5 que un desecho es peligroso cuando presenta una o varias de las características anteriores, si es una mezcla de desechos ordinarios con desechos peligrosos o si aparecen en las listas de industrias que generan desechos peligrosos como fuentes específicas (Cuadro 5 del Anexo 2), o en la lista de desechos peligrosos de fuentes no específicas que se encuentra en el Cuadro 6 del Anexo 2 de este Reglamento<sup>(4)</sup>.

El Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos Industriales tiene como objetivo establecer las normas y procedimientos para un manejo adecuado de los desechos que, desde una perspectiva sanitaria y ambiental, se considere peligrosos, según la definición que se encuentra en el Reglamento sobre las Características y el Listado de los Desechos Peligrosos Industriales<sup>(4)</sup>.

En el Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos<sup>(3)</sup>, se establece que el generador de desechos peligrosos será el responsable de garantizar que su tratamiento y disposición final se realicen de acuerdo con las condiciones exigidas en el mismo Reglamento (artículo 2); también se define que el tratamiento de un producto o desecho peligroso es un método, técnica o proceso designado para cambiar sus características físicas,

químicas o biológicas, de manera que se produzca un desecho no peligroso o menos peligroso para su seguro almacenaje, transporte o disposición final (artículo 11, inciso 1). También se indica (inciso 2) que los tratamientos incluyen la neutralización de los desechos, la recuperación de energía o de fuentes de materiales de desecho y se señala las principales prácticas para dicho tratamiento, entre las cuales se menciona: reciclaje, métodos físico-químicos, métodos biológicos, incineración, tratamiento fuera del país y otros mecanismos como la fijación química, el encapsulamiento, la estabilización y la solidificación<sup>(3)</sup>.

Los tratamientos más importantes utilizados para los desechos peligrosos son:<sup>(1, 6, 7, 8, 9)</sup>

1. Tratamientos Biológicos
2. Tratamiento Térmico
3. Estabilización y Solidificación
4. Tratamientos Físico-químicos

### Tratamientos biológicos

El tratamiento biológico es la degradación del residuo orgánico por la acción de los microorganismos. La degradación altera la estructura molecular de los compuestos orgánicos. Una limitación de este tratamiento es que las concentraciones de los residuos por tratar pueden ser letales para los microorganismos.

### Tratamiento térmico

El tratamiento térmico consiste en un proceso de incineración que destruye únicamente los residuos orgánicos, pero no los residuos inorgánicos, mediante la combustión completa de la materia orgánica, transformándola en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O). Para obtener el resultado anterior, se necesita tener un buen control del sistema de incineración, pues de lo contrario se estaría enviando sustancias tóxicas a la atmósfera. En Costa Rica, el servicio de incineración de solventes, principalmente los no clorados,

se realiza en los hornos de la fábrica de cemento Holcim.

### Estabilización y solidificación

Los desechos peligrosos se mezclan con otros materiales para ser capturados o fijados, formando una estructura sólida. El objetivo es convertir los desechos peligrosos en un sólido inerte, estable, de baja lixiviabilidad (la lixiviación es el proceso por el cual los contaminantes se transfieren de una matriz estabilizada a un medio líquido como el agua) y con suficiente fuerza mecánica, se previene que migren hacia el agua.

La solidificación depende de las características de los desechos. Los materiales usados en la solidificación son:

- Cementos
- Limo o materiales puzolánicos (porcelana)
- Materiales termoplásticos: betún, parafina o polietileno
- Silicatos fundidos
- Arcillas

### Tratamientos físico-químicos

En los tratamientos físicos no se da una transformación de la composición del desecho, sino que se utilizan para recuperar algunos componentes que se pueden reutilizar, mientras que y los tratamientos químicos sí se utilizan para transformar la composición de los desechos, con el fin de obtener sustancias menos peligrosas.

En cuanto a la disposición final de los desechos peligrosos, el Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos (artículo 12) indica que su disposición adecuada se refiere a la descarga, inyección, deposición, lanzamiento y/o colocación de cualquier desecho peligroso (previamente tratado) y aclara que dicha disposición debe hacerse de manera que el desecho o cualquiera de sus constituyentes que entre en contacto con el ambiente, no acarree ningún tipo de problema<sup>(3)</sup>.

Además, se establece (artículo 12, inciso 2) que los únicos métodos de disposición final aceptados son:

- Relleno sanitario de seguridad.
- Encapsulamiento o incineración.
- Exportación a países desarrollados (sólo con fines de tratamiento y disposición final) <sup>(3)</sup>.

