

PIRÓLISIS Y COMBUSTIÓN DE LODO DE DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES URBANAS TRATADO CON FeCl_3

FOLGUERAS DÍAZ, María Belén⁽¹⁾; ALONSO HIDALGO, Manuela⁽²⁾

FERNÁNDEZ, Francisco Javier⁽²⁾; LAGE CAL, Susana⁽¹⁾; LUENGO GARCÍA, Juan Carlos⁽¹⁾

e-mail belenfd@uniovi.es

⁽¹⁾Universidad de Oviedo, Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo, Departamento de Energía

⁽²⁾Universidad de Oviedo, Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, Departamento de Energía

RESUMEN

El lodo es un residuo inevitable del proceso de depuración de las aguas residuales urbanas. Dicho residuo contiene materia orgánica (hidrocarburos, aminoácidos, proteínas, grasas, microorganismos, etc.) y una amplia variedad de materia inorgánica. Puesto que tiene un poder calorífico relativamente elevado, las técnicas de valorización energética del mismo, tales como la combustión y la pirólisis pueden representar una alternativa interesante para su gestión [1]. Mediante la combustión, el lodo puede transformarse directamente en energía, mientras que mediante la pirólisis se pueden obtener combustibles líquidos y gaseosos de características más adecuadas que el propio lodo. Como se ha comentado anteriormente, el lodo contiene distintos tipos de materia inorgánica que afectan a los procesos de pirólisis y combustión [2]. El tipo de aditivos que se añaden al lodo en la planta depuradora tiene una influencia significativa sobre dichos procesos.

En este trabajo se emplea un lodo de depuradora que fue acondicionado mediante la adición de polielectrolito orgánico y FeCl_3 . El análisis por termogravimetría con espectrometría de masas (TG-MS) ha puesto de manifiesto que, durante la pirólisis del lodo, se forman compuestos con nitrógeno, azufre y cloro (NH_3 , HCN , HCNO , SH_2 , COS , SO_2 y HCl), que afectan negativamente a la calidad del gas de pirólisis como combustible. Además, el Fe_2O_3 procedente del FeCl_3 promueve la oxidación del H_2 para formar H_2O a temperaturas superiores a 620°C . Durante la combustión, el Fe_2O_3 actuó también como un promotor de la oxidación, propiciando la formación de CO_2 , NO_2 y Cl_2 a partir de CO , NO y HCl , especialmente a temperaturas superiores a 352°C . Tanto durante la pirólisis como durante la combustión, el Fe_2O_3 favorece la formación de SO_2/SO_3 .

Palabras clave: Lodo de depuradora, Pirólisis, Combustión

1. Introducción

El lodo es un subproducto de las estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDARs). Este subproducto está constituido por materia orgánica (hidrocarburos, aminoácidos, proteínas, grasas, celulosa, sustancias húmicas y microorganismos junto con una pequeña cantidad de lignina y celulosa) y una amplia variedad de materia inorgánica que depende, entre otros aspectos, del tipo de tratamiento que ha experimentado el lodo en la planta. Los procesos más habituales de eliminación de este residuo son el depósito en vertedero, el empleo en la agricultura y la incineración. Sin embargo, la legislación cada vez más restrictiva hace más difícil la aplicación de estas vías de eliminación. Por lo tanto, es preciso buscar soluciones alternativas que sean rentables y respetuosas con el medioambiente.

Dadas sus características, el lodo de EDAR puede considerarse un tipo de biomasa residual. Entre las técnicas de valorización energética de la biomasa figuran la pirólisis, la combustión y la gasificación. En dichas técnicas, la biomasa experimenta un proceso de degradación térmica que conduce a la obtención de combustibles gaseosos y/o líquidos (gasificación y pirólisis) o a la obtención directa de energía térmica (combustión o co-combustión). Así, en la pirólisis se lleva a cabo un calentamiento en ausencia de oxígeno, lo que permite transformar un residuo en un combustible útil. Durante la gasificación se produce una oxidación parcial de la biomasa con un agente oxidante (O_2 , H_2O , etc.), obteniéndose un gas combustible. Tanto a partir de la pirólisis como de la gasificación se obtiene un gas combustible con menor poder calorífico que la biomasa de partida, que puede tratarse adecuadamente para reducir su impacto medioambiental.

