

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**VALORIZACIÓN DE CENIZAS VOLANTES Y
CENIZAS DE FONDO PROCEDENTES DE
LA INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
URBANOS: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

(Valorisation of fly ash and bottom ash from
incineration of municipal solid waste:
A review)

Para acceder al Título de

Graduado/a en Ingeniería Química

Autor: Sonia Alonso Gutiérrez

Septiembre 2015

TÍTULO	Valorización de cenizas volantes y cenizas de fondo procedentes de la incineración de residuos sólidos urbanos. Revisión bibliográfica.		
AUTOR	Sonia Alonso Gutiérrez		
DIRECTOR/CODIRECTOR	Ana Andrés Payan / Juan Dacuba García		
TITULACIÓN	<i>Grado en Ingeniería Química</i>	FECHA	21/09/2015

PALABRAS CLAVE

Al realizar la búsqueda bibliográfica en bases de datos internacionales las palabras clave utilizadas fueron introducidas en inglés: “Fly ash, bottom ash, MSWI, ACP, wastes, incineration, municipal wastes, recycling wastes, treatments, valorization, heavy metals”, usadas tanto de forma aislada como combinada en la base de datos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La generación y gestión de los residuos sólidos urbanos presentan gran interés, debido a la gran cantidad de residuos producidos, a la tendencia creciente en lo que respecta a su generación y a la disminución del espacio disponible en vertederos para su deposición. A día de hoy la incineración de residuos sólidos urbanos es una de las técnicas más eficaces de gestión de residuos debido a que reduce el volumen y la masa de los residuos en un 90% y 70% respectivamente.

El proceso de incineración genera dos tipos fundamentales de residuos sólidos:

- **Cenizas de fondo o escorias (bottom ash)** son los residuos generados por la combinación de material total o parcialmente quemado que se descarga en las parrillas
- **Cenizas volantes**, provenientes del sistema de control de contaminación de aire (**fly ash**).

RESULTADOS

Los resultados obtenidos, los cuales se estructuran en tres bloques: (i) información obtenida acerca de la recopilación de publicaciones seleccionadas, (ii) caracterización de las cenizas volantes y escorias, (iii) tratamientos, (iv) nuevas vías de valorización.

- (i) Para tener un mayor conocimiento sobre las cenizas volantes y de fondo se realizó una selección de los artículos de revisión más relevantes. Estos artículos de revisión recorren tanto la caracterización física, química, los tratamientos y las posibles aplicaciones que podrían tener. Las referencias fueron buscadas a lo largo de los 10 últimos años (2005-2015).
- (ii) Las propiedades físicas y químicas tanto de las cenizas volantes como de las escorias, dependen principalmente de la composición de las materias primas de los residuos sólidos urbanos, las condiciones de operación, el tipo de incineración y el sistema de control de contaminación del aire. La composición química muestra que los elementos mayoritarios son Cd, Pb, Ni, Cu. Además, SiO_2 , AlO_3 , CaO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O son los óxidos más comunes encontrados en las cenizas volantes y de fondo.

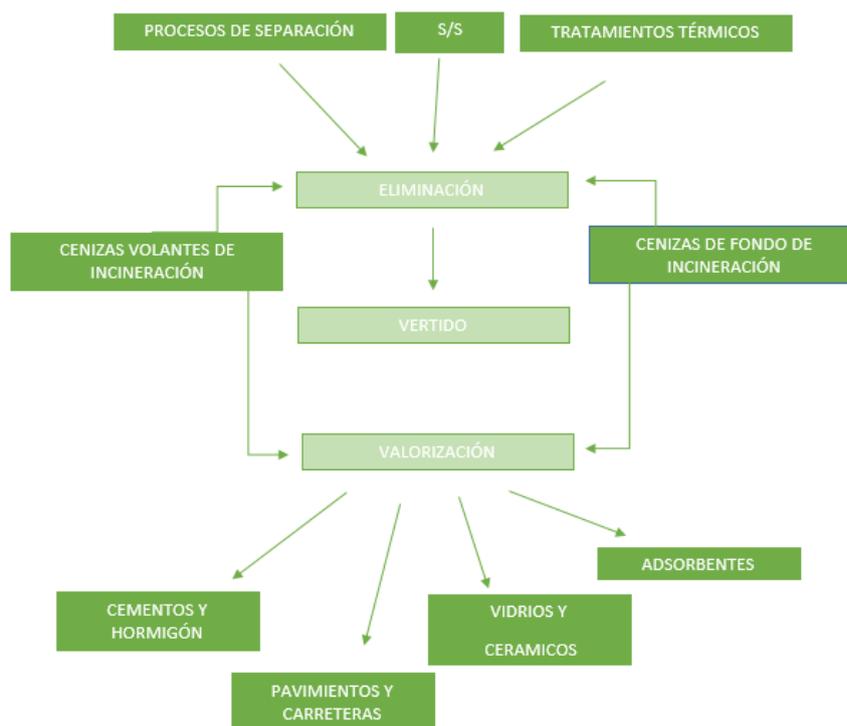


Figura 1. Gestión y valorización de cenizas volantes y cenizas de fondo.

- (iii) La gestión actual tanto de las cenizas volantes como de las de fondo están encaminadas tradicionalmente a su eliminación mediante deposición en vertedero (con o sin etapas de acondicionamiento previas). En la figura 1 se muestra la gestión completa con los diferentes tipos de tratamientos de

eliminación de contaminantes, procesos de separación (lavado, lixiviación, procesos electroquímicos), estabilización/solidificación y procesos térmicos.

- (iv) Después de los tratamientos anteriores, las cenizas son mucho más fáciles de usar. Para determinar la posibilidad de aplicación. En cuanto a las aplicaciones más investigadas a lo largo de los últimos 10 años se pueden clasificar en 4 grupos: cementos y hormigón, pavimentos y carreteras, vidrios y cerámicos y adsorbentes.

CONCLUSIONES

En la presente revisión se escogieron como palabras claves “fly ash, bottom ash, MSWI, waste, valorisation ...” gracias a las cuales se encontraron hasta 219 referencias, de las cuales fueron seleccionadas 68 como referencias de mayor impacto e interés, procediendo así a un a un estudio más exhaustivo de las mismas.

Durante la revisión se comprobó que tanto de las cenizas volantes como las cenizas de fondo, son residuos peligrosos, debido a su alto contenido en metales pesados como Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, además de su contenido en cloruros. Destacar que las cenizas volantes poseen mayor peligrosidad que las cenizas de fondo debido a una composición con mayor cantidad de cloruros.

Dentro de los pretratamientos y tratamientos destacan tres grupos principales: Procesos de separación, estabilización/solidificación y tratamientos térmicos, donde se buscan la eliminación de las especies potencialmente contaminantes del residuo, disminuyendo así los problemas derivados de su deposición.

La reutilización de los residuos está encaminada hacia cuatro vías principales de valorización: cementos y hormigones, cerámicos y vidrios, pavimentación y absorbentes, destacando entre ellos la obtención de productos cerámicos vidriados y su inclusión en matrices de cemento como principales aplicaciones. Actualmente hay más aplicaciones para las cenizas volantes y cenizas de fondo pero se encuentran todavía bajo investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Annalisa Zacco et al. Review of fly ash inertisation treatments and recycling. *Environ Chem Lett* (2014) 12:153–175
- [2] Charles H. K. Lam, Alvin W. M. Ip, John Patrick Barford and Gordon McKay. Use of Incineration MSW Ash: A Review. *Sustainability* 2010, 2, 1943-1968.
- [3] Margarida J. Quina et al. Treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration: An overview. *Waste Management* 28 (2008) 2097–2121.
- [4] Margarida J. Quina et al. Chemical stabilization of air pollution control residues from municipal solid waste incineration. *Journal of Hazardous Materials* 179 (2010) 382–392.

TÍTULO	Valorisation of fly ash and bottom ash from incineration of municipal solid waste: A review		
AUTOR	Sonia Alonso Gutiérrez		
DIRECTOR/CODIRECTOR	Ana Andrés Payan /Juan Dacuba García		
TITULACIÓN	<i>Grado en Ingeniería Química</i>	FECHA	21/09/2015

KEYWORDS

“Fly ash, bottom ash, MSWI, ACP, wastes, incineration, municipal wastes, recycling wastes, treatments, valorization, heavy metals”.

SCOPE

The generation and management of municipal solid waste are of great interest due to the large amount of waste produced, the growing trend in regard to his generation and decreasing landfill space available for deposition. Today the incineration of municipal solid waste in one of the most effective techniques of waste management because it reduces the volume and mass of waste by 90% and 70% respectively.

The incineration process produces two main types of solid waste:

- Bottom ash are waste generated by the combination of total material to be burned or partially discharge grills
- Fly ash, control system from air pollution.

RESULTS

The results, which are structured in three blocks: (i) information obtained regarding the collection of selected publications, (ii) characterization of fly ash and bottom ash, (iii) treatment, (iv) new recovery methods.

- (i) To have a better understanding of the fly ash and bottom ash a selection of the most relevant review articles was performed. These review articles roam both physical characterization, chemical, treatments and possible

applications that might be. References were sought over the last 10 years (2005-2015).

- (ii) The physical and chemical properties of ashes, depend mainly on the commodity composition of municipal solid waste, operating conditions, type of incineration system pollution control air. The chemical composition shows that the major elements are Cd, Pb, Ni, Cu. In addition, SiO₂, AlO₃, CaO, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O oxides are the most common found in fly ash and bottom ash.

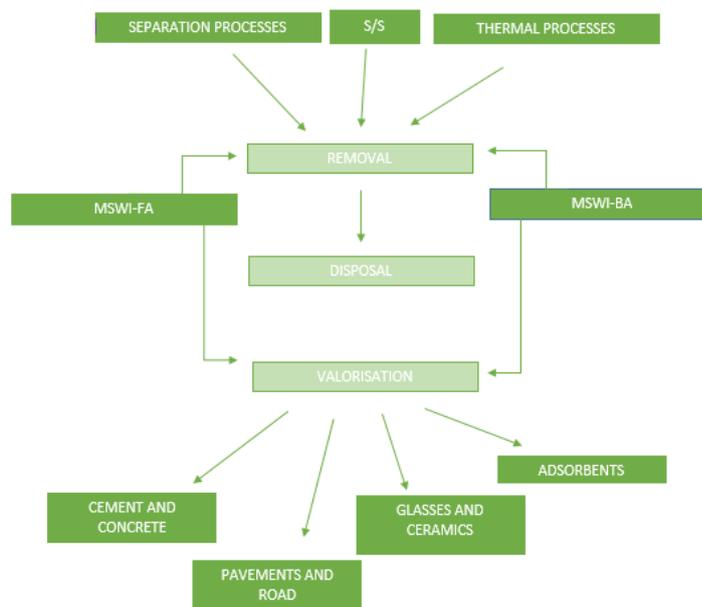


Figure 1. Management and valorisation of fly ash and bottom ash

- (iii) The current management of both ashes as the background are traditionally aimed at disposal by landfill deposition (with or without prior conditioning stage). In Figure 1 the entire operation with different types of treatments contaminant removal, separation processes (washing, leaching, electrochemical processes), stabilization / solidification and thermal processes shown.
- (iv) After the above treatments, the ashes are much easier to use. To determine the applicability. As the most investigated over the last 10 years applications can be classified into 4 groups: cement and concrete pavements and roads, glasses and ceramics and adsorbents.

CONCLUSIONS

In this review they were chosen as key words "fly ash, bottom ash, MSWI, waste, valorisation ..." through which they found up to 219 references, which were selected 68 references greatest impact and interest, and proceeding to one to one more thorough examination of them.

During the review it was found that both, fly ash and bottom ash are hazardous waste because of their high content of heavy metals such as Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in addition to its chloride content. Noting that the fly ash have greater danger than the bottom ash due to a composition with greater amount of chlorides.

Among the treatments and pre-treatments are three main groups: Separation processes, stabilization / solidification and thermal treatment, where the removal of potentially contaminating species are searched residue, thereby decreasing the problems of deposition.

The reuse of waste is directed towards four main avenues for recovery: cement and concrete, ceramics and glass, paving and absorbent, among them the production of glazed ceramic products and their inclusion in cement matrices main applications. Currently there are more applications for fly ash and bottom ash but are still under investigation.

REFERENCES

- [1] Annalisa Zacco et al. Review of fly ash inertisation treatments and recycling. *Environ Chem Lett* (2014) 12:153–175
- [2] Charles H. K. Lam, Alvin W. M. Ip, John Patrick Barford and Gordon McKay. Use of Incineration MSW Ash: A Review. *Sustainability* 2010, 2, 1943-1968.
- [3] Margarida J. Quina et al. Treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration: An overview. *Waste Management* 28 (2008) 2097–2121.
- [4] Margarida J. Quina et al. Chemical stabilization of air pollution control residues from municipal solid waste incineration. *Journal of Hazardous Materials* 179 (2010) 382–392.



Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación



INDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Incineración de RSU: Cenizas volantes y cenizas de fondo.	5
1.2. Caracterización y gestión de residuos de incineración	8
2. OBJETIVO	12
3. METODOLOGIA	13
3.1. Objetivo de la revisión	13
3.2. Fuentes de datos	14
3.3. Selección de artículos: Criterios de calidad	15
3.4. Análisis de los artículos seleccionados	16
4. RESULTADOS	17
4.1. Recopilación de las publicaciones seleccionadas	17
4.2. Caracterización de las cenizas volantes y de fondo	19
4.3. Gestión de cenizas volantes y de fondo	22
4.4. Vías de valorización emergentes	32
5. CONCLUSIONES	41
6. BIBLIOGRAFIA	43

Lista de Tablas

- Tabla 1.** Entrada y salida de residuos en las diferentes incineradoras españolas.
- Tabla 2.** Contenido en óxidos (%) de cenizas volantes de incineración (FA).
- Tabla 3.** Contenido en óxidos (%) de cenizas de fondo de incineración (BA).
- Tabla 4.** Contenido en metales (mg/kg) de cenizas volantes de incineración (FA).
- Tabla 5.** Contenido en metales (mg/kg) de cenizas de fondo de incineración (BA).
- Tabla 6.** Contenido en cloro en las cenizas volantes (FA) (mg/kg).
- Tabla 7.** Contenido en cloro en las cenizas de fondo (BA) (mg/kg).
- Tabla 8.** Pérdida de ignición en cenizas volantes y de fondo (wt%).
- Tabla 9.** Técnicas de procesos de separación.
- Tabla 10.** Tratamientos S/S. Grupo A. Estabilización química.
- Tabla 11.** Tratamientos S/S. Grupo B. Solidificación con aglutinantes.
- Tabla 12.** Tratamientos S/S. Grupo C. Varios.
- Tabla 13.** Tratamientos térmicos. Sinterización.
- Tabla 14.** Tratamientos térmicos. Vitrificación.
- Tabla 15.** Tratamientos térmicos. Fusión.
- Tabla 16.** Aplicaciones de las cenizas volantes y de fondo.