Sin embargo, no existe ningún método de disposición totalmente seguro y en todos los casos se requiere evaluar previamente los posibles impactos ambientales y seleccionar con propiedad los sitios para disponer de los desechos peligrosos<sup>(6)</sup>. Por tanto, es necesario realizar estudios para adaptar a nuestra realidad las metodologías que sean idóneas e ir dando solución al adecuado manejo de los desechos peligrosos que se requiere en nuestro país. La sede central del Instituto

Tecnológico, al contar con un centro de investigación especializado en prevenir y resolver problemas ambientales, puede realizar estos estudios enfocados en resolver el problema del tratamiento y disposición final adecuados de los desechos peligrosos que se generan en esta sede y de esta manera, servir de ejemplo a otras instituciones e industrias, además de estar a derecho con la legislación ambiental existente, lo cual no sólo es una obligación como ciudadanos, sino un deber como formadores de profesionales a los que la sociedad exige un comportamiento y un desempeño apegados a la ética ambiental.

En el Cuadro 1 se muestra las condiciones experimentales de tres tratamientos químicos para desechos acuosos de metales pesados y uno, para desechos de cianuros, todos propuestos por el Dr. Harada para realizar ensayos de laboratorio con el fin

Cuadro 1. Condiciones generales para el tratamiento de algunos metales pesados y de cianuro en medio acuoso.

Condiciones del proceso		24th Mayo 2005 K.HARADA			
Proceso	Sustancias	Condiciones del proceso			Nota
		pH/Temp.	Reacción	Tiempo	
1. Método de Sulfato Ferroso	Mg, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Cd, In, Sn, Ba, Pb, Bi	>9 >60°C	2NaOH/FeSO <sub>4</sub> =1/1  xM <sup>2+</sup> + (3-x)Fe <sup>2+</sup> + 6OH <sup>-</sup> ⇒ MxFe <sub>3-x</sub> O <sub>4</sub> MxFe <sub>3-x</sub> (OH) <sub>6</sub> + 1/2O <sub>2</sub> ⇒ MxFe <sub>3-x</sub> O <sub>4</sub>		• Sustancias que interfieren: Al, Si, P, Nb, Sb, Ta, (Ga, Ge, As, Se, Sr, Y, Zr, La, Sn)
2. Método de Hierro en Polvo	Al, As, Bi, Cd, Cr <sup>6+</sup> , Cr <sup>3+</sup> , Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn, Zn	3~4	Iron Powder Iron:400g / 50L	>30min	• agitación fuerte • metales pesados conc.<1000mg/l
		9~10		>10min	
3. Método con Compuestos de Sulfuro	Hg	7(6~8)	Hg;10mg/l S <sup>2-</sup> ; 10mg/l (Na <sub>2</sub> S) Fe <sup>3+</sup> ; 40mg/l (FeCl <sub>3</sub> )	>10min	
4. Método de Descomposición de Cianuros	Desechos acuosos de cianuro	>10	NaOCl ORP=300~350mV	>10min	• 5Cl <sub>2</sub> /2CN=6,83g/1g
		7~8	NaOCl ORP=600~650mV	>30min	

de adaptarlos a las características de los desechos que se tiene en la Institución.

## Objetivo general

Establecer a escala de planta piloto los tratamientos físico-químicos evaluados y la disposición segura de los desechos peligrosos que se encuentran acumulados o se generan en cantidades significativas en los laboratorios del ITCR.

## Objetivos específicos

1. Evaluar a escala de planta piloto algunos de los tratamientos físico-químicos ya probados a nivel de laboratorio, para algunos de los desechos peligrosos del ITCR.
2. Evaluar a escala piloto el método de inmovilización con cemento para los desechos peligrosos tratados.
3. Definir el procedimiento operativo para centralizar el tratamiento de algunos desechos peligrosos del ITCR en la planta piloto.

## Materiales y métodos

Para alcanzar el primer objetivo, se realizó las siguientes actividades:

- 1) Se diseñó y construyó un reactor de acero inoxidable con las siguientes características:
  - Camisa externa para calentar con agua hasta los 90 °C, con termostato.
  - Agitación mecánica.
  - Medidor de pH y temperatura.
  - Línea de aire alimentada con un compresor de 0,5 caballos de fuerza (hp).
  - El reactor cuenta con varios niveles de salida para evacuar el líquido supernatante.
  - Bomba de alimentación conectada

a cuatro recipientes, donde cada uno contiene: sulfato de hierro, hidróxido de sodio, ácido sulfúrico y agua.

