

Retención de gases nitrosos y sulfurosos de efluentes de combustión empleando monolitos de cenizas volantes**Retention of gases nitrous and sulfurous from combustion effluents using monoliths of flying ashes****Retenção de nitrogênio e sulfurosos gases efluentes de combustão usando monólitos de cinzas volantes**

Segundo Seijas Velásquez¹, Priscilla Seijas Bernabé², Nadia Seijas Bernabé²,
Ludwig Salgado Rodríguez², Marco Alva Castañeda²

Resumen

Se disminuyó la presencia de gases nitrosos y sulfurosos presentes en los efluentes de combustión a través del empleo de monolitos sintetizados a partir de cenizas volantes de carbón. Ciencia, tecnología y humanidad. El estudio se inició con la activación alcalina de las cenizas volantes, empleando una solución de NaOH 3,9M y a una temperatura de 150 °C. Luego se preparó el gel de siembra empleando NaOH, aluminato sódico y el extracto alcalino de las cenizas volantes, además se preparó el gel de alimentación. Ambos se emplearon para la elaboración del gel de cristalización o hidrogel, el cual se procedió a secar sobre el papel de filtro, al aire y a temperatura ambiente durante 24 h. La siguiente etapa es la aglomeración para la formación de monolitos de cenizas utilizando alúmina como aglomerante. La pasta que se empleó para formar las cenizas volantes tratadas y activadas y la alúmina, se colocaron en un molde, y por compresión, se obtuvieron los monolitos, los cuales pasaron por un proceso de calcinación a 600 °C. Después, se acondicionó el sistema experimental, el cual estuvo conformado por una caldera acuotubular de 1 BHP que empleó como combustible carbón antracita. Se evaluó la composición de gases de combustión tipo NO_x y SO₂ que emitió. La medición se realizó tanto antes y después de colocar el dispositivo que contenían los monolitos, realizándose pruebas para evaluar el volumen óptimo a emplear de monolitos de cenizas, donde en el primer ensayo se colocó 2 g, en el segundo ensayo se colocó 4 g y en el tercero 6 g, realizándose tres repeticiones por cada ensayo. Se logró producir monolitos a partir de cenizas volantes con capacidad de retención de gases nitrosos y sulfurosos que procedían de efluentes generados en un sistema de combustión estacionario.

Palabras clave: Gases nitrosos, sulfurosos, efluentes de combustión, monolitos, cenizas volantes.

Abstract

Its reduced the presence of gases nitrous and sulfurous in the combustion effluents through the employment of synthesized monoliths starting from flying ashes of coal. The study began with the alkaline activation of the flying ashes, using a solution of NaOH 3,9M and to a temperature of 150 °C. It's prepared the culture gel using NaOH, sodium aluminate, alkaline extract of the flying ashes, it is also carried out the preparation of feeding gel. Both they were used for the elaboration of the crystallization gel or hydrogel, which it proceeded to dry off on the filter paper, to the air and ambient temperature for 24 h. The following stage is the mass formation of monoliths using alumina like agglomerate. The pasta that was used to form the treated flying ashes and activated and the alumina, they were placed in a mold, and for compression, the monoliths were obtained, which went by a process of calcination to 600 °C. Then, the experimental system was conformed by a boiler aquotubular of 1 BHP that used as combustible coal anthracite. The composition of gases of combustion type NO_x and SO₂ that it emitted was evaluated. The mensuration was realized before and after what device that it contained the monoliths, being carried out tests to evaluate the good volume to use of monoliths of ashy, where in the first rehearsal 2 g was placed, in the second rehearsal 4 g was placed and in the third 6 g, being carried out three repetitions for each assays. Was possible to produce monoliths starting from flying ashes with capacity of retention of nitrous and sulfurous gases coming from effluents generated in a stationary combustion.

Keywords: Oxides, sulphur, gas combustion, monoliths, fly ash effluent

¹ Universidad Nacional de Trujillo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Industrial.

² Universidad Nacional de Trujillo. Instituto de Investigación en Ciencias e Innovación Tecnológica.