Lista de Figuras.

- Figura 1.** Generación y tratamiento de RSU (2009).
- Figura 2.** Plantas incineradoras de España.
- Figura 3.** Metodología revisión bibliográfica.
- Figura 4.** % según referencias encontradas sobre los países más referentes.
- Figura 5.** Distribución de referencias por años estudiados (% referencias/año, nº referencias por año).
- Figura 6.** Tendencia de investigación a lo largo de tiempo (%) según referencias totales (2005-2015).
- Figura 7.** Gestión de las cenizas volantes y de fondo.
- Figura 8.** Pretratamientos y tratamientos de las cenizas volantes y de fondo.
- Figura 9.** Principio de remediación electrodiálisis.

Figura 10. Resumen de los tratamientos por S/S.

Figura 11. Gestión y valorización de cenizas volantes y de fondo.

Figura 12. Diagrama del proceso de producción del cemento.

Figura 13. Estructura típica del pavimento.

1. INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto se lleva a cabo una revisión bibliográfica sobre las posibles vías de valorización de las cenizas volantes y cenizas de fondo procedentes de la incineración de RSU.

1.1. Incineración de RSU: Cenizas volantes y cenizas de fondo.

La generación y gestión de los residuos sólidos urbanos presentan gran interés, debido a la gran cantidad de residuos producidos, a la tendencia creciente en lo que respecta a su generación y a la disminución del espacio disponible en vertederos para su deposición. La composición de los residuos sólidos urbanos es altamente dependiente de la localización en la que son generados, estando sometida a variaciones estacionales. En líneas generales los residuos sólidos urbanos están compuestos por dos fracciones fundamentales: orgánica, constituida por papel, alimentos, textiles, gomas, cuero y plásticos, e inorgánica, que comprende metales, vidrios, polvo y ceniza.

Fuente	Código LER - RESIDUO	Generación	Reciclado ¹	Compostaje	Vertido	Incineración
MAGRAMA	20 03 01 Mezclas de residuos municipales	18.291.848	410.777	2.138.523	13.533.585	2.208.963
	20 01 01 Papel y cartón	1.266.395	1.266.395	0	0	0
	20 01 02 Vidrio	7.202	7.202	0	0	0
	20 01 08 R. biodegradables de cocinas y restaurantes	603.975	535.718	68.256	0	0
	20 02 01 R. biodegradables de parques y jardines	326.537	129.542	65.150	131.845	0
	15 01 06 Envases mezclados	653.977	428.392	0	199.197	26.388
	15 01 07 Envases de vidrio	726.479	726.479	0	0	0
INE	20 01 40 Residuos metálicos	43.394	41.780	0	1.614	0
	20 01 39 Residuos de plástico	104.681	86.995	0	17.682	3
	20 01 38 Residuos de madera	127.522	116.052	0	6.698	4.771
	20 01 10 Residuos textiles	7.668	2.930	0	4.738	0
	20 01 21 Equipos desechados	29.330	28.451	0	879	0
	20 01 23 Equipos desechados	29.330	28.451	0	879	0
	20 01 35 Equipos desechados	29.330	28.451	0	879	0
	20 01 36 Equipos desechados	29.330	28.451	0	879	0
	20 01 33 Residuos de pilas y acumuladores	1.624	1.608	0	15	0
	20 01 34 Residuos de pilas y acumuladores	1.624	1.608	0	15	0
20 03 02 R. de mercados	481.780	133	0	379.950	101.697	
20 03 07 Residuos voluminosos	481.780	133	0	379.950	101.697	
TOTAL		22.672.411	3.782.456	2.271.929	14.276.204	2.341.822
%			17	10	63	10

Figura 1. Generación y tratamiento de RSU (2009) (Fuente: MAGRAMA)

Según los datos recogidos en el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), se puede observar en la Figura 1 que durante el año 2009 se generaron en torno a 23 millones de toneladas de residuos, de los cuales el 10% fue destinado a la incineración, mientras que más del 60 % fue directamente depositado en vertederos.

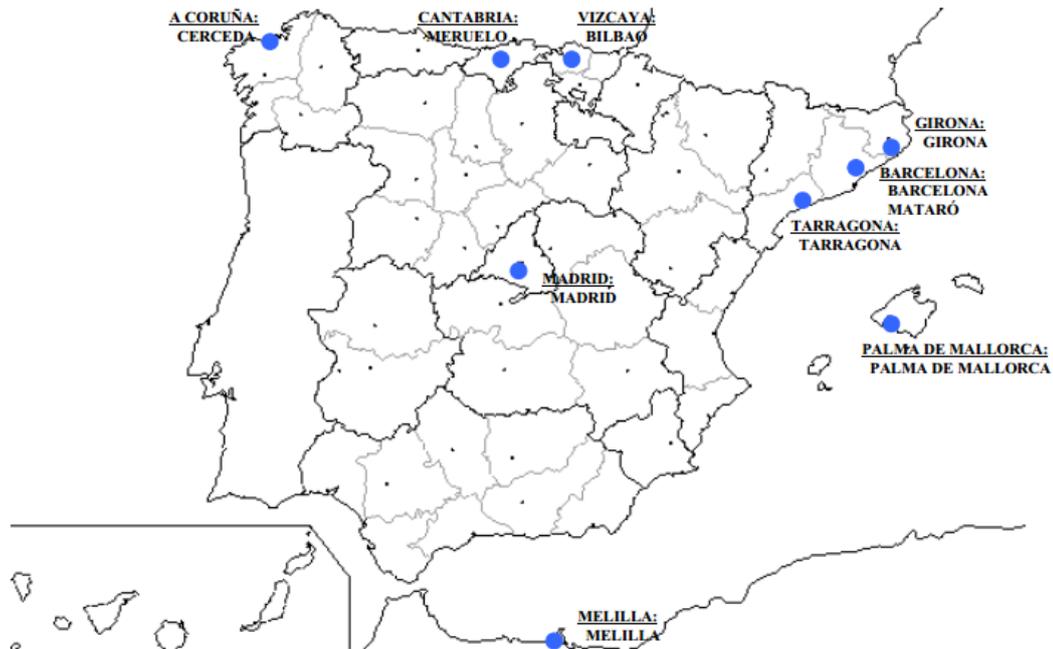


Figura 2. Plantas incineradoras en España

Actualmente en España existen un total de diez plantas incineradoras, repartidas según se indica la Figura 2, con una capacidad de tratamiento de $2,19 \times 10^6$ t/año (Tabla 1), lo que supone del orden del 10 % del volumen anual de residuos sólidos urbanos generados (Figura 1).

A día de hoy la incineración de residuos sólidos urbanos es una de las técnicas más eficaces de gestión de residuos debido a que reduce el volumen y la masa de los residuos en un 90% y 70% respectivamente.

La incineración de los residuos sólidos urbanos es un proceso que opera en exceso de aire para asegurar que la combustión sea completa y que la temperatura no sea lo suficientemente elevada como para fundir las cenizas y escorias. Las instalaciones de incineración de residuos sólidos urbanos están reguladas mediante la Directiva de

Incineración 2000/76/CE (Comisión Europea, 2000), que establece los parámetros operativos requeridos para su correcto funcionamiento, tanto en lo que respecta a los residuos introducidos como en lo que se refiere a las condiciones de proceso y emisiones a agua o atmósfera.

Tabla 1. Entrada y salida de residuos en las diferentes incineradoras españolas (MAGRAMA (información proporcionada por las CCAA, 2009)

CCAA	Nº de instalaciones	Capacidad nominal (t/año)	Entrada total (t)		Salida total	
			RU mezcla	Rechazos instalaciones	Potencia generada (kwh/h/año)	Residuos generados (t)
Islas baleares	1	300.000	294.185	-	152.388.000	97.459
Cantabria	1	96.000	0	116.909	83.301.041	16.674
Cataluña	4	690.620	651.000	69.225	314.973	182.391
Galicia	1	533.742	527.024	8.995	389.258.000	101.385
Madrid	1	300.000	388	311.295	234.841.000	42.433
País Vasco	1	240.000	220.217	0	661.000.000	-
Melilla	1	36.000	40.987	0	8.044.000	1.043
TOTAL	10	2.196.362	2.240.224	-	1.529.147.014	441.385

Especialmente relevantes son las condiciones de proceso que permitirán la destrucción completa de las moléculas orgánicas, establecidas en el mantenimiento de temperaturas superiores a 850°C durante al menos 2 segundos con contenido de oxígeno superior al 6%. No obstante, dado que la combustión es en muchos casos incompleta es preciso el tratamiento de los gases de salida de la cámara de combustión (generalmente mediante cal seca, húmeda o semi-seca). Adicionalmente es preciso el análisis de los gases de salida de proceso en lo que concierne a NOx, CO, partículas, COT, HCl, HF y SO2, con objeto de garantizar el correcto funcionamiento de la instalación y el cumplimiento de los límites de emisión.

Asimismo, y en base a la Directiva de Incineración 2000/76/CE (Comisión Europea, 2000) las instalaciones deben operar de modo que se reduzca al mínimo la cantidad y nocividad de residuos generados, reciclando éstos cuando sea posible. Para ello, y

previamente a la selección de las vías de eliminación o reciclado de los residuos resultantes de la incineración, será preciso llevar a cabo la caracterización física y química de los residuos, y su potencial contaminante, especialmente en lo que respecta a las fracciones solubles totales y de metales pesados.

El proceso de incineración genera dos tipos fundamentales de residuos sólidos:

- ***Cenizas de fondo o escorias (bottom ash)*** son los residuos generados por la combinación de material total o parcialmente quemado que se descarga en las parrillas
- ***Cenizas volantes***, provenientes del sistema de control de contaminación de aire (***fly ash***).

En general las cenizas de fondo se consideran materiales no tan peligrosos, pudiendo ser empleados en cerámicos tradicionales y agregados, por otro lado las cenizas volantes tienen un elevado carácter tóxico derivado de los metales pesados, sales de Cl y compuestos organoclorados. Es por ello que cualquier sistema de gestión deberá contemplar tanto la caracterización previa del residuo como la caracterización medioambiental exhaustiva del producto obtenido tras el tratamiento, que tendrá como posibles destinos finales la deposición o la reutilización.

1.2. Caracterización y gestión de residuos de incineración

Las propiedades de las cenizas y escorias se pueden separar en dos partes: propiedades físicas y propiedades químicas.

Al conocer las propiedades de las cenizas, propiedades químicas, principalmente, podemos asegurar una selección más adecuada para su valorización futura.

- Propiedades físicas
 - Granulometría
 - El contenido de humedad
 - La densidad aparente
 - Resistencia a la compresión
 - Permeabilidad
 - La porosidad

- Propiedades químicas
 - Composición química
 - Pérdida por ignición
 - Los metales pesados y lixiviación
 - Constituyentes orgánicos
 - Contenido de cloruro

Las cenizas volantes y escorias de incineradora de residuos sólidos urbanos presentan como características fundamentales:

- Elevados contenidos de **metales pesados** (fundamentalmente Cd, Pb, Zn), **compuestos organohalogenados** (principalmente dioxinas y furanos) y **sales solubles** (fundamentalmente cloruros). Debido a las concentraciones de sales metálicas y compuestos organoclorados las cenizas volantes y de fondo procedentes de incineradoras de RSU están recogidas en el Catálogo Europeo de Residuos como **residuo peligroso** con los códigos 190113 y 190111 respectivamente.
- En líneas generales presentan contenidos significativos de Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na y Cl, así como cantidades relevantes de metales pesados, especialmente Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn. Estos metales pueden causar problemas de lixiviación y son perjudiciales para el medio ambiente sin tratamiento adecuado. Generalmente, el contenido de metales pesados en las cenizas volantes es mayor que en las cenizas de fondo debido a la vaporización de metales durante la combustión y al proceso de adsorción de metales en la superficie de las cenizas. Adicionalmente contienen trazas de hidrocarburos policíclicos aromáticos, clorobencenos, bifenilos policlorados y dibenzo-p-dioxinas y furanos policlorados.
- Por otro lado las cenizas presentan elevados contenidos en SiO₂, Al₂O₃ (formadores de cristales), Na₂O y K₂O (agentes fundentes) y CaO, MgO, ZnO y PbO (estabilizadores de la matriz).
- A pesar de que la composición en óxidos puede variar las cenizas se caracterizan por presentar un carácter netamente alcalino debido al hidróxido

de calcio y carbonato sódico empleados en la eliminación de los gases ácidos, lo que implica cantidades elevadas de cloruros en las cenizas.

A fin de utilizar los residuos y reducir el impacto medioambiental, tres métodos de tratamiento tienen han introducido y se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Procesos de separación
- solidificación / estabilización
- Métodos térmicos
- Otros métodos

En la práctica, es común iniciar el tratamiento de cenizas y escorias con las técnicas de separación, seguido de tratamientos térmicos o estabilización / solidificación. Dependiendo de los objetivos que se quieran conseguir con los tratamientos, las estrategias pueden varias. Reducir el impacto ambiental implica procesos tales como la reducción de la concentración total de los contaminantes a través de lavado, reduciendo el lixiviado de contaminantes por la estabilización o la disminución de la tasa de lixiviación por solidificación.

