

## **Retos en la aplicabilidad de la norma colombiana sobre el control de dioxinas y furanos en incineradores**

*Beatriz Aristizábal Zuluaga, Jairo González García y Consuelo Montes de Correa\**

(Recibido el 29 de julio de 2002)

### **Resumen**

Los incineradores de desechos hospitalarios, municipales y hornos crematorios se han identificado como los principales generadores de dioxinas y furanos. Colombia no ha sido ajena a esta problemática. Recientemente, el Ministerio del Medio Ambiente estableció las pautas para regular las emisiones de incineradores de residuos sólidos y líquidos. La forma más directa de conocer el estado actual y la eficiencia de los sistemas de control que se implementen para cumplir con las normas es mediante el análisis de estas sustancias. Los análisis de dioxinas y furanos en muestras de cenizas de un incinerador de residuos hospitalarios de la ciudad de Medellín ilustran la metodología analítica establecida por organismos internacionales para la detección y cuantificación de dioxinas y furanos. Dado que los costos implicados en dichos análisis son demasiado altos, se requieren estrategias que faciliten el cumplimiento de la norma.

----- *Palabras clave:* dioxinas, furanos, análisis, cromatografía de gases (CG)/espectrometría de masas (MS), normas ambientales.

## **Challenges for implementing the colombian regulation about the control of dioxins and furans from incinerators**

### **Abstract**

Most of all quantifiable environmental emissions of dioxin and furans are contributed by air emissions from medical and municipal waste incinerators and backyard burning. Aware of this problem, the Colombian government through the Ministry of Environment recently issued the guidelines for regulating emissions from solid and liquid waste incinerators. The most direct and efficient way to evaluate the current incinerator emissions and the efficiency

---

\* Grupo de Investigación Catálisis Ambiental. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Antioquia. A.A. 1226. Medellín. [cmontes@carios.udea.edu.co](mailto:cmontes@carios.udea.edu.co).

of air pollution control devices is through the performance of numerous analytical determinations. The analysis of dioxins and furans on ash samples from a medical waste incinerator in Medellín illustrates the internationally accepted methodology for the detection and quantitative measurement of these substances. Due to the high costs involved, strategies are needed to expedite the compliance of the proposed standards.

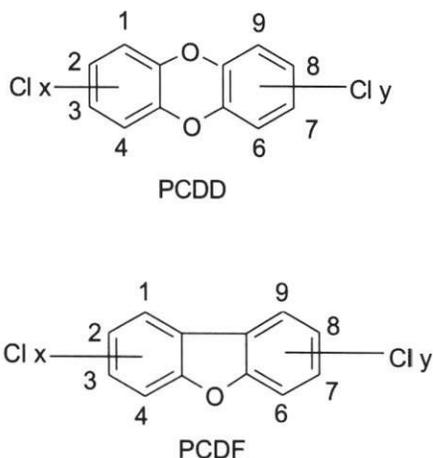
----- *Key words:* dioxins, furans, analysis, HRGC/LRMS, environmental regulations.

## Introducción

En la actualidad la gran cantidad de residuos de naturaleza diversa que se generan como resultado de la actividad humana plantea una importante problemática ambiental y de gestión. La solución más inmediata a este problema pasa por la minimización de los residuos mediante la aplicación de prácticas tan comunes como la reducción, la recuperación o el reciclado de los materiales. En la mayoría de países con desarrollo tecnológico elevado se lleva a cabo una política de revalorización de los residuos mediante la aplicación de tratamientos térmicos controlados, que reducen drásticamente los residuos tanto en peso como en volumen, a la vez que permiten una fácil recuperación energética en forma de electricidad [1]. No obstante, el tratamiento de residuos en plantas incineradoras implica la gestión de otro tipo de materiales de rechazo propios de esta actividad tales como las cenizas, escorias y gases emitidos a la atmósfera. Estos últimos contienen gases nocivos: HCl, HF, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y otros hidrocarburos aromáticos halogenados, entre los cuales destacamos las policlorodibenzo-p-dioxinas y los policlorodibenzofuranos (PCDDs/PCDFs). La EPA ha estimado que el 70% de todas las emisiones ambientales cuantificables de PCDDs/PCDFs provienen de los incineradores de desechos municipales, hospitalarios y hornos crematorios [2]. Aparte del estudio de los niveles de PCDDs/PCDFs emitidos a la atmósfera, el contenido de estos compuestos en las cenizas y escorias procedentes de dichos incineradores es un requisito indispensable anterior a otros tratamientos.

