

BIOSÓLIDOS GENERADOS EN LA DEPURACIÓN DE AGUAS: (II). MÉTODOS DE TRATAMIENTO

M. Mahamud

Área de Ingeniería Química. Universidad de Burgos

A. Gutiérrez y H. Sastre

Depto. de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente. Universidad de Oviedo

RESUMEN: En este artículo se lleva a cabo una revisión de los diferentes métodos de tratamiento de los biosólidos obtenidos en las estaciones depuradoras de aguas residuales. Primeramente se abordan los procesos tales como digestión, pasteurización, secado o compostaje entre otros, cuyo principal objetivo es la estabilización de los lodos para su uso posterior. En segundo lugar se exponen los métodos cuyo objetivo es la mayor eliminación posible de materia orgánica como son la oxidación en fase acuosa y la incineración. Datos sobre tratamiento y destino de biosólidos obtenidos de una encuesta llevada a cabo en diferentes EDAR españolas se exponen en la parte final.

INTRODUCCIÓN

Los métodos de tratamiento de lodos pueden estar orientados fundamentalmente a conseguir dos fines bien diferenciados. Por un lado, existen una serie de tratamientos que llevan a cabo una estabilización de los biosólidos, es decir, los someten a un tratamiento que da lugar a un producto adecuado para su utilización posterior, reduciendo su capacidad de fermentación y la presencia de organismos patógenos (Haubry, 1992).

Los procesos de digestión o secado pueden ser considerados entre estos tratamientos de estabilización. Por otra parte se utilizan también procesos conducentes a una total o casi total eliminación de la materia orgánica del lodo, obteniendo un menor volumen de un residuo más manejable y prácticamente inerte. Entre estos últimos procesos cabe citar la oxidación con aire en fase

acuosa y la incineración. Por ello, los procesos de tratamiento de lodos pueden, en general, dividirse en dos grandes categorías, procesos de estabilización de los lodos y procesos de reducción/eliminación del componente orgánico de los mismos. En la Figura 1 se indican de manera esquemática los diferentes tratamientos a que pueden ser sometidos los biosólidos desde su obtención en planta hasta el destino final de los mismos. El esquema no se puede considerar exhaustivo pero pone de manifiesto diferentes opciones así como interconexiones entre las posibles etapas de tratamiento.

océano como fuente de recursos de importancia vital para gran parte de la humanidad y, más concretamente, para nuestro país, donde la pesca y más recientemente los cultivos marinos tienen una gran incidencia social y económica. Es importante resaltar también que la mayor parte de la población e industrias, no sólo turísticas, están ubicadas en la franja costera y es por tanto esencial considerar la protección del ecosistema en todo el litoral.

Artículo recibido el **14 de septiembre de 1995** y aceptado para su publicación el **16 de abril de 1996**. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

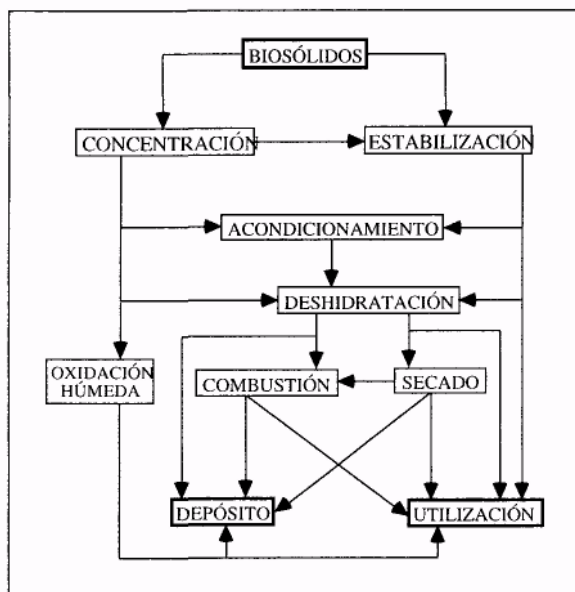


Figura 1. Esquema de los diferentes procesos a que pueden ser sometidos los biosólidos para su utilización o depósito final

PROCESOS DE ESTABILIZACIÓN DE BIOSÓLIDOS

Ya ha sido indicado que el aprovechamiento de los biosólidos como un producto requiere generalmente la aplicación de un tratamiento previo de estabilización que lo haga adecuado para el fin requerido. Estos tratamientos rinden un producto con una carga microbiana menor y por tanto más adecuado para el manejo y el contacto por parte del hombre. Entre estos procesos cabe citar: la pasteurización, la digestión anaerobia mesófila, la digestión aerobia termófila, el compostaje, estabilización con cal del lodo líquido, almacenamiento líquido, y, deshidratación y almacenamiento. Para determinar el grado de estabilización alcanzado con un determinado procedimiento se utilizan preferentemente dos criterios de estabilización, el del contenido en sólidos volátiles y el de reducción de organismos patógenos indicadores.

Contenido en sólidos volátiles: La cantidad de sólidos volátiles se utiliza comúnmente como un indicador de la cantidad de materia orgánica contenida en el lodo, pudiendo ser utilizado como medida de la efectividad de un tratamiento en la estabilización del componente orgánico del mismo. Este método de medida no es aplicable al caso de los procesos de compostaje y de estabilización con cal.