Los aditivos que se emplean en las EDARs modifican la composición química del lodo. Esto tiene una influencia significativa sobre su comportamiento durante los procesos de degradación térmica. Se han llevado a cabo varios estudios cinéticos sobre la combustión y la pirólisis del lodo [2-6]. Sin embargo, hay muy pocos estudios que analicen el efecto del tratamiento del lodo sobre los citados procesos. Shao y col. [2] estudiaron el efecto catalítico de varios óxidos metálicos (CaO y Fe_2O_3 , entre ellos) sobre la pirólisis del lodo y observaron que ambos óxidos reducían la conversión de la materia orgánica.

En este trabajo se estudió la pirólisis y la combustión de un lodo de depuradora tratado con $FeCl_3$. Para ello, se obtuvieron los perfiles termogravimétricos (TG y DTG) de ambos procesos, así como la evolución de las especies gaseosas emitidas tanto durante la pirólisis (CO_2 , H_2O , CH_4 , H_2 , HCN , $HCNO$, SH_2 , COS , HCl , SO_2), como durante la combustión (CO_2 , H_2O , NO_2 , SO_2 , SO_3 , HCl , Cl_2). El conocimiento de estos procesos, así como del efecto del $FeCl_3$ del lodo sobre los mismos, proporciona información útil para la óptima recuperación energética de este residuo. La pirólisis, además de ser un proceso de valorización energética, también contribuye a mejorar nuestro conocimiento sobre la primera etapa de la combustión.

2. Método de trabajo

El lodo estudiado procede de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas que dispone de una etapa de eliminación de fósforo. El acondicionamiento del lodo se llevó a cabo mediante la adición de polielectrolito orgánico. El polielectrolito orgánico desestabiliza los materiales coloidales y provoca que las pequeñas partículas se aglomeren en partículas sedimentables más grandes o flóculos. Además, también se añadió $FeCl_3$ previamente al secado al objeto de prevenir la adherencia del lodo durante su transporte neumático a través de tuberías para su secado térmico. El $FeCl_3$ presente en el lodo se transforma parcialmente en Fe_2O_3 durante el calentamiento.

El análisis elemental (C, H y N) fue realizado con un analizador Perkin-Elmer 2400. La concentración de S fue determinada mediante el método Eschka. El Cl fue analizado por espectroscopia atómica de emisión por plasma (ICP-MS), después de su digestión con $HNO_3+H_2O_2+HF+H_3BO_3$. Los elementos mayoritarios y minoritarios fueron analizados mediante ICP-AES previa fusión con $LiBO_2$. El poder calorífico del lodo fue determinado mediante un calorímetro adiabático PARR de acuerdo con la norma ASTM D 2015-91.

La técnica de termogravimetría con espectrometría de masas (TG-MS) fue empleada para estudiar la pirólisis y la combustión del lodo. Los termogramas fueron obtenidos con un analizador termogravimétrico Mettler-Toledo TGA/SDTA 851^o acoplado a un espectrómetro de masas (Pfeiffer Vacuum ThermoStarTM GSD301T). Se emplearon muestras secas de 10 mg con un tamaño de partícula menor de 200 μm . La pirólisis se llevó a cabo en atmósfera de nitrógeno con un flujo de 50 cm^3/min empleando una velocidad de calentamiento de 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ desde la temperatura ambiente hasta 800 $^{\circ}\text{C}$. Para la combustión con flujo de oxígeno, se emplearon las mismas condiciones de operación. De esta forma, se obtuvo la pérdida de peso (TG) y la velocidad de pérdida de peso (DTG) con la temperatura para la pirólisis y la combustión.

Se estudió la evolución de varios componentes gaseosos producidos durante la pirólisis y la combustión del lodo. Las especies fueron identificadas mediante la detección de los ratios masa / carga (m/z) de los fragmentos iónicos clave producidos. Para la pirólisis, los componentes gaseosos detectados fueron CO_2 (m/z =44), CH_4 (m/z =15), H_2 (m/z =2), H_2O (m/z =18), HCN (m/z =27), HCNO (m/z =43), SH_2 (m/z =34), SO_2 (m/z 64), COS (m/z =60) y HCl (m/z =38). El CO no fue detectado porque su peso molecular es igual al del gas portador. Para la combustión, los compuestos detectados fueron los siguientes: CO_2 (m/z =44), H_2O (m/z =18), NO_2 (m/z =46), SO_2 (m/z =64), SO_3 (m/z =80), HCl (m/z =36) y Cl_2 (m/z =70).