Las dioxinas y furanos (policloro-dibenzo-p-dioxinas, PCDDs, y policloro-dibenzofuranos, PCDFs, son compuestos organoclorados con características químicas similares que se caracterizan por su persistencia en el ambiente y su baja biodegradabilidad [1-3]. Cada compuesto comprende dos anillos bencénicos interconectados, en el caso de los PCDDs, los anillos están unidos por puentes de oxígeno y en el caso de los PCDFs, los anillos bencénicos están conectados

por un enlace de carbono y un puente de oxígeno. En la figura 1 se muestran las estructuras genéricas de los PCDDs y PCDFs, respectivamente [3].



**Figura 1** Estructuras genéricas de los PCDDs y PCDFs

Existen 75 PCDDs y 135 PCDFs, dependiendo de la posición de los átomos de cloro. Cada compuesto individual se denomina congénere (210 en total), mientras que los grupos de congéneres con el mismo número de átomos de cloro se denominan homólogos. Los grupos homólogos se abrevian por conveniencia. Por ejemplo, los compuestos que contienen cuatro cloros se abrevian TCDDs y TCDFs, respectivamente, mientras que los que contienen 8 cloros se abrevian OCDDs y OCDFs, respectivamente [1]. Las dos familias de sustancias presentan propiedades fisicoquímicas análogas, dada su similitud estructural. En general, las PCDDs y los PCDFs son sólidos cristalinos e incoloros a temperatura ambiente que se caracterizan por una elevada estabilidad térmica y química, con puntos de fusión y ebullición relativamente altos, estables en medio ácido y básico, e incluso frente a la acción de algunos agentes oxidantes. Además, son de carácter lipofílico, presentan gran resistencia a la degradación biológica y son fuertemente adsorbidos sobre la superficie de diferentes matrices [3]. Todas estas características son propias de sustancias altamente persistentes,

capaces de bioacumularse y de acceder con relativa facilidad a los diferentes niveles de la cadena trófica. Las dos vías en que estas sustancias entran en la cadena alimenticia son aire-planta-animal y agua o sedimento-pescado. Una tercera ruta es a través de la contaminación accidental debido al manejo y procesamiento inapropiado de alimentos. Se ha estimado que más del 90% de la exposición humana a las dioxinas y furanos es a través de la ingestión de sustancias contaminadas, especialmente aquéllas de origen animal [2].

Varios incidentes de contaminación con PCDDs /PCDFs se han reportado [1]: el de Yusho (Japón, 1968), Seveso (Italia, 1976), la guerra del Vietnam, la vinculación de las dioxinas y furanos a los procesos de combustión (Holanda, 1977), la contaminación de alimentos cárnicos en Bélgica (1999). Por tanto, estas sustancias han suscitado un gran interés no sólo en la comunidad científica sino también en el resto de la sociedad, lo que ha conducido a la mayor profundización en el conocimiento de estos contaminantes y al establecimiento de disposiciones legales y sanitarias necesarias para limitar su formación y posterior impacto. A modo de resumen se indican las de mayor relevancia en los últimos años [1]:

1996: Elaboración de la Norma Europea EN-1948:1996 que establece los límites de emisión en 0,1 ng I-TEQ/m<sup>3</sup> a la atmósfera de dioxinas y furanos en fuentes fijas.

1997: IARC-WHO cataloga a la 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina como compuesto cancerígeno en humanos (Grupo A).

1998: WHO. La organización mundial de la salud propone la disminución de la ingesta total de dioxinas y furanos desde 10 hasta aproximadamente 1-4 pg I-TEQ por día y kg de peso corporal.

En Colombia, mediante la resolución 0058 de enero de 2002 del Ministerio del Medio Ambiente se establecieron los límites máximos de emi-

sión para incineradores de residuos sólidos y líquidos y hornos crematorios [4]. En el artículo 7 se establecen los límites de emisión de dioxinas y furanos en 1 ng I-TEQ/m<sup>3</sup> para los dos primeros años de vigencia de la norma. Posteriormente, se deben reducir a 0,1 ng I-TEQ/m<sup>3</sup> en un período de nueve años, que es el límite internacional para las emisiones de dioxinas y furanos (Ver tabla 1). Además, establece la periodicidad con la que se debe certificar el análisis. Las plantas que no se encuentren dentro de los límites especificados, tendrán dos meses para ajustarlos y demostrar que cumplen la norma [4], de lo contrario se les suspenderá el servicio.