Reducción de organismos patógenos indicadores: La reducción de organismos patógenos indicadores es

importante ya que minimiza los riesgos de infección de la población. Los patógenos típicamente contemplados incluyen virus, bacterias, parásitos y hongos. Digestión anaerobia, compostaje y estabilización con cal llevan a cabo generalmente reducciones de dos órdenes de magnitud. Existen pocos datos relativos a la eliminación de patógenos en procesos típicos de digestión aerobia, aunque cuando dicha digestión se lleva a cabo a elevada temperatura se observan reducciones en el número de organismos patógenos indicadores de al menos dos órdenes de magnitud.

La selección de un determinado proceso de estabilización depende fundamentalmente del destino final reservado al biosólido, eligiendo pues, aquél sistema que da lugar a un producto apropiado al uso o disposición final del mismo. El tratamiento de un lodo es un proceso que generalmente incluye etapas de espesamiento, estabilización, acondicionamiento y deshidratación. Las etapas involucradas en la estabilización son interdependientes, así, por ejemplo, un adecuado espesamiento dará lugar a unas instalaciones de estabilización de menor tamaño, con el consiguiente ahorro económico. A continuación se exponen algunos métodos de estabilización de lodos con sus características más importantes.

Pasteurización del biosólido

En este proceso se somete el biosólido al menos a una temperatura de 70°C durante 20 minutos como mínimo o bien a 55°C durante una hora. El lodo también puede someterse a todo el abanico de condiciones intermedias equivalentes. En todos los casos, esta etapa irá seguida de una digestión anaerobia mesófila. Esta secuencia de pasteurización-digestión anaerobia produce lodos digeridos con unas características que permiten clasificar el proceso como de Tipo A según los criterios de la EPA (Kuchenrither, 1992; Walker Engineering; Bastian, 1994).

Digestión anaerobia mesófila

Los procesos de digestión anaerobia de alta carga, se llevan a cabo en un digestor primario con un periodo medio de retención que oscila entre los 10 y los 30 días en función del tipo de lodos alimentados y de la temperatura de trabajo. Algunas instalaciones pertenecientes a depuradoras españolas que procesan por este sistema mezclas de lodos primarios y secundarios, utilizan temperaturas en el intervalo 30-33°C y tiempos de residencia que van de los 17 a los 30 días. Se suele disponer además de un digestor secundario que facilita el espesamiento de los lodos y donde se lleva a cabo una digestión adicional.

La digestión anaerobia ha sido y es uno de los procesos más comunmente utilizados en las EDAR para la estabilización de los biosólidos (Masón, 1992; Metcalf, 1991; WEF, 1992; Benefield, 1982) pudiendo clasificarse como un tratamiento clásico. Este sistema presenta una serie de ventajas e inconvenientes inherentes que se han resumido en la Tabla 1.

Tabla 1. Ventajas e inconvenientes de los sistemas de digestión anaerobia.

DIGESTIÓN ANAEROBIA VENTAJAS
Importante reducción de sólidos volátiles (entre un 40 y un 60%) (WEF, 1992; Amorena, 1994) Bajos costes de operación si se recupera el metano producido Proceso excedentario en energía Es el método más rentable económicamente para plantas que traten por encima de 7.500 m³/día y se puede aplicar a plantas cuyo intervalo de tamaños abarca más de dos órdenes de magnitud (WEF, 1992) Buena reducción del número de microorganismos patógenos Lodos utilizables para agricultura, pudiendo aplicarse generalmente en mayor cantidad que los correspondientes biosólidos obtenidos mediante digestión aerobia (Crohn, 1995) Reducción de la masa total de lodo
INCONVENIENTES
Elevado volumen de inversión preciso para llevar a cabo su instalación Posibilidad de depósitos minerales en el equipo, dificultades de limpieza y posible formación de espumas Potencial producción de olores Peligrosidad de los gases inflamables producidos Presenta sobrenadantes con elevadas DBO, DQO, sólidos en suspensión y NH₃ Puede presentar problemas de "digestión ácida" ya que los microorganismos productores de metano son de crecimiento lento

De todas formas, con la elección de un diseño moderno de funcionamiento contrastado y operando la planta con el concurso de trabajadores expertos, muchos de los problemas mencionados pueden ser reducidos en gran medida.

El volumen de los digestores aumenta, obviamente, con la cantidad de lodos a procesar así como cuanto menor es la temperatura de trabajo, al requerir mayores tiempos de residencia. Este proceso lleva a cabo una reducción significativa en el número de patógenos existentes, encontrándose dentro de los procesos PSRP según la

EPA (Kuchenrither, 1992).

Como ya se ha enunciado, la digestión anaerobia puede llevarse a cabo a diferentes temperaturas y de ordinario se procede a un calentamiento de la masa en fermentación que acelera el proceso. El proceso global resulta excedentario en energía ya que del gas producido en la digestión se consume del orden de un 65% o menos (Walker Engineering; Sastre, 1994) para mantener la temperatura del lodo en el nivel adecuado. En principio, este sistema parece bastante atractivo ya que además de producir un lodo de características que facilitan su utilización posterior, resulta ser un proceso energéticamente excedentario, obteniendo energía que puede ser utilizada bien en la propia planta o para otros fines (Sastre, 1994).

Existen también procesos de digestión anaerobia termófila que operan a temperaturas ligeramente superiores a 50°C. A pesar de que precisan menores tiempos de residencia, producen una mayor destrucción de bacterias y mejoran la procesabilidad del lodo, su aplicación es limitada debido a sus requerimientos energéticos, problemas de estabilidad en la operación, producción de olores y sobrenadantes con abundante contenido en sólidos disueltos (Metcalf, 1991).

