

Resumen

La generación de biosólidos en tres EDAR de distinto tamaño y principio operativo se incrementa con el caudal depurado según la expresión $y=ax^{2.5575}$, siendo sus características similares, con sequedades del 20-25%, y materia orgánica, N y P iguales a, respectivamente, 60-75%, 7% y 4% sobre materia seca. Los metales mayoritarios en los tres casos fueron, por este orden, Fe, Zn, Cu y Mn (97% del total, y 11-19 g/kg ms) siendo el minoritario el Hg. Los biosólidos, todos aptos para uso agrícola, concentraban la MO y los metales del agua residual 417 y 869 veces, respectivamente, estimándose que la contaminación de cada 484 l de agua residual generaba 1 kg de biosólido.

Palabras clave:

Agua residual urbana, EDAR, biosólidos, carga orgánica, metales pesados.

Abstract**Transfer of pollution from municipal wastewater to biosolids: their chemical characterization**

Production of biosolids depends on the amount of wastewater treated according the expression $y=ax^{2.5575}$, being y the log of TM/year of biosolids produced, and x the log of the m^3 /year of wastewater treated. Quality of biosolids generated by three WWTP does not seem function either of the amount of treated water and neither of the treatment process applied (active sludges or biodiscs). The biosolids exhibited values of 20-25% in dehydration, and those of organic matter, nitrogen and phosphour being equal to 60-75%, 7% and 4%, respectively. Moreover, the total of metals there present were 11-19 g/kg over dried matter, supposing Fe, Zn, Cu and Mn the 97% of all metals, and being Hg the minority metal. Biosolids can be used in agricultural practices (they agree with the Spanish normative here applied) and they concentrated the organic matter and metals found in wastewater up to 417 and 869 times, respectively. At the same time, we have stimated that each 484 l of wastewater produced 1 kg of biosolid.

Keywords:

Municipal wastewater, wastewater treatment plant, biosolids, organic load, heavy metals.

Transferencia de contaminación desde el agua residual urbana a los lodos de depuración: caracterización de biosólidos

Por: **Rafael Marín Galván**, jefe de Control de Calidad de Emacsa

Empresa Municipal de Aguas de Córdoba, S.A. (Emacsa)

C/ de los Plateros, 1

14006 Córdoba

Tel.: 957 222 500

Fax: 957 222 536

E-mail: rmargal@emacsa.es

Web: www.emacsa.es

1. Introducción

En un trabajo previo ya se presentaron los resultados obtenidos en la caracterización de biosólidos o fangos de depuración producidos por la EDAR La Golondrina (Emacsa-Córdoba) durante los años 2002 y 2003. Dado que la depuración de un agua residual implica un fenómeno más o menos complejo de concentración de la contaminación existente en origen (orgánica, fisicoquímica, microbiológica) en unos subproductos finales que acumulan tal contaminación, también se prestó atención a este tema.

En el referido estudio se comprobó que el contenido del agua residual bruta en metales tras digestión ácida en caliente ($>0,02$ mg/l por metal) era de unos 2,7 mg/l, siendo el mayoritario el Fe con 1,5 mg/l, seguido de Cu, Zn, Mn, Pb, Cr, Ni y Cd. Cada litro de agua residual estaba compuesto, además, por unos 500 mg de materias orgánicas (materia biodegradable), mientras que el agua residual depurada presentaba contenidos totales

de metales ($>0,001$ mg/l por metal) de unos 1,4 mg/l, siendo nuevamente el metal mayoritario el Fe, seguido de Pb y Cr, Cu, Ni, Cd, Mn, Zn, y Hg.

Calculado el rendimiento de depuración para cada especie metálica de las investigadas, lo que en realidad indica la fracción de metal que pasa finalmente a los biosólidos o lodos de depuración, se concluyó que las más altas tasas de reducción de metales fueron las de Fe (75%) y Zn (42%), seguidos de Cu, Hg y Mn ($\approx 25\%$).