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del lodo

La Tabla 1 muestra los análisis elemental e inmediato del lodo seco, así como las concentraciones de los elementos mayoritarios en sus cenizas expresados como óxidos.

Tabla 1: Datos de caracterización del lodo y sus cenizas.

Humedad (% peso)	Materia volátil (% peso)	Cenizas (% peso)	Carbono fijo (% peso)	Poder calorífico superior (MJ/kg)
3,9	59,1	31,2	5,8	16,21
C (% peso)	H (% peso)	N (% peso)	S (% peso)	Cl (% peso)
36,7	5,21	5,10	0,38	0,65
SiO_2 (% peso)	Al_2O_3 (% peso)	Fe_2O_3 (% peso)	$\text{CaO}+\text{MgO}$ (% peso)	P_2O_5 (% peso)
44,7	11,8	15,3	9,3	12,3

En la Tabla 1 se observa que el lodo seco tiene un alto rendimiento en materia volátil (59,1% en peso) y un bajo rendimiento en carbono fijo (5,8% en peso). También presenta un alto rendimiento en cenizas (31,2% en peso). Su poder calorífico (16,21 MJ/kg) se encuentra dentro del intervalo de valores que corresponden a un lignito (ASTM D388). Dado que el lodo es un tipo de biomasa residual presenta una alta relación molar H/C de 1,7, superior a la de los carbones. También muestra un alto contenido en nitrógeno (5,10% en peso). Debido al tratamiento de este lodo con FeCl_3 , su contenido en cloro (0,65% en peso) es superior al de la biomasa (< 0,2%). Del análisis de las cenizas se puede concluir que las concentraciones de SiO_2 , Fe_2O_3 y P_2O_5 del lodo son altas (Tabla 1).

3.2. Efecto del FeCl₃ sobre la pirólisis del lodo y evolución de los componentes gaseosos emitidos

El lodo estudiado fue tratado en la EDAR con FeCl₃, lo que afecta al comportamiento del mismo durante el proceso térmico, reflejándose en los perfiles TG/DTG y los gases emitidos.

Efecto sobre el perfil de pirólisis (TG/DTG)

La pirólisis es un proceso térmico que tiene lugar en atmósfera inerte, y donde la materia orgánica sufre una serie de reacciones complejas que generan productos volátiles y materia carbonosa condensada (char). El proceso global de pirólisis viene dado por:



Los perfiles de pirólisis del lodo (TG/DTG) pueden dividirse en los tres intervalos 165 – 380°C, 380 – 550°C y 550 – 800°C (Figura 1). La pérdida de peso correspondiente a cada uno de los intervalos en los que se ha dividido la pirólisis fue 58,6, 18,9 y 7,4%, respectivamente. El rendimiento en char fue del 15,1%. El DTG muestra dos picos parcialmente solapados en el primer intervalo, cuyas temperaturas pico son 281 y 330°C, y un hombro en el segundo intervalo. En el primer intervalo tiene lugar la pirólisis de los componentes más reactivos (materia orgánica biodegradable) junto con la pirólisis parcial de otros componentes menos reactivos (bacterias) cuya descomposición ocurre a temperaturas más altas. En el segundo intervalo se completa la pirólisis de los componentes menos reactivos (principalmente bacterias). Además, se observa una cola a temperaturas superiores a 550°C debido a una ligera desvolatilización del char (pirólisis secundaria), que se produce como consecuencia de la rotura de los enlaces terminales C-C en las estructuras orgánicas condensadas del char. Otros autores [6] atribuyen la citada desvolatilización a la pirólisis de la materia no biodegradable.

