

# **Evaluación preliminar. Tratamiento del mercurio de fluorescentes y bombillas del alumbrado público**

## **Preliminary assessment. Treatment of mercury from fluorescent light bulbs and street lighting**

Juan Carlos Salas-Jiménez<sup>1</sup>, William Benavides-Ramírez<sup>2</sup>

---

*Fecha de recepción: 21 de octubre del 2014*

*Fecha de aprobación: 26 de enero del 2015*

Salas-Jiménez, J. C.; Benavides-Ramírez, W. Evaluación preliminar. Tratamiento del mercurio de fluorescentes y bombillas del alumbrado público. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 4, Octubre-Diciembre. Pág 78-85.

---

1 Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jcsalas@itcr.ac.cr

2 Escuela Ingeniería Ciencia de Materiales. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: wbenavides@itcr.ac.cr

## Palabras clave

Inertización de mercurio; método de tratamiento de luminarias; manejo de fluorescentes.

## Resumen

La actividad que se estudia es un proceso para inertizar el mercurio de las luminarias (desechos de bombillos y fluorescentes). Este consiste en triturar y mezclar los desechos con azufre aplicando calentamiento para formar un polímero de sulfuro de mercurio, que resulta un producto sólido, inerte, estable y de baja lixiviación que se puede depositar en un relleno sanitario. El calentamiento causa la generación de vapores de azufre molestos y de olor desagradable, por lo que se realizó un cambio del método de tratamiento sin calentar, mediante el uso de una mezcla del desecho de luminaria con azufre y mortero (cemento y arena). Las pruebas de laboratorio preliminares presentan resultados positivos para efectuar pruebas a nivel de planta piloto con este nuevo método a temperatura ambiente. Este proyecto se desarrolló en una de las actividades productivas del Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA) del Tecnológico de Costa Rica.

## Keywords

Inerting of mercury; method of treatment of luminaires; fluorescent management.

## Abstract

The activity under study is a process for inerting mercury lights (fluorescent bulbs and waste). This is crushed and mixed waste sulfur heating applying a polymer to form mercury sulfide to yield a solid, inert, stable and low leaching, which may be disposed in a landfill. The heating causes annoying vapor generation sulfur odor which is unpleasant, so that a change of the treatment method was performed without heating by using a luminaire scrap mixture with sulfur and mortar (sand and cement), where preliminary laboratory tests show positive results, for testing at pilot plant with this new method at room temperature. This project was developed in one of the productive activities has the Center for Research in Environmental Protection (CIPA) of the Technological Institute of Costa Rica.

## Introducción

Los tubos fluorescentes y las bombillas de uso doméstico y del alumbrado público (luminarias) se mezclan con los desechos ordinarios y se envían al relleno sanitario como sitio de disposición final. Este proceso es incorrecto ya que las luminarias contienen mercurio, un metal pesado de alta toxicidad que puede causar daños en el cerebro, los riñones y los pulmones y perjudicar seriamente un feto en desarrollo. Por este motivo, los tubos fluorescentes y bombillas se convierten en un desecho peligroso que se debe tratar para poder desecharlo adecuadamente en un relleno sanitario.

En 1998, el gobierno de Costa Rica aprobó el decreto N° 27000-MINAE “Reglamento sobre las características y el listado de los desechos peligrosos industriales” (MINAE, 1998a), el decreto N° 27001-MINAE “Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos Industriales” (MINAE, 1998b) y el Decreto N° 27002-MINAE, “Reglamento Residuos Peligrosos su Toxicidad” (MINAE, 1998c), 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. Estos reglamentos tienen como objetivo establecer las características de los desechos peligrosos, el listado de los mismos, los límites de concentración máxima permisible, manejo desde su almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final y el procedimiento para la prueba de extracción.

El Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos Industriales tiene como objetivo establecer las normas y procedimientos para un manejo adecuado de estos materiales desde una perspectiva sanitaria y ambiental y se aplica a todo aquel que se considere peligroso según la definición sobre las características y el listado de los desechos peligrosos industriales (Decreto N° 27001-MINAE, 1998). El reglamento también 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 (artículo 2). Se establece, además, que el tratamiento de un producto o desecho peligroso es un método, técnica o proceso dirigido a cambiar las características físicas, químicas o biológicas, de manera que se produzca un desecho no peligroso o menos peligroso para su almacenaje, transporte o disposición final segura (artículo 11, sobre el tratamiento de los desechos peligrosos, inciso 1).