- **Procesos de separación:** El objetivo de los métodos de separación es mejorar la calidad de las cenizas y residuos y para así poder obtener una buena utilización mejorar su utilización.
- **Solidificación / Estabilización (S/S):** El proceso S/ S se refiere a aquellos procesos que utilizan un aditivo o aglutinante para inmovilizar química y / o físicamente el peligroso contenido presente en los residuos.
Para la estabilización, el objetivo es reducir al mínimo la solubilidad y toxicidad de los contaminantes. Para la solidificación, generalmente aglutinantes como el cemento se utilizan para encapsular el material residual con el fin de inmovilizar contaminantes y reducir la lixiviación.
- **Tratamiento térmico:** Este proceso puede reducir el volumen de residuos en un 60% o más; el producto es más resistente a la lixiviación, y es más estable para el medio ambiente.
- **Otros métodos:** A parte de los tratamientos más habituales mencionados anteriormente, existen otros métodos utilizados como tratamiento de las

cenizas. Dentro de este grupo podríamos englobar la carbonatación y la captura de CO₂.

Las políticas medioambientales y la conciencia del agotamiento de los recursos disponibles han promovido el uso eficiente de éstos (Comisión Europea, 2008b) y la valorización de los residuos generados en los procesos productivos mediante su uso como materia prima alternativa en otros sectores. En líneas generales las cenizas volantes de incineradora y las escorias pueden ser utilizadas en materiales de construcción y aplicaciones geotécnicas, si bien se consideran otras aplicaciones como la recuperación de suelos o el acondicionamiento de lodos. No obstante, debido a la heterogeneidad en la composición de las cenizas y a su potencial peligrosidad, la selección más adecuada de las mismas para su valorización debe llevarse a cabo en base a las características físicas y químicas de materias primas y productos, que no sólo permitirán la obtención de productos alternativos medioambientalmente 'seguros', sino técnicamente viables y de valor añadido en el mercado.

2. OBJETIVO

El presente Trabajo Fin de Grado presenta como objetivo general la revisión bibliográfica de los trabajos publicados desde el año 2005 hasta la actualidad, referentes a la utilización de cenizas volantes y escorias procedentes de la incineración de residuos sólidos urbanos, con el objeto de establecer la viabilidad de su reutilización o reciclaje como una alternativa a su deposición en vertederos.

La consecución de este objetivo requiere el planteamiento de los siguientes objetivos específicos:

- Recopilación de publicaciones científicas de ámbito internacional que consideren la utilización de cenizas volantes y escorias en procesos de valorización según su caracterización química y/o física.
- Análisis y clasificación de los trabajos recopilados según:
 - Cenizas volantes y cenizas de fondo: Caracterización física y química.
 - Tratamientos y pre-tratamientos previos a la reutilización de las cenizas.
 - Posibles vías de valorización

En base a estos estudios, se determinó la viabilidad del reciclaje o reutilización de las cenizas volantes y escorias como materias primas en diferentes procesos.

3. METODOLOGIA

La metodología aplicada para realizar la revisión bibliográfica en este proyecto, se detalla en la figura 3 consta de cuatro pasos diferentes (i) Objetivo de la revisión, (ii) Fuentes de datos, (iii) Selección de artículos de interés, (iv) Análisis exhaustivo de los artículos seleccionados.

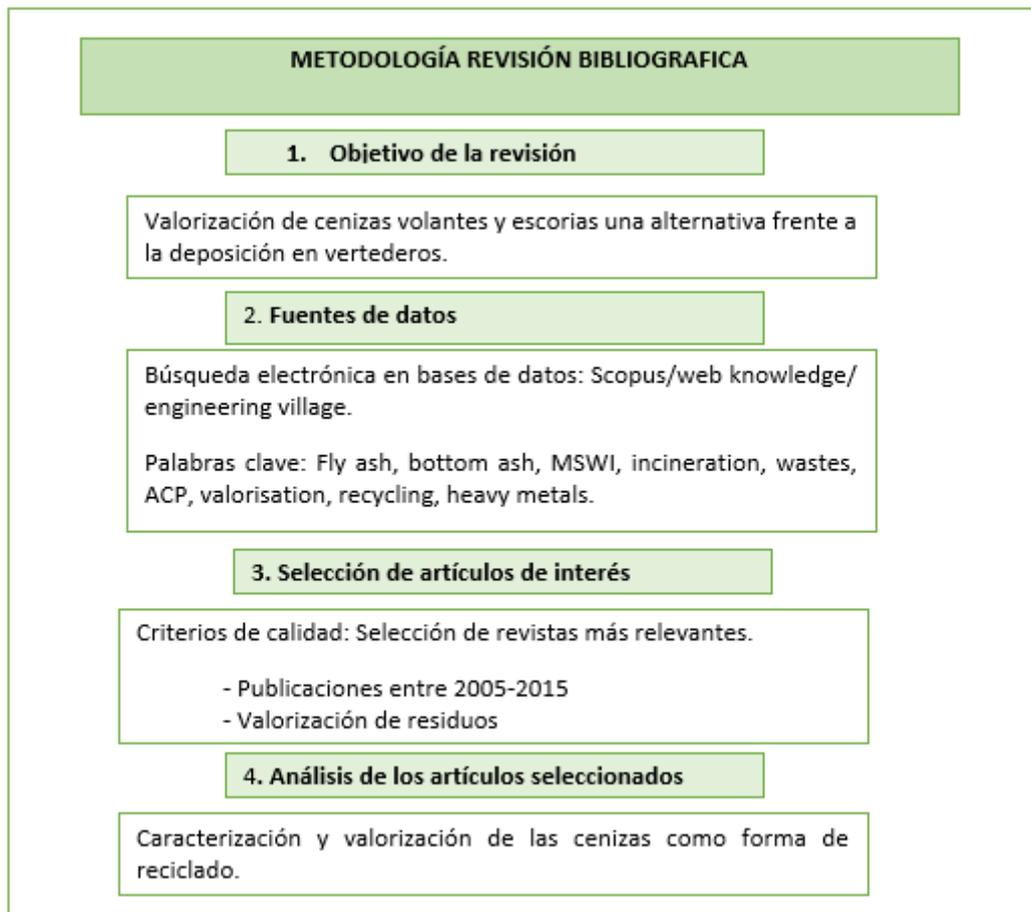


Figura 3. Metodología revisión bibliográfica

3.1. Objetivo de la revisión

Las políticas de gestión de residuos a nivel Europeo, encaminadas al reciclaje y la minimización tanto de residuos como del consumo de recursos naturales, así como el aumento de tasas de vertido, han llevado a las industrias a modificar sus políticas ambientales encaminándolas hacia el reciclaje y la sostenibilidad.

Tanto la incineración de residuos sólidos urbanos como su posterior deposición en vertederos supone un gran impacto ambiental, por un lado de la atmosfera, debido a

la cantidad de contaminantes que son enviados a ella tras el proceso de incineración, como a los suelos y aguas producidos por la lixiviación de los residuos depositados en los vertederos. Es por ello que hoy en día se buscan nuevas vías de valorización para reducir la cantidad de residuos que se depositan en los vertederos tras su incineración.

3.2. Fuentes de datos

La metodología utilizada ha incluido la revisión bibliográfica de artículos en diversas bases de datos y plataformas web, entre las que destacan:

- **Scopus** es una gran base de datos bibliográfica de literatura científica multidisciplinar e internacional que facilita análisis de citas desde 1996. Contiene más de 42 millones de referencias de documentos publicados en algunos casos desde el siglo XIX en unas 17.000 revistas científicas, que incluyen unos 1.200 títulos en acceso abierto, 600 publicaciones comerciales y 350 series monográficas, 3,7 millones de conference papers, 24 millones de registros de patentes.
- **Web of Knowledge:** plataforma web que da acceso a diversos contenidos y recursos de información científica de alta calidad, muy importantes para la investigación en todo tipo de organizaciones. Entre estos recursos figuran: Web of Science (Science, Social Science, Art & Humanities, Conference Proceedings Citation Indexes hasta 2009), Journal Citation Reports, Derwent Innovation Index (hasta 2009).
- **Engineering Village:** servicio de información científica y tecnológica que proporciona acceso integrado a diversas e importantes bases de datos que cubren referencias de documentos de todo el mundo en amplios sectores de la ciencia y la ingeniería. En nuestro caso, a través de Engineering Village se pueden consultar COMPENDEX (Ingeniería y tecnología mecánica, industrial, química, civil, energética, biológica, de materiales, transportes, etc.) y NTIS (informes científicos y técnicos no secretos norteamericanos y de otros países).
- **Derwent World Patents Index** es una base de datos de patentes de 44 países que proporciona los abstracts de las mismas, en lo que describe la naturaleza y el uso de la invención.

- **Plataforma Google.**

Para realizar una búsqueda bibliográfica exhaustiva en las citadas bases de datos, en primer lugar se identificaron los términos o “keywords” que guiarían nuestra investigación, a estas palabras las llamaremos palabras clave. La elección de las palabras clave es una etapa importante en la búsqueda bibliográfica puesto que este paso permite localizar las publicaciones previas de interés para nuestra revisión.

Al tratarse de una base de datos internacional las palabras clave utilizadas para realizar la búsqueda bibliográfica fueron introducidas en inglés: “Fly ash, bottom ash, MSWI, ACP, wastes, incineration, municipal wastes, recycling wastes, treatments, valorization, heavy metals”, y usadas tanto de forma aislada como combinada en la base de datos.

Tras realizar la búsqueda bibliográfica, el total de artículos encontrados fueron sometidos a un proceso de selección con el objetivo de detectar los artículos más relevantes y que pasarían a la siguiente etapa de análisis.

3.3. Selección de artículos: Criterios de calidad

En líneas generales, los artículos encontrados en la revisión bibliográfica estudian o presentan la posibilidad de valorización de las cenizas volantes y escorias, los posibles tratamientos y la caracterización física, química y mineralógica de las cenizas volantes. Con el objetivo de separar los artículos relevantes de los que no lo son se han fijado tres criterios fundamentales de calidad (criterios de inclusión/exclusión), que son los siguientes:

- Criterio de calidad 1: Artículos publicados entre 2005 y 2015.
- Criterio de calidad 2: Artículos publicados en revistas internacionales con índice de impacto.
- Criterio de calidad 3: Artículos que introduzcan cenizas volantes y/o cenizas de fondo provenientes exclusivamente de la incineración de residuos sólidos urbanos.
- Criterio de calidad 4: Artículos que introduzcan cenizas volantes y/o cenizas de fondo como procesos de valorización, llevando a cabo su reciclado.

En base a estos criterios de calidad, 68 artículos fueron seleccionados como relevantes o representativos, y por tanto sometidos a la etapa de análisis exhaustivo.

3.4. Análisis de los artículos seleccionados

Una vez seleccionados los artículos de interés, éstos han sido clasificados de acuerdo con la fecha de publicación y el país de procedencia de la publicación, con la finalidad de contextualizar cronológica y espacialmente las investigaciones realizadas en este campo. Posteriormente fueron clasificados en los siguientes aspectos a estudiar:

- Caracterización de las cenizas volantes y escorias
 - Propiedades físicas
 - Propiedades químicas
- Gestión de las cenizas
 - Pretratamientos: Eliminación de metales pesados y/o otros compuestos contaminantes antes de su reciclado.
 - Tratamientos: Eliminación de metales pesados y/o otros compuestos contaminantes antes de su deposición en vertederos.
- Valorización: Búsqueda de nuevas alternativas para la reutilización tanto de cenizas volantes como escorias.

4. RESULTADOS

A continuación, se van a detallar los resultados obtenidos, los cuales se estructuran en tres bloques: (i) información obtenida acerca de la recopilación de publicaciones seleccionadas, (ii) caracterización de las cenizas volantes y escorias, (iii) tratamientos, (iv) nuevas vías de valorización.

4.1. Recopilación de las publicaciones seleccionadas

Las políticas de gestión de residuos, encaminadas al reciclaje y la minimización tanto de residuos como del consumo de recursos naturales, así como el aumento de tasas de vertido, han llevado a las industrias a modificar sus políticas ambientales encaminándolas hacia el reciclaje y la sostenibilidad.

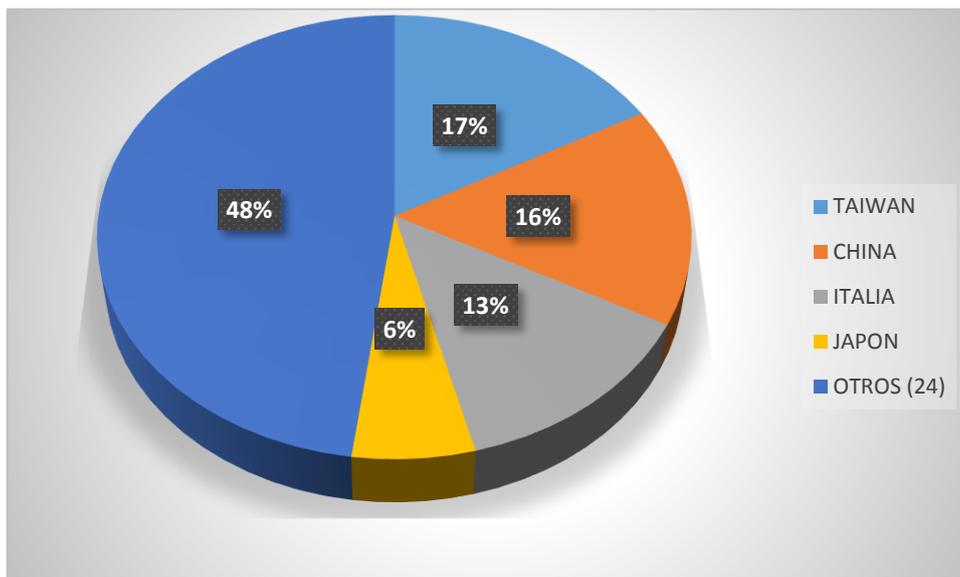


Figura 4. % según referencias encontrados sobre los países más referentes

Dentro de estas políticas en el gráfico anterior se pueden observar los países de mayor referencia dentro de esta revisión bibliográfica, en el cual se observa que más del 50% de las referencias encontradas pertenecen a Taiwán, China, Italia y Japón, mientras que por otro lado 24 países suponen menos de la mitad de referencias [España, Suecia (4%), Francia, Portugal, Alemania, Bélgica (3%), Holanda, Corea, Suiza, USA, Dinamarca, Reino Unido (2%), Austria, Noruega (1%), Finlandia, República Checa, Australia, Grecia, México, Eslovaquia, Estonia, Colombia e Indonesia (<1%)].