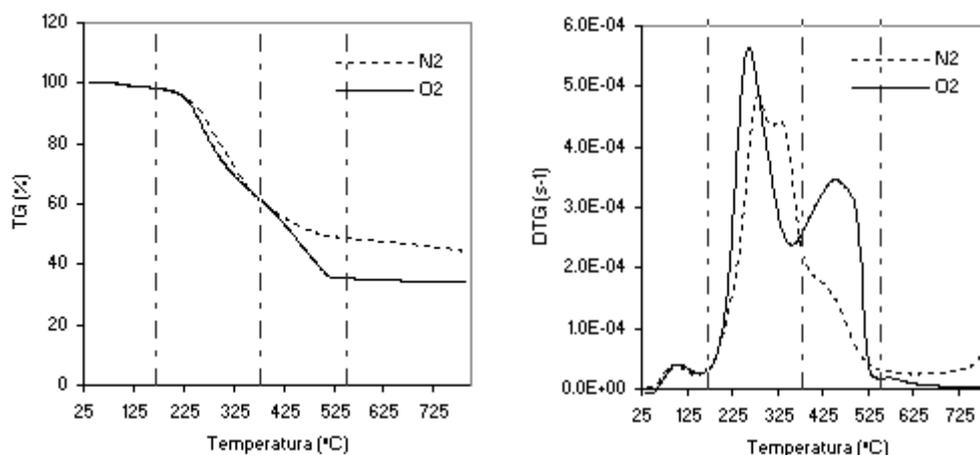


Figura 1. Comparación de los perfiles (TG y DTG) de pirólisis (N₂) y combustión (O₂) del lodo

Efecto sobre los gases de pirólisis

Durante el calentamiento del lodo, debido a las reacciones de rotura de enlaces y a las reacciones que tienen lugar durante la formación del char se desprende CO, CO₂, H₂O, CH₄, H₂, etc. El H₂O se liberó durante los tres intervalos de calentamiento, aunque principalmente durante el primero. Se detectó la presencia de H₂ durante los dos primeros intervalos, observándose en cada uno la presencia de un pico redondeado. Sin embargo, en el tercer intervalo se produjo un descenso brusco de la producción de hidrógeno, a unos 620°C, debido a la formación de H₂O (Figura 2). Dado que este proceso tiene lugar en ausencia de O₂, la formación de H₂O fue debida a la reducción del Fe₂O₃ por el H₂. Zou y col. [7] obtuvieron resultados similares empleando cloruros metálicos durante la pirólisis de lignito. Además,

según estos investigadores, el Fe_2O_3 también puede reducirse a Fe metálico en presencia de CO. El Fe formado puede actuar como catalizador durante la pirólisis.

El desprendimiento de CO_2 tuvo lugar durante todo el proceso de pirólisis con un perfil similar al DTG del lodo (Figura 2). Adicionalmente, durante la pirólisis también se formaron compuestos de nitrógeno, azufre y cloro, tales como NH_3 , HCN, HCNO, SH_2 , COS, SO_2 y HCl, que afectan negativamente a la calidad del gas de pirólisis como combustible. Los compuestos de nitrógeno (NH_3 , HCN y HCNO) proceden principalmente de la degradación térmica de los aminoácidos y proteínas (fracción bacteriana del lodo), identificándose el HCN como el producto principal en la mayoría de los casos [8]. Los citados compuestos son precursores de las emisiones de NOx durante la combustión del lodo. Las curvas de intensidad de los compuestos nitrogenados HCN y HCNO se muestran en la Figura 2. Las emisiones de HCNO evolucionan principalmente durante el primer y segundo intervalos, produciéndose las más altas intensidades en el segundo intervalo, lo que está de acuerdo con las más altas concentraciones de aminoácidos y proteínas de la fracción de materia bacteriana. La curva del HCNO muestra dos hombros y un pico, que se corresponden con los dos picos y el hombro del DTG, respectivamente. La temperatura del pico es de 456°C . El comportamiento de las emisiones de HCN es similar a las de HCNO, hallándose el pico a 470°C .