**Tabla 1** Límites de emisión de dioxinas y furanos para incineradoras en Colombia [4].

<i>Aplicabilidad</i>	<i>Límite de emisión ng- I-TEQ/m<sup>3</sup></i>
<i>Años</i>	<i>Período de muestreo de 6-8 horas</i>
Primero	1,0
Segundo	1,0
Tercero	0,7
Cuarto	0,7
Quinto	0,5
Sexto	0,5
Séptimo	0,3
Octavo	0,3
Noveno en adelante	0,1

En este artículo se exponen algunos aspectos sobre la toxicidad de las dioxinas y furanos, así como las metodologías analíticas disponibles para su identificación y cuantificación. Se presenta además un ejemplo concreto del análisis de dioxinas y furanos en las cenizas de un incinerador de residuos hospitalarios de la ciudad de Medellín. Por último, se hace una breve estimación de los costos implicados en los análisis de estas sustancias.

## Toxicidad

Para estudiar la toxicidad de las PCDDs/PCDFs, se han realizado investigaciones en distintas clases de animales, observándose que estos compuestos pueden producir cáncer, mutaciones y malformaciones fetales [5]. El efecto tóxico de las PCDDs/PCDFs difiere según la especie, la edad y el sexo; por eso aún no ha sido posible generalizar estos efectos en los humanos [6]. Sin embargo, es bien conocido que personas expuestas a estos compuestos presentaron náuseas; dolor de cabeza; irritación de ojos, piel y tracto respiratorio; hemorragias intestinales, o pérdida acelerada de peso debido a la disminución en los tejidos muscular y adiposo. Además desarrollaron cloracné y otras manifestaciones cutáneas. Otros efectos de los PCDDs/PCDFs en humanos, como alteraciones en el sistema neuromuscular, sistema inmunológico, disfunciones endocrinas y cáncer, entre otras, se encuentran aún en estudio [1, 5-7].

No todas las dioxinas y furanos han demostrado ser tóxicas. El comportamiento toxicológico diferente de estas sustancias varía en función del grado y orden de cloración, observándose tan sólo en aquellos compuestos que se encuentran cloro-sustituidos en las posiciones 2, 3, 7, 8, lo que

reduce el número de compuestos de interés a diecisiete (siete dioxinas y diez furanos) [8]. Debido a que en muestras reales siempre se encontrará más de un isómero PCDD/PCDF, la evaluación de la toxicidad se realiza tomando en cuenta la concentración de los compuestos que se encuentran clorados en las posiciones 2, 3, 7, 8; para esto se definió el concepto de TEF (factor de equivalencia tóxica), el cual mide el potencial toxicológico de cada congénere 2, 3, 7, 8 sustituido con respecto a la 2, 3, 7, 8-TCDD, que es el compuesto más tóxico y al cual se le asigna un TEF de 1 (ver tabla 2). En una muestra determinada, se multiplica la concentración de cada congénere 2,3,7,8 sustituido por su respectivo TEF; a la suma de estos factores se le conoce como I-TEQ (equivalente tóxico total internacional), el cual puede evaluar la toxicidad de una muestra cualquiera con respecto a la 2, 3, 7, 8-TCDD [9-14].

Debido a que la ingestión de alimentos es la vía de exposición más importante a PCDDs/PCDFs, en 1990 la Organización Mundial de la Salud recomendó un TID ("Tolerable Daily Intake": valor tolerable de ingestión) para los humanos de 10 pg I-TEQ por kilogramo de peso corporal-día; en 1998 se redujo a valores entre 1-4 pg I-TEQ por kilogramo de peso corporal-día. Algunos