Para tener un mayor conocimiento sobre las cenizas volantes y de fondo se realizó una selección de los artículos de revisión más relevantes. Estos artículos de revisión recorren tanto la caracterización física, química, los tratamientos y las posibles aplicaciones que podrían tener.

Las referencias fueron buscadas a lo largo de los 10 últimos años (2005-2015).

En la figura 5 se muestra la tendencia de las referencias estudiadas a lo largo de los últimos diez años, por un lado se expone el % de referencias por año según el total de referencias estudiadas (barras azules) y por otro el número concreto de referencias por año (línea naranja).

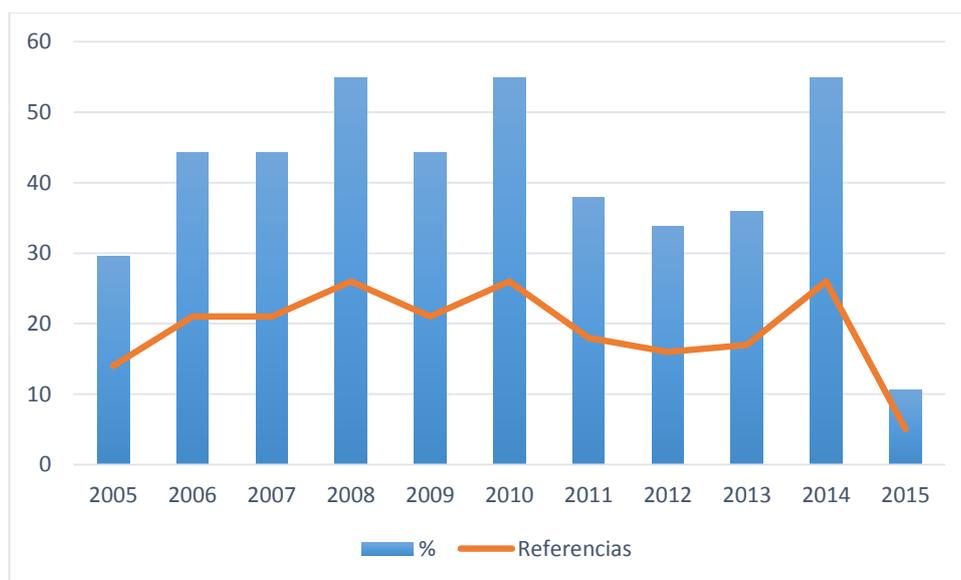


Figura 5. Distribución de referencias por años estudiados (% referencias / año, número de referencias por año)

La presente bibliografía se centra en tres puntos básicos: Caracterización, tratamientos y valorización. Por ello las referencias estudiadas fueron clasificadas acorde a dichos puntos, como se explicó anteriormente en la metodología. Dicha clasificación queda reflejada en la figura mostrada a continuación, donde se exponen la tendencia de investigación seguida a lo largo del tiempo.

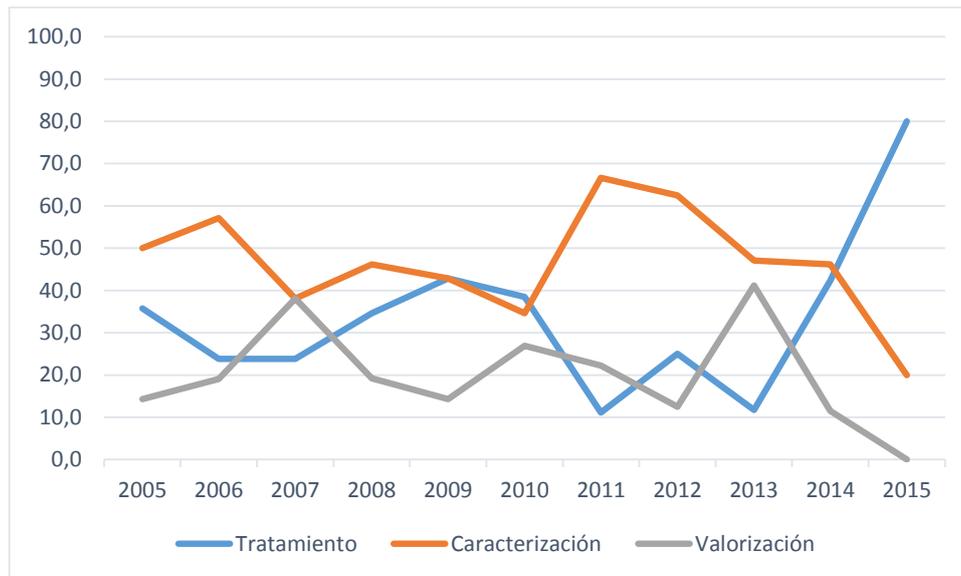


Figura 6. Tendencia de investigación a lo largo del tiempo (%) según referencias totales (2005-2015)

4.2. Caracterización de las cenizas volantes y de fondo

La composición de los residuos sólidos urbanos varía con el tiempo y de país a país, debido a las diferencias en los estilos de vida y a los procesos de reciclaje de cada país, el contenido puede llegar a variar mucho.

Generalmente, las propiedades físicas y químicas tanto de las cenizas volantes como de las cenizas de fondo, dependen principalmente de la composición de las materias primas de los residuos sólidos urbanos, las condiciones de operación, el tipo de incineración y el sistema de control de contaminación del aire.

La composición química muestra que los elementos mayoritarios son Si, Al, Fe, Mg, Ca, K, Na y Cl. Además, SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O son los óxidos más comunes encontrados en las cenizas volantes y de fondo (Tablas 4 y 5).

En cuanto a los óxidos, los más abundantes varían para las cenizas volantes y las cenizas de fondo. Por un lado en las cenizas volantes aparece que el óxido mayoritario es el CaO para gran parte de las referencias con un porcentaje entre el 20% y 45% (Tabla 3).

En cambio para el caso de las cenizas de fondo es el SiO₂ el compuesto con mayor presencia en las cenizas, con unos porcentajes en peso que varían entre aproximadamente un 30 % y un 50 %. (Tabla 4)

Tabla 2. Contenido en óxidos (%) de cenizas volantes de incineración (FA)

	Cheng et al, 2004	Alba, N et al, 2007	Haiying et al, 2007	Andreola et al, 2008	Pan et al, 2008	Yang et al, 2008	Ginés et al, 2009	Medina et al, 2010
SiO ₂	19,4	18,8	20,5	18,5	13,6	27,5	6,3	58,6
Al ₂ O ₃	10,1	12,7	5,8	7,4	0,9	11	3,5	27,4
CaO	19,7	24,3	35,8	37,5	45,4	16,6	43	0,8
Fe ₂ O ₃	1,8	1,6	3,2	2,3	3,8	5	0,6	7,3
MgO	2,8	2,6	2,1	2,7	3,2	3,1	1,4	1
K ₂ O	8,1	4,3	4	2	3,8	8,2	4,6	2,4
Na ₂ O	8,9	5,8	3,7	2,9	4,2	8,3	5,8	0,3

Tabla 3. Contenido en óxidos (%) de cenizas de fondo de incineración (BA)

	Gupta, V.K et al. 2005	Pan et al, 2008	Andreola et al, 2008	Ginés et al, 2009
SiO ₂	27,8	13,44	46,7	49,38
Al ₂ O ₃	9,9	1,26	6,86	6,58
CaO	25,9	50,39	26,3	14,68
Fe ₂ O ₃	4	8,84	4,69	8,38
MgO	3,3	2,26	2,22	2,32
K ₂ O	1,8	1,78	0,88	1,41
Na ₂ O	3,3	12,66	4,62	7,78

Para los metales pesados, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn son los metales más comúnmente encontrados tanto en las cenizas como en las cenizas de fondo, mostrando una presencia más abundante en Zn y Pb, como se muestran en las tablas siguientes (Tabla 5 para el caso de las cenizas volantes (FA) y Tabla 6 para las cenizas de fondo (BA)).

Estos metales pueden causar grandes problemas de lixiviado produciendo un gran impacto sobre el medio ambiente si no se realizan los tratamientos adecuados. Generalmente, el contenido en metales pesados es más alto en las cenizas volantes que en las cenizas de fondo, esto es debido a la vaporización de los metales durante el

proceso de combustión y al proceso de absorción en la superficie de las partículas de las cenizas volantes.

Tabla 4. Contenido en metales (mg/kg) de cenizas volantes de incineración. (FA)

	Hjelmar, 1996	Youcai et al, 2002	Wu and Ting, 2006	Chang et al, 2008	Medina et al, 2010
Cd	250-450	25.5	95	470	5
Cr	140-530	118	72	83	108
Cu	860-1400	313	570	1300	75
Ni	95-240	0.8	22	124	96
Pb	7400-19000	149	2000	10900	1075
Zn	19000-41000	4.3	6288	25800	924

Tabla 5. Contenido en metales (mg/kg) de cenizas de fondo de incineración. (BA)

	Hjelmar, 1996	Taipei, 2004	Waste and Recycled Material (2010)
Cd	1,4-40	8,5-10,7	0,3-61
Cr	230-600	323-439	13-1400
Cu	900-4800	4139-4474	80-10700
Ni	60-190	216-242	9-430
Pb	1300-5400	2474-2807	98-6500
Zn	1800-6200	4261-4535	200-12400

Las cenizas volantes presentan un contenido de cloruro mucho más alto que las cenizas de fondo (Tabla 7 y 8 respectivamente). Esto puede ser debido al lavador de cal en el sistema de control de la contaminación del aire, que elimina gases ácidos tales como HCl, resultando así en una alta cantidad de contenido de cloruro restantes en las cenizas volantes después del sistema de control de la contaminación del aire. La pérdida por ignición de las cenizas es de alrededor de 9-13% para las cenizas volantes y 3-5% de las cenizas de fondo.

Tabla 6. Contenido en cloro en las cenizas volantes (FA) (mg/kg)

Autores	Pan, J.R et al. (2008)	Andreola, F et al. (2008)	Qian, G et al. (2006)	Gines, O et al. (2009)	Yang, J et al. (2008)	Wu, H.Y. et al. (2006)	Lima, A.T et al. (2008)
mg/kg	5.749	8.670	120.000-200.000	83.800	103.200	157.200	215.000

Tabla 7. Contenido en cloro en las cenizas de fondo (BA) (mg/kg)

Autores	Qian, G et al. (2006)	Andreola, F et al. (2008)	Pan, J.R et al. (2008)	Saikia, N. et al. (2009)
mg/kg	201.100	1.760	2.876	149.500

Tabla 8. Pérdida de ignición en cenizas volantes y de fondo (wt%)

Autores	Pan, J.R et al. (2008)	Yang, J et al. (2008)	Pan, J.R et al. (2008)	Saikia, N. et al. (2009)
Tipo	FA	FA	BA	BA
wt%	9.73	13.36	3.24	4.59

4.3. Gestión de cenizas volantes y de fondo

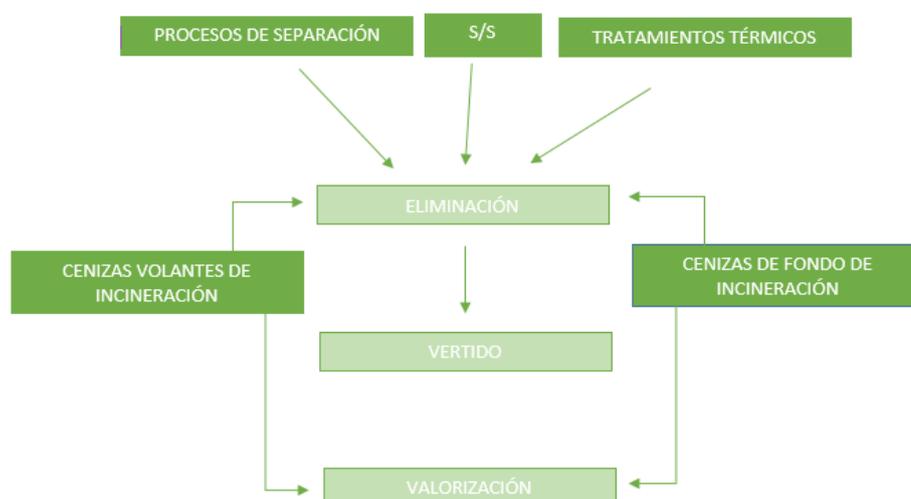


Figura 7. Gestión de las cenizas volantes y de fondo

La gestión actual de las cenizas tanto volantes como de fondo están encaminadas tradicionalmente a su eliminación mediante deposición en vertedero (con o sin etapas de acondicionamiento previas), si bien los problemas medioambientales derivados del

vertido, así como las tasas asociadas a éste, han impulsado la valorización de las cenizas volantes en otros sectores industriales.

Tradicionalmente la opción de gestión más habitual para las cenizas volantes ha sido la deposición en vertedero, con o sin tratamiento previo. Sin embargo, la deposición en vertedero está asociada a problemas medioambientales relacionados con la lixiviación a corto y largo plazo de los contaminantes, especialmente en lo que se refiere a las sales solubles, difíciles de estabilizar sin extracción acuosa previa por lo que se recomiendan pretratamientos o técnicas de estabilización/solidificación previamente a su deposición.

Los procesos de separación tienen por objeto la extracción (y en ocasiones recuperación) de las especies potencialmente contaminantes del residuo, disminuyéndose los problemas derivados de su deposición. No obstante, los procesos de separación pueden ser aplicados como etapa de preparación de las cenizas para su inclusión en otros productos. Entre los procesos de separación destacan el **lavado**, en el que se lleva a cabo la eliminación de sales solubles y metales pesados mediante el uso de agua como agente lixivante, la **lixiviación**, que emplea agentes lixiviantes distintos al agua (ácidos, quelantes...) y los **procesos electroquímicos**.