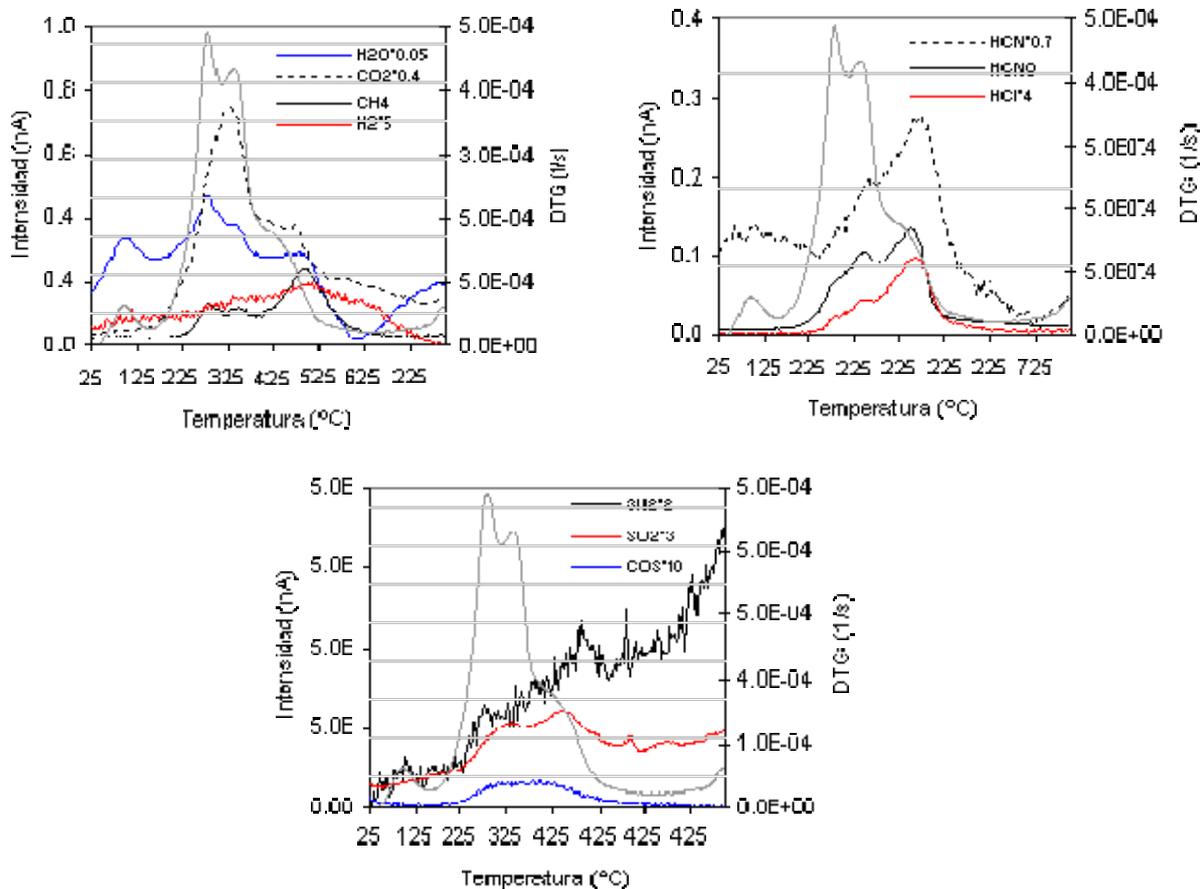


Figura 2. Perfiles de masas de varios componentes del gas de pirólisis

Las emisiones de azufre procedentes de la descomposición de aminoácidos y proteínas (SH_2 , SO_2 y COS) se produjeron en el intervalo $190\text{--}800^\circ\text{C}$. El SH_2 muestra dos pequeños picos a 348°C (primer intervalo) y 488°C (segundo intervalo). El SO_2 muestra dos picos 350°C y 475°C . La presencia de Fe_2O_3 en el lodo podría promover la oxidación de los fragmentos de SH a SO_2 y SO_3 . El COS muestra un pico ancho que se extiende principalmente en los primeros intervalos ($218\text{--}550^\circ\text{C}$). Zhang y col. [9] indicaron que durante la pirólisis del lignito los fragmentos de SH procedentes de la

descomposición de los aminoácidos y proteínas sufren interacciones complejas con la matriz orgánica del lodo para formar H_2S , COS y SO_2 .

El HCl evolucionó principalmente durante el primer y segundo intervalos, mostrando un pico en el segundo intervalo con dos hombros en el primero. La temperatura pico del HCl se encuentra a $475^\circ C$ y se debe principalmente a la descomposición del $FeCl_3$ que ocurre en presencia de agua entre $250 - 550^\circ C$ (Figura 2).