Recibido, 8 de agosto 2014
Aceptado, 25 de setiembre 2014

Resumo

A presença de gases nitrosos e sulfurosos presentes nos efluentes de combustão foi reduzida através da utilização de monólitos sintetizados a partir de cinzas de carvão. Ciência, tecnologia e humanidade. O estudo foi iniciado com a ativação do alcalóide da cinza de mosca, usando uma solução de NaOH 3, 9M e uma temperatura de 150 °C. Então preparado gel plantio usando NaOH, aluminato de sódio e extrato alcalino da cinza de mosca, também preparado gel de poder. Ambos foram utilizados para a produção de cristalização de gel ou hidrogel, que começou a secar sobre o papel de filtro no ar e à temperatura ambiente por 24 horas. A próxima etapa é a aglomeração para a formação de monólitos de cinzas utilizando alumina como um ligante. Massas acostumado a ser tratado e registrada cinza de mosca e alumina, foram colocadas em um molde e compressão, os monólitos, que passou por um processo de calcinação a 600 °C foram obtidos. Mais tarde, desenvolveu o sistema experimental, que era composto de um tubo de caldeira de 1 CV usado combustível carvão e antracito. Avaliada a composição do tipo de gás de combustão NOx e SO₂ emitido. A medição foi feita tanto antes como depois de colocar o dispositivo contendo os monólitos, realização de testes para avaliar o uso do volume ideal de monólitos de cinzas, onde o primeiro julgamento foi colocado 2 g, no segundo julgamento foi colocado 4G e o terceiro 6G, fazer três repetições para cada teste. Concluiu-se que eles conseguiram produzir monólitos da cinza de mosca, com capacidade de gases nitrosos e sulfurosos que veio de efluentes gerados em um sistema de combustão estacionária de retenção.

Palavras-chave: enxofre, gases nitrosos, efluentes de combustão, monólitos, ash.

Introducción

La emisión a la atmósfera de contaminantes gaseosos y sus productos derivados ácidos conduce al deterioro de la calidad del aire y a la acidificación del suelo y de las aguas artificiales. Ello trae consigo importantes efectos sobre los ecosistemas acuáticos y terrestres, generando riesgos para la salud humana y acelerando el deterioro de los materiales de construcción y de los monumentos. Los principales contaminantes atmosféricos que contribuyen a la acidificación son los óxidos de nitrógeno (NOx) y de azufre (SO₂) (Estevez y col. 2000).

La denominación NOx engloba a NO y NO₂, donde la constitución de los gases emitidos en las centrales térmicas tiene aproximadamente un 90 % de NO y el resto de NO₂. Los óxidos de nitrógeno son una familia importante de compuestos químicos que contaminan el aire. De todos ellos el NO (óxido nítrico) y NO₂ (dióxido de nitrógeno) son los que están en el aire en cantidades apreciables². El NO es un gas incoloro e inodoro, tóxico a altas concentraciones y presente en el aire en menos de 0,50 ppm. Aunque a baja concentración su tolerancia por los seres vivos es aceptable, sin embargo, es un precursor del NO₂, y por tanto, responsable en parte de la contaminación fotoquímica. El NO₂ no es sólo un contaminante importante del aire por sí sólo, sino que también reacciona en la atmósfera para formar ozono troposférico (O₃) y lluvia ácida (Estevez y col. 2000; Rouquerol y col. 1999).

Es importante destacar que el ozono que se desea minimizar es el ozono troposférico; esto es, el ozono en el aire ambiental que se respira. No se habla acerca del ozono en la atmósfera superior o estratosférico el cual protege a la tropósfera de la radiación proveniente del sol. El ozono troposférico ha sido y sigue siendo un problema significativo de contaminación del aire y es el principal constituyente del smog fotoquímico (niebla visible resultado de la polución aérea que contiene oxidantes fotoquímicos) (Rouquerol y col. 1990).

Los NOx y los óxidos de azufre (SOx) en la atmósfera, son capturados por la humedad para formar lluvia ácida. La lluvia ácida, junto con la deposición seca y húmeda, afecta severamente ciertos ecosistemas y directamente a algunos sectores de nuestra economía (Estevez y col. 2000; Rouquerol y col. 1999).

Entre otras consecuencias negativas están: la nitrificación de las aguas (por parte de NOx), acidificación de los suelos y el poder irritante sobre las vías respiratorias que provoca daños sobre la salud humana (Estevez y col. 2000; Rouquerol y col. 1999; Hernández y col. 2000).