También define (inciso 2) el tratamiento de estabilización y solidificación como un tratamiento factible, que consiste en mezclar los desechos peligrosos con otros materiales donde son capturados o fijados, formando una estructura sólida. El objetivo de la estabilización es convertir el desecho en un sólido inerte, estable, que tiene 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, esto impide que migren hacia el agua (Fuhrmann, Melamed, Kalb, Adams y Milian, 2002). ¿Se refiere al lugar o al proceso?

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

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

El proceso de inertización del mercurio en desechos de luminarias (bombillos de alumbrado público y fluorescentes) se realiza a través de un proceso de calentamiento en el cual se mezclan los desechos de vidrio contaminados (con mercurio) y azufre hasta formar una masa pastosa que luego se solidifica, formándose el sulfuro de mercurio II (HgS), que es una sal poco soluble en agua (Fuhrmann, Melamed, Kalb, Adams y Milian, 2002).

Debido a que el mercurio (Hg) es un metal líquido y ligeramente volátil a temperatura ambiente, se realizaron pruebas de laboratorio sobre la estabilización y solidificación, tratando los desechos de luminarias usando una matriz de cemento con azufre, en un proceso sin la etapa de calentamiento con el fin de disminuir la evaporación del mercurio (Zhang y Bishop, 2002; Ming, Loa, Walsh, Lamb, 2004).

En cuanto a la disposición final de los desechos peligrosos, el Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos establece (artículo 12) que la disposición adecuada se refiere a la descarga, inyección, deposición, lanzamiento y/o colocación de cualquier desecho peligroso (previamente tratado) y esto debe hacerse de manera que el desecho o cualquiera de sus constituyentes que entra al ambiente no le produzca ningún tipo de problema.

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

- Relleno sanitario de seguridad
- Encapsulamiento, incineración.
- Exportación a países desarrollados (solo con fines de tratamiento y disposición final) (MINAE, 1998b).

Sin embargo, no existe ningún método de disposición totalmente seguro y en todos los casos es necesario evaluar previamente los posibles impactos ambientales y seleccionar con propiedad los sitios para disponer los desechos peligrosos.

A los desechos peligrosos que son tratados por estabilización y solidificación antes de enviarlos al relleno sanitario se les realiza una prueba a nivel de laboratorio denominada TCLP (nombre en inglés de Toxicity Characteristic Leaching Procedures) (USEPA, 1991), con el fin de determinar la característica de toxicidad por lixiviación de un residuo a partir de un análisis químico a una muestra o extracto del lixiviado o extracto, obtenido bajo ciertas condiciones estándares. La prueba TCLP determina la movilidad en el residuo de determinados constituyentes tóxicos; (MINAE, 1998a; USEPA, 1991) en el caso de desechos que contienen mercurio, la lixiviación de un residuo tratado no puede dar concentraciones mayores de 0,2 mg/L, que es el límite máximo permisible de acuerdo con el reglamento establecido por el Decreto D27000-MINAE.

## Metodología

Evaluación a nivel de pruebas de laboratorio de un tratamiento de inertización de mercurio de luminarias sin la etapa de calentamiento, utilizando una matriz de mortero (mezcla de cemento y arena) y azufre:

Proceso de Inertización en frío del mercurio de los desechos de luminarias mezclándolo en frío con azufre y mortero (cemento + arena 1:3).

El proceso de inertización en frío consiste en mezclar los desechos de luminarias que contienen mercurio, con cemento + arena en una proporción de 1:3, azufre y agua, formando una estructura sólida a temperatura ambiente. El objetivo es convertir los desechos de luminarias que contienen mercurio en un sólido inerte, estable y de baja lixiviabilidad.

Como punto de partida se prepararon siete pruebas a nivel de laboratorio para determinar la mezcla de mortero (cemento + arena) más adecuada. Se encontró que la concentración inicial promedio de mercurio en las luminarias es de 7,75 ppm, lo que corresponde a 38.7 veces el mínimo permitido (0,2 ppm).