- 2) Se construyó un filtro de acero inoxidable para separar los lodos del líquido supernatante y en un área de 70 m<sup>2</sup>, se instaló la planta piloto para realizar las pruebas, lo cual se constituye en el actual Laboratorio de Desechos Peligrosos.
- 3) Se recolectó desechos acuosos de metales pesados y de cianuro provenientes de:
  - Laboratorios de Docencia de Química Básica I y II
  - Laboratorio Químico y Microbiológico CEQIATEC, de la Escuela de Química
  - Centro de Investigación Integración Industria-Bosque de la Escuela de Ingeniería Forestal
  - Escuela de Ingeniería Electrónica
  - Laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Materiales, se recolectó las escorias con cianuro del proceso de nitruración.

## Tratamiento para metales pesados

- Los desechos acuosos de metales pesados provenientes de diferentes fuentes fueron llevados al Laboratorio de Desechos Peligrosos y allí se mezcló los desechos con características químicas similares, para homogenizar la mezcla.
- Se realizó pruebas preliminares para determinar las concentraciones iniciales de los desechos mezclados por medio de un método de colorimetría, utilizando el equipo **SMART 2 Colorimeter de LaMotte**, con el fin de determinar las cantidades de reactivos que se consumirían durante el tratamiento.
- Se realizó pruebas de dilución con la mezcla de desechos, con el fin de

*Los desechos acuosos de metales pesados provenientes de diferentes fuentes fueron llevados al Laboratorio de Desechos Peligrosos y allí se mezcló los desechos con características químicas similares, para homogenizar la mezcla.*

- determinar la dilución más adecuada para el reactor.
- Se colocó los desechos en el reactor y se diluyeron.
- Se realizó el tratamiento para metales pesados siguiendo las indicaciones del siguiente procedimiento recomendado por el Dr. Harada (Cuadro 2).
- Se deja sedimentar los sólidos formados durante el tratamiento, de manera que queden dos fases: el líquido supernatante y el sólido.
- El sólido sedimentado se extrae del reactor por la parte inferior y se coloca en el filtro para eliminar la mayor cantidad de líquido posible.

Cuadro 2. Formación de hidróxidos insolubles (agua de desecho: 300 Litros)

1	Ajustar el pH por encima de 10,0 con NaOH al 25%	
2	Añadir disolución de hipoclorito de sodio [NaClO] al 13% en una relación de $(5Cl_2/2CN= 6,83\text{gramos}/1\text{gramos})$ o hasta que [ORP] > 400mV	Oxidación de materia orgánica y cianuros en concentración por debajo de 200 ppm.
3	Agite con aire durante 30 minutos manteniendo el PH por encima de 10,0 y el ORP> 400mV	
4	Ajustar el pH a 2,8 con $H_2SO_4$ al 10% con agitación	
5	Añadir disolución de $(FeSO_4)$ a no menos de 880 gramos y bisulfito de sodio $(Na_2S_2O_5)$ a no menos de 62 gramos o manteniendo el ORP = +500mV	Reducción
6	Mantenga el pH=2,8 por 20 minutos	
7	Ajuste el pH a 5,1 con NaOH al 25%	
8	Añadir entre 2,5 y 5 kilogramo de carbón activado	Procedimiento para tratar mercurio en bajas concentraciones y sustancias orgánicas
9	Mantener el pH=5,1 por 30 minutos con agitación	
10	Ajustar el pH entre 7,5-8,0 con NaOH al 25% y mantenerlo durante 20 minutos.	Eliminación de fluoruro, ácido fósforico y arsénico
11	Ajustar el pH a 10,8 con NaOH al 25% y agitar con aireación durante 30 minutos	Eliminación de amonio
12	Añadir disolución al 40% de cloruro de hierro (III) $(FeCl_3)$ y mantener el pH>10	Floculante
13	Ajustar el pH a 10,8 (NaOH)	Eliminación de metales pesados
14	Agite con aire y mantenga el pH = 10, 8 por 30 minutos	
15	Ajustar el pH a 8,0 $(H_2SO_4)$	
16	Añadir un coagulante polimérico (no aniónico)	
17	Filtración	
18	Ajustar el pH a 7,0 $(H_2SO_4)$	

- Al líquido supernatante que quedó en el reactor, se le realizó un análisis para comprobar que las concentraciones de metales pesados fueran inferiores a las establecidas por la normativa nacional.
- Si esas concentraciones se cumplen, se regula el pH del líquido entre 6 y 8, y luego se dispone de él por el drenaje. Si no se cumplen, se vuelve a tratar el líquido.
- Al sólido se le realizó la prueba para determinar la característica de toxicidad por lixiviación (TCLP 1311 de la EPA, *Environmental Protection Agency*, por sus siglas en inglés)<sup>(10)</sup>, para determinar si cumple con la normativa nacional y si no, se realiza el proceso de solidificación.