**Tabla 2** Factores de equivalencia tóxica de los PCDD/PCDF 2, 3, 7, 8 sustituidos [9-14]

<i>PCDFs</i>	<i>I-TEF</i>	<i>PCDDs</i>	<i>I-TEF</i>
2, 3, 7, 8-TCDF	0,100	2, 3, 7, 8-TCDD	1
1, 2, 3, 7, 8-PeCDF	0,050	1, 2, 3, 7, 8-PeCDD	0,500
2, 3, 4, 7, 8-PeCDF	0,500		
1, 2, 3, 4, 7, 8-HxCDF	0,100	1, 2, 3, 4, 7, 8-HxCDDD	0,100
1, 2, 3, 6, 7, 8-HxCDF	0,100	1, 2, 3, 6, 7, 8-HxCDD	0,100
1, 2, 3, 7, 8, 9-HxCDF	0,100	1, 2, 3, 7, 8, 9-HxCDD	0,100
2, 3, 4, 6, 7, 8-HxCDF	0,100		
1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-HpCDF	0,010	1, 2, 3, 4, 7, 8, 9-HpCDD	0,010
1, 2, 3, 4, 7, 8, 9-HpCDF	0,010		
OCDF	0,001	OCDD	0,001

países, incluso, han legislado acerca de los niveles máximos de PCDDs/PCDFs que se admiten en alimentos, como pescado y lácteos en general [7]. También es importante resaltar el interés que existe, por parte de países industrializados en disminuir la cantidad de PCDDs/PCDFs presentes en pesticidas utilizados en agricultura. Por ejemplo, en Alemania se estableció un valor de 100 ng I-TEQ/kg como valor límite, por encima del cual, estos materiales no pueden ser utilizados para el tratamiento agrícola. En lo concerniente a la incineración de residuos peligrosos, la Directiva Europea 94/67/CE, indica que los valores medios de emisiones al aire durante un período de muestreo de seis horas como mínimo y ocho horas como máximo no deberán sobrepasar los 0,1 ng I-TEQ/m<sup>3</sup> [8]. La forma más prudente y directa de proteger la salud humana de la exposición a los PCDDs/PCDFs es mediante el análisis de estas sustancias en las principales fuentes y en los alimentos.

### **Análisis de dioxinas y furanos**

Los bajos niveles en que se encuentran las dioxinas y furanos en diferentes matrices, a menudo al nivel de la traza y ultratrazas, y la gran cantidad de interferencias que se encuentran frecuentemente en su determinación han conducido al desarrollo de metodologías analíticas muy sensibles, selectivas, específicas y de gran precisión y exactitud [8]. Las principales características son:

- a) Alta sensibilidad y bajos límites de detección, ya que estos compuestos manifiestan su poder tóxico a nivel de ppt o ppq.
- b) Alta selectividad, a fin de diferenciar dichos compuestos frente a interferencias cuyos niveles pueden ser superiores en varios órdenes de magnitud.
- c) Alta especificidad para discriminar los isómeros clorosustituidos en las posiciones 2, 3, 7, 8.
- d) Alta precisión y exactitud para obtener un valor que se aproxime al valor real con la mínima dispersión.

Las etapas fundamentales de estas metodologías son [8]:

1. La toma de muestra, que viene determinada por el tipo de matriz para analizar.
2. La extracción con soxhlet para muestras sólidas o la extracción líquido-líquido en el caso de muestras acuosas.
3. La purificación y fraccionamiento del extracto con adsorbentes: sílica, florisil, alúmina o diferentes tipos de carbón activo.
4. La separación y detección de los isómeros de interés mediante cromatografía de gases de alta resolución (HRGC) acoplada a espectrometría de masas de alta resolución (HRMS) o baja resolución (LRMS).

La tabla 3 presenta las principales metodologías disponibles [9-14]. Aunque cada una de ellas sigue pautas muy definidas, todas siguen directrices generales que se diferencian principalmente por el tipo de matriz en la que se encuentran las dioxinas y los furanos.

La única técnica aceptada que permite la determinación de concentraciones específicas de los congéneres del orden de partes por trillón o cuatrillón, ha sido el acoplamiento de la cromatografía de gases de alta resolución con la espectrometría de masas de alta resolución (HRGC/HRMS) [1]. La HRMS es necesaria ya que posee la sensibilidad, resolución y especificidad requerida para discriminar entre masas muy similares. No obstante, son pocos los laboratorios en el mundo que cuentan con equipos HRMS, debido a que son muy costosos. En este sentido, se han hecho esfuerzos alternos hacia la aplicación de la espectrometría de masas de baja resolución LRMS para estos análisis [15-17].