Todos estos factores indican una necesidad obvia de reducir las emisiones de gases nitrosos y sulfurosos. Por lo que, las exigentes regulaciones medioambientales están actualmente dirigidas con el fin de controlar la calidad del aire, fomentando la búsqueda y desarrollo de nuevos procesos y tecnologías que puedan ser utilizadas para la separación o retención de gases contaminantes (Estevez y col. 2000; Rouquerol y col. 1999; Hernández y col. 2000).

Uno de los procesos que ha sido ampliamente utilizado es la adsorción física sobre sólidos porosos. La adsorción física puede ser usada además como medio para concentrar determinados gases en una corriente gaseosa (Ackley y col. 2003; Hernández y col. 2003).

En los procesos de adsorción, los gases, vapores y líquidos se retienen sobre una superficie sólida como consecuencia de reacciones químicas y/o fuerzas superficiales de dispersión, polarización e interacciones dipolares y cuadrupolares, todas balanceadas por fuerzas de repulsión (Hernández y col. 2003; Hernández y col. 2005). Dentro de los adsorbentes más representativos están contempladas carbón activo AC, fibras de carbón activo AFC, zeolitas naturales, modificadas y aerogeles de carbón los cuales han sido evaluados en investigaciones recientes (Crini G. 2005; Hernández y col. 2005).

Los aerogeles de carbón son adsorbentes con considerable potencial, ya que sus características de textura pueden adaptarse por control de la concentración, proporción, naturaleza de reactante, catalizador en la recta origen y en todos los pasos de preparación. El término aerogel ha sido usado para designar a los geles secados bajo condiciones supercríticas, (Chen y col. 2006). Los estudios más extensos de estos materiales son orientados en aerogeles de resorcinol-formaldehído (RF) y melamina-formaldehído (MF).

Una variación de este proceso es la producción de monolitos obtenidos en base a aerogeles, los cuales son preparados con mezclas resorcinol-formaldehído por el proceso de sol-gel (Chen y col. 2006). Actualmente se está realizando investigaciones, con una novedosa propuesta, en donde la producción de los monolitos sean empleando hidrogeles que han sido elaborados con cenizas volantes de carbón, las cuales previamente han pasado por operaciones de activación-extracción, extrusión y carbonización (Vicente R. 2002; Moreno N. 2002; Wang y col. 2010; Hernández y col. 2003).

Las cenizas volantes (CV) son residuos sólidos provenientes de la combustión de materiales como el carbón, pet-coke, madera, de la incineración de residuos sólidos urbanos y de procesos de fundición. Presentan un aspecto pulverulento, suave al tacto, con coloración más o menos grisácea, en función del contenido en inquemados, que proporcionan una tonalidad más oscura y hierro, que le da una coloración parda (Moreno N. 2002). Actualmente, las investigaciones están abocadas a buscar nuevas alternativas para utilizar nuevamente éste residuo sólido.

Desde la década del 50 el uso principal que se le ha otorgado a las cenizas volantes es en la industria del cemento y del hormigón, principalmente en la construcción de obras civiles, muros de embalses, arrecifes coralinos artificiales entre otros. Sin embargo este campo de aplicación no puede asimilar toda la ceniza volante generada, ya

que no toda cumple con las especificaciones ASTM C618, por lo que se estima que aproximadamente un 30% es reutilizado en la industria del cemento y del hormigón (Moreno N. 2002). Estudios recientes hablan sobre las características y virtudes que presentan este tipo de materiales, como adsorbentes e intercambiadores iónicos (Moreno N. 2002; Wang y col. 2010).

Cabe resaltar que la composición química y mineralógica de las cenizas volantes, posee una alta concentración en componentes sílico-alumínicos, por lo que hace que éstas puedan ser utilizadas como material de partida para la síntesis de aerogeles, zeolitas y monolitos mediante su activación alcalina y calentamiento por vía hidrotermal o con microondas. Es por ello que se propuso la presente investigación, cuyo objetivo principal fue producir monolitos de cenizas volantes adsorbentes de gases nitrosos y sulfurosos procedentes de efluentes contaminantes y evaluar su capacidad de retención, constituyéndose en una propuesta de un método alternativo y de bajo costo para reducir la presencia de NO_x y SO₂ en las emisiones gaseosas procedentes de diversas fuentes antropogénicas industriales.