3.3. Efecto del $FeCl_3$ sobre la combustión del lodo y evolución de los componentes gaseosos emitidos

Efecto sobre el perfil de combustión (TG/DTG)

El proceso de combustión se inicia con la pirólisis del lodo, produciéndose un combustible gaseoso y un residuo sólido (char). Los gases producidos se queman cuando se ponen en contacto con O_2 . Finalmente, el char se oxida debido a la difusión del O_2 . Las reacciones que se producen son las siguientes:

a) Pirólisis del lodo: Lodo \rightarrow materia volátil (H_2 , CO , CO_2 , H_2O , C_xH_y , etc.) + char

b) Combustión de los volátiles: Materia volátil + $O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$

c) Combustión del char: Char + $O_2 \rightarrow CO_2$

Estas reacciones se solapan parcialmente durante las etapas o intervalos del DTG. Dichas etapas están delimitadas por las siguientes temperaturas $165 - 352^\circ C$, $352 - 550^\circ C$ y $550 - 800^\circ C$. En el primer y segundo intervalos las temperaturas pico son 262 y $450^\circ C$, respectivamente. El porcentaje de pérdida de peso en cada uno de los citados intervalos fue de $51,7$, $46,6$ y $1,7\%$, respectivamente. El perfil de combustión muestra dos picos parcialmente solapados entre las temperaturas 165 y $550^\circ C$ aproximadamente. En el primer intervalo, los perfiles de pirólisis y combustión son similares. Sin embargo, existen algunas diferencias entre ambos perfiles, dado que en la combustión se observa que el pico es más estrecho y más alto, lo que implica mayores velocidades de pérdida de peso, y se produce a una temperatura ligeramente más baja ($262^\circ C$ para la combustión y $281^\circ C$ para la pirólisis). Sólo una fracción de la materia volátil generada durante el primer y segundo intervalos de pirólisis se quema durante el primer intervalo de combustión. Ello indica que durante el segundo intervalo de la combustión continúa el proceso de desvolatilización / combustión de los volátiles junto con la combustión del char. En el segundo intervalo, el perfil de combustión muestra un pico (muy diferente del hombro de la pirólisis) debido a la combustión del char y al final del proceso de desvolatilización / combustión de los volátiles de la materia bacteriana que se inició en el primer intervalo. Las pérdidas de peso en el segundo intervalo fueron $33,2\%$ y $13,4\%$ correspondientes a la desvolatilización / combustión de los volátiles y combustión del char, respectivamente.

Efecto sobre los gases de combustión

Durante el proceso de combustión, se produce la oxidación de la materia orgánica del lodo con O_2 , formándose CO_2 y H_2O . Además, también se producen otros compuestos, tales como NO , NO_2 , SO_2 , HCl y Cl_2 , debido a la presencia de N y S de la proteínas del lodo y Cl de los cloruros metálicos.

En el primer intervalo, los gases formados durante la pirólisis del lodo se quemaron rápidamente con el O_2 , dando lugar a la formación de CO , CO_2 , H_2O , NO , NO_2 , SO_2 , SO_3 , etc. El char formado durante la desvolatilización fue un char nitrogenado (char-N). Análogamente al carbón [10], el char-N se produjo probablemente como resultado de las reacciones de condensación de los grupos amino (aminoácidos y proteínas) con grupos carboxilato (pectina) que conducen a la fijación del N en el char. En el segundo intervalo, la combustión del char-N produjo principalmente CO_2 y NO , aunque se alcanzó un alto grado de conversión de NO en NO_2 . Como cabría esperar, en este intervalo, el H_2O formada es mucho menor que la del primer intervalo.

En la Figura 3 se muestran los perfiles del CO_2 , H_2O , NO_2 , SO_2 , SO_3 , HCl y Cl_2 . El H_2O y el CO_2 se observaron durante el primer y segundo intervalos. El H_2O se formó durante la desvolatilización,

combustión de los volátiles y reacciones de condensación para la producción del char. La intensidad del H_2O es más significativa durante el primer intervalo mostrando un perfil similar al del DTG. En el segundo intervalo, la intensidad del H_2O , que se formó a partir de los compuestos orgánicos volátiles y la combustión del char, es menor. El perfil de evolución del H_2O muestra un pico a unos 272°C (primer intervalo) y un hombro en el segundo intervalo. Las emisiones de CO_2 proceden principalmente de a) la liberación de CO_2 durante la desvolatilización, b) la combustión de compuestos orgánicos liberados durante la desvolatilización y c) la combustión del char (sólo durante el segundo intervalo). En el segundo intervalo, las emisiones de CO_2 procedentes del char son las más importantes y muestran un perfil similar al del DTG. Sin embargo, en el primer intervalo, debido a la formación de CO y CO_2 , el perfil de CO_2 , que presenta un único pico a 306°C , no se ajusta al DTG. El efecto catalítico del Fe_2O_3 , potenciando la conversión de CO a CO_2 , sólo se nota ligeramente, lo que puede deberse a que sólo un fracción del FeCl_3 se convierte en Fe_2O_3 . El FeCl_3 se descompone a temperaturas superiores o iguales a 200°C .