Los estudios realizados utilizando la HRGC/LRMS demostraron que con la espectrometría de masas de baja resolución empleando una trampa de iones se obtienen resultados comparables a los obtenidos mediante HRMS [15-17]. En particular, muestras con altos niveles de

**Tabla 3** Metodologías analíticas para la determinación de dioxinas y furanos [9-14]

<i>Método</i>	<i>Técnica</i>	<i>Rango de calibración (pg/μl)</i>	<i>Matriz</i>
EPA 1613	HRGC/HRMS	0,5-2000	Agua, suelo, tejido, sedimento, sólidos en general
EPA 8290A	HRGC/HRMS	1-1000	Agua, suelo, tejido, cenizas, fango
EPA 8280A	HRGC/LRMS	100-10000	Agua, suelo, cenizas, fango
EPA 23	HRGC/HRMS	0,5-1000	Fuentes estacionarias
EPA T09A	HRGC/HRMS	0,5-1000	Aire ambiente
EN 1948	HRGC/HRMS	0,2-1280	Emisiones de incineradoras

PCDDs/PCDFs (ppb o ppm), como cenizas, escorias, emisiones de incineradora, suelos o muestras con ausencia de interferencias, pueden analizarse por LRMS. El método 8280A de la EPA [11], está diseñado para trabajar con LRMS en el análisis de muestras sólidas y cenizas. Los límites de detección están entre 100-10.000 pg/μl. Las muestras que contienen altos niveles de interferencias como lixiviados, o con niveles de PCDD/PCDF menores de ppt, como efluentes de fábricas de papel, se recomienda analizarlas por HRMS [15]. El análisis por LRMS requeriría etapas adicionales de purificación y limpieza de los extractos [18].

A continuación se presenta la metodología utilizada para caracterizar las dioxinas y furanos en las cenizas volantes de una planta de incineración. La metodología analítica empleada en las determinaciones se adapta a los requisitos descritos en distintos protocolos internacionales, como por ejemplo el método EPA 1613, la Norma Europea EN-1948, en los cuales las etapas analíticas difieren muy poco [19].

### **Análisis de cenizas de un incinerador de residuos hospitalarios de la ciudad de Medellín**

**Materiales y reactivos:** se usaron los estándares de calibración EN-1948-CVS de la Norma Europea [13]. Estas soluciones contienen

diecisiete dioxinas y furanos nativos y dieciocho estándares internos marcados isotópicamente. Los solventes: acetona, diclorometano, hexano, nonano, tolueno, éter etílico, fueron todos de la marca J.T. BaKer para análisis de residuos. Para el proceso de purificación sólido-líquido, se usaron los adsorbentes: sílica gel (J.T. BaKer-grado reactivo) neutra 60-200 mallas, preextraída con 300 mL de diclorometano en soxhlet por 24 h y activada posteriormente a 190 °C por 24 h, sílica gel (J.T. BaKer-grado reactivo) acidificada con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 44% en peso y sílica gel (J.T. BaKer-grado reactivo) tratada con NaOH 1M, alúmina básica 80-200 mallas (Fisher-grado cromatográfico) activada a 300 °C por 8 h y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, "Florisil" 60-100 mallas (J.T. BaKer-grado reactivo) y AgNO<sub>3</sub> (J.T. BaKer-grado reactivo) activado a 600 °C por 8 h.

### **Extracción y limpieza**

Las muestras de las cenizas se obtuvieron de los ciclones de la planta incineradora. El tamaño de la muestra para cada extracción fue alrededor de 4 g. La extracción y purificación se realizó siguiendo el método 1613 o EN 1948 [9, 13], con algunas modificaciones [8, 18]. La primera parte consiste en la digestión ácida de las cenizas con 20 mL de HCl 3% durante 2 h, con previa adición de la solución de fortificación (cantidad necesaria para obtener 1.000 pg de cada estándar). Después de filtrar las cenizas, se secan en un horno a 50 °C, y se mantienen en un

recipiente tapado. Luego se realiza una extracción con 300 mL de tolueno en un equipo soxhlet por 48 h. El extracto final se concentra y se cambia el solvente a hexano, antes de iniciar el proceso de purificación.

Para la purificación se usó cromatografía de adsorción. La columna de sílica consistió de las siguientes capas: 1,5 g de sílica-AgNO<sub>3</sub> al 10% en peso/5 g de sílica básica/1 g de sílica neutra/10 g de sílica ácida/2 g de sílica neutra/3 g de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. La columna de florisil se empaca colocando primero una capa de 5 g de florisil previamente activado a 600 °C seguida de 3 g de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. La columna de alúmina consiste de 6 g de alúmina básica o neutra y 3 g de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, previamente activada a 300 °C. Los extractos se introdujeron en la parte superior de las columnas y los PCDD/PCDF se eluyeron con diferentes solventes [18]. El extracto final se concentró y se llevó a un vial, donde se adicionó el estándar de inyección inmediatamente antes de inyectar la muestra en el GC/MS.