Material y métodos

Obtención de Materia Prima

La muestra de ceniza volante que se utilizó en el presente estudio se obtuvo de las calderas TSXG de la empresa Trupal, que utiliza carbón antracitoso en las calderas. Se seleccionó la ceniza volante que esté constituida por partículas esféricas con un diámetro promedio malla 100.

Activación alcalina de las cenizas volantes (CV)

La operación se realizó a una temperatura de extracción de 150 °C, las cenizas se mezclan con una solución de NaOH 3.9M, siendo la relación (sólido/ líquido) = 1/3. Las muestras se agitaron durante cuatro horas, luego se filtran; después la pasta obtenida se procedió a lavar con agua desionizada.

Preparación del gel de siembra.

Se disolvió 1 lenteja de NaOH en 3 ml de agua desionizada. Una vez disuelto se añadió 0.30 g de aluminato sódico, se tapó y se continuó agitando hasta la disolución total. Se trasvasó la disolución anterior a un frasco de plástico y sobre la disolución de aluminato se vertió rápidamente 15 ml de disolución de extracto alcalino de CV e inmediatamente se agitó con una varilla hasta que se formó un gel homogéneo.

El gel se deja envejecer en reposo y a temperatura ambiente durante 24 h, con el frasco tapado.

Preparación del gel de alimentación.

Se disolvieron 3 lentejas de NaOH en 4 ml de agua desionizada a los que se añade 1.21 g de aluminato sódico. Una vez disuelto, se trasvasó la disolución a un recipiente de plástico. Sobre la disolución de aluminato anterior se vertió rápidamente 62 ml de extracto alcalino de CV e inmediatamente se agitó vigorosamente con batidora hasta que se formó un gel homogéneo.

Preparación del gel de cristalización

Sobre la totalidad del gel de alimentación se vertió aproximadamente 4.5 g del gel de siembra envejecido y se agitó de forma vigorosamente con batidora hasta que se consiguió un gel homogéneo. Finalmente, se trasvasó la mezcla a un frasco de plástico con cierre hermético.

Se dejó envejecer el hidrogel en reposo a temperatura ambiente durante 24 h con el frasco cerrado herméticamente. Se procedió a cristalizar el hidrogel envejecido, en una estufa a 100° C durante 7 h. Al cabo de ese tiempo se procedió a enfriar el recipiente y se filtró la suspensión sobre buchner con papel de filtro y succión de trompa de agua. Finalmente, el sólido blanco se lavó con abundante agua desionizada (aproximadamente 300 ml en pequeñas adiciones). El sólido se procedió a secar sobre el papel de filtro, al aire y a temperatura ambiente durante al menos 24 h.

Aglomeración para la formación de monolitos de CV

Para formar los monolitos se tuvo que utilizar alúmina como aglomerante. La preparación de los mismos se llevó a cabo mezclando las cenizas volantes tratadas y activadas y la alúmina, ésta última en un porcentaje en peso del 5%, y asegurando un mezclado homogéneo.

Posteriormente se fueron introduciendo pequeñas cantidades de muestra, en forma de pasta acuosa, en un molde, y por compresión, se obtuvieron los monolitos para utilizar en el estudio de la eliminación de NO_x y SO₂.

Proceso de calcinación

La calcinación de los monolitos se realizó iniciando el calentamiento hasta llegar a una temperatura de 600° C con un gradiente de 50° C cada diez minutos. Se mantuvo a 600° C durante una hora, luego se dejó enfriar los monolitos en la mufla hasta el día siguiente.

Instalación de sistema experimental y evaluación de la capacidad de retención de gases nitrosos y sulfurosos

El sistema de combustión estacionario, lo constituyó una caldera acuotubular de 1 BHP que empleó como combustible carbón antracita. Se evaluó la composición de gases de combustión previa optimización del proceso mediante regulación del exceso de aire de combustión. Mediante el empleo de analizador de gases se determinó las concentraciones de NO_x y SO_x que emite el sistema estacionario.