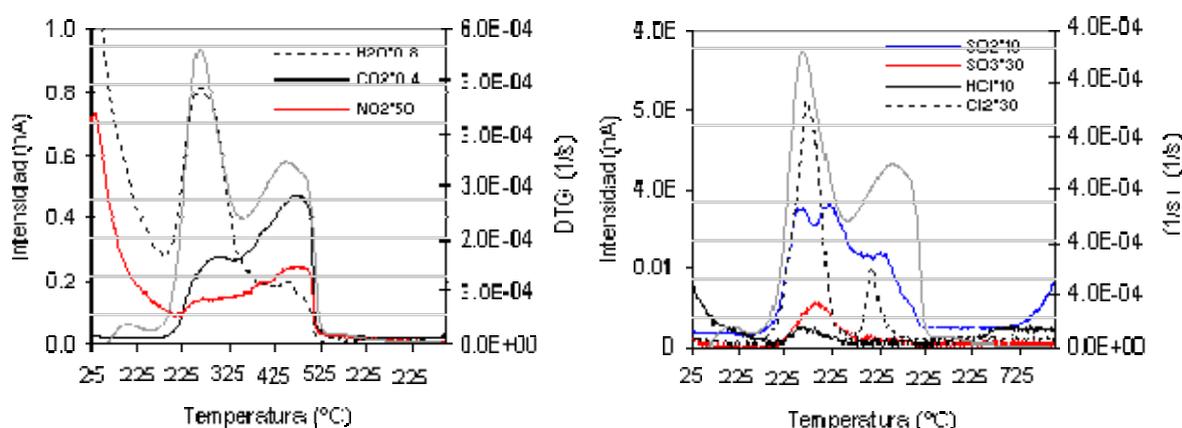


Figura 3. Perfiles de masas de varios componentes del gas de combustión

El nitrógeno del lodo (7,6 % en peso, stec) procede principalmente a las proteínas y los aminoácidos de la materia bacteriana. Durante la desvolatilización, inicialmente se producen NH_3 , HCN y HCNO , que posteriormente reaccionan con O_2 para formar NO . Durante la combustión del char-N, también se produce NO . Posteriormente, en cada intervalo, se produce la conversión de NO a NO_2 por reacciones homogéneas en fase gas [10]. Análogamente al CO , el Fe_2O_3 incrementa la velocidad de conversión de NO a NO_2 . Esto es por lo que el perfil de NO_2 es similar al del CO_2 . En el primer intervalo, dado que la formación del Fe_2O_3 a partir del FeCl_3 es gradual, la oxidación de CO y NO a CO_2 y NO_2 se produce a temperaturas ligeramente más altas. Así, el perfil del NO_2 , que presenta un pico redondeado a 281°C (análogamente al observado para el CO_2) es similar al del DTG, pero su altura es mucho menor. Sin embargo, en el segundo intervalo, el Fe_2O_3 mejora la velocidad de conversión del NO a NO_2 y las emisiones de NO_2 aumentan mostrando un pico a 475°C .

Las emisiones de SO_2 se produjeron durante el primer y segundo intervalos, con picos a unos 250 , 315 y 427°C . El SO_3 producido por la oxidación parcial del SO_2 fue principalmente observado en el primer intervalo, aproximadamente a 286°C (Figura 3). Liu y col. [11] estudiaron la reducción de las emisiones de SO_2 durante la combustión de carbón usando FeCl_3 y Fe_2O_3 , así como cloruros metálicos. Encontraron que el FeCl_3 acelera la combustión e incrementa las emisiones de SO_2 en el rango de temperaturas 300 - 520°C , y que el Fe_2O_3 promueve las reacciones entre el SO_2 y la materia mineral del carbón. En este lodo, tanto el FeCl_3 como el Fe_2O_3 actúan sobre las emisiones de SO_2 , dado que a temperaturas superiores a 250°C , el FeCl_3 se descompone para formar Fe_2O_3 y HCl . Así, puede observarse un pequeño pico de HCl a unos 277°C , junto con un gran pico de Cl_2 a unos 270°C (Figura 3), lo que puede deberse a la reacción del FeCl_3 con H_2O y a la oxidación del HCl formado en el primer intervalo. En el segundo intervalo, el Fe_2O_3 catalizó la reacción entre el SO_2 y ciertos

compuestos de las cenizas, tales como el CaO y MgO y, por lo tanto, apenas se produjeron emisiones de SO₃.