#### Método de Inmovilización con cemento

- El sólido obtenido con el tratamiento anterior se entregó al grupo de investigación del Proyecto *Desarrollo de las Tecnologías de Inmovilización, Solidificación y Estabilización de los Desechos Peligrosos en Costa Rica*, para realizar la evaluación de la disposición final del desecho a escala piloto mediante esta tecnología. Con esto se cumple el segundo objetivo específico y mediante acuerdo entre los investigadores y la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del ITCR

(VIE), se decidió que este método iba a ser desarrollado por el Proyecto indicado.

#### Tratamiento de las escorias con cianuro

Este tratamiento es parte del cumplimiento del objetivo específico 1.

- Las escorias con cianuro provenientes del proceso de nitruración fueron llevadas al Laboratorio de Desechos Peligrosos.
- Se realizó pruebas preliminares para determinar las concentraciones iniciales de cianuro en los desechos por medio de un método colorimétrico, utilizando el equipo **SMART 2 Colorimeter de LaMotte**, con el fin de determinar las cantidades de reactivos que se consumirían con el tratamiento.
- Se realizó pruebas de dilución a la mezcla de desechos, con el fin de determinar la dilución más adecuada para el reactor.
- Se colocó los desechos en el reactor y se diluyeron.
- Se realizó el tratamiento para cianuro siguiendo las indicaciones del siguiente procedimiento mostrado en el Cuadro 3.
- Se realizó análisis para comprobar que las concentraciones de  $CN^{1-}$  fueran inferiores a las establecidas por la normativa nacional.
- Si ello se cumple, se regula el pH entre 6 y 8, y luego se dispone del líquido por el drenaje. Si no se cumple, se vuelve a tratar el líquido.

Cuadro 3. Descomposición de cianuros.

1	Diluir hasta 200 ppm
2	Ajustar el pH a 10,5 (NaOH)
3	Adicionar hipoclorito de sodio [NaClO] ( $5Cl_2 / 2CN = 6,83$ gramos /1gramo)
4	Mantener por 30 minutos la reacción con aireación.
5	Ajustar el pH entre 6 y 8

#### Procedimiento operativo para centralizar el desecho

Con este procedimiento se logra el objetivo específico 3.

Para definir el procedimiento operativo para la centralización del tratamiento de

algunos desechos peligrosos, se consideró los siguientes aspectos:

- Cantidad
- Complejidad del tratamiento

## Discusión de los resultados

### Diseño de reactor y filtro

En la Figura 1 se muestra el reactor que se construyó en acero inoxidable con una capacidad de 300 litros, tiene control de temperatura y pH, agitación mecánica y burbujeo con aire. El reactor tiene conexión directa a cuatro diferentes recipientes donde se puede colocar los reactivos utilizados para el tratamiento, los cuales son trasegados hasta el reactor por medio de una bomba. Estas características del reactor permiten versatilidad en su uso, pues se puede tratar grandes volúmenes de desechos, utilizando una gran variedad de métodos de tratamiento en medio acuoso.

Por otro lado, el reactor cuenta con varios niveles de evacuación del líquido supernatante, lo cual permite separar el líquido del sólido por decantación y el sólido se extrae del reactor por gravedad, para luego pasar a un filtro donde se extrae la mayor cantidad de líquido posible.

## Tratamiento a escala piloto de los desechos acuosos de metales pesados

A los desechos acuosos de metales pesados recolectados se les realizó análisis químicos para determinar la concentración inicial de algunos de esos metales, con el fin de determinar la dilución y la cantidad de reactivos requeridos para el tratamiento.

Se trató dos lotes de desechos acuosos de metales pesados y el primero estaba constituido por 47,7 kilogramos de mezcla de desechos provenientes de la determinación de la DQO (Demanda Química de Oxígeno), mezcla de desechos de dicromato de potasio al 5,0%, desechos de disolución al 10,0% de sulfato de cobre y desechos del Laboratorio de Docencia. El segundo lote fue de 111 kg y estuvo constituido por una mezcla de desechos de DQO y desechos del tratamiento de la madera. Las concentraciones iniciales de ambos lotes se muestran en el Cuadro 4.