Luego se procedió a instalar en la cámara de postcombustión, un dispositivo tipo columna de lecho fijo vertical compuesto de un tubo de acero 316, de 30 cm de longitud y 1 cm de diámetro interno (equipo de filtrado), en el cual se colocó los monolitos de cenizas volantes, donde se realizaron 3 tratamientos, en el primero se colocó 2 g de monolitos en la entrada (T1), en el segundo se utilizó 4 g (T2) y en el tercero 6 g (T3), empleándose un tiempo de 2 horas por cada ensayo y realizándose tres repeticiones. Finalizando cada uno de ellos, se procedió a realizar las respectivas mediciones con el analizador de gases, para cuantificar la concentración de NO_x y SO₂ y contrastar con la medición que se realizó antes de realizar los tratamientos experimentales.

Resultados

Los datos experimentales obtenidos de la optimización del proceso de combustión se observan en la tabla 1, donde se presentan los resultados de la combustión de 1 kilogramo de carbón antracita con exceso de aire de entre un rango de 3.0 a 20.9%. El diagnóstico de la combustión en la caldera donde muestra una mayor eficiencia de combustión es cuando se empleó un exceso de aire de 5.0% con un contenido en las emisiones de salida de 458.4 ppm de SO₂ y 195.8 ppm de NO_x.

Mientras que en la tabla 2, se muestran los resultados obtenidos con respecto a las concentraciones promedio de SO₂ y NO_x, contenidas en las emisiones procedentes de la caldera acuotubular después del tratamiento con monolitos a la salida de la columna de lecho fijo vertical, empleándose en el sistema de combustión un exceso de aire de 5%

(parámetro óptimo del proceso). Y un tiempo para el proceso de adsorción de dos horas, obteniéndose que empleando seis gramos de monolitos en la salida de la chimenea de la caldera se obtiene bajas concentraciones de SO₂ y NO_x en las emisiones gaseosas emitidas.

Tabla 1. Eficiencia de combustión de la caldera experimental acuotubular en función del exceso de aire

Exceso de Aire (%)	*Contenido de SO ₂ (ppm)	*Contenido de NO _x (ppm)	Eficiencia de combustión (%)
3,0	305,5	69,7	66,00
4,0	347,2	94,5	66,80
5,0	458,4	195,8	72,00
6,0	437,5	179,9	71,80
7,0	429,2	148,7	71,80
8,0	400,1	119,9	69,00
8,2	381,3	110,2	68,50
10,5	316,4	82,2	66,60
15,6	211,9	65,8	64,40
20,4	152,2	49,9	62,90
20,9	120,5	45,1	52,80

* Análisis de gases de combustión por la chimenea. Mediciones efectuadas con analizador de gases Bacharach.

Tabla 2. Concentración promedio de SO₂ y NO_x de las emisiones gaseosas después del tratamiento con monolitos a la salida de columna de lecho fijo vertical de la caldera acuotubular.

Exceso de aire en caldera acuotubular: 5%
Concentración inicial SO₂: 458,4 ppm
Concentración inicial NO_x: 195,8 ppm

Tratamiento	Cantidad empleada de monolitos (g)	*Concentración Promedio de SO ₂ (ppm)	*Concentración Promedio de NO _x (ppm)
T0	0	458,400	195,800
T1	2	390,950	109,550
T2	4	360,450	78,320
T3	6	288,550	66,147

* Análisis de gases de combustión por la chimenea. Mediciones efectuadas con analizador de gases Bacharach.



Figura 1. Aspecto de los monolitos calcinados de cenizas volantes.

Discusión

La retención de compuestos gaseosos tales como los gases nitrosos y sulfurosos utilizando materiales con gran porosidad como los monolitos sintetizados con cenizas volantes es posible por el proceso de adsorción física sobre sólidos porosos, que fue el método estudiado en la presente investigación.

La adsorción física puede ser usada como medio para concentrar determinados gases en una corriente gaseosa (Ackley y col. 2003; Hernández y col 2003). En los procesos de adsorción, los gases, se retienen sobre una superficie sólida como consecuencia de reacciones químicas y/o fuerzas superficiales de dispersión, polarización e interacciones dipolares y cuadrupolares, todas balanceadas por fuerzas de repulsión (Hernández y col. 2003; Hernández y col. 2005). La adsorción física, como se desprende de los tipos de interacción molecular que la producen, no afecta sensiblemente la estructura de la superficie sólida; por lo que se puede considerar al sólido como un sustrato inerte que aporta solamente el campo de fuerzas y una superficie geométrica donde se asentarán las moléculas del gas formando una fase adsorbida con “personalidad” independiente de la del gas y el sólido. Los sólidos más adecuados para la adsorción son los que presentan grandes relaciones superficie / volumen, es decir, aquellos que tienen una elevada porosidad y área superficial para facilitar el contacto sólido-gas (Ackley y col. 2003; Hernández y col 2003; Hernández 2005).