En el cuadro 1 se muestran las mezclas realizadas en laboratorio de acuerdo con un criterio de experto. De la mezcla 1 a la 4 se varía la proporción de mortero en aumento (de 15%, 35%, 55% y 75%) y con porcentajes de desechos de luminaria (de 75%, 55%, 35% y 15%, respectivamente, manteniendo el porcentaje de azufre en 10%. A las pruebas 5 y 7 no se les agregó azufre, a las 6 y 7 se les adicionó 0,5 g de mercurio metálico para enriquecer de mercurio, mientras que las mezclas 5, 6 y 7 se utilizaron como pruebas de control.

El procedimiento de mezclado realizado para obtener las mezclas de pruebas del cuadro 1 se explica a continuación:

- Primero se hace la mezcla del desecho de luminaria con el azufre, agitando durante cinco minutos para lograr una mezcla homogénea.

- Se agrega el cemento + arena (mortero 1:3) y se agita durante cinco minutos para lograr una mezcla homogénea.
- Se adiciona el agua lentamente hasta formar una mezcla que presente consistencia y no sea fluida. En la figura 1 se muestra el porcentaje de agua requerida en cada mezcla.

Se realizaron las pruebas de compresibilidad después de dejar las mezclas secando durante 22 días; luego se realizaron la prueba de TCLP y se determinó la concentración de mercurio mediante espectroscopia de atómica.

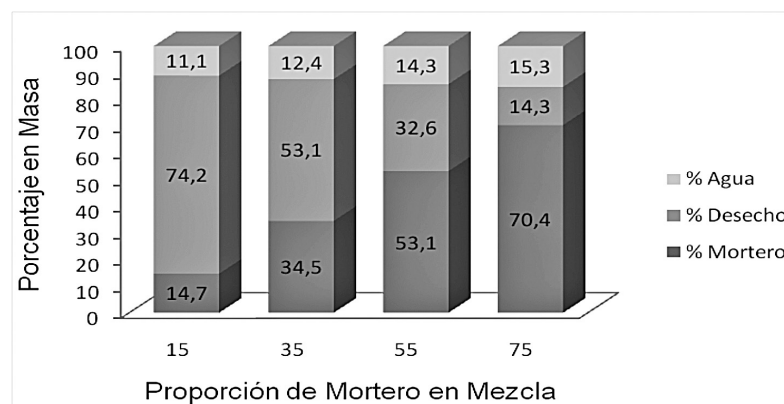
**Cuadro 1.** Relación en porcentaje de masa de los componentes de la mezcla para Solidificar y Pruebas de control.

Mezcla	Mortero Relación 1:3	Azufre	Desecho Luminaria + Hg.	Pruebas Control
1	15	10	75	
2	35	10	55	
3	55	10	35	
4	75	10	15	
5	50	0	50	X
6	45	10	45+ 0,5g Hg.	X
7	100	0	0,5g Hg.	X

### Resultados y discusión

En la figura 1 se determinó experimentalmente que, al aumentar la cantidad de mortero, se requiere una mayor cantidad de agua para lograr una mezcla homogénea con la consistencia deseada. La variación de los porcentajes del agua está entre el 11% y el 15% cuando se cambia la proporción de mortero de un 15% a un 75%, respectivamente. Esta proporción de agua es una variable muy importante, ya que un porcentaje menor hace más difícil obtener una mezcla homogénea, quedando partes secas, lo que no permite que haya una solidificación por falta de fraguado. Por otra parte, si el porcentaje de agua es mucho mayor, se obtiene una mezcla muy fluida que dura mucho para secarse y solidificarse.

Cada mezcla se deposita en recipientes para su solidificación y fraguado, proceso que tiene una duración de treinta días. Finalmente, se debe realizar la prueba de resistencia a la compresión.



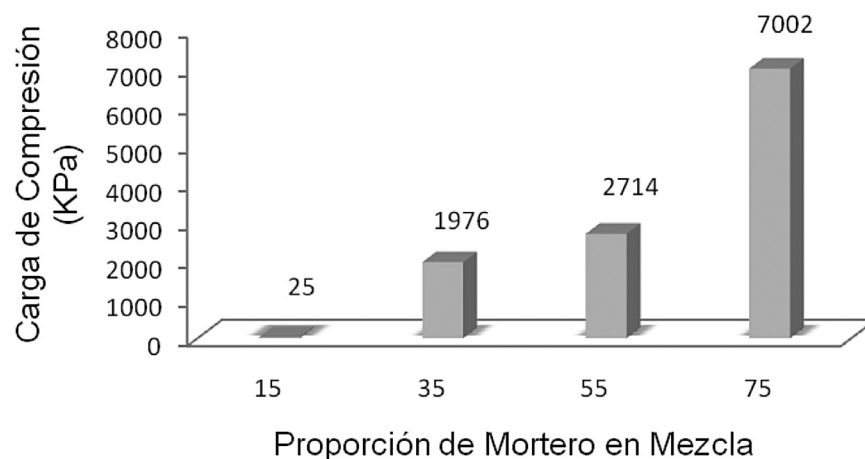
**Figura 1.** Porcentajes de agua requeridos en cada mezcla.