El método de formación de hidróxidos para el tratamiento de metales pesados en medio acuoso es apropiado para cuando la concentración de desecho de metales ordinarios en el agua es menor a 2000 mg/l y la concentración de metales de difícil procesamiento es menor a 100 mg/l



Figura 1. Reactor, filtro y otros equipos; cooperante japonés Dr. Harada y el Embajador de Japón en Costa Rica.

**Cuadro 4.** Concentraciones iniciales de algunos metales pesados en desechos acuosos.

LOTES	Concentración inicial de metales pesados (mg/l)				
	Cr <sup>6+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Pb <sup>2+</sup>	Hg <sup>2+</sup>	As <sup>3+</sup>
1	720	2500	80	130	---
2	371,2	1209	1,3	75	65,6

cuando se refiere a Cr (III); en el caso del Cu<sup>2+</sup> y Fe<sup>3+</sup>, cuando sea menor a 5000 mg/l, y para el Mn<sup>2+</sup> y el Zn<sup>2+</sup>, menor a 200 mg/l. Por tanto, se dedujo que el primer lote por tratar debía diluirse siete veces para que el tratamiento resultara eficiente, particularmente para el tratamiento del Cr (III), aunque en el caso del Cu<sup>2+</sup>, el número de veces es menor al indicado.

Por tanto, para determinar el comportamiento del desecho respecto a lo anterior, se realizó una prueba de laboratorio con una dilución de 6,4 veces (Prueba 1).

Es importante indicar que el primer lote de desechos no se puede diluir siete veces de una sola vez, porque el volumen resultante sobrepasaría la capacidad del reactor, que es de 300 litros, por lo cual la prueba de *beaker* se realizó con una dilución

de los desechos de 6,4 veces, pero al agregar los reactivos, el volumen final en la prueba realizada en el *beaker* simuló un volumen mayor a los 300 litros del reactor. En este sentido, es recomendable realizar una dilución del desecho de tal forma que en conjunto con los reactivos adicionados, no se sobrepase un volumen final de 300 litros.

En el Cuadro 5 se muestran los resultados obtenidos de los análisis realizados al líquido supernatante de la muestra tratada en la Prueba 1.

Como se puede inferir del cuadro anterior, el tratamiento dado a la muestra con una dilución de 6,4 veces fue efectivo, pues las concentraciones de los metales analizados están por debajo de las concentraciones máximas permitidas en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, decreto N° 33601-MINAE-S<sup>(2)</sup>.

#### Tratamiento del desecho en el reactor. Primer lote

Se tomó la decisión de realizar el tratamiento del desecho en el reactor, de manera que el volumen final del líquido por manejar fuera aproximadamente de 200 litros y la dilución del desecho, de 4 veces (Prueba 2), ya que las concentraciones iniciales de los metales por tratar en el desecho (Lote 1) eran bastante bajas, también debido a que la Prueba 1 del tratamiento del desecho diluido 6,4 veces produjo concentraciones

**Cuadro 5.** Concentraciones de metales pesados después de realizar la prueba 1 al lote 1 de desechos.

MUESTRA	Concentración (mg/l)				
	Cr <sup>+6</sup>	Cr total	Cu <sup>+2</sup>	Pb <sup>+2</sup>	Hg <sup>+2</sup>
Según Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales	---	2,5	2,0	0,5	0,01
PRUEBA 1	0,03	0,06	0,14	0,1	0,00

de metales muy por debajo de lo que el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales exige.

En el Cuadro 6 se muestran los resultados obtenidos al analizar el líquido supernatante después del tratamiento de los desechos en el reactor (Pruebas 2 y 3).

A partir del Cuadro 6, se puede afirmar que la concentración de todos los metales después de la prueba 2 está por debajo de lo que exige la norma de vertido y reuso de aguas, excepto en el caso del metal  $Hg^{2+}$ . Por lo tanto, se debió tratar el líquido supernatante con carbón vegetal dos veces (Prueba 3) para disminuir la concentración de  $Hg^{2+}$  a 0,05 mg/l en el primer tratamiento y luego, a una concentración de 0,0024 mg/l después de agregar por segunda vez carbón vegetal, para así cumplir con la normativa.

La información obtenida en el cuadro anterior muestra que la dilución de 4 veces fue efectiva y que no fue necesario diluir 7 veces el desecho, permitiendo con esto manejar volúmenes más pequeños y con un menor gasto de agua. En el caso del mercurio, la dilución es efectiva si se realiza dos veces el tratamiento con carbón activado.