Digestión aerobia

Los procesos de digestión aerobia están indicados especialmente para la estabilización de lodos procedentes del tratamiento biológico, siendo en esencia una continuación del proceso de aireación. Los métodos, cada vez menos usados, de digestión aerobia psicrófila y mesófila operan a temperaturas en torno a los 20°C y presentan tiempos de residencia entre 10 y 30 días (Haubry, 1992; Metcalf, 1991) con valores típicos en el intervalo 14-16 días (Hernández, 1994). El tiempo de residencia va a venir condicionado en gran medida por el origen de los lodos, correspondiendo los tiempos más reducidos a la digestión aerobia de biosólidos procedentes únicamente de un proceso de fangos activos. El tiempo de residencia ha de ir incrementándose conforme se incorpora al proceso de digestión aerobia una mayor cantidad de lodos procedentes de decantación primaria.

La digestión aerobia termófila es un proceso de estabilización de lodos en el cual reacciones biológicas aerobias que tienen lugar a temperaturas del orden de 55°C (el intervalo varía en $\pm 10^\circ\text{C}$ o incluso más, de acuerdo con diferentes referencias) destruyen los componentes orgánicos biodegradables del biosólido. Según esta definición, el proceso podría ser equiparable al compostaje, pero existen diferencias suficientes que justifican la existencia de una nomenclatura propia para los dos procesos.

Tabla 2. *Ventajas e inconvenientes de la digestión aerobia .*

DIGESTIÓN AEROBIA
<i>VENTAJAS</i>
Bajo coste inicial, sobre todo para pequeñas instalaciones El sobrenadante es menos problemático que en el caso de los procesos anaerobios Control de operación simple Amplio intervalo de aplicación Buena desinfección del lodo (en el caso de procesos termófilos) Poca generación de olores con un diseño y operación adecuados Reducción de la masa total de lodo
<i>INCONVENIENTES</i>
Altos costes energéticos Generalmente menor reducción de sólidos volátiles que el proceso de digestión anaerobia Puede precisar la adición de álcali para reducir la bajada de pH Pueden producirse espumas Existe la posibilidad de dispersión de patógenos por medio de aerosoles El lodo es difícil de deshidratar por medios mecánicos Las bajas temperaturas afectan negativamente su rendimiento Aplicable generalmente a EDAR de tamaño reducido con una capacidad de tratamiento por debajo de 17.000 m³/día (Metcalf, 1991) aunque se ha utilizado con éxito en plantas mayores. Instalaciones típicas pueden tratar caudales de agua del orden de 3.000-6.000 m³/día

Así por ejemplo, en los procesos de digestión aerobia termófila el manejo del lodo es en forma de líquido, con un contenido en sólidos entre el 3% y el 5% (Haubry, 1992; Metcalf, 1991) mientras que para las operaciones de compostaje es preciso llevar a cabo una deshidratación previa del lodo hasta alcanzar contenidos en sólidos del 30-35% como mínimo (Cadenas, 1993, WEF, 1992).

En la Tabla 2 se recogen las principales ventajas e inconvenientes de las técnicas de digestión aerobia.

Las modernas técnicas de digestión aerobia termófila utilizan el carácter exotérmico de las reacciones de oxidación de la materia orgánica. Si la sequedad de los lodos es superior al 3% se puede conseguir un proceso autotérmico (procesos ATAD, según la nomenclatura inglesa correspondiente a "Autothermal Thermophilic

Aerobio Digestión") que se llevará a cabo a temperaturas comprendidas entre 45 y 70°C que permiten destruir la mayoría de los virus y huevos de ácaros (Haubry, 1992; Kelly, 1993). Este proceso de digestión opera con tiempos de retención mínimos del orden de un día (Fuchs, 1993) aunque los valores correspondientes a diferentes instalaciones se encuentran en un intervalo muy amplio. Se recomienda que todo el lodo esté sometido a una temperatura mínima de 55°C para que la desinfección sea satisfactoria.

Según algunos estudios (Mason, 1992), este proceso es capaz de eliminar microorganismos nocivos refractarios al tratamiento anaerobio. Cuando los lodos a tratar provienen de la depuración de aguas residuales urbanas y de aguas de origen industrial, se considera que una buena alternativa para conseguir un producto con suficiente estabilidad química y un nivel suficientemente bajo de patógenos el acoplar un proceso de digestión aerobia termófila con una digestión anaerobia (Haubry, 1992). Otros trabajos (Fuchs, 1993) indican que es posible conseguir mediante digestión aerobia termófila una garantía simultánea de estabilización y desinfección.

Compostaje

El compostaje consiste en la descomposición aerobia por parte de bacterias y hongos de la materia orgánica existente en el fango deshidratado, con formación de un nuevo producto. Algunos autores hacen especial hincapié en que esta biodegradación se realice en un medio diferente del suelo (Manaban, 1990). Durante el compostaje se llevan a cabo transformaciones que sucederían en el suelo de forma natural pero con una cinética más rápida, ya que las condiciones en las que se realiza la operación son favorables para el desarrollo bacteriano. Para ello se lleva a cabo la mezcla del lodo deshidratado con un agente de textura o material soporte, que sirve para proporcionar porosidad y permitir la circulación de aire en el interior de la masa (siendo esta operación, en opinión de algunos expertos, la que diferencia de forma clara los procesos de compostaje de los de digestión aerobia). Este material de soporte también suele actuar como fuente de carbono suplementaria para las reacciones biológicas. El compost alcanza temperaturas entre 55 y 70°C y la duración de la operación de compostaje es del orden de 4-6 semanas. Se seguirá de un periodo de maduración adecuado para asegurar que la reacción de compostaje se ha completado de forma sustancial. En la Tabla 3 se recogen las principales ventajas y desventajas del proceso de compostaje.