En el cuadro 2 se muestran los resultados de las pruebas de compresión.

**Cuadro 2.** Determinación de pruebas de compresión de las mezclas.

Mezcla	Proporción	Diámetro	Largo	Carga
	Mortero	(m)	(m)	KPa
1	15	0,05	0,10	25
2	35	0,05	0,10	1976
3	55	0,05	0,10	2714
4	75	0,05	0,10	7002
5	50	0,05	0,10	3858
6	45	0,05	0,10	3353
7	100	0,05	0,10	21225
8	50	0,05	0,10	1693

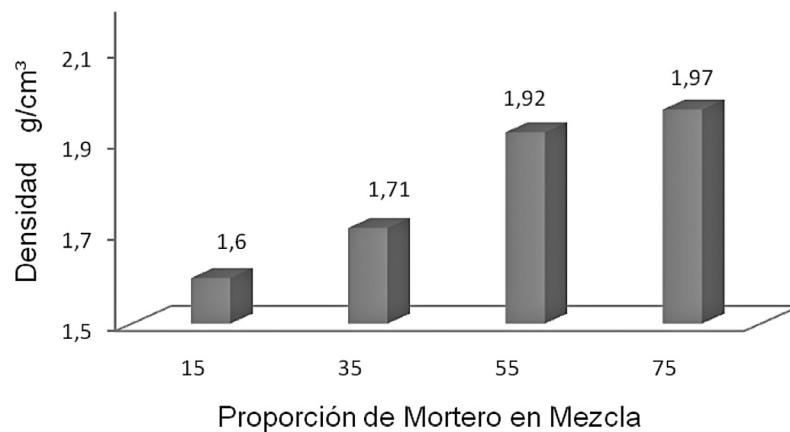
En la figura 2 se muestra que la resistencia de las mezclas de la 1 a la 4 aumenta al incrementarse la proporción de cemento + arena.



**Figura 2.** Determinación de resistencia de las muestras al someterlas a compresión.

La muestra 1, que contenía 15 % cemento + arena, se desboronaba al presionarla con la mano, pero las muestras 2, 3 y 4, con un 35%, 55% y 75%, respectivamente, mostraron tener resistencias por encima de los 350 Kpa, que es la resistencia mínima por compresión en un relleno sanitario.

En la figura 3 se observa el resultado del cálculo matemático de la densidad, que muestra una tendencia con relación a la proporción de mortero, ya que al aumentar el porcentaje de mortero también lo hace la densidad y eso provoca un incremento en la resistencia a la compresión de las muestras sólidas analizadas.



**Figura 3.** Densidades de las mezclas.

En el cuadro 3 se incorporan los resultados de la concentración de mercurio obtenida en la prueba de lixiviación para cada mezcla. La cuantificación del mercurio se realizó mediante espectroscopía atómica.

**Cuadro 3.** Contenido de mercurio en los lixiviados de las mezclas analizadas.

Mezcla	Mortero (%)	Azufre (%)	Desecho (%)	Concentración Mercurio (mg / l)
1	15	10	75	0.12
2	35	10	55	0.39
3	55	10	35	0,066
4	75	10	15	0,044
5	50	0	50	0,24
6	45	10	45%+ 0,5g Hg.	0,36
7	100	0	0,5g Hg.	0,25

De acuerdo con los resultados del análisis de la concentración de mercurio en el lixiviado, la mezcla 1 está muy cerca del máximo permisible (0,2 mg / L) y la mezcla 2 está por encima. Las muestras 3 y 4 presentan los mejores resultados, ya que se obtiene una concentración que está muy por debajo del máximo permisible según lo establecido en el decreto D27000-MINAE.