### Tratamiento del desecho en el reactor. Segundo lote

Con base en los resultados obtenidos del tratamiento del primer lote y del análisis que se muestra en el Cuadro 5, se decidió trabajar con la muestra sin diluir, ya que se determinó que si la concentración de Cr (III) no era mayor a 700 mg/l, se podía trabajar sin efectuar una dilución, a pesar de que de acuerdo con el procedimiento original para Cr (III), se debe diluir 3

**Cuadro 6.** Concentraciones de metales pesadas en el líquido supernatante en las pruebas 2 y 3 realizadas en el reactor.

MUESTRA	Concentración (mg/l)				
	Cr <sup>+6</sup>	Cr total	Cu <sup>+2</sup>	Pb <sup>+2</sup>	Hg <sup>+2</sup>
Según Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales	---	2,5	2,0	0,5	0,01
PRUEBA 2	0,26	0,35	0,03	0,00	>0,5
PRUEBA 3	---	---	---	---	0,0024

**Cuadro 7.** Concentración de metales pesados en el líquido supernatante de las pruebas 4 y 5 realizadas en el reactor.

MUESTRA	Concentración (mg/l)					
	Cr <sup>+6</sup>	Cr total	Cu <sup>+2</sup>	Pb <sup>+2</sup>	Hg <sup>+2</sup>	As <sup>+3</sup>
Según Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales	---	2,5	2,0	0,5	0,01	0,5
PRUEBA 4	< 0,1	< 0,1	0,479 ± 0,058	0,997± 0,760	0,13	2,56 ± 0,15
PRUEBA 5	----	---	---	< 0,05	0,004	< 0,01

veces y trabajar con volúmenes menores para facilitar el manejo de líquidos.

En el Cuadro 7 se muestra los resultados de los análisis del líquido supernatante después del tratamiento.

Analizando los datos del Cuadro 7, se puede determinar que el tratamiento sin diluir la muestra fue efectivo para disminuir la concentración de todos los metales, particularmente en el caso del Cr (III) y del Cu (II), pues sus altas concentraciones se redujeron significativamente hasta cumplir con la normativa. Cabe destacar que se disminuyó las concentraciones del Pb (II), Hg (II) y As (III), pero seguían estando por encima de lo establecido por la normativa, por lo que se procedió a tratar de nuevo el líquido supernatante con sulfuro de sodio y carbón activado (Prueba 5). Como se observa en el Cuadro, este segundo tratamiento del líquido supernatante fue efectivo para reducir la concentración de  $Hg^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $As^{3+}$  más allá de lo que el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales exige.

Se determinó que los desechos acuosos de metales pesados generados en el ITCR pueden ser tratados sin diluir, si se realiza primero una precipitación con hidróxido de sodio para disminuir significativamente la concentración de los metales pesados que se encuentren en altas concentraciones y luego se aplica sulfuro de sodio para eliminar los metales pesados que continuaban en muy bajas concentraciones, para finalmente agregar carbón activado para absorber mercurio en bajas concentraciones.

### **Separación del sólido del líquido supernatante**

Una vez separados los sólidos de los líquidos por decantación, éstos continuaban con gran cantidad de agua, por lo cual fue necesario realizar algunas pruebas para determinar el medio filtrante más adecuado.

Para ello se probó varios medios:

- En el caso del lote 1, se realizó pruebas con arena y mecha.
- En el caso del lote 2, se realizó pruebas utilizando arena y mecha, sólo mecha, y mecha más una mezcla tratada con floculante aniónico.

En el caso de la utilización de una capa de arena y una de mecha, se dio un proceso de filtración lenta que duró aproximadamente ocho días y el lote 1 sí se pudo separar con este método, mientras que para el lote 2 no funcionó, dado que el filtro se saturó muy rápido y no se dio el proceso de filtración.

Al realizar la prueba de filtración del lote 2 sólo con mecha, se observó que resultó efectivo, pues se dio la separación, pero el proceso fue muy lento, porque tanto en el caso de la filtración con arena y mecha, como en el de la filtración utilizando sólo mecha, el sólido se sedimentó en el filtro, formándose una capa adicional de lodo que dificultó la filtración del agua que quedaba en la parte superior del filtro.

Cuando se agrega un coagulante aniónico a la mezcla de lodo con agua y se utiliza mecha como medio filtrante, el proceso de filtración se reduce a dos días aproximadamente, debido a que la capa de lodo que se forma en el filtro se compacta y se reduce, dejando libres las paredes del filtro por donde el agua libre de sólidos escurre.