Las instalaciones de compostaje pueden funcionar con diseños muy variados en función de la tecnología empleada y los condicionantes particulares. Por ejemplo, una planta de compostaje puesta en funcionamiento en noviembre de 1994 en Gelph (Ontario, Canadá)

(Gies, 1995) es capaz de tratar más de 18 t/día de biosólidos (expresados como materia seca) mediante el concurso de tres reactores cerrados que operan con ligera presión negativa, ésto unido al sistema de lavado de gases utilizando la propia planta de tratamiento de aguas permite llevar a cabo el proceso sin producción de olores desagradables. En España se están llevando a cabo interesantes estudios en el campo del compostaje y existen instalaciones de compostaje de biosólidos que están produciendo compost de gran calidad (Amorena, 1994; Cadenas, 1993; Caus, 1994; Arbiol, 1994).

Estabilización con cal del lodo líquido

Se lleva a cabo mediante adición de cal hasta incrementar el pH por encima de 12.0, asegurando que este valor mínimo se mantenga al menos durante un periodo de 2 horas. El lodo puede entonces ser utilizado directamente.

Este proceso tiene el inconveniente de que el lodo solamente es aplicable a suelos ácidos. Además, precisa gran cantidad de reactivo, los costes dependen de la situación particular de la instalación, el volumen de lodo se ve incrementado y la caída de pH después del tratamiento puede dar lugar a olores y a un aumento del contenido en microorganismos.

Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de los sistemas de compostaje.

COMPOSTAJE
VENTAJAS
Se obtiene un producto de alta calidad comercializable parí su uso en agricultura
Admite ser combinado con otros procesos y presenta unoí costes iniciales bajos
INCONVENIENTES
Requiere contenidos en sólidos entre el 40 y el 60% así como la incorporación de un agente de textura
Es peciso disponer de un sistema de aireado a presión o bien de volteado mecánico, y debido a ello existe una posible dispersión de patógenos a través del polvo
Elevados costes de operación y grandes requerimientos de terreno
Precisa la incorporación de otro material como fuente de carbono
Es un productor potencial de olores aunque la observancií de procedimientos adecuados de operación y diseño (Benedict, 1986; Finstein, 1986) minimizan la aparición de olores desagradables. La visita a unas moderna; instalaciones de compostaje (Mancomunidad de la Comarcí de Pamplona, 1994) permite comprobar este extremo

Almacenamiento como líquido

Almacenado el lodo líquido durante un periodo mínimo de 3 meses. Aparte de llevarse a cabo una estabilización, este procedimiento permite almacenar los excedentes de lodo ya que su aplicación, estacional, no se extiende por igual a lo largo del año (Royer, 1990, Gies, 1995, Metcalf, 1991).

Deshidratacion y almacenamiento

Acondicionamiento del lodo no tratado mediante la adición de cal u otros coagulantes seguido de deshidratación y almacenamiento de la torta durante un periodo mínimo de 3 meses. Si el lodo ha sido sometido anteriormente a digestión anaerobia mesófila primaria, el periodo de almacenamiento será llevado a cabo durante un periodo de tiempo no inferior a 14 días.

Acondicionamiento térmico

Como etapa previa a la deshidratación del lodo por medio de métodos mecánicos, suele ser conveniente realizar algún tipo de tratamiento térmico que facilite dicha deshidratación, de esta manera se puede reducir o eliminar la adición de acondicionadores químicos (WEF, 1992; WEF, 1992a; Vater, 1984; Karlsson, 1993). El fundamento del acondicionamiento térmico es la rotura de las membranas celulares por calor con lo que se libera el agua contenida en su interior y es posible mediante métodos mecánicos convencionales (centrífugas, filtros) obtener valores de concentración en sólidos entre el 30 y el 40%. Existen dos principales variantes de acondicionamiento térmico, procesos de tratamiento térmico y de oxidación a baja temperatura.

Secado térmico

Ya se han mencionado en la primera parte de este artículo los procesos de secado térmico de biosólidos como una de las nuevas técnicas de cara a obtener un producto estable y fácilmente manejable que puede ser posteriormente utilizado con diferentes finalidades, bien de tipo agrícola o como combustible. Existen en el mercado procesos de secado térmico de lodos (Alpha, 1993; Gies, 1995) que, partiendo de biosólidos deshidratados con un 20-40% en sólidos, producen un granulado (con tamaños de partícula entre 2 y 5 mm) de bajo contenido en humedad, con un porcentaje de sólidos entre el 88 y el 96%.

Situación actual en países europeos

La Tabla 4 indica el porcentaje de lodos tratados mediante distintos procesos en los diferentes países de la Comunidad Europea así como los correspondientes a la CE globalmente.

Como puede comprobarse fácilmente, la suma de porcentajes correspondientes a un país determinado es mayor que 100, ya que un mismo lodo puede sufrir varios tratamientos de los descritos. En prácticamente todos los países se llevan a cabo procesos de deshidratación y de digestión, bien sea ésta aerobia o anaerobia. La estabilización de biosólidos mediante adición de cal es un procedimiento casi exclusivo de España y aunque no se dispone de datos cuantitativos sobre compostaje, ya se ha indicado anteriormente que se está llevando a cabo en diversas instalaciones.

PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE BIOSÓLIDOS

Oxidación húmeda

La oxidación húmeda es un proceso utilizado en la industria para el tratamiento de residuos con bajo calor de combustión tales como efluentes acuosos con reducidas concentraciones de sustancias orgánicas (Sittig, 1979). El principio de este proceso consiste en la oxidación de los contaminantes orgánicos en fase acuosa mediante el oxígeno, a elevada temperatura y presión con producción de dióxido de carbono y productos inocuos (Cheremisinoff, 1989). El origen del mismo se encuentra en la necesidad de hallar un tratamiento que minimice el problema de la generación de lodos procedentes de los procesos de depuración, por medio de la utilización de forma innovadora y eficaz de las técnicas de oxidación ya mencionadas (García, 1993).

Mediante este proceso se pueden obtener fuertes reducciones del contenido en sólidos de los lodos producidos así como de la carga contaminante de los mismos (WEF, 1992a). Por ello, este sistema resulta útil ya que el volumen de lodos generados es mucho más reducido siendo éstos un producto libre de patógenos debido a la severidad del tratamiento. (Guiver, 1992; Bowen, 1989).

Se pueden considerar dos tipos generales de procesos (WEF, 1992): en la variante de presión intermedia, se lleva a cabo un tratamiento del lodo a una presión en torno a 40 atm y a unos 232°C de temperatura. Cada kilogramo de sólidos secos reacciona con un volumen de 2.8 m³ de aire. Existe también la oxidación a alta presión que opera a 260°C, y presiones de hasta 100 atm, precisando un volumen de 6.2 m³ de aire por kilogramo de sólidos. En ambos casos el tiempo de residencia es superior a 40 minutos. Estos procesos producen una

reducción media del contenido en sólidos volátiles de un 80%. Por centrifugación se separan los sólidos inertes o cenizas (utilizables en la industria cerámica, por ej.) con una sequedad entre el 75 y el 80%, recirculando el efluente líquido a la planta de tratamiento. Existen diferentes procesos comerciales de oxidación húmeda tales como el Zimpro, Osaka Gas, Kenox, Wetox, Oxidine y Vertech (Rijs, 1992; García, 1993).

Tabla 4. Procesamiento de los lodos en la CE

País	PORCENTAJE DE LODOS PROCESADO MEDIANTE					
	Espe s.	Des hid.	Dig. Aerobia	Dig. Aerobia	Co mp.	Adición de cal
Bélgica	53	60	67	22	0	2
Dinamarca	-	95	50	40	1	5
Francia	-	-	49	17	0	0
Alemania	-	77	64	12	3	0
Grecia	0	0	97	3	0	0
Irlanda	14	33	19	8	0	0
Italia	75	90	56	44	0	0
Luxem.	-	80	81	0	5	0
Holanda	-	53	44	35	0	0
España	-	70	65	5	-	26
Reino Unido	74	42	48	1	1	2
Media Global	43	61	56	17	1	2

(Nota: los porcentajes no tienen necesariamente que sumar cien ya que algunos procesamientos son en serie)

Incineración

Se puede definir la incineración de los lodos como su destrucción térmica a elevada temperatura en presencia de exceso de aire.

Puesto que todo tratamiento de aguas trae asociada inevitablemente la generación de un residuo sólido y el tratamiento de aguas se está generalizando y avanzando técnicamente, cada vez se producen mayores cantidades de biosólidos que es preciso gestionar de la manera más adecuada posible. En las grandes áreas urbanas, las alternativas de uso de los lodos producidos pueden no ser económicamente viables debido tanto al gran volumen de lodos producidos como al coste de transporte al lugar de destino. En estas circunstancias, la incineración de los lodos puede ser considerada como

una alternativa atractiva si se tiene en cuenta que va a producir una importante reducción del volumen de residuo y éste tendrá, en principio, una notable estabilidad y la ausencia de componente orgánico.

En la Tabla 5. se indican las principales ventajas de esta técnica así como los inconvenientes más notables, centrados en los de tipo económico, social y ambiental.

Puesto que las cenizas obtenidas representan un 30% de los sólidos totales contenidos en los biosólidos y pueden ser productos tóxicos debido a su contenido en metales (Matthews, 1992) se ha de buscar no obstante la mejor alternativa para el destino final de las mismas como puede ser su utilización como materia prima en la fabricación de materiales cerámicos o proceder a la vitrificación de las mismas (Smith, 1992, Matthews, 1992). Las instalaciones de incineración pueden además ser potenciales elementos contaminantes de la atmósfera, bien por lo inadecuado de su diseño o por una operación incorrecta de las mismas (Sastre, 1993).

Tabla 5. Ventajas e inconvenientes de la incineración de biosólidos.