A continuación se puede ver el gráfico sobre las referencias estudiadas sobre pretratamientos y tratamientos de las cenizas volantes y de fondo.

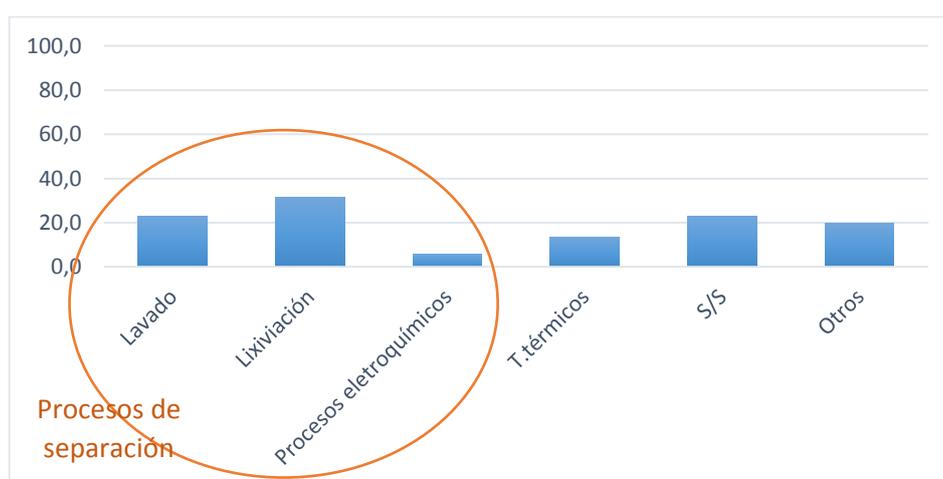


Figura 8. Pretratamientos y tratamientos de las cenizas volantes y de fondo (%)

Procesos electroquímicos

El objetivo de este proceso es eliminar los metales pesados y recuperar aún más. El proceso implica la aplicación de un potencial eléctrico para obligar a las reacciones de reducción / oxidación en el superficie del cátodo y el ánodo. Durante el proceso, los metales se depositan sobre la superficie del cátodo.

Aunque los procesos no implican adición química, las eficiencias son muy bajas. El tratamiento combinado (lavado + proceso electroquímico) muestran resultados que logran una gran reducción de metales pesados para el caso cenizas volantes. (Zhang, F.S, et al .2008)(Ferreira, C et al. 2005)

Se demostró que la remediación electrodialítica, es un método mejorado de extracción de metales pesados en las cenizas volantes en comparación con los métodos más tradicionales de extracción. Se observaron resultados para la eliminación de Cd, Pb, Zn, Cu y Cr. (Pedersen AJ et al. 2005)

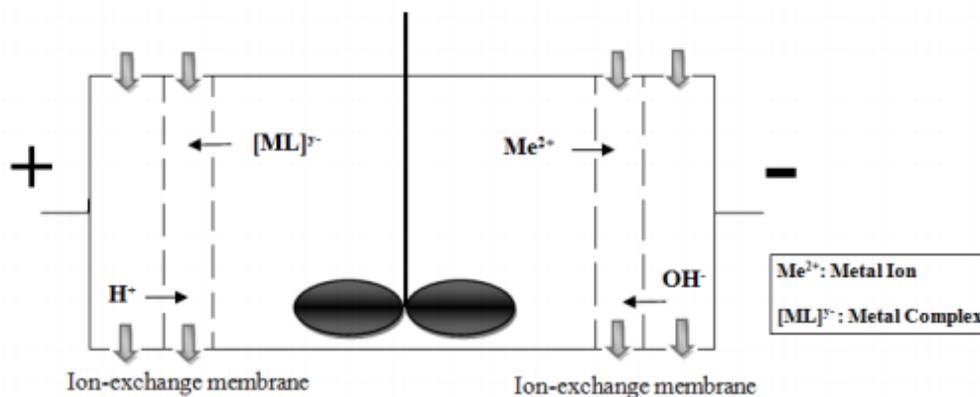


Figura 9. Principio de remediación electrodialítica (adaptado por Pedersen AJ et al. 2005))

Lavado

El objetivo en este caso es generalmente eliminar las sales solubles mediante el uso de agua como lixiviante. Este proceso puede ser utilizado como un primer paso en metodologías más elaboradas. Se ha demostrado que los métodos de lavado relacionados con el agua por sí sola no son muy apropiados, ya que grandes cantidades de metales pesados (por ejemplo, Pb y Zn) también son liberados simultáneamente con las sales solubles. Algunos químicos aditivos, tales como fosfatos solubles, se pueden utilizar para evitar este problema. (Margarida J. Quina et al.2010)

Lixiviado

El objetivo de la lixiviación es la extracción de metales pesados para una mayor recuperación, utilizando soluciones lixiviantes que no sean agua. Los principales elementos de este proceso son Pb y Zn, y con el objetivo de obtener una solución en que las concentraciones sean lo suficientemente altas para permitir una separación adicional o recuperación. Cuando la separación que se produce es demasiado baja, se pueden implementar dos posibilidades para mejorar la eficiencia de lixiviación: añadiendo aditivos químicos o reintroducción de los lixiviados en el proceso. En las referencias, muchos estudios informaron sobre el uso de agentes químicos para la lixiviación de metales pesados demostraron la influencia del pH sobre la lixiviación. (Joris J. Dijkstra et al. 2006)(Geert Cornelis et al.2006)

Tabla 9. Técnicas de procesos de separación

Proceso de separación	Residuo	Objetivo /metodología	Conclusiones	Referencia
Lavado	FA/BA	Eliminación de los componentes contaminantes y su lixiviado mediante la combinación del lavado y tamizado.	A fin de reducir la cantidad de aguas residuales y la contaminación, un tratamiento se ha desarrollado, sobre la base de tamizado en húmedo en una solución recirculada, seguido de etapas de lavado. El tamizado en húmedo tiene como objetivo obtener una fracción menos contaminada y una más contaminada; el lavado se utiliza para eliminar las sales solubles, esencialmente cloruros.	Aurore de Boom et al. (2015)
Lavado	FA/BA	lavado-calcinación-conversión de cenizas volantes lavada en el material de cemento con ceniza de fondo	La frecuencia de lavado tuvo una mayor influencia reduciendo la cantidad de residuo y el contenido de cloro de la relación L / S, el tiempo de mezclado, o la velocidad de mezcla.	Fenfen Zhu et al. (2008)

Tabla 9. Técnicas de procesos de separación. (Continuación)

Proceso de separación	Residuo	Objetivo/ metodología	Conclusiones	Referencia
Electrodialítica	FA/BA	Prueba de una célula experimental de dos compartimentos	Los porcentajes de remoción de metales pesados fueron en general bajas para Los residuos, excepto para un máximo de 61% de Cd y el 53% de Zn y 66% Pb después de 14 días de remediación en el TERCER compartimento	Gunvor M. Kirkelund et al. (2015)
Lixiviación	FA/BA	Ensayo de lote de metales pesados: TCLP método (procedimiento de lixiviación característica de toxicidad)	Se observó claramente que los metales pesados podrían ser removidos completamente o parcialmente de las cenizas a través del lavado ácido con solución diluida de HCl de modo que las cenizas restante podría ser depositan en vertederos o ser utilizadas como material de construcción. Sin embargo, la eliminación de Pb disponible por la prueba TCLP se encontró que era relativamente pobre en comparación con otros metales después del lavado ácido.	Hwa Young Lee (2007)
Lixiviación	FA/BA	Características de lixiviación de metales pesados utilizando diversos métodos de extracción: Cuatro métodos de extracción se utilizaron en este estudio , incluyendo una prueba de extracción de agua, el procedimiento de lixiviación característica de toxicidad [TCLP, , un TCLP modificado con control de pH , y un proceso de extracción química secuencial (SCE)]	Las cantidades de metales pesados lixiviados de la SCE y las pruebas TCLP modificados fueron más altos que los del agua extracción y pruebas regulares TCLP. Aunque los procesos de extracción difieren, los resultados de la SCE y pruebas TCLP modificadas son bastante similares en la liberación de metales pesados bajo condiciones ácidas. En general, el pH lixivante, y por lo tanto la extracción de pH, afectará a la disolución y precipitación de metales, en consecuencia, resulta en una pH-dependencia de la concentración de lixiviación y liberación para algunos metales pesados.	Kung-Yuh Chiang et al.(2008)

A partir de estos estudios, se puede concluir que varias técnicas de separación llevadas a cabo para los residuos de incineración, tanto FA como BA son consideradas técnicamente factible. Cuando el coste del tratamiento no es un problema, se puede encontrar una solución sostenible mediante el uso de procesos de separación. De hecho, algunas metodologías son muy eficaces en la eliminación de las sustancias peligrosas, y por consiguiente obteniendo sustancias no peligrosas. Por otro lado, los procesos de separación también pueden ser considerados como un primer paso para otros tratamientos, promoviendo estrategias de reciclaje.

Estabilización/Solidificación

Los procesos de **S / S** utilizan reactivos, el agua y otros componentes en los lodos y residuos peligrosos, para formar sólidos estables. Aditivos o aglutinantes, tales como cementos puzolánicos o materiales, se utilizan para inmovilizar componentes peligrosos presentes en los residuos.

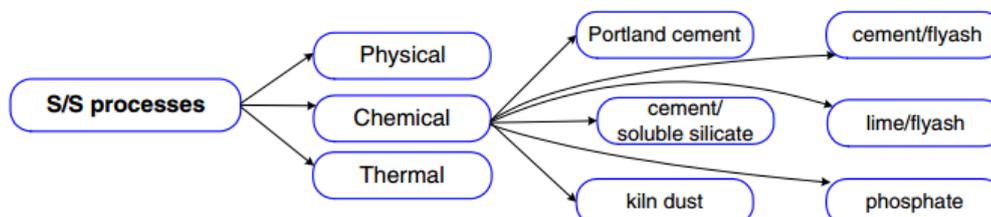


Figura 10. Resumen de los tratamientos por S/S [16]

Un análisis de las metodologías más frecuentemente estudiadas sugiere que se pueden formar tres grupos se pueden formar:

- (1) la estabilización química (Grupo A) - con la adición de compuestos químicos destinados a la fijación de las especies tóxicas. Como se puede observar en la Tabla 11.
- (2) Solidificación con aglutinantes (Grupo B) - utilizando principalmente Cemento Portland de diferentes tipos, que implica la sustitución de una cierta cantidad de cemento por otra materiales con un efecto similar pero menor precio. En la Tabla 12 se pueden encontrar referencias pertenecientes a este grupo.

(3) Varios (Grupo C) - todas las otras estrategias, la Tabla 8 (polímero de concreto, carbonatación, envejecimiento, etc.). Referencias representadas en la Tabla 13.

Tabla 10. Tratamientos S/S Grupo A. Estabilización química

S/S	Residuo	Objetivo /metodología	Conclusiones	Referencia
Estabilización con FeSO ₄ y Fe ₂ (SO ₄) ₃	FA/BA	Estudiar la eficacia de la mezcla de FeSO ₄ y Fe ₂ (SO ₄) ₃ con los residuos con el fin de estabilizar los metales pesados.	La solución se hace reaccionar con la ceniza depuradora para forma Ca ₄ Fe ₉ O ₁₇ , que recubre la superficie de las cenizas partículas y, por tanto, liberando los metales.	Hu (2005)
Estabilización mediante reacción con ácido fosfórico	FA	Reducción de los contaminantes presentes en las cenizas y su evolución mineralógico	Los resultados ayudan a comprender la reacción de fosfato utilizado para estabilizar una matriz mineral de cenizas volantes y demostrar que se forman minerales como fosfatos que pueden atrapar iones de metales pesados	B. BOURNONVILLE et al. (2006)
Estabilización química	FA/BA	Estabilización química de los residuos utilizando NaHS · xH ₂ O, H ₃ PO ₄ , Na ₂ CO ₃ , C ₅ H ₁₀ NNa ₂ · 3H ₂ O, Na ₂ O · SiO ₂ (estabilización de metales pesados)	Todos estos aditivos tienen un efecto positivo para la estabilización de Pb y Zn. En el caso de Cr, la adición de H ₃ PO ₄ , Na ₂ CO ₃ · SiO ₂ y Na ₂ O conducido a un aumento de la cantidad de lixiviado. Para K, no se detectó ninguna reducción cuando los diferentes aditivos fueron usados.	Margarida J. Quina et al.(2010)

Tabla 11. Tratamientos S/S Grupo B. Solidificación con aglutinantes

S/S	Residuo	Objetivo /metodología	Conclusiones	Referencia
Geopolimeración	FA	Unir físicamente y químicamente cenizas volantes (FA) en una matriz sólida, con el fin de reducir la movilidad contaminante.	Geopolímeros, basado en metacaolín e hidróxido de sodio / composiciones de silicato, estabilizan las cenizas volantes contra la lixiviación, muestra la liberación de metales pesados que permiten la eliminación en un vertedero para residuos no peligrosos	Isabella Lancellotti et al. (2009)
Cemento como aglutinante	FA/BA	La solidificación / estabilización (S / S) de cenizas volantes y residuos de control de la contaminación del aire de IRSU se estudió, con y sin el uso de cemento.	Experimentos de laboratorio mostraron que la escala de S/S reduce significativamente la lixiviación de metales pesados partir de cenizas volantes y de fondo.	Pieter Billen et al.(2014)

Tabla 12. Tratamientos S/S. Grupo C. Varios

S/S	Residuo	Objetivo /metodología	Conclusión	Referencia
Carbonatación	BA/APC	Evaluar el efecto de la carbonatación en la desmovilización de los componentes críticos de la residuos compactados	La carbonatación demostró ser un método ineficaz para estabilizar Cl ⁻ y SO ₄ ²⁻ . La carbonatación fue más eficaz en la desmovilización de los componentes críticos en Buenos Aires que en los residuos de APC. Reducción de las condiciones puede contribuir a estabilizar de Cr y Se en estos residuos	Todorovic and Ecke (2006)
COSMOS	FA	Un nuevo método sostenible para la estabilización de metales pesados, basado en el uso de todos los residuos, se propone. Sin productos químicos están implicados en la reacción.	Este trabajo presenta por primera vez una nueva tecnología de estabilización basado en el uso de todos los materiales de desecho. La tecnología propuesta evitar el uso de productos químicos para la estabilización y el vertido de cualquier material obtenido de MWSI	A. Bosio et al. (2014)

Hoy en día la mayoría área de investigación dinámica es en el campo de la solidificación con aglutinantes, utilizando, en particular, el cemento. En la práctica, a nivel industrial en Europa, esto es de hecho el método más importante para el tratamiento de residuos, aunque también se emplean agentes como sulfato ferroso, ácido fosfórico o fosfato que permiten disminuir la lixiviación del producto solidificado/estabilizado final.