### Análisis instrumental

Los extractos purificados se analizaron por HRGC/LRMS en un cromatógrafo Varian modelo 3800, equipado con control electrónico de presión, detector selectivo de masas Saturn 2000 de trampa de iones, e inyector PTV modelo 1079.

Se usó una fuente de ionización positiva EI (+) y se operó en el modo de preparación del ión: MRM (Monitoreo de Reacciones Múltiples). Temperatura de la trampa: 220 °C. Temperatura del "manifold": 40 °C. Temperatura de la línea de transferencia: 270 °C. Tipo de onda: resonante. Voltaje del multiplicador: 200 V. Modulación axial: 4.0 V. Tiempo de scan: 0,33 s/scan. Corriente de emisión: 95 µA. Target TIC: 2000 counts. Tiempo máximo de ionización: 25.000 µs. Tiempo de pre-scan: 1.500 µs. La separación cromatográfica se obtuvo con una columna capilar CP-SIL 8 de bajo sangrado (30 m x 0,25 mm x 0,25 µm espesor de película). Programa de temperatura del horno de la columna: temperatura inicial 60 °C por 3 min., 25 °C/min. hasta 235 °C por

10 min. Posteriormente, se incrementa la temperatura a 10 °C/min. hasta 275 °C y se mantiene por 3 min. Finalmente, se sube a 310 °C a 10 °C/min. y se mantiene por 3 min. Tiempo total del programa 33,5 min. Condiciones del inyector: El inyector se configuró con una partición inicial de 10, a los 0,2 min. se cerró y finalmente a los 2,0 min. se operó de nuevo con una partición de 60. Se usó un inserto desactivado de 3,4 mm empacado con lana de vidrio. Flujo por el splitter 60 mL/min. Programa de temperatura del inyector: 100 °C durante 0,2 min., luego se incrementa la temperatura a 200 °C/min. hasta 300 °C y se mantiene a esta temperatura por 20 min. Gas de arrastre: helio de ultra alta pureza (Agafano), cabeza de presión 18 psi. Velocidad de inyección: 1 µL/s. Volumen de inyección: 2,0 µL.

El límite de detección del método (LDM) se estableció experimentalmente para la concentración en la cual la relación señal/ruido  $\geq 3$ . Ésta corresponde a la concentración de los compuestos nativos y marcados en la solución de calibración CS2 de la norma EN-1948, que está en un rango de 0,8-3,2 pg/µl para los compuestos nativos y de 16 y 32 pg/µL para los marcados. Las curvas de calibración se construyeron en un rango de 4-1.280 pg/µL para los compuestos nativos. Los compuestos marcados están presentes en concentraciones de 16 y 32 pg/µl en todas las soluciones de calibración.

### Resultados

En la tabla 4 se presentan los resultados de los análisis de dos muestras representativas de las cenizas de la planta incineradora de residuos hospitalarios ASEI.

Como puede observarse en la tabla 4 las cenizas presentaron niveles alrededor de 3-5 ng I-TEQ/g. Muestras de otro lote de cenizas de la misma incineradora fueron analizadas mediante HRGC/HRMS en el laboratorio de Espectrometría de Masas del Departamento de Ecotecnologías, Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales de Barcelona, España. Los resultados per-

tación efectiva. Gracias a la financiación de este proyecto por parte del Sistema Universitario de Investigación de la Universidad de Antioquia, en el grupo Catálisis Ambiental se ha logrado un avance importante en la detección y cuantificación de dioxinas y furanos en cenizas de incineración. Sin embargo, se hace necesario apoyo adicional que conduzca al perfeccionamiento y validación de las metodologías analíticas disponibles con infraestructura local para la determinación de dichas sustancias en diferentes matrices. Se requiere, además, el desarrollo de proyectos operacionales y tecnológicos financiados conjuntamente por el gobierno y las firmas interesadas, tendientes a reducir el nivel de dioxinas y furanos en las empresas de incineración, de tal manera que se desarrollen metodologías y procesos de control de calidad y desempeño ambiental de las mismas. Estos proyectos se verían fortalecidos mediante el intercambio científico-tecnológico con laboratorios internacionales con la ventaja de que no tendríamos que depender en forma pasiva de laboratorios externos, sino que se trabajaría en forma cooperativa.