INCINERACIÓN
VENTAJAS
Los biosólidos son reducidos a cenizas in-situ
Es una alternativa de depósito a largo plazo pues produce una notable reducción de volumen. Las cenizas representan un 20% del volumen total de materia seca (un 30% en peso) y del orden del 4% del volumen de tortas que tuvieran un 20% de contenido en sólidos
La combustión destruye todos los microorganismos presentes y oxida los compuestos orgánicos tóxicos
Los metales pesados en las cenizas son menos solubles
Un diseño adecuado puede hacer la incineración económicamente viable
Existencia de la tecnología adecuada para mantener el nivel de emisiones a la atmósfera en valores admisibles
INCONVENIENTES
De tipo económico dado que es la alternativa más costosa de eliminación de lodos (Sastre, 1994; Walker, 1982; Bruce, 1989; Dobson, 1990; Matthews, 1992)
Las instalaciones de incineración suelen plantear comunmente serios problemas de contestación social Posibles problemas medioambientales

Aunque los biosólidos poseen una composición mayoritariamente orgánica, el proceso de combustión no será autotérmico para biosólidos con sequedades por debajo del 20%. Para biosólidos con sequedades por encima del 30% la combustión puede llevarse a cabo sin aporte de combustible auxiliar.

La tecnología de combustión actualmente utilizada es la de lecho fluidizado que presenta notables ventajas respecto a otros sistemas de combustión (hornos de cámaras múltiples, por ejemplo) que por razones históricas se siguen utilizando en algunas plantas antiguas (Sastre, 1993, Smith, 1992).

PROCESADO Y DESTINO DE LODOS EN ALGUNAS EDAR

Se ha considerado de interés la realización de una encuesta en diversas EDAR de la geografía española para recoger una idea aproximada de la problemática en diferentes municipios y conocer tanto las alternativas al uso como los futuros planes para la utilización del lodo. Esta encuesta ha sido llevada a cabo telefónicamente y en algún caso se ha realizado una visita a las instalaciones. Los datos aquí recogidos no tienen necesariamente que ser estadísticamente representativos ya que la encuesta se ha realizado sobre una muestra muy reducida y su planificación no responde a un estudio estadístico riguroso. Se pretende simplemente tener referencia de algunos de los procedimientos actuales en materia de utilización de lodos así como la problemática que presentan. En la Tabla 6 se resumen para las instalaciones consideradas los valores del caudal diario tratado, producción de lodos, así como las utilidades de los mismos.

A continuación se expone la información recogida en las diferentes EDAR contactadas así como la proveniente de varios estudios realizados en el Principado de Asturias:

Valencia: con un caudal de tratamiento de unos 380.000 m³/día, produce diariamente, tras un proceso de digestión anaerobia, 230 m³ de lodos al 25% en sólidos (57 t de materia seca) que son utilizados en agricultura. El resto de los lodos, que no son sometidos a digestión, sufren un proceso de espesamiento y deshidratación tras el cual son incinerados.

Palencia: en la actualidad esta planta procesa una modesta cantidad (20.000 m³/día) de aguas residuales de carácter urbano produciendo tras un proceso de digestión anaerobia una cantidad de lodos (expresado como materia seca) del orden de 6 a 8 t/día. El contenido en sólidos del lodo obtenido es de alrededor de un 20% tras una etapa de filtrado en filtros banda.

El lodo obtenido se utiliza en su totalidad por un único agricultor. En lodos de esta estación se han realizado experimentos de vermicultura de cara a la eliminación del olor en tortas.

Zaragoza, La Almozara: esta EDAR procesa 26.000 m³ 'día de aguas residuales con un porcentaje de efluente industrial entre el 15 y el 40%. Tras un proceso de digestión anaerobia (con producción de energía eléctrica) y de deshidratación en filtro banda, se obtienen unas 20 t de lodos al 24% en sólidos que son depositados en vertedero.

Zaragoza, La Cartuja: estación diseñada para tratar 6 m³/s de efluentes fundamentalmente de origen urbano. En la fecha de contacto, se encontraba en fase de puesta en marcha, procesando unos 350.000 m³/día. Tras un proceso de espesamiento y de deshidratación mediante centrifugas se obtienen 400 t/día de lodos al 30% en sólidos. Por calentamiento con vapor se llega a sequedades del 85% tras lo cual se procede a su incineración en dos hornos de lecho fluidizado. Estas instalaciones cuentan con un sistema de estabilización química con cal para posibles emergencias.

Burgos: En la actualidad lleva a cabo el tratamiento de 95.000 m³/día con una carga contaminante de unos 513.000 habitantes equivalentes de la cual más del 60% es de origen industrial. El lodo producido tras un proceso de digestión anaerobia y deshidratación en filtro banda es de 160 t/día al 23% en sólidos (37 t/día de materia seca). El destino de estos lodos es la agricultura y el depósito en vertedero. A pesar de la elevada carga contaminante de origen industrial que llega a esta EDAR, el lodo obtenido puede ser empleado para usos agrícolas según la normativa CE.

Comunidad de Madrid: En la comunidad de Madrid operan del orden de 100 EDAR. Las de mayor tamaño tienden a proceder a la incineración de sus lodos. Las de menor tamaño, tras procesos de estabilización, destinan sus lodos a fines agrícolas (compostaje) si sus características lo permiten.

Principado de Asturias: Una vez que estén en funcionamiento todas las depuradoras de la Zona Central de Asturias, entre las que destacan las de Oviedo (Villapérez), Frieres y Baiña, tendrán en conjunto una capacidad de tratamiento superior a los 600.000 habitantes equivalentes. La producción diaria de biosólidos se estima en unas 54 toneladas (expresadas como materia seca). La idea original de llevar a cabo el tratamiento de todos los lodos mediante un único incinerador radicado en la depuradora de Oviedo ha provocado una importante contestación social en las zonas próximas a las instalaciones. En la actualidad, este proyecto se encuentra paralizado y los biosólidos son deshidratados y depositados en vertedero. Algunos sufren

un proceso previo de digestión anaerobia. El Principado de Asturias ha encargado diferentes estudios tanto sobre el proyecto de incineración como sobre posibles alternativas de tratamiento y uso de los biosólidos (Sastre, 1993, 1994).