4. Conclusiones y consideraciones finales

Los perfiles de pirólisis y combustión de un lodo de EDAR tratado con FeCl₃ muestran dos etapas principales. Previamente a la primera etapa, se produjo la pérdida de agua superficial. En la pirólisis, se produce la desvolatilización y formación del char en la primera y segunda etapas. En la combustión, se produce la desvolatilización del lodo y combustión de los volátiles en la primera etapa, mientras en la segunda tiene lugar la combustión del char.

La evolución de los gases emitidos durante la pirólisis (CO₂, H₂O, CH₄, H₂, HCN, HCNO, SH₂, SO₂, COS, y HCl) depende de la temperatura y de las propiedades catalíticas del Fe₂O₃ producido a partir del FeCl₃. El Fe₂O₃ produjo un decrecimiento del H₂ y SH₂ debido a la formación de H₂O y SO₂/SO₃. La acción adsorbente del CaO redujo las emisiones de SO₂/SO₃. Las emisiones de COS y HCl muestran un pico alrededor de 360°C y 460°C, respectivamente.

La evolución de los gases emitidos durante la combustión (CO₂, H₂O, NO, NO₂, SO₂, SO₃, HCl y Cl₂) también depende de la temperatura y de los efectos catalíticos de Fe₂O₃. La ausencia de SO₃ en el segundo intervalo de combustión se debe principalmente a su retención en las cenizas.

5. Referencias

- [1] RULKENS, W. Sewage sludge as a biomass resource for the production of energy: Overview and assessment of the various options. *Energy & Fuels*, 2008, vol. 22, pp. 9-15.
- [2] SHAO, J. YANG, R. CHEN, H. YANG, H. LEE, D.H. Catalytic effect of metal oxides on pyrolysis of sewage sludge. *Fuel Processing Technology*, 2010, vol. 9, pp. 1113-1118.
- [3] FOLGUERAS, M. B. DIAZ, R. M. Influence of FeCl₃ and lime added to sludge on sludge-coal pyrolysis. *Energy*, 2010; vol. 35, pp. 5250-5259.
- [4] THIPKHUNTHOD, P. MEEYOO, V. RANGSUNVIGIT, P. KITIYANAN, B. SIEMANOND, K. RIRKSOMBOON, T. Pyrolytic characteristics of sewage sludge. *Chemosphere*, 2006, vol. 64, pp. 955-962.
- [5] FONT, R. FULLANA, A. CONESA, J. Kinetic models for the pyrolysis and combustion of two types of sludge. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 2009, vol. 74, pp. 429-438.
- [6] TINGYU, Z. SHOUYOU, Z. JIEJIE, H. YANG, W. Effect of calcium oxide on pyrolysis of coal in a fluidized bed. *Fuel Processing Technology*, 2000, vol. 64, pp. 271-284.
- [7] ZOU, F. YAO, J. YANG, X. SONG, W. LIN, W. Catalytic effects of metal chlorides on the pyrolysis of lignite. *Energy & Fuels*, 2007, vol. 21, pp. 619-624.
- [8] BECIDAN, M. SKREIBERG, O. HUSTAD, J. NO_x and N₂O precursors (NH₃ and HCN) in pyrolysis of biomass residues. *Energy & Fuels*, 2007, vol. 21, pp. 1173-1180.
- [9] ZHANG, D. YANI, S. Sulphur transformation during pyrolysis of an Australian lignite. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, vol. 33, pp. 1747-1753.
- [10] THOMAS, K. M. The release of nitrogen oxides during char combustion. *Fuel*, 1997, vol. 76, pp. 457-473.
- [11] LIU, L. CHE, D. XU, T. Catalytic reduction of SO₂ during combustion of typical Chinese coals. *Fuel Processing Technology*, 2002, vol. 79, pp. 157-169.