En el Cuadro 8 se muestran las pruebas realizadas con diferentes proporciones del coagulante al 0,5% de masa / volumen.

Se determinó que una proporción de coagulante de 10 ml al 0,5% de masa/volumen en la muestra 2 es suficiente para que se dé el fenómeno de la coagulación y el proceso de filtración ocurra más rápido. Para que el floculante sea efectivo en los lodos, éstos deben tener una proporción de agua de 1 a 1.

Los lodos obtenidos después del filtrado tenían un 66% de humedad para el lote 1 y

*Se determinó que los desechos acuosos de metales pesados generados en el ITCR pueden ser tratados sin diluir, si se realiza primero una precipitación con hidróxido de sodio para disminuir significativamente la concentración de los metales pesados que se encuentren en altas concentraciones y luego se aplica sulfuro de sodio para eliminar los metales pesados que continuaban en muy bajas concentraciones, para finalmente agregar carbón activado para absorber mercurio en bajas concentraciones.*

**Cuadro 8.** Efecto del floculante al 0.5% de masa/volumen en diferentes proporciones, en una mezcla de 250 gramos de lodo y 250 gramos de agua.

Mezcla de 250 g de lodo y 250 g de agua	Floculante agregado a la mezcla en ml	Observación
Muestra 1	5	No se da una separación adecuada.
Muestra 2	10	Se forma una masa pastosa y el líquido supernatante queda transparente.
Muestra 3	15	Se forma un sólido pastoso difícil de agitar.

un 63,3 % para el lote 2. A estos lodos se les aplicó el método y procedimiento para determinar la característica de toxicidad por lixiviación (Test TCLP)-Método 1311<sup>(10)</sup> y se obtuvo los resultados que se muestran en el Cuadro 9 y que cumplen con el Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos Industriales, Decreto N.º 27002-MINAE.

Después de haber realizado las pruebas de laboratorio y de planta piloto, se generó un procedimiento general para el tratamiento de los metales pesados acuosos generados en el ITCR.

### Tratamiento de cianuros

Para el tratamiento de las escorias metálicas con cianuros, se probó dos métodos diferentes:

- Oxidación con hipoclorito de sodio en medio básico (pH > 10)

- Oxidación con burbujeo de aire

El desecho de cianuro es un sólido pastoso que está constituido por metales ferrosos, arenas y residuos de sales de cianuro y gran parte de este desecho es insoluble en agua, por lo cual se debió realizar varias pruebas para determinar la proporción más adecuada de desecho y agua, con el fin de extraer las sales de cianuro y formar una mezcla sólido – líquida fácil de agitar, para que se realice adecuadamente la extracción, cuya concentración inicial de cianuro es de 0,18 mg/l.

Se determinó que la proporción desecho - agua más adecuada era la de 40% de masa/masa, y después de decantar y tratar el líquido supernatante con el método del hipoclorito de sodio y el método de burbujeo con aire, se obtuvo los siguientes resultados (Cuadro 10).

**Cuadro 9.** Concentraciones de metales pesados en los lodos.

Muestra	Concentración (mg/l)			
	Cr <sup>+6</sup>	Pb <sup>+2</sup>	Hg <sup>+2</sup>	As <sup>+3</sup>
Según decreto 27002-MINAE- S	5,0	5,0	0,2	5,0
Lodo del lote 1	0,50 ± 0,12	< 0,2	0,061	0,124 ± 0,004
Lodo del lote 2	N.D*.	N.D.	0,004	0,022 ± 0,006

N.D\*. = No detectado

Cuadro 10. Concentración de cianuro en escorias.

	Concn inicial sin tratar (mg/l)	Concn final después tratamiento con NaClO /OH <sup>-</sup> (mg/l)	Concn final después burbujeo de aire (mg/l)
Desecho con cianuro	0,18	0,00	0,00

Los dos métodos son efectivos, pero el burbujeo con aire es menos costoso y menos riesgoso, dado que en el caso del tratamiento con hipoclorito de sodio, se requiere mantener un pH mayor a 10 y un exceso de cloro ( $5\text{Cl}_2 / 2\text{CN} = 6,83$  gramos / 1.0 gramos), para no permitir que se forme el cloruro de cianógeno, que es un gas tóxico.