Por otra parte, los biosólidos actúan como acumuladores de materias en ellos. Así, por cada 111.251 m^3 /día de agua que accedía a la EDAR (unas 111.000 t), se produjeron aproximadamente 145 t de biosólidos. Los biosólidos caracterizados presentaron altos contenidos en N y P (8% y 4%, respectivamente sobre materia seca), así como en Ca, Mg y K (todos nutrientes empleados por las plantas verdes), por lo cual podrían presentar buenas aptitudes para su empleo agrícola. Por ello, en

la práctica se destinan en una parte importante a compostaje.

Con respecto a las tasas de acumulación de sustancias en el biosólido, entendidas éstas como cociente de la concentración en el lodo de sustancia (en mg/kg), dividido entre su concentración en el agua a depurar (en mg/l), la materia orgánica (media entre DBO₅ y DQO) y el N, experimentaban una tasa de concentración de unas 350 veces desde el agua residual influente al biosólido (sobre materia seca), mientras que el P lo hacía del orden del doble.

Además, los metales que más se bioacumulaban eran Fe (6.000 veces), Zn y Cu (1.600-1.700 veces), seguidos del Mn (1.100 veces). La secuencia de acumulación continuaba con Pb, Cr, Ni, Hg y Cd. Comparando estos factores con las concentraciones retenidas en la depuración (concentración de metal en agua bruta vs. concentración en agua depurada) se comprobó que los metales que eran más drásticamente eliminados en el proceso depurador (Fe, Zn y Cu) también eran los más bioacumulados. Asimismo, los metales menos eficazmente eliminados en el proceso (Pb, Cr, Ni, Hg y Cd, con diferencias sensibles entre ellos) también fueron los que menos se bioacumulaban. Estas evidencias indicaban que aquellos metales que eran menos eficientemente retirados del agua residual se bioacumulaban menos y, consiguientemente, estarían presentes en el agua depurada en cantidades proporcionalmente más altas.

Evaluado si existía un factor más determinante que otros que rigiera la presencia y concentración de metales pesados en los biosólidos, el estudio concluía que, cuantitativamente, la presencia de metales en el biosólido de la EDAR La Golondrina estaba regida mayoritariamente por dos factores determinantes: concentración de metales retenida en el proceso depurador y concentración de metales en agua bruta, que en principio podría estimarse como el factor más crítico. Final-

mente, las importantes variaciones en las tasas de acumulación de metales en los biosólidos debían responder a varios factores: el propio comportamiento fisicoquímico de cada metal concreto, sus diferentes tasas de adsorción o ingesta por las bacterias depuradoras, así como la propia dinámica práctica de generación de los fangos, con una producción cambiante a lo largo del tiempo en función del propio rendimiento depurador obtenido en la EDAR y de los caudales de tratamiento, lo que implicaba distintas tasas de recirculación de fangos secundarios, y distintas dinámicas de envío de fangos excedentarios para secado.

En este sentido, conviene recordar que la Unión Europea establece para el tema de la gestión de lodos de depuración una estrategia basada en tres aspectos: minimización en la generación de estos subproductos; su valorización en la medida de lo posible; y finalmente, tratamiento del resto no resuelto por las dos primeras vías.

El aspecto de la minimización pasa por una más exigente deshidratación y secado, de forma que se reduzcan los costes de transporte del lodo ya seco, así como, evidentemente, el volumen total de biosólido. En el tema de la valorización, podemos referirnos al empleo de los lodos en compostaje o uso agrícola más o menos directo, lo que implica que cumplan con la calidad exigida en la normativa (RD 1310/90) en cuanto a metales pesados y compuestos orgánicos allí presentes, haciéndose suficientemente "atractivo" al potencial usuario (agricultura, jardinería, etc.) el empleo de este substrato. Así mismo, también cabe citar la cogeneración de energía eléctrica apoyada en la digestión de lodos de depuración.

Finalmente, otras vías de gestión de estos subproductos, que probablemente tengan un mayor auge en un cercano futuro, sean su empleo en fabricación de cerámicas, ladrillos y otros elementos de construcción, así como la recuperación ener-

gética ligada a la pirólisis o gasificación de biosólidos. Aquí, el control de emisiones atmosféricas será crítico.