### Conclusión

Mediante HRGC/LRMS se comprobó que las cenizas de los ciclones de una planta de incineración de residuos hospitalarios contienen altos niveles de dioxinas y furanos. La regulación de emisiones de incineradores de residuos sólidos y líquidos por parte de la autoridad ambiental desempeña un papel importante en la materialización de beneficios potenciales en la salud de la población. Sin embargo, las decisiones deberían ir acompañadas de acciones que faciliten la aplicabilidad de la norma. Tomando en cuenta los altos costos de la metodología analítica para la caracterización de dioxinas y furanos, se requiere el apoyo gubernamental a proyectos conjuntos Universidad-Empresa, así como la colaboración internacional para evitar que en nuestro país continuemos siendo simples receptores de tecnología.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al CODI-U. de A. la financiación de este proyecto. Adicionalmente expresan su reconocimiento a los doctores Josep Rivera y Esteban Abad Holgado por su continuo apoyo durante la realización de este proyecto y por el análisis de un lote de cenizas por HRGC/HRMS en el laboratorio de Espectrometría de Masas del Departamento de Ecotecnologías, Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales de Barcelona.

### Referencias

1. Casanovas, J., Ramos Rivero, L., et al. "Dioxinas y furanos problemática ambiental y metodología analítica". *Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente*, Madrid. 1996. pp. 1-268.
2. Overmeire I.V., Clark G., et al. "Trace contamination with dioxin-like chemicals: evaluation of bioassay-based TEQ determination for hazard assessment and regulatory responses", *Env. Sci & Policy*, Vol. 4, 2001, p. 345.
3. McKay G. "Dioxin Characterisation, formation and minimisation during municipal solid waste (MSW) incineration: review", *Chem. Eng. J.* Vol. 86. 2002. p. 343.
4. Ministerio del Medio Ambiente, Colombia. "Resolución 0058: Normas y límites máximos permisibles de emisión para incineradores y hornos crematorios de residuos sólidos y líquidos, artículo 7 límite de emisión de dioxinas y furanos". Enero, 2002.
5. Mukerjee D. "Health impact of polychlorinated Dibenzo-p-dioxins: A critical review". *J. Air & Waste Manage. Assoc.* Vol. 48. 1998. p. 157.
6. Mukerjee D. "Health risk of endocrine-disrupting ortho-substituted PCBs". *Environmental Engineerig Science*. Vol. 15. No. 2. 1998. p. 157.
7. Lovett A.A., Foxall C.D. and Chewe D. "PCB and PCDD/DF concentrations in egg and poultry meat samples from know urban and rural locations in Wales and England". *Chemosphere*. Vol. 37. 1998. p. 1.671.
8. Abad E. "Estudio de las policlorodibenzo-p-dioxinas (PCDD) y los policlorodibenzofuranos (PCDF) en los procesos de incineración y su influencia en el medio ambiente". *Tesis Doctoral Universidad de Barcelona Facultad de Química*, Barcelona. 1999. pp. 1-254.

**Tabla 4** Concentraciones de dioxinas y furanos en dos muestras de cenizas del ciclón. Empresa ASEI

Compuesto	Concentración (pg/g)	
	Cenizas 1	Cenizas 2
2378-TCDF	10.426,210	4.458,730
2378-TCDD	2.301,920	461,890
12378-PeCDF	2.595,010	372,620
23478-PeCDF	656,030	3706,000
12378-PeCDD	28,440	72,580
123478-HxCDF	2.741,420	231,570
123678-HxCDF	4.574,030	357,790
234678-HxCDF	1.552,690	880,160
123478-HxCDD	ND	424,530
123678-HxCDD	ND	ND
123789-HxCDD	ND	ND
123789-HxCDF	1.229,820	326,390
1234678-HpCDF	824,330	700,070
1234678-HpCDD	211,020	675,550
1234789-HpCDF	477,240	776,680
OCDD	758,380	596,770
OCDF	379,970	598,60
Total I-TEQ (pg/g)	4.846,001	3.065,830
Coeficiente de desviación [n = 3]	0,091	0,182

ND: no detectado.

mitieron corroborar que son cenizas de alto contenido de dioxinas y furanos. El equivalente tóxico internacional total promedio fue de 8,0 ng I-TEQ/g. Esto sugiere que el material particulado de la planta incineradora ASEI contiene altas concentraciones de dioxinas y furanos.