Tabla 5. Ventajas e inconvenientes de la incineración de biosólidos.

EDAR	Caudales (10 ³ m ³ /día)	Sólidos Secos (t/día)	Uso y destino
Valencia	380	>57	Lodos digeridos → Agricultura Resto→Incineración
Palencia	20	8	Digestión→Agricultura
Zaragoza (La Almozara)	26	5	Digestión→Vertedero
Zaragoza (La Cartuja)	350	120	Incineración
Burgos	95	37	Digestión→Agricultura Digestión→Vertedero
Comunidad de Madrid	-	-	Estabilización → Agricultura Incineración
Asturias (Zona Central)	-	54	Digestión→Vertedero Deshidratación → Vertedero ¿Incineración? ¿Usos alternativos?

CONCLUSIONES

El tratamiento a que se someten los biosólidos difiere notablemente en función de diferentes factores, tales como la localización geográfica, el tamaño de las instalaciones, las características del efluente y razones de tipo económico-cultural.

Allí donde las características del lodo hagan que no sea adecuado para su uso agrícola, este podrá ser depositado, previa estabilización/secado o incineración, eligiéndose esta última opción cuando los volúmenes generados sean elevados y el espacio disponible para el vertido sea escaso.

El desarrollo de nuevas tecnologías puede permitir la utilización de los lodos con otros fines, aunque sea sólo de forma parcial.

Procesos de incineración pueden ser asimismo utilizados aunque los biosólidos sean potencialmente aprovechables con otros fines. Ello puede ser debido a razones histórico-económicas como consecuencia de la existencia de instalaciones de incineración en funcionamiento o bien a

dificultades de tipo logístico para el transporte y uso de estos biosólidos. El disponer simultáneamente de diferentes vías de tratamiento de biosólidos es práctica común y aconsejable, tanto debido a problemas de estacionalidad (caso de aplicaciones agrícolas) como como de posibles averías en las instalaciones.

Si los biosólidos son utilizables en el campo de la agricultura tras un adecuado tratamiento de los mismos, ésta podría ser la opción más recomendable siempre que los condicionantes de tipo práctico y de mercado lo permitan. Asimismo se ha de continuar paralelamente con las investigaciones de campo para poder determinar posibles efectos adversos no previstos que los biosólidos pudieran tener en la salud humana y/o medioambiental.

El desarrollo de nuevos procesos de estabilización y eliminación de lodos así como la mejora de los ya existentes dejan abiertas nuevas posibilidades para el uso y la disposición de los biosólidos generados en el proceso de limpieza de nuestras aguas residuales.

El tratamiento de los biosólidos ha de ser considerado de la máxima importancia para el diseño de las nuevas EDAR.

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS Y SIGLAS

ATAD: Autothermal Thermophilic Aerobic Digestión

atm: Atmósfera (101325 Pa)

CE: Comunidad Europea.

EDAR: Estación depuradora de aguas residuales.

EPA: United States Environmental Protection Agency.

m³: Metro cúbico,

t: Tonelada métrica (1000 kg).

WEF: Water Environment Federation.

°C: Grado centígrado.

REFERENCIAS

Alpha, Environmental Technology (1993), *Informe publicitario*.

Amorena Udabe, A. (1994), *Valorización Agrícola de los Fangos de Depuradora en la Comarca de Pamplona*, Jornadas Técnicas: Biosólidos y Aguas Depuradas Como Recursos, R. Mujeriego y L. Sala (Eds.). Pag. 53-66. Sant Feliu de Guíols, Gerona.

Arbiol, M. (1994), *Compostaje de Biosólidos de Jardinería y Fangos de Depuradora en Castelldefels*, Jornadas Técnicas: Biosólidos y Aguas Depuradas Como Recursos, R. Mujeriego y L. Sala (Eds.). Pag. 75-88. Sant Feliu de Guíols, Gerona.

Bastían, R.K. (1994), *United States Regulations and Practical Experience on Biosolids Reuse and Disposal*, Jornadas Técnicas: Biosólidos y Aguas Depuradas Como Recursos, R. Mujeriego y L. Sala (Eds.). Pag. 169-192. Sant Feliu de Guíols, Gerona.

Benedict, A.H., Epstein, E. y English, J.N. (1986), *Municipal Sludge Composting Technology Evaluation*, Journal of Water Pollution Control Federation, 58(4), 279-289.

Benefield, L.D. y Randall, C.W. (1982), *Biological Process Design for Wastewater Treatment*, Prentice-Hall, Inc, New Jersey.

Bowen, P.T., Hendrick, J.E., Woodward, T.A., Mitchell, L.C., Lahlou, M. (1989), *Sludge Treatment, Utilization, and Disposal*, Journal of the Water Pollution Control Federation, 61(6), 821-829.

Bruce, A.M., Davis, R.D. (1989), *Sewage Sludge Disposal: Current and Future Options*, Water Science and Technology, 21, 1113-1128.

Cadenas, A., Cañellas, N., Amengual, A., Calafat, J. (1993), *Planta Experimental de Compostaje de Lodos*, Ingeniería Química, 104-106, junio, 1993.