### Procedimiento operativo para centralizar el tratamiento de algunos desechos peligrosos del ITCR en la planta piloto

1. Cada Centro de Investigación y cada Laboratorio del ITCR debe utilizar la Guía de Manejo de Desechos Peligrosos del ITCR y la normativa aprobada por el Consejo Institucional para el manejo de desechos peligrosos en el ITCR<sup>(5)</sup>, con el fin de conocer las formas de proceder para el manejo adecuado de desechos peligrosos.
2. Cada fuente generadora debe hacer una solicitud al Laboratorio de Desechos Peligrosos, para el tratamiento de los desechos que produzcan en cantidades de 5 a 10 galones.
3. La unidad solicitante debe cubrir el costo total del tratamiento y de la disposición final del desecho.
4. La unidad solicitante debe trasladar los desechos peligrosos al Laboratorio de Desechos Peligrosos siguiendo las medidas de seguridad correspondientes.

### Conclusiones y recomendaciones

1. Los métodos probados para el tratamiento de los desechos acuosos de metales pesados y de escorias con cianuro fueron efectivos.
2. Los desechos acuosos peligrosos que son compatibles entre sí, deben mezclarse para disminuir costos y no realizar varias veces el mismo tratamiento.
3. Desechos con concentraciones mayores a las indicadas por el método, se pueden tratar efectuando varias veces el procedimiento sobre el líquido supernatante, con el fin de no trabajar con volúmenes altos.
4. Los desechos acuosos de metales pesados que no contengan mercurio, no se deben mezclar con aquellos que sí lo tienen.
5. En el caso de los desechos acuosos del ITCR que contienen mercurio, debe tratarse dos veces el líquido supernatante con carbón activado.
6. La filtración más efectiva utiliza mecha de tela humedecida y un floculante aniónico en la mezcla por filtrar.
7. Existe una guía de manejo de desechos y una normativa en el ITCR que da las pautas para el manejo adecuado de los desechos peligrosos, así como un Laboratorio de Desechos Peligrosos donde se puede centralizar el tratamiento de algunos de ellos.

*Existe una guía de manejo de desechos y una normativa en el ITCR que da las pautas para el manejo adecuado de los desechos peligrosos, así como un Laboratorio de Desechos Peligrosos donde se puede centralizar el tratamiento de algunos de ellos.*

8. Los lodos obtenidos después del tratamiento no presentan peligrosidad, pues cumplen con la normativa para análisis de lixiviados y se pueden enviar a un relleno sanitario.
  9. Se debe realizar pruebas del tratamiento con pequeños volúmenes de desechos una vez mezclados, para determinar el comportamiento de éstos antes del tratamiento a escala piloto, ya que se presentan variaciones de una matriz de desechos a otra, aunque sean del mismo tipo o tengan el mismo origen.
  10. Se recomienda buscar la menor dilución posible, para evitar el uso excesivo de agua y la manipulación de grandes cantidades de desechos durante el proceso de tratamiento.
  11. Cada generador de desechos peligrosos debe presupuestar el costo de su tratamiento.
3. Gobierno de la República de Costa Rica. Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos Industriales. Diario Oficial La Gaceta N.º 101. 1998.
  4. Gobierno de la República de Costa Rica. Reglamento sobre las Características y el Listado de los Desechos Peligrosos Industriales. Diario Oficial La Gaceta N.º 124. 1998.
  5. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Normativa para el Manejo de Desechos Peligrosos en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Sesión Ordinaria N.º 2516. Gaceta del Instituto Tecnológico de Costa Rica N.º 227. 2007.
  6. La Grega, M.D. Gestión de Residuos Tóxicos. Volumen 1. McGraw Hill. México. 1996.
  7. Pérez, E. *Los residuos peligrosos en México*. Programa Universitario de Medio Ambiente. UNAM. México. 1997.
  8. Quesada, H; Salas, J.C. *Manejo de desechos peligrosos en el ITCR. Primera Fase: Evaluación Preliminar. Informe Final Proyecto de Investigación*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago. 2002.
  9. Toledo, G. *Residuos Peligrosos*. Programa Universitario de Medio Ambiente. UNAM. México. 1996.
  10. USEPA. Method 1311. Toxicity Characteristic Leaching Procedure, Code of Federal Regulations, 40 CFR parts 261, Appendix II, July, 1991.

## Bibliografía

1. Bravo, M. *Minimización de Residuos*. Seminario Internacional. CYTED. Costa Rica. 1999.
2. Gobierno de la República de Costa Rica. Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. Decreto N.º 33601-MINAE-S. Diario Oficial La Gaceta N.º 55. 2007.