### Estimado de costos para el análisis de dioxinas y furanos

En Colombia, como en muchos países en vía de desarrollo, los incineradores emiten sustancias

tóxicas de manera poco regulada, afectando directamente una parte significativa de la población. Debido a la falta de investigación y experiencia, la reducción de las emisiones resulta ser demasiado costosa. En particular, la metodología analítica para la cuantificación de dioxinas y furanos, requiere instrumentación sofisticada y esfuerzo considerable en la preparación de las muestras. Adicionalmente, el tiempo de análisis no es despreciable. Como puede observarse en la tabla 5, tan sólo los insumos requeridos para cada análisis corresponden a aproximadamente US\$400. Es preciso anotar que no se ha tomado en cuenta el uso del equipo y los costos de personal, los cuales pueden ser, como mínimo, una cantidad equivalente. Es decir, el costo por análisis se estima en aproximadamente US\$800. Dicha tarifa no está muy alejada de la tarifa internacional (US\$740-860 dependiendo del número de muestras por analizar) y aparentemente no se justificaría competir con los análisis realizados en el exterior. La norma establece que los análisis de laboratorio se podrán hacer en laboratorios nacionales o internacionales debidamente acreditados [4].

Aunque la forma más efectiva de proteger la salud humana de la exposición a sustancias contaminantes es mediante el establecimiento de normas. Para que éstas se cumplan se requiere fomentar la investigación y cooperación, no sólo con la industria sino también con otros laboratorios certificados, que conduzcan a su implemen-

**Tabla 5** Costo del análisis de PCDD/PCDF por muestra analizada

Insumos Estándar	Costo US\$
Calibración, muestreo, fortificación y recuperación	200
Solventes, adsorbentes, gases, materiales	200
Total	400

9. U.S. Environmental Protection Agency, office of water. "Method 1613: Tetra through octa-chlorinated dioxins and furans by isotope dilution HRGC/HRMS". Octubre de 1994.
10. U.S. Environmental Protection Agency. "Method 8290A: Polychlorinated Dibenzodioxins (PCDD) and Polychlorinated Dibenzofurans (PCDF) by HRGC/HRMS". Enero de 1998.
11. U.S. Environmental Protection Agency. "Method 8280A: The analysis of Polychlorinated Dibenzodioxins and Polychlorinated Dibenzofurans by high resolution gas chromatography/low resolution mass spectrometry (HRGC/LRMS)". Diciembre de 1996.
12. U.S. Environmental Protection Agency. "Method 23 EPA, part 60: Determination of Polychlorinated Dibenzodioxins and Polychlorinated Dibenzofurans from stationary sources". Julio de 1994.
13. Comunidad Económica Europea. "Método EN 1948 1-2-3: Stationary source emissions determination of the mass concentration of PCDD/PCDF". Diciembre 1996.
14. U.S. Environmental Protection Agency. "Compendium of methods for the determination of toxic organic compounds in ambient air TO-9A: Determination of polychlorinated, polybrominated and brominated/ chlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in ambient air". Enero 1997.
15. Eljarrat E., Casanovas J., et al. "Determination of chlorinated dioxins and furans by high resolution gas chromatography coupled to mass spectrometry: comparative study of LRMS and HRMS". *Química Analítica*. Vol. 14. 1995. p. 89.
16. Hayward D.G., Hooper K. and Andrzejewski D. "Tandem-in-time mass spectrometry method for the sub-parts-per-trillion determination of 2, 3, 7, 8-chlorine-substituted dibenzo-p-dioxins and -furans in high-fat foods". *Anal. Chem.* Vol. 71. No. 1. 1999. p. 212.
17. Fabrellas B., Sanz P., et al. "Análisis of PCDD/PCDF by ion trap detector. Application to waste samples", *Organohalogen Compounds*. Vol. 45. 2000. p. 160.
18. Abad E., Sauló J., et al. "Evaluation of a new automated cleanup system for the analysis of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans in environmental sample". *Journal of chromatography A*. Vol. 893. 2000. p. 383.
19. Abad E., Adrados M. A. et al. "Dioxin abatement strategies and mass balance at a municipal waste management plant", *Environ. Sci. Technol.* Vol. 36, 2002. p. 92.