Tratamientos térmicos

Algunos métodos térmicos también se han considerado para residuos de incineración con el fin de obtener un material que es estable con el medio ambiente. De hecho, estos procesos pueden dar lugar a una reducción significativa en el volumen de residuos, lo que requiere menos espacio cuando la opción es el depósito en vertederos.

Por otro lado, los procesos de lixiviación se reducen fuertemente ya que la porosidad del material producido es muy bajo. Debido a las altas temperaturas utilizadas, estos

métodos son muy eficientes en la destrucción de dioxinas, furanos y otros compuestos orgánicos tóxicos.

El material final se ha considerado adecuado para reutilizar en aplicaciones prácticas, debido al hecho de que aquellos procesos térmicos conducen a la incorporación de elementos de preocupación en la matriz de vidrio a través de delimitación químico y / o encapsulación. Además de los procesos descritos, la reacción de CaO (soluble) a CaO (insoluble) a altas temperaturas conduce a una disminución en el valor y por lo tanto a un cambio en la solubilidad de los metales pesados.

En general, los métodos térmicos se pueden dividir en tres grupos:

- (1) La sinterización - se aumenta la temperatura hasta que las especies químicas de interés pueden lograr una reconfiguración. Por lo general, las temperaturas implicadas en este proceso están en el rango de 900 a 1000 °C, y se obtiene el producto una densidad mayor. Referencias mostradas en la Tabla 14.

Tabla 13. Tratamientos térmicos. Sinterización

Residuo	Objetivo /metodología	Conclusión	Referencia
FA	La sinterización es un método alternativo para reciclar FA, y es un método viable para producir los vidrios y cerámicos de vidrio de residuos de incineración.	El comportamiento de sinterización de FA con un horno rotatorio y buscó una solución para reducir las concentraciones de metales pesados en niveles aceptables, considerando tabiques metálicos.	Annalisa Zacco et al. (2014)
FA	Obtención de minerales más estables y con menor contenido de toxicidad.	El método hidrotérmico ofrece una solución prometedora a la reducción de los riesgos ambientales de los depósitos de cenizas volantes y se abre oportunidades para dar valor a las cenizas volantes como recurso.	A.P Bayueso et al. (2008)

- (2) La vitrificación - el material se funde con aditivos (precursores de vidrio) con el fin de fijar los contaminantes en la matriz final (alúmina-silicatos). Las temperaturas implicadas son 1100-1500 °C y el material es enfriado para formar una sola fase sólida (amorfo y homogénea). Dado que el método es caro, este tratamiento no

está generalizado para los residuos de incineración. Se muestran las referencias en la Tabla 15.

Tabla 14. Tratamientos térmicos. Vitrificación

Residuo	Objetivo /metodología	Conclusiones	Referencia
FA/BA	El material de desecho es derretido con aditivos (precursores de vidrio) con el fin de solucionar los contaminantes en la matriz final (alumino-silicatos).	Mecanismos de retención son la unión química de las especies inorgánicas en los residuos con materiales formadores de vidrio, tales como sílice, y la encapsulación de los constituyentes de residuos por una capa de materiales vítreos.	Annalisa Zacco et al. (2014)
FA	Varias muestras de cenizas volantes recogidas de diferentes plantas de incineración de residuos sólidos municipales fueron vitrificadas utilizando un horno de plasma térmico a 1400-1500.	Tratamiento de plasma térmico es opcional y una alta tecnología efectiva para disponer cenizas volantes de incineración de residuos sólidos urbanos, y la producción de escorias es estable y lo suficientemente segura para el medioambiente.	Qin Wang et al.(2009)

(3) Punto de fusión (o de fusión) - aunque el proceso es similar a la vitrificación, en este caso no se utilizan aditivos, y el vidrio formado puede no ser homogénea. Referencias en Tabla 16.

Tabla 15. Tratamientos térmicos. Fusión

Residuo	Objetivo /metodología	Conclusión	Referencia
FA	Fases metálicas específicas separadas del producto fundido y reciclar estas metales después de refinamiento	Los elementos inorgánicos fueron reorganizados después la fusión de tratamiento de acuerdo con su temperatura de ebullición, en particular, Si, Al, Ca, Fe, Mg, Mn, P, Cr y Sn, que tienen altos puntos de ebullición, se convirtieron en la escoria, mientras que los elementos tales como Cd y Pb, que tienen un punto de ebullición bajo, eran encontrados en los gases de escape.	Annalisa Zacco et al. (2014)
BA	Procesado por fusión para recuperar la escoria puzolánica reactiva, que puede entonces utilizarse en SBC para reemplazar parcialmente el cemento.	Tiempos de fraguado inicial y final de la pasta de cemento aumentado a medida que la cantidad del cemento sustituido por las cenizas de fondo de incineración aumentan	K.L. Lin et al. (2006)

La principal conclusión es que, a través de estos tratamientos térmicos, un material puede volverse estable con el medio ambiente para así poder ser utilizado en nuevas aplicaciones, incluyendo su uso como materia prima secundaria. El inconveniente de este procedimiento es el alto costo que puede ser involucrarlos, debido a la entrada de alta potencia requerida. Es importante destacar que los procesos térmicos constituyen una de las mejores métodos de destrucción de los compuestos orgánicos traza altamente tóxicos (por ejemplo, las dioxinas y furanos).

4.4. Vías de valorización emergente

Después de los tratamientos anteriores, las cenizas son mucho más fáciles de usar. Para determinar la posibilidad de aplicación, hay tres factores principales para abordar: la idoneidad para el procesamiento, rendimiento técnico y el impacto ambiental.

Tabla 16. Aplicaciones de las cenizas volantes y de fondo.

Aplicación	Residuo	Composición	País	Referencia
Pavimentación	BA	20% y 10% BA	Italia	Emanuele Toraldo et al.(2013)
Pavimentación	BA	-	España	Maria Izquierdo et al.(2007)
Cemento	FA	48 wt % FA	Italia	Maria Anna Cinquepalmi et al.(2007)
Hormigón	BA	75 % FA	Italia	Monica Ferraris et al.(2008)
Cemento	FA/BA	1.75% FA 3.5% BA	Taiwan	Pan, J.R.; et al (2008)
Cemento	FA/BA	44%	Japón	Saikia, N et al.(2007)
Hormigón	BA	-	Italia	Ferraris, M.; et al .(2009)
Cerámicos y vidrios	FA/BA	50 % BA 5% FA 53% BA 4% FA	Italia	F.Andreola et al. (2007)
Cerámicos y vidrios	FA	-	China	Haiying et al. 2007
Cerámicos y vidrios	FA	90wt % FA 72 wt% FA	China	Jiakuan Yang et al.(2009)
Cerámicos Y vidrios	FA	-	China	Yang, J.; et al.(2009)
Absorbente colorantes	BA	-	India	Gupta, V.K et al.(2005)
Absorbentes	BA	50-75 % FA	Grecia	A. Papandreou et al. (2007)

En la Tabla 17 se pueden encontrar hasta 4 aplicaciones distintas de reutilización de cenizas volantes y de fondo.

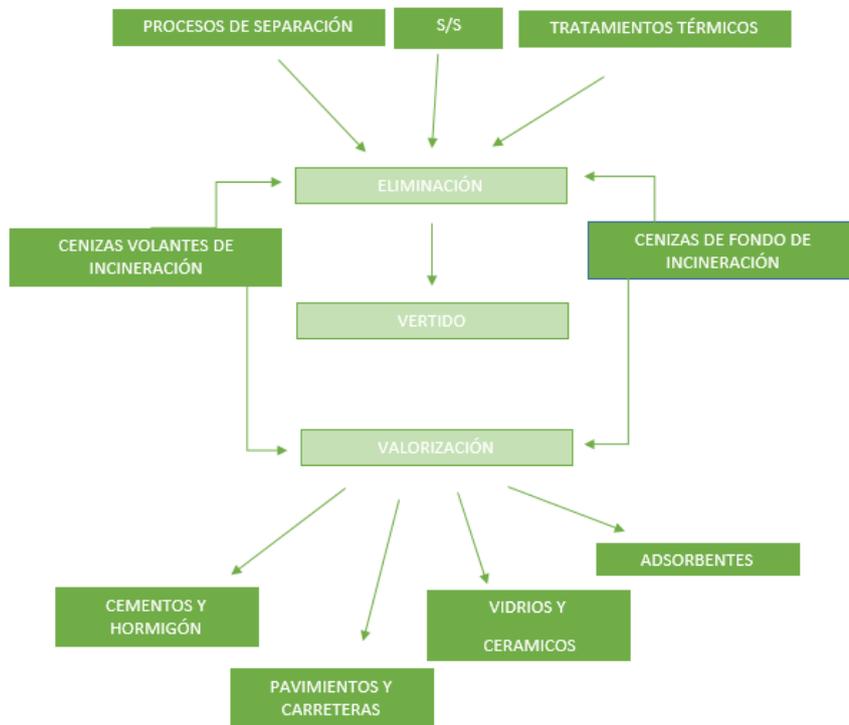


Figura 11. Gestión y valorización de cenizas volantes y de fondo

Cemento y hormigones

Las cenizas de incineración contienen compuestos como CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 . La composición de las cenizas volantes y las cenizas de fondo es similar a la composición de materias primas para la producción de cemento, por lo tanto, podría ser una posible sustitución de materia prima en la producción de cemento Portland.

La adición de cenizas de incineración para la producción de hormigones acortaría el tiempo de fraguado y disminuiría la capacidad de trabajo, por lo que se sugiere el yeso como un agente de dilatación.

La producción de cemento (Figura 12) consume enormes cantidades de energía y emite grandes cantidades de dióxido de carbono, que es una de las causas principales dentro de la industria que provocan el calentamiento global. Una de las ventajas de la utilización de cenizas volantes y de fondo como materia prima del cemento, es la reducción de las emisiones de dióxido de carbono, minimizando así el efecto del calentamiento global.

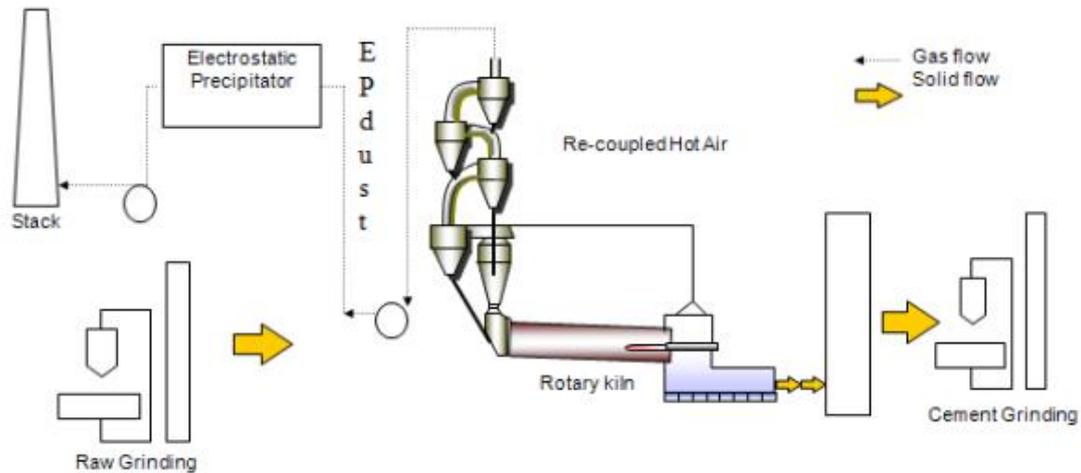


Figura 12. Diagrama del proceso de producción del cemento

Como se utiliza una gran cantidad de energía para descomponer el carbonato de calcio (CaCO_3) a cal (CaO), se emite una gran cantidad de dióxido de carbono durante el proceso. Debido al hecho de que IRSU cenizas de fondo y cenizas volantes se compone de cal en vez de carbonato cálcico carbonato, se puede reducir la emisión de dióxido de carbono.

Aun así, hay varios problemas técnicos en esta aplicación; el alto contenido de cloruro afectará a la calidad del producto, y el efecto del ciclo continuado en los hornos de cemento causará obstrucción rápida y corrosión en el interior de los intercambiadores de calor. (Pan, J.R et al 2008)

La alta concentración de metales pesados también será una preocupación ambiental. Se recomienda realizar un pre-tratamiento de las cenizas para eliminar el contenido de cloruros y metales pesados, además la cantidad de cenizas de incineración añadidas al proceso deben ser controladas cuidadosamente para asegurar la seguridad de los procesos, así como la calidad del producto. (Boghetich, G. et al 2005).

Para el comportamiento de hidratación del ladrillo de cemento, se ha encontrado que mejora contenido de metal alcalino en la hidratación y el contenido de Zn, Pb y Cd retarda la velocidad de hidratación del cemento. Después del lavado como pre-tratamiento de las cenizas volantes y de fondo, el contenido de metal alcalino se reduce y la velocidad de hidratación de las cenizas lavadas presentes en los ladrillos es inferior a las cenizas primas que contienen los ladrillos. Las cenizas volantes contiene

altas cantidades de cloruro y de sulfato, que revela la formación de una fase en el período de hidratación, por tanto, la reacción de hidratación se ralentiza cuando aumenta la cantidad de cenizas volantes. (Saikia, N et al .2007).