En función de lo dicho más arriba, este trabajo investiga más exhaustivamente sobre los biosólidos producidos a lo largo de un período de cinco años (del 1-11-2001 al 30-10-2006), pero no sólo en la EDAR de una ciudad de tamaño medio, sino en dos EDAR más pequeñas que operan con biodiscos en lugar de fangos activos y que sirven a poblaciones con características fabriles y urbanas distintas. Se trata de concluir si estos biosólidos difieren de los producidos en una EDAR municipal de gran tamaño, y si pueden ser usados también para aprovechamiento agrícola. Finalmente, se evaluará la tasa de transferencia de la contaminación existente en las aguas residuales hacia los biosólidos.

2. Materiales y métodos

Las técnicas aplicadas para caracterización de las aguas residuales fueron las habituales en control de calidad de aguas negras. En este sentido, los S_{SUS} se determinaron tras filtración y posterior secado del residuo a 108 °C; la DBO₅, mediante el método del Oxitop empleando inhibidor de nitrificación (*alil-tiourea*); y la DQO total, mediante la técnica del dicromato potásico. La determinación de metales totales mediante ICP se llevó a cabo tras digestión ácida de 20 ml de muestra, a las que se añadían 3 ml de HCl y 1 ml de HNO₃, manteniendo en recipiente cerrado de teflón durante 2 h a 180 °C. Nitrógeno y fósforo corresponden al denominado nitrógeno Kjeldahl el primero y, en el segundo caso, al P total obtenido tras digestión con persulfato amónico en medio sulfúrico.

Los muestreos de biosólidos se llevaron a cabo mensualmente para la EDAR La Golondrina, siendo trimestrales en los otros dos casos, tomándose las muestras en los primeros cinco días de cada mes. La se-



Figura 1. EDAR La Golondrina, desarenado-desengrasado.



Figura 2. Biodiscos de la EDAR Cerro Muriano.

quedad se obtuvo sometiendo el fango a 105-108 °C de temperatura en estufa hasta peso constante. Y la materia orgánica, calcinando el fango ya seco en mufla a 550 °C hasta peso constante. Por último, la determinación de metales totales en el biosólido se realizó mediante digestión de 1 g de fango ya seco, siguiendo el procedimiento descrito para el agua residual, mientras que para el N y el P se operó mediante digestiones (N-Kjeldahl y P total). El período estudiado comprende desde noviembre de 2001 hasta octubre de 2006, abarcando los períodos anuales desde noviembre de un año hasta octubre del siguiente.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización de los biosólidos: producción y contenido orgánico

La EDAR La Golondrina es una depuradora convencional que opera mediante el proceso biológico de fangos activos. En trabajos citados en la bibliografía se recogen sus características operativas. En todo caso, cítese que dispone de bombeo de agua en cabecera mediante tornillos de Arquímedes, pretratamiento (tamizado en dos niveles, desarenado y desengrasado), decantación primaria no forzada, tratamiento biológico equipado con selectores anaerobios previos a la aireación (24% so-

bre volumen total de las balsas de aireación), decantación secundaria y tratamiento de fangos (Figura 1).

Los fangos primarios se espesan mediante gravedad; los fangos secundarios, mediante flotación; y el conjunto de ambos se deshidrata con ayuda de polielectrólito en decantadores centrífugos. El caudal de diseño es de 108.000 m³/día. Esta EDAR cuenta con Autorización de Vertidos expedida por el Organismo de Cuenca con fecha 4-7-2005.

Por su parte, la EDAR de Cerro Muriano (barriada periférica de Córdoba) también procesa, además del agua doméstica de la zona, el agua residual procedente de la Base Militar del Euroejército instalada en el término municipal. Esta depuradora opera mediante el sistema de biodiscos (Figura 2), estando diseñada para una capacidad de depuración de ≈1.260 m³/día. El sistema consta de pretratamiento, biodiscos, decantación secundaria y deshidratación de fangos mediante centrifugación con adición de polielectrólito. La EDAR cuenta con Autorización de Vertidos expedida por el Organismo de Cuenca con fecha 17-1-2006.

Finalmente, la EDAR de Cardena (municipio de la provincia de Córdoba situado a unos 85 km de la capital, pero cuya gestión integral del agua la realiza Emacsa) procesa el agua doméstica de esta pequeña

población rural. Esta depuradora también opera mediante el sistema de biodiscos, estando diseñada para depurar hasta ≈275 m³/día. El sistema consta de pretratamiento, biodiscos, decantación secundaria y secado de fangos en eras al aire libre. La EDAR cuenta asimismo con Autorización de Vertidos expedida por el Organismo de Cuenca con fecha 4-9-2006.