La muestra 5 tiene una mezcla de 50% mortero y 50% de desechos de luminarias sin azufre y presenta una concentración de los lixiviados por encima de la norma, lo que demuestra que el azufre puede estar reaccionado con el mercurio a temperatura ambiente. En la mezcla 6, al agregarle 0,5 gramos de mercurio metálico, se tiene una concentración de mercurio de 816 mg/L inicial, el resultado del análisis obtenido es de 0,36 mg/l, dando un porcentaje de retención del mercurio en esta mezcla del 99,95%, lo cual permite indicar que el mortero y el azufre son muy efectivos para retener el mercurio. En la mezcla 7, a la que también se le agregaron 0,5 gramos de mercurio metálico y 100% de mortero, se tiene una concentración de mercurio de 826 mg/L inicial, el resultado del análisis obtenido es de 0,25 mg/L, dando un porcentaje de retención del mercurio en esta mezcla de 99,96%, lo cual permite indicar que el mortero solo sin azufre es también muy efectivo para retener el mercurio.

Para efectos de un tratamiento en frío se pueden realizar pruebas a nivel de planta piloto con la mezcla 3, ya que presenta una concentración 3,0 veces por debajo del límite máximo permisible y cumple con los requerimientos de compresión de relleno sanitario. Es importante tomar en cuenta la mezcla que minimice la cantidad de mortero a utilizar y maximice la cantidad de desechos de luminarias, para disminuir costos en materias primas. Para establecer la mezcla que maximice estas dos variables, se deberían realizar pruebas variando la proporción de mortero entre el 55% y el 35%. Estos ensayos, así como el establecimiento de las pruebas en la planta piloto, excede los objetivos del presente proyecto.

### Conclusiones y recomendaciones

1. En las mezclas 6 y 7 a las que se agregó mercurio puro al desecho de luminarias y mortero puro, se determinó que el mortero (cemento + arena 1:3) tiene una gran capacidad de retención del mercurio, con resultados superiores al 99,90%.
2. La mezcla 3 (55% mortero, 10% azufre y 35% luminaria) cumple con los parámetros de compresibilidad y concentraciones permisibles de mercurio en los lixiviados; ésta se puede escalar a nivel piloto.
3. Se recomienda realizar un diseño de experimentos variando la proporción de mortero entre 35% y 55%, buscando reducir costos en el consumo de mortero y aumentando la proporción de desechos de luminarias.
4. Se recomienda dar una mayor difusión a este proyecto, por ser este el único proceso que se tiene para el tratamiento de luminarias en el país y por la importancia que tiene desde el punto de vista ambiental.

### Agradecimientos

Este artículo desarrolla uno de los tres objetivos del proyecto de Protocolización, Rediseño y Evaluación del Proceso de Inertización del Mercurio de Luminarias, para optar por el grado de Maestría en Sistemas Modernos de Manufactura, impartida por el Tecnológico de Costa Rica, realizado por Lic. Juan Carlos Salas Jiménez y el Ing. William Jesús Benavides Ramírez.

### Bibliografía

- Fuhrmann, M, Melamed, D, Kalb, P.D., Adams, J.W. & Milian, L.W. (2002), Sulfur Polymer Solidification/Stabilization of elemental mercury waste. *Waste Management*, V., 22, 327-333
- MINAE (1998a). Decreto N° 27000-MINAE. (1998). Reglamento sobre las Características y el Listado de los Desechos Peligrosos Industriales. La Gaceta N° 124.
- MINAE (1998b). Decreto N° 27001-MINAE. (1998). Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos Industriales. La Gaceta N° 101.
- MINAE (1998c). Decreto N° 27002-MINAE. (1998). Reglamento residuos peligrosos su toxicidad. La Gaceta 101.
- Ming, J., Loa, T., Walsh, T. & Lamb T. (2004). Stabilization of high mercury contaminated brine purification sludge. *Journal of Hazardous Materials*, B113, 157-164.
- USEPA. Method 1311. (1991). *Toxicity Characteristic Leaching Procedure*. Code of Federal Regulations, 40 CFR parts 261, Appendix II.
- Zhang, J. & Bishop P. (2002). Stabilization/solidification (S/S) of mercury-containing wastes using reactivated carbon and Portland cement. *Journal of Hazardous Materials*, B92, 199-212.