Por otro lado cuando se realiza la tecnología S / S, las cenizas volantes se puede aplicar potencialmente como un reemplazo del cemento o como un agregado. La adición de hasta el 50% de cenizas volantes tratadas no afectará a la fuerza y dureza, y la propiedad de lixiviación es aceptable para el uso en la construcción de carreteras. Sin embargo, la durabilidad a largo plazo aún no se ha determinado (Aubert, J.E et al.2006).

Es posible utilizar las cenizas de fondo como agregado del hormigón. Los resultados muestran que las cenizas de fondo tratadas (inmersión en hidróxido de sodio durante 15 días) pueden reemplazar hasta el 50% de la grava en el hormigón sin afectar a la durabilidad. El Cracking y la hinchazón pueden ocurrir si la ceniza no es tratada, debido a la reacción entre aluminio metálico y cemento. Las cenizas volantes también podrían ser utilizadas como un ligero agregado del hormigón mediante el procesamiento en gránulos. Esto podría ser adecuado para aplicaciones no estructurales tales como paredes interiores para fines de aislamiento .También, el uso de cemento solidificado de cenizas volantes ha demostrado ser aptos para una reutilización segura como agregado artificial en morteros de cemento Portland. (Charles H. K. Lam et al. 2010).

Estos últimos mostraron bajas tasas de lixiviación de metales pesados, de alta resistencia a la compresión (hasta 36 N / mm²) después de 90 días de curado sin demora en el desarrollo de la resistencia mecánica de los morteros (Cinquelpalmi, M.A et al.2008).

El tratamiento de lavado de agua puede mejorar la reutilización de las cenizas volantes en el hormigón como agregado, bajo la condición de una presión compacta de 28 N/mm² y una temperatura de sinterización de 1140° C durante 60 minutos (Charles H. K. Lam et al. 2010).

El problema de lixiviación es la principal preocupación ambiental de esta alternativa. Aunque muchos resultados muestran que la lixiviación de metales pesados no es

significativa, la lixiviación de metales pesados inesperada puede ocurrir cuando se derriba la estructura o entra en contacto con la lluvia.

Los intentos en el uso de grandes cantidades de ceniza en el hormigón de cemento se han desarrollado en Japón: conocido como ECOCEMENT (Saikia, N. et al.2007). Otro proceso, conocido como el proceso de co-combustión (Lee, V.K.C. et al.2007) inicialmente utiliza la energía de incineración de los residuos sólidos urbanos de piedra caliza calcinada a cal en la producción del cemento Portland y luego utiliza una mezcla de cenizas volantes y las cenizas de fondo como parte de la alimentación de la harina cruda de los ladrillos.

Pavimentos y carreteras

Un pavimento de carretera típica se compone de varias capas, que se componen de diferentes tipos de materiales. La Figura 7 se muestra la estructura de un pavimento de la carretera. La capa superior de un pavimento esta sellada. Debe ser uniforme, duradera y altamente resistente al deslizamiento. Los materiales más comunes para de dicha capa son de tratamiento superficial bituminoso y hormigón de asfalto. La capa de debajo de la que lleva transito es la capa base, que es la capa de carga-extensión principal. La base puede consistir en premezclada de asfalto, hormigón de cemento, grava granular, roca triturada, o materiales estabilizados con cal o cemento. La capa debajo de la capa de base es la sub-base, que normalmente se construye a partir de gravas naturales o a partir de materiales estabilizados con cemento o cal. La capa más baja es sub-base, que actúa como una base para el pavimento. (Robinson, R et al.2005).

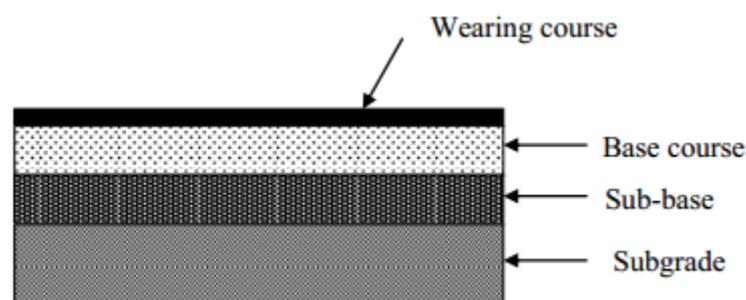


Figura 13. Estructura típica del pavimento

Una posible forma de reutilizar las cenizas de fondo es reemplazar los materiales de la capa base y sub-base. El uso de IRSU cenizas de fondo como pavimento de la carretera proporciona un método sencillo y directo para reutilizar las cenizas de incineración. Varios tramos de carretera han utilizado cenizas de fondo en carretera construcción (Francois, D et al. 2009). Una carretera de ensayo fue construido en Suecia y las cenizas de fondo se utilizaron como una sub-base (Ore, S et al.2009). Se encontró que la sustitución de grava en la base de la carretera con las cenizas de fondo no afectó la liberación de Ca, Co, Fe, Mn, Ni, NO₃-N (nitrato-nitrógeno) y Pb con el medio ambiente. Otra estudio de tres años sobre la utilización de cenizas de fondo de pavimento de la carretera en Francia, mostró concentraciones de metales pesados, fluoruros y valores de pH en el lixiviado estaban por debajo de los límites autorizado para el agua potable. Indicó que es seguro de usar las cenizas de fondo para la construcción de carreteras.

En Japón, una planta de fundición y producción de piedra fue construida para utilizar las cenizas volantes para la producción de piedra. Una de las aplicaciones de la piedra producida es para pavimentos permeables, con 85% en peso de la piedra en tierra.

La principal preocupación de estas aplicaciones es la lixiviación de contaminantes en suelos y aguas subterráneas ya que plantea un problema ambiental. Una posible solución podría ser pre-tratamiento de las cenizas por el lavado de reducir la concentración de contaminantes (Aberg, A et al.2006). Se ha informado de que el uso de las cenizas volantes estabilizadas con cemento, que se utiliza como material de construcción de la base de carreteras, no cumplió con la normas de lixiviación de material de construcción. En contraste, el lavado previo de estabilizado de las cenizas volantes puede satisfacer la mayoría de las normas graves.

Vidrios y cerámicos

Las cenizas de fondo y cenizas volantes también se ha utilizado como materia prima para la producción de vidrios, vitro-cerámicos y cerámica a alta temperatura (> 1.000°C). Como las cenizas de fondo y cenizas volantes contienen alto contenido de SiO₂, Al₂O₃ y CaO, es posible utilizar parte de cenizas de fondo y de cenizas volantes para sustituir parte de la arcilla en la producción de cerámicos sin pre-tratamiento.

(*Andreola et al. 2007*). También estudiaron la viabilidad de utilizar las cenizas de fondo y cenizas volantes para la producción de baldosas de cerámica. Se encontró que la introducción de hasta un 20% en peso de cenizas de fondo en el cuerpo de cerámica no lo hizo cambiar sustancialmente los comportamientos mineralógicas y térmicas del cuerpo cerámico. Sin embargo, el uso de cenizas volantes pueden producir problemas en las propiedades del cuerpo cerámico producido y puede ser debido al alto contenido en cloruro y el contenido orgánico en las cenizas volantes. *Haiying et al. 2007* mostró resultados diferentes para la utilización de cenizas volantes en la producción de azulejos de cerámica, demostraron que con un 20% cenizas volantes añadido, las baldosas de cerámica pueden registrar una alta resistencia a la compresión y baja absorción de agua después de 960°C de sinterización. La cantidad de metales pesados tóxicos en la lixiviación se redujo a una décima parte. La ceniza puede ser utilizada para la producción de baldosas cerámicas con una durabilidad aceptable, obteniéndose incluso cuando las baldosas contienen un 50% de cenizas de incineración de residuos sólidos urbanos.

La vitrificación, es una de las técnicas más eficientes empleadas para el tratamiento de residuos peligrosos, es capaz de fijar los metales pesados o sustancias tóxicas en la estructura amorfa de vidrio. Al mismo tiempo, las sustancias tóxicas como dioxinas se descomponen cuando se funde por encima de 1300 °C. Se utiliza la ceniza vitrificada como material de base de la carretera, chorro de arena, terraplenes, en la producción de la construcción y decorativo materiales como cerámica, ladrillos y bloques de pavimento permeables al agua.

Las propiedades mecánicas y térmicas de los vitrocerámicos son superiores a los de matriz de vidrio. Debido a sus propiedades distintas, dentro de los vitrocerámicos se pueden encontrar una amplia variedad de aplicaciones.

Numerosos residuos basados en silicato han sido considerados para la producción de materiales vitrocerámicos. (*Rawlings, R.D et al. 2006*) En dicha referencia se ha encontrado que el vidrio producido a partir de la vitrificación de cenizas de incineración es adecuado para la producción de materiales vitrocerámicos debido a sus características mecánicas y térmicas. En general las cenizas vitrificadas se han utilizado con éxito como materia prima para la producción de vitrocerámicos. (*Yang, J et al.*

2009) (Aloisi, M et al. 2004). Las propiedades de las cerámicas de vidrio fueron muy afectadas por el tiempo de tratamiento térmico y la temperatura. Yang demostró la reutilización de las cenizas volantes para la producción de cerámica de vidrio a una baja temperatura de fusión por el uso de aditivos. La temperatura de fusión puede ser disminuida significativamente de 1500°C a 1200°C, lo que hace que el proceso sea menos intensivo en energía y respetuoso con el medio ambiente ya que se consume menos energía. (Yang, J et al. 2009).

Adsorbentes

Las técnicas de adsorción son ampliamente utilizadas como alternativas de bajo costo al carbón activo. Las cenizas de fondo de IRSU se han empleado para la eliminación de nitrógeno y metales pesados de las aguas residuales. (Gupta, V.K et al. 2005).

Una de las principales preocupaciones para el uso de cenizas de incineración para el tratamiento de aguas residuales es la lixiviación de metales pesados, la presencia de metales pesados en el agua es un problema serio debido a su alta toxicidad. El uso de cenizas volantes de IRSU como adsorbente es menos común que la ceniza de fondo. Esto puede deberse al hecho de que los metales pesados procedentes de las cenizas volantes son más tóxicos, lo que reduce la posibilidad de utilizarlo como un adsorbente.

La capacidad de intercambio catiónico de las cenizas de fondo es la cantidad total de la capacidad intercambiable (miliequivalentes por 100 gramos de materiales adsorbentes). Es importante comparar las capacidades de adsorción para diferentes cenizas. Se ha encontrado que la capacidad de intercambio catiónico (CEC) en gran medida depende del tamaño de las partículas de las cenizas de fondo. Las características de adsorción de metales pesados gracias a diferentes tamaños de partículas de cenizas de fondo se ha investigado. La tasa de adsorción de metales pesados aumenta con la disminución del tamaño de partícula de ceniza, lo que significa que la tasa de adsorción es proporcional al tamaño de partícula y específica de la superficie de las cenizas de fondo.

El estudio de la eliminación de colorantes de aguas residuales utilizando cenizas de fondo de IRSU de Bélgica (Gupta, V.K et al. 2005) los resultados mostraron que la

absorción de colorantes son de hasta 98% por el método batch y la capacidad de adsorción es comparable a otros adsorbentes disponibles. El pH óptimo para la adsorción de colorante varía del 5 al 8 y depende de la estructura química de las moléculas de colorante. Se sugiere que la ceniza de fondo de bajo costo puede ser utilizado para la eliminación de colorantes de las aguas residuales.

5. CONCLUSIONES

Las cenizas volantes y de fondo de incineradoras de residuos sólidos urbanos se catalogan como residuos peligrosos dentro del marco legislativo europeo en base a sus contenidos de sales solubles y metales pesados principalmente.

Actualmente la gestión habitual tanto de cenizas volantes como de fondo es la deposición en vertederos. Las nuevas políticas medioambientales están encaminadas a impulsar el reciclaje de los residuos y su uso como materia prima alternativa en otros sectores industriales. Es por ello que en los últimos años se está impulsando la valorización de las cenizas volantes y cenizas de fondo en distintos procesos.

En la presente revisión se escogieron como palabras claves “fly ash, bottom ash, MSWI, waste, valorisation ...” gracias a las cuales se encontraron hasta 219 referencias, de las cuales fueron seleccionadas 68 como referencias de mayor impacto e interés, procediendo así a un a un estudio más exhaustivo de las mismas.

Durante la revisión se comprobó que tanto de las cenizas volantes como las cenizas de fondo, son residuos peligrosos, debido a su alto contenido en metales pesados como Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn, y además de su contenido en cloruros. Cabe destacar que las cenizas volantes poseen mayor peligrosidad que las cenizas de fondo debido a una composición con mayor cantidad de cloruros.

Dentro de los pretratamientos y tratamientos destacan tres grupos principales: Procesos de separación, estabilización/solidificación y tratamientos térmicos, donde se buscan la eliminación de las especies potencialmente contaminantes del residuo, disminuyendo así los problemas derivados de su deposición. Por otro lado, gracias a ellos las cenizas volantes y las cenizas de fondo se convierten en residuos más estables para su uso como materia prima en nuevos procesos.

La reutilización de los residuos está encaminada hacia cuatro vías principales de valorización: cementos y hormigones, cerámicos y vidrios, pavimentación y absorbentes, destacando entre ellos la obtención de productos cerámicos vidriados y su inclusión en matrices de cemento como principales aplicaciones. Actualmente hay

más aplicaciones para las cenizas volantes y cenizas de fondo pero se encuentran todavía bajo investigación.