Las tres EDAR cumplen habitualmente con los estándares de depuración exigibles que marcan valores límite de 25 mg/l de DBO₅, de 125 mg/l de DQO y de 35 mg/l de S_{SUS} para sus aguas depuradas vertidas a cauce público posteriormente.

Como diferencia entre ellas, aparte de su proceso operativo y su capacidad de tratamiento, debe indicarse que la EDAR de La Golondrina procesa agua residual doméstica (urbana+industrial) de una población de 325.000 habitantes, con un grado de industrialización de alrededor de un 15%, mientras que la EDAR de Cardena depura agua fundamentalmente doméstica (pequeña población rural, con un matadero industrial y una población de unos 1.000 h), y la EDAR de Cerro Muriano presenta una situación fabril intermedia entre las anteriores (población de unos 7.500 h), además de la ubicación en la barriada de las instalaciones militares reseñadas más arriba.

La **Tabla 1** recoge los datos medios para el quinquenio 2001/2006 sobre caudales depurados y producción práctica de biosólidos en las tres EDAR. Lógicamente, a medida que se incrementa el caudal depurado lo hace la producción de biosólidos. Además, esta relación puede expresarse matemáticamente mediante una regresión estadística (**Figura 3**), con un coeficiente de ajuste bastante significativo ($r^2 > 0,99$). Pese a sólo contar con tres casos, en principio podría concluirse que la producción de biosólidos en una EDAR urbana puede evaluarse a priori mediante una ecuación matemática del tipo:

$$\log(\text{producción de fangos en t/año}) = 0,0264 \times [\log(\text{caudal depurado en m}^3/\text{año})^{2,5575}]$$

Quedaría ahora, el comprobar la validez de esta hipótesis para otras EDAR.

Así mismo, la **Tabla 2** presenta los datos medios de todas las características investigadas en los biosólidos: se pueden observar diferencias y similitudes entre los tres casos. Así, si bien la sequedad de los tres lodos se sitúa alrededor del 20-25%, la materia orgánica alcanza casi el 75% en La Golondrina, bajando hasta menos del 60% para Cerro Muriano, y con un valor medio de casi el 70% para Cardeña.

Si observamos la variación a lo largo de los cinco años investigados de la sequedad de los biosólidos (**Figura 4**), puede apreciarse que los de las EDAR de La Golondrina y Cerro Muriano, sometidos a un proceso de deshidratación mediante centrifugado con adición de polielectrólito, mantienen una más alta homogeneidad que los secados en eras al aire libre, lo cual es esperable por la influencia climatológica sobre aquéllos, como indican los bajos valores de sequedad del año 2006 (mucho más húmedo que los dos anteriores) para la EDAR de Cardeña.

Podemos prestar atención ahora a la componente orgánica de los biosólidos. La **Figura 5** presenta la

Años 2002/2006	La Golondrina	Cerro Muriano	Cardeña
Proceso biológico	Fangos Activos	Biodiscos	Biodiscos
Caudal, m ³ /año	32 x 10 ⁶	4 x 10 ⁵	4 x 10 ⁴
Biosólidos, t/año	5 x 10 ⁴	10 ⁹	23
Kg biosól. / m ³ /agua	1,6	0,3	0,5

Tabla 1. Características de las EDAR.

Característica	La Golondrina	Cerro Muriano	Cardeña
Sequedad %	21,9	20,0	25,8
Materia orgánica %	73,9	58,7	68,0
Nitrógeno %	7,1	7,2	6,8
Fósforo %	4,2	3,2	3,9
Cobre	463	649	309
Hierro	9.792	16.717	10.106
Manganeso	245	687	267
Plomo	59	172	109
Cadmio	2,3	1,4	2,6
Níquel	23	47	43
Cromo	29	70	51
Zinc	482	1.117	703
Mercurio	1,7	1,2	1,0
Arsénico	5,6	18	6,8
Selenio	5,0	12	13
Cobalto	2,1	6,5	2,5
Ca+Mg+Na+K	5,0	4,8	4,8
Total metales	11.115	19.592	11.723

Nota: Metales en mg/kg de materia seca.