Caus Pía, J.M., Amengual Vich, A. y Cañellas Serrano, N. (1994), *Compostaje y Reutilización de Biosólidos en Agricultura: El Caso de Felanitx en Mallorca*, Jornadas Técnicas: Biosólidos y Aguas Depuradas Como Recursos, R. Mujeriego y L. Sala (Eds.). Pag. 67-74. Sant Feliu de Guíols, Gerona.

Cheremisinoff, P.N., ed. (1989), *Encyclopedia of Environmental Control Technology. Vol. I. Thermal Treatment of Hazardous Wastes*, Gulf Publishing Company, Houston.

Crohn, D.M. (1995), *Sustainability of Sewage Sludge Land Application to Northern Hardwood Forests*, Ecological Applications, 5(1), 53-62.

Dobson, J.N. (1990), *A Sludge Disposal Strategy for Dumfries and Galloway Regional Council*, Journal of the Institution of Water and Environmental Management, 4, 371-378.

- Finstein, M.S., Miller, F.C. y Strom, P.F. (1986), Monitoring and Evaluating Compostine Process Performance. Journal of Water Pollution Control Federation. 58(4).
- Fuchs, L., Schwinning, H. (1993), Digestión Termófila Aeróbica. Un Proceso Económico para el Tratamiento de Lodos, Tecnología del Agua. 109, 47-50.
- García Ramos, V. (1993), Nuevo Sistema Idóneo para el Medio Ambiente y Rentable para el Tratamiento de Fangos Orgánicos, Tecnología del Agua. 105, 74-79.
- Gies, G. (1995), Beneficial Use of Biosolids Expands in Canada. Biocycle 36(3), 79-82.
- Guiver, K. (1992), Proceedings of Enviroscoot '92 Symposium on 'Sewage Sludge Disposal: the Commercial Opportunities', Journal of the Institution of Water and Environmental Management. 6, 636.
- Haubry, A., Bonnin, C. y Prévot, C. (1992). Aerobic and Anaerobic Sludge Treatment Disinfection Techniques. Sludge 2000 Conference, Paper 8, Cambridge.
- Hernández Muñoz, A. (1994). Depuración de Aguas Residuales. 3ª Edición. Colección Señor. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- Karlsson, I. y Göransson, J. (1993), Thermic Sludge Treatment. Water Science and Technology, 27(5-6), 449-456.
- Kelly, H.G., Melcer, H. y Mavinic, D.S. (1993), Autothermal Thermophilic Aerobio Digestion of Municipal Sludges: A One-Year, Full-Scale Demonstration Project. Water Environment Research. 65(7), 849-861.
- Kuchenrither, R.D. (1992), The Obiectives of Sludge Treatment. Sludge 2000 Conference, Paper 6, Cambridge.
- Manahan, S.E. (1990), Hazardous Waste Chemistry, Toxicology and Treatment. Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Michigan.
- Mancomunidad de la Comarca de Pamplona (1994), EDAR de Arazuri, Instalaciones de compostaje.
- Mason, C.A., Häner, A., Hamer, G. (1992), Aerobia Thermophilic Waste Sludge Treatment, Water Science and Technology. 25(1). 113-118.
- Matthews, P.J. (1992), Sewage Sludge Disposal in the UK: A New Challenge for the Next Twenty Years, Journal of the Institution of Water and Environmental Management, 5. 551-559.
- Metcalf & Eddy (1991), Wastewater Engineering. Treatment. Disposal. and Reuse. 3ª Edición. Me Graw-Hill Inc., Nueva York.
- Rijs, G.B.J. (1992), Advanced Techniques for Minimizing the Volume of Sewage Sludge. Sludge 2000 Conference, Paper 16, Cambridge.
- Royer, L.S., Brookhart, N. (1990), Common-Sense Liquid Sludge Management, Water Environment & Technology. 52-57, diciembre, 1990.
- Sastre, H., Gutiérrez, A. y Mahamud, M. (1994), Evaluación Técnica y Económica de Dos Alternativas de Tratamiento de Lodos de Depuradora. Proyecto técnico, Consejería de Medio Ambiente y Urbanismo del Principado de Asturias, Oviedo.
- Sastre, H., Gutiérrez, A., Mahamud, M., Marañón, E. y Coca, J. (1993), Incineración de Lodos Originados en el Tratamiento de Efluentes Urbanos en Plantas Depuradoras. Proyecto técnico, Consejería de Medio Ambiente y Urbanismo del Principado de Asturias, Oviedo.
- Sittig, M. (1979), Incineration of Industrial Hazardous Wastes and Sludges. Pág. 323-340. Noyes Data Corporation, Nueva Jersey.
- Vater, W. (1984), Energy saving Sludge Incineration in Stuttgart Central Sewage Works, F.R.G., Water Science and Technology. 16,531-540.
- Walker, D.L. (1982), Sludge Disposal Strategy: a UK Viewpoint. Water Science and Technology. 14(3), 127-136.
- Walker Engineering, Ltd., Tratamiento de Lodos de Aguas Residuales Mediante el Sistema de Combustión Sumergida. Informe Técnico.
- Water Environment Federation (1992). Design of Municipal Wastewater Treatment Plañis. WEF Manual of Practice No. 8. ASCE Manual and Report on Engineering Practice No. 76. Water Environment Federation, Alexandria.
- Water Environment Federation (1992a). Sludge Incineration: Thermal destruction of Residues. Manual of Practice Fd-19. Water Environment Federation. Alexandria.