Se puede considerar que a pesar de los avances en pretratamientos y tratamientos para la eliminación de los contaminantes claves de este tipo de residuos, existe todavía una gran tendencia hacia la deposición en vertederos, en vez de su inclusión como materia prima en nuevos procesos industriales. Esto puede ser debido tanto a los costes extras que generan los pretratamientos de estabilización de los residuos, como a problemas técnicos generados por una eliminación incompleta de metales pesados y cloruros.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Lima, A.T.; Ottosen L.M.; Pedersen, A.J.; Ribeiro, A.B. Characterization of fly ash from bio and municipal waste. *Biomass Bioenerg.* 2008 32, 277-282
- [2] Wu, H.Y.; Ting, Y.P. Metal extraction from municipal solid waste (MSW) incinerator fly ash—Chemical leaching and fungal bioleaching. *Enzyme Microb. Technol.* 2006, 38, 839-847
- [3] Gines, O.; Chimenos, J.M.; Vizcarro, A.; Formosa, J.; Rosell, J.R. Combined use of MSWI bottom ash and fly ash as aggregate in concrete formulation: Environmental and mechanical considerations. *J. Hazard. Mater* 2009, 129, 274-281.
- [4] Yang, J.; Xiao, B.; Boccaccini, A.R. Preparation of low melting temperature glass-ceramics from municipal waste incineration fly ash. *Fuel* 2009, 88, 1275-1280.
- [5] Qian, G.; Cao Y.; Chui, P.; Tay, J. Utilization of MSWI fly ash for stabilization/solidification of industrial waste sludge. *J. Hazard. Mater.* 2006, 129, 274-281.
- [6] Pan, J.R.; Huang, C.; Kuo, J.J.; Lin, S.H. Recycling MSWI bottom and fly ash as raw materials for Portland cement. *Waste Manag.* 2008, 28, 1113-1118
- [7] Andreola, F.; Barbieri, L.; Hreglich, S.; Lancellotti, I.; Morselli, L.; Passarini, F.; Vassura, I. Reuse of incinerator bottom and fly ashes to obtain glassy materials. *J. Hazard. Mater.* 2008, 153, 1270-1274.
- [8] Saikia, N.; Kato, S.; Kojima, T. Production of cement clinkers from municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash. *Waste Manag.* 2007, 27, 1178-1189.
- [9] Charles H. K. Lam, Alvin W. M. Ip, John Patrick Barford and Gordon McKay. Use of Incineration MSW Ash: A Review. *Sustainability* 2010, 2, 1943-1968.
- [10] Cheng, T.W.; Chen, Y.S. Characterisation of glass ceramics made from incinerator fly ash. *Ceram. Int.* 2004, 30, 343-349.
- [11] Haiying, Z.; Youcai, Z.; Jingyu, Q. Study on use of MSWI fly ash in ceramic tile. *J. Hazard. Mater.* 2007, 141, 106-114.

- [12] A. Medina, P. Gamero, X. Querol et al. Fly ash from a Mexican mineral coal I: Mineralogical and chemical characterization. *Journal of Hazardous Materials* 181 (2010) 82–90.
- [13] Zhang, F.S.; Itoh, H. Extraction of metals from municipal solid waste incinerator fly ash by hydrothermal process. *J. Hazard. Mater.* 2006, 136, 663–670.
- [14] Ferreira, C.; Jensen P.; Ottosen, L; Ribeiro, A. Removal of selected heavy metals from MSW fly ash by the electrodialytic process. *Eng. Geo.* 2005, 77, 339–347.
- [15] Pedersen AJ, Ottosen LM, Villumsen A. Electrodialytic removal of heavy metals from municipal solid waste incineration fly ash using ammonium citrate as assisting agent. *J Hazard Mater* (2005) 122:103–109
- [16] Margarida J. Quina et al. Treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration: An overview. *Waste Management* 28 (2008) 2097–2121.
- [17] Joris J. Dijkstra et al. The leaching of major and trace elements from MSWI bottom ash as a function of pH and time. *Applied Geochemistry* 21 (2006) 335–351
- [18] Geert Cornelis et al. Antimony leaching from uncarbonated and carbonated MSWI bottom ash. *Journal of Hazardous Materials A* 137 (2006) 1284–1292
- [19] Alba, N.; Vázquez E.; Gasso, S.; Baldasano, J.M. Stabilization/solidification of MSW incineration residues from facilities with different air pollution control. Durability of matrices versus carbonation. *Waste Manag.* 2001, 21, 313–323.
- [20] Margarida J. Quina et al. Chemical stabilization of air pollution control residues from municipal solid waste incineration. *Journal of Hazardous Materials* 179 (2010) 382–392.
- [21] Xue J, Wang W, Wang Q, Liu S, Yang J, Wui T Removal of heavy metals from municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash by traditional and microwave acid extraction. *J ChemTechnol Biotechnol* (2010) 85:1268–1277
- [22] Hu, S.-H., Stabilization of heavy metals in municipal solid waste incineration ash using mixed ferrous/ferric sulfate solution. *J. Hazard. Mater* (2005) 123 (1–3), 158–164.

- [23] B. BOURNONVILLE et al. STABILIZATION OF MINERALS BY REACTION WITH PHOSPHORIC ACID Evolution of Model Compounds. *Process Safety and Environmental Protection*,(2006) 84(B2): 117– 124
- [24] Isabella Lancellotti et al. Chemical stability of geopolymers containing municipal solid waste incinerator fly ash. *Waste Management* 30 (2010) 673–679
- [25] Pieter Billen et al. Comparison of solidification/stabilization of fly ash and air pollution control residues from municipal solid waste incinerators with and without cement addition. *J Mater Cycles Waste Manag* (2015) 17:229–236
- [26] Todorovic, J., Ecke, H. Demobilisation of critical contaminants in four typical waste-to-energy ashes by carbonation. *Waste Manage* (2006) 26 (4), 430–441.
- [27] A. Bosio et al. A sustainable technology for Pb and Zn stabilization based on the use of only waste materials: A green chemistry approach to avoid chemicals and promote CO₂sequestration. *Chemical Engineering Journal* 253 (2014) 377–384
- [28] Jung, C.H., Matsuto, T., Tanaka, N. Behavior of metals in ash melting and gasification-melting of municipal solid waste (MSW). *Waste Manage.*(2005) 25 (3), 301–310
- [29] Annalisa Zacco et al. Review of fly ash inertisation treatments and recycling. *Environ Chem Lett* (2014) 12:153–175
- [30] A. Trujillo-Vazquez et al. Characterization of a mineral waste resulting from the melting treatment of air pollution control residues. *Waste Management* 29 (2009) 530–538
- [31] K.L. Lin et al. Pozzolanic characteristics of pulverized incinerator bottom ash slag. *Construction and Building Materials* 22 (2008) 324–329.
- [32] Ming-Yen Wey et al. Thermal treatment of the fly ash from municipal solid waste incinerator with rotary kiln. *Journal of Hazardous Materials* B137 (2006) 981–989.
- [33] Qin Wang et al. Application of thermal plasma to vitrify fly ash from municipal solid waste incinerators. *Chemosphere* 78 (2010) 626–630.
- [34] A.P Bayueso et al. Hydrothermal processing of MSWI Fly Ash-towards new stable minerals and fixation of heavy metals. *Journal of Hazardous Materials* 167 (2009) 250–259.

- [35] Gunvor M. Kirkelund. Electrodialytic removal of heavy metals and chloride from municipal solid waste incineration fly ash and pollution control residue in suspension- test of a new two compartment experimental cell. *Electrochimica Acta* 2015.
- [36] Ferraris, M.; Salvo, M.; Ventrella, A.; Buzzi, L.; Veglia, M. Use of vitrified MSWI bottom ashes for concrete production. *Waste Manag.* 2009, 29, 1041-1047
- [37] Yang, J.; Xiao, B.; Boccaccini, A.R. Preparation of low melting temperature glass-ceramics from municipal waste incineration fly ash. *Fuel* 2009, 88, 1275-1280
- [38] Gupta, V.K.; Ali, I.; Saini, V.K.; Van Gerven, T.; Van Bruggen, B.D.; Vandecasteele, C. Removal of dyes from wastewater using bottom ash. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2005, 44, 3655-3664.
- [39] Boghetich, G.; Liberti L.; Notarnicola M.; Palma, M.; Petruzzelli, D. Chloride extraction for quality improvement of municipal solid waste incinerator ash for the concrete industry. *Waste Manag. Res.* 2005, 23, 57-61.
- [40] Aubert, J.E.; Husson, B.; Sarramone, N. Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement. Part 1: Processing and characterization of MSWI fly ash. *J. Hazard. Mater.* 2006, 136, 624-631.
- [41] Cinquepalmi, M.A.; Mangialardi, T.; Panei, L.; Paolini, A.E.; Piga, L. Reuse of cement-solidified municipal incinerator fly ash in cement mortars: Physico-mechanical and leaching characteristics. *J. Hazard. Mater.* 2008, 151, 585-593
- [42] Lee, V.K.C.; Kwok, K.C.M.; Cheung, W.H.; McKay, G. Operation of a municipal solid waste co-combustion pilot plant. *Asia-Pac. J. Chem. Eng.* 2007, 2, 631-639
- [43] Robinson, R.; Thagesen, B. *Road Engineering for Development*; Spon: London, UK, 2005; p. 252
- [44] Francois, D.; Pierson, K. Environmental assessment of a road site built with MSWI residue. *Sci. Total. Environ.* 2009, 407, 5949-5960.
- [45] Ore, S.; Todorovic, J.; Ecke, H.; Grennberg, K.; Lidelow, S.; Lagerkvist, A. Toxicity of leachate from bottom ash in a road construction. *Waste Manag.* 2007, 27, 1626-1637
- [46] Aberg, A.; Kumpiene, J.; Ecke, H. Evaluation and prediction of emissions from a road built with bottom ash from municipal solid waste incineration (MSWI). *Sci. Total. Environ.* 2006, 355, 1-12.

- [47] Aloisi, M.; Karamanov, A.; Pelino, M. Sintered glass—Ceramic from municipal solid waste incinerator ashes. *J. Non-Cryst. Solids* 2004, 345-346, 192-196 [47]
- [48] Rawlings, R.D.; Wu, J.P.; Boccaccini, A.R. Glass-ceramics: Their production from wastes—A Review. *J. Mater. Sci.* 2006, 41, 733-761.
- [49] Charles H. K. Lam et al. Use of Incineration MSW Ash: A Review Sustainability 2010, 2, 1943-1968.
- [50] Banar, M.; Zkan, A. Characterization of the municipal solid waste in Eskisehir City, Turkey. *Environ. Eng. Sci.* 2008, 25, 1213-1219.
- [51] Moy, P.; Krishnan, N.; Ulloa, P.; Cohen, S.; Brandt-Rauf, P.W. Options for management of municipal solid waste in New York City: A preliminary comparison of health risks and policy implications. *J. Environ. Manag.* 2008, 87, 73-79.
- [52] Okada, T.; Tojo, Y.; Tanaka, N.; Matsuto, T. Recovery of zinc and lead from fly ash from ash-melting and gasification-melting processes of MSW—Comparison and applicability of chemical leaching methods. *Waste Manag.* 2007, 27, 69-80.
- [53] Reijnders, L. Disposal, uses and treatments of combustion ashes: A review. *Resour. Conserv. Recycl.* 2005, 43, 313-336
- [54] Skodras, G.; Grammelis, P.; Kakaras, E.; Karangelos, D.; Anagnostakis, M. ; Hinis, E. Quality characteristics of Greek fly ashes and potential uses. *Fuel Process. Technol.* 2007, 88, 77-85.
- [55] Dhadse, S.; Kumari, P.; Bhagia, L.J. Fly ash characterization, utilization and government initiatives in India—A review. *J. Sci. Ind. Res.* 2008, 67, 11-18.
- [56] Choi, K.I.; Lee, D.H. PCDD/DF in leachates from Korean MSW landfills. *Chemosphere* 2006, 63, 1353-1360.
- [57] Zhang, H.J.; Ni, Y.W.; Zhang, X.P.; Zhang, Q.; Zhao, L.; Zhang, N.; Chen, J.P. PCDD/F formation and its mass balance in a MSW incineration system. *Environ. Sci.* 2008, 29, 1133-1137.
- [58] Wilewska-Bien, M.; Lundberg, M.; Steenari, B.M.; Theliander, H. Treatment process for MSW combustion fly ash laboratory and pilot plant experiments. *Waste Manag.* 2007, 27, 1213-1224.

- [59] Jiang, Y.; Xi, B.; Li, X.; Zhang, L.; Wei, Z. Effect of water-extraction on characteristics of melting and solidification of fly ash from municipal solid waste incinerator. *J. Hazard. Mater.* 2009, 161, 871-877.
- [60] Aguiar del Toro, M.; Calmano, W.; Ecke, H. Wet extraction of heavy metals and chloride from MSWI and straw combustion fly ashes. *Waste Manag.* 2009, 29, 2494-2499.
- [61] Ito, R.; Dodbiba, G.; Fujita, T.; Ahn, J.W. Removal of insoluble chloride from bottom ash for recycling. *Waste Manage.* 2008, 28, 1317-1323.
- [62] Ito, R.; Fujita, T.; Sadaki, J.; Matsumoto, Y.; Ahn, J.W. Removal of chloride in bottom ash from the industrial and municipal solid waste incinerators. *Int. J. Soc. Mater. Eng. Res.* 2006, 13, 70-74.
- [63] Zhu, F.; Takaoka, M.; Oshita, K.; Takeda, N. Comparison of two types of municipal solid waste incinerator fly ashes with different alkaline reagents in washing experiments. *Waste Manag.* 2009, 29, 259-264.
- [64] Zhu, F.; Takaoka, M.; Shiota, K.; Oshita, K.; Kitajima, Y. Chloride chemical form in various types of fly ash. *Environ. Sci. Technol.* 2008, 42, 3932-3937.
- [65] Zhu, F.; Takaoka, M.; Oshita, K.; Kitajima, Y.; Inada, Y.; Morisawa, S.; Tsuno, H. Chloride behavior in raw fly ash washing experiments. *J. Hazard. Mater.* 2010, 178, 547-552.
- [66] Wang, Q.; Yang, J.; Wu, T. Effects of water-washing pretreatment on bioleaching of heavy metals from municipal solid waste incinerator fly ash. *J. Hazard. Mater.* 2009, 162, 812-818.
- [67] Karlfeldt Fedje, K.; Ekberg, C.; Skarnemark, G.; Steenari, B.M. Removal of hazardous metals from MSW fly ash—An evaluation of ash leaching methods. *J. Hazard. Mater.* 2010, 173, 310-317.
- [68] Ferreira, C.D.; Jensen, P.; Ottosen, L.; Ribeiro, A. Preliminary treatment of MSW fly ash as a way of improving electrochemical remediation. *J. Environ. Sci. Health Part A: Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.* 2008, 43, 837-843.