Tabla 2. Características de los biosólidos (período 2002-2006).

evolución de su % en materia orgánica en el período estudiado. En este caso no existen variaciones significativas entre años y, además, el contenido medio de los biosólidos de las tres EDAR no es esencialmente distinto. Así pues, ni el tipo de población (urbana o rural) ni el caudal depurado (desde más de 30.000.000 m³/año hasta sólo 40.000 m³/año) influyeron apreciablemente sobre el contenido en materia orgánica.

Puede intentarse ahora ver qué ocurre con el contenido en nitrógeno y fósforo de los biosólidos. Para el primero, tanto de la ya referida **Tabla 2** como de la **Figura 6**, se deduce que el contenido medio en los tres casos es el mismo, entre el 6,8 y el 7,2%. Por su parte, la variación anual de este parámetro, salvo para el año 2002, no ha sido especialmente relevante, si bien podría deducirse además, que durante los tres

primeros años del estudio la variabilidad fue más alta que durante 2005 y 2006, detectándose los valores más extremos del seguimiento en los biosólidos procedentes de Cerro Muriano y Cardeña, en que el nitrógeno osciló entre un máximo del 14% y un mínimo inferior al 4%.

En el caso del fósforo, los valores medidos son del orden de la mitad que para el nitrógeno. Así, el contenido en los fangos de las tres EDAR se sitúa entre el 3,2% y el 4,2%, aunque aquí la variabilidad interanual fue sensiblemente más baja que para el nitrógeno (Figura 7). En todo caso, la más alta variación se detectó para Cardeña con un abanico que oscilaba entre el 2% y el 7%, aproximadamente.

3.2. Caracterización de los biosólidos: metales

Desde la óptica del aprovechamiento agrícola de biosólidos una cuestión crítica es su contenido en metales pesados, especialmente de aquellos metales considerados en el Anexo I B del RD sobre utilización de lodos de depuración, y que cuya concentración se encuentra limitada (Tabla 3).

En nuestro estudio se han determinado no sólo siete los metales pesados del referido RD, sino un total de doce, además de metales "inocuos" como el calcio, magnesio, sodio y potasio, que en cierta medida se pueden considerar bien como beneficiosos para el suelo (sobre todo el calcio) o bien como nutrientes esenciales para los cultivos (el potasio, por ejemplo).

Tomando el total de los 16 metales investigados (Tabla 2 y Figura 8), este contenido sí variaba notablemente entre unas EDAR y otras. Si bien para La Golondrina y Cardeña se movían entre 11 y 12 mg/kg ms en valor medio, los biosólidos de la EDAR de Cerro Muriano alcanzaban más de 19 mg/kg ms, es decir del orden de un 70% más que en los otros casos. En el mismo sentido, la variación interanual extrema del total de metales era mínima para La

Metales limitados	Suelos pH<7	Suelos pH>7	EDAR La Golondrina		EDAR Cerro Muriano		EDAR Cardeña	
			Med.	Máx.	Med.	Máx.	Med.	Máx.
Cadmio	20	40	2,3	6,2	1,4	1,5	2,6	9,8
Cobre	1.000	1.750	463	738	649	798	309	481
Níquel	300	400	23	62	47	143	43	110
Plomo	750	1.200	59	107	172	271	109	190
Zinc	2.500	4.000	482	820	1.117	2.088	703	1.072
Mercurio	16	25	1,7	2,1	1,2	1,7	1,0	1,2
Cromo	1.000	1.500	29	71	70	197	51	158

Nota: Metales en mg/kg de materia seca.

Tabla 3. Metales pesados en lodos de depuración. Comparación con los límites establecidos en el RD 1310/1990 para uso en suelos ácidos y básicos.

Golondrina (mínimo 8 y máximo 14 mg/kg ms), muy acusada para Cerro Muriano (oscilando entre un mínimo de 6 y un máximo de 26 mg/kg ms) e intermedia para Cardeña.

En el caso de Cerro Muriano existen importantes instalaciones militares, potenciales productoras habituales de vertidos asimilados a industriales procedentes de labores periódicas de mantenimiento de vehículos terrestres y aéreos y, aunque estas instalaciones poseen medidas para minimización de vertidos industriales exigidas por la Ordenanza de Vertidos Industriales de Córdoba, algunos posibles vertidos accidentales de este tipo podrían ser los causantes del comportamiento indicado más arriba.

En el mismo sentido, la variación del total de metales en el fango de la EDAR de Cardeña (población rural) también es apreciable, oscilando sus puntas entre un mínimo de 8 y un máximo de 18 mg/kg ms. Aquí la industria más importante es la de un matadero industrial, cuya contribución al total ha de ser muy relevante.

Tanto en Cerro Muriano como en Cardeña, dado que son poblaciones muy modestas en comparación con Córdoba, el seguimiento de sus vertidos industriales es de mucha menor intensidad que con respecto a la

capital. Si bien existe la obligación del cumplimiento de la Ordenanza de Vertidos, su comprobación por parte de Emacsa es lógicamente menos sistemática. Además, considerando que las prácticas urbanas no tienen por qué ser más contaminantes en dos poblaciones pequeñas que en la propia ciudad de Córdoba, los resultados de acumulación de metales en los biosólidos nos estarían justificando la necesidad de extremar el control de vertidos (especialmente industriales) a nuestros saneamientos, como forma de minimizar prácticas ambientales incorrectas, aun en poblaciones pequeñas o muy pequeñas, lo que representaría un esfuerzo económico muy considerable para el organismo controlador.

Por otro lado, de los 16 metales investigados, en todos los casos se cumplía que el mayoritario fue el hierro, que representaba en valores medios el 88% para La Golondrina, el 85% para Cerro Muriano y el 86% para Cardeña. Por orden de importancia, y también para todos los casos investigados, el segundo metal mayoritario fue el zinc, con el 4% sobre el total de metales en La Golondrina y el 6% para Cerro Muriano y Cardeña. Finalmente, cobre y manganeso componían el resto de metales más importantes, con un

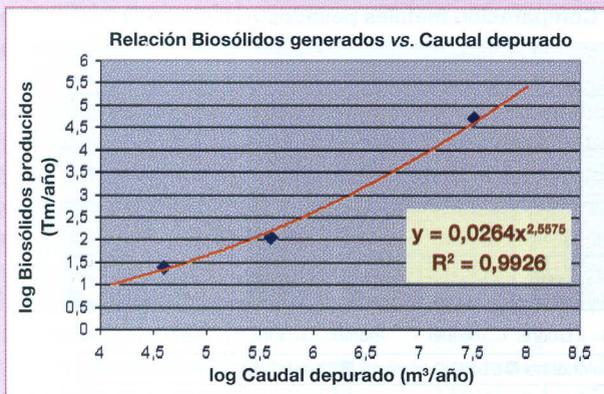


Figura 3. Relación entre producción de biosólidos y caudal depurado.

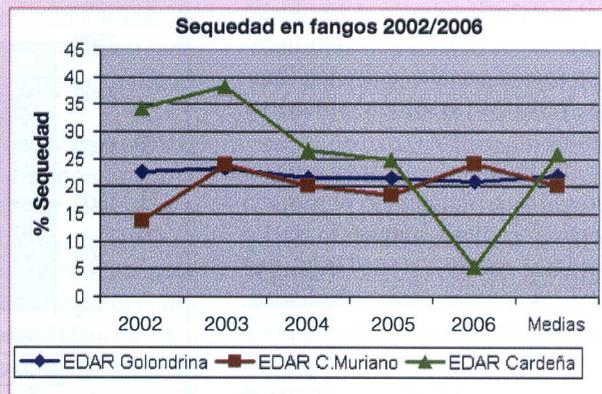


Figura 4. Sequedad en biosólidos.

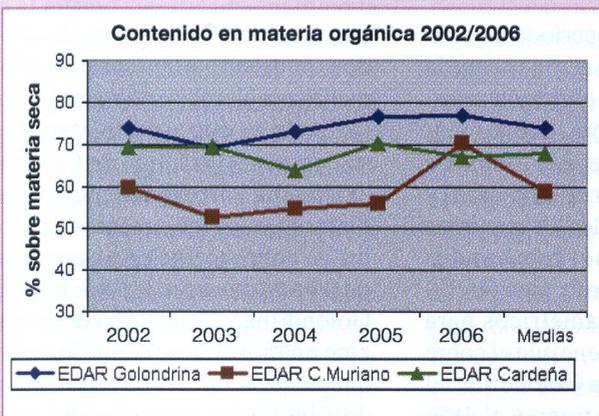


Figura 5. Materia orgánica en biosólidos.

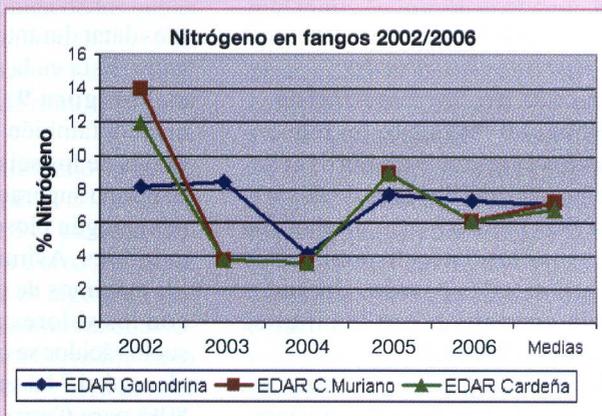


Figura 6. Nitrógeno en biosólidos.

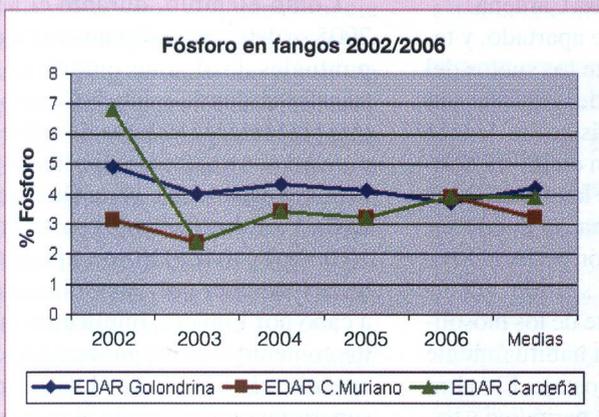


Figura 7. Fósforo en biosólidos.

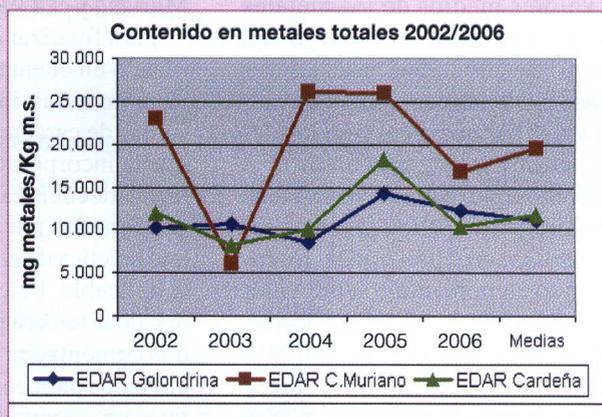


Figura 8. Total de metales en biosólidos.

4,2% en la Golondrina, un 3,3% en Cerro Muriano y un 2,6% en Cardeña, para cobre, y un 2,2% en La Golondrina, un 3,4% en Cerro Muriano y un 1,8% para Cardeña, en cuanto a manganeso. Estos cuatro metales

representaron del orden del 97% o más de todos los metales presentes en los biosólidos. A destacar, además, que el contenido en plomo (contaminante ambiental ubicuo) en los tres biosólidos fue del 0,9% para

Cerro Muriano y Cardeña, y de sólo el 0,5% para La Golondrina.

Siguiendo el orden de ocurrencia de los metales investigados, se obtuvo para los lodos de las tres EDAR que los contenidos en níquel y cro-

mo superaron el 0,1%, siendo siempre el metal minoritario el mercurio, con menos del 0,01%, encontrándose los demás metales entre los límites anteriores (arsénico, selenio y cadmio).

A destacar, por último, que el contenido en metales no pesados o "inocuos