En el caso del presente estudio se empleó como adsorbente microporoso a los monolitos de cenizas volantes.

La capacidad de adsorción de este medio poroso, depende fuertemente de su estructura superficial interna, en donde se presentan interacciones entre los compuestos volátiles y las paredes del medio, las cuales están conformadas por una distribución de poros de distintos tamaños, los cuales se comportan como secuestrantes de compuestos como SO₂ y NO_x. Como se observa en la tabla 2, las cantidades retenidas de SO₂ y NO_x difirieron de acuerdo al volumen o cantidad de monolitos empleados para el proceso de adsorción, disminuyendo las concentraciones iniciales de estos compuestos a la salida de la chimenea del sistema estacionario empleado (caldera acuotubular de 1 BHP) después de un periodo de dos horas, existiendo diferencias significativas cuando se empleó 6 gramos de monolitos determinándose una concentración promedio de 288,550 ppm para SO₂ y 66,147 ppm de NO_x.

Conclusiones

Se logró producir monolitos de cenizas volantes con capacidad de retención gases nitrosos y sulfurosos procedentes de efluentes gaseosos emitidos por un sistema experimental de combustión estacionario.

En un tiempo de 2 horas y con 6 g de monolitos de cenizas volantes se alcanzó la mayor disminución de gases sulfurosos y nitrosos contenidos en los efluentes gaseosos emitidos por un sistema experimental de combustión estacionario.

Referencias bibliográficas

- Estevez NM, Vega MM, Sánchez P. 2000. Depuración de emisiones atmosféricas industriales. Página Web: <http://publicaciones.ua.es>.
- Rouquerol F, Rouquerol J, Sing K. 1999. Adsorption by powders and porous solids. Academic Press, San Diego, pp 1 -21.
- Hernández MA, Rojas F, Corona L. 2000. Nitrogen sorption characterization of the microporous structure of clinoptilolite-type zeolites. *Porous Materials*, 7:443-454.
- Ackley MW, Rege SU, Saxon H. 2003. Application of natural zeolites in the purification and separation of gases. *Microporous & Mesoporous Mater*, 61: 25-42.
- Hernández MA, Asomoza M, Solís S, Rojas F, Lara V., Portillo R, Salgado MA. 2003. Alkane adsorption on microporous SiO₂ Substrata. 1. Textural Characterization and Equilibrium. *Energy and Fuel*, 17: 262-270.
- Hernández MA., Rojas F, Corona L, Lara VH, Portillo R, Salgado MA, Petranoskii V. 2005. Evaluación de la porosidad de zeolitas naturales por medio de curvas diferenciales de adsorción. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 21(2):71-81.
- Crini G. 2005. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97: 1061-1085.
- Hernández MA, Rojas F. 2005. A quantitative study of adsorption of aromatic hydrocarbons (benzene, toluene and p-xylene) on dealuminated clinoptilolite zeolite. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44: 2908-2916.
- Chen J, Chen Q, Li Y. 2006. Characterization and adsorption properties of porous carbon nanofiber granules. *China Particuology*,: 238-242.
- Vicente R. 2010. *Eliminación de NOx y SO₂ mediante materiales zeolíticos preparados a partir de cenizas volantes*. Tesis para obtener el título de Química Industrial. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial. Universidad de Zaragoza. España.
- Moreno N. 2002. *Valorización de cenizas volantes para la síntesis de zeolitas mediante extracción de sílice y conversión directa*. Aplicaciones ambientales. Tesis doctoral de la Universidad Politécnica de Cataluña.
- Wang L, Jin Y, Nie Y. 2010. Investigation of accelerated and natural carbonation of MSWI fly ash with a high content of Ca. *J. Hazard. Mater* , 174(1-3): 334-343.
- Hernández S, Juan R, Querol X, Alastuey A, Ferrer P, Andrés JM. 2003. Activación de cenizas volantes para retención de gases contaminantes. *Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio*, 42 (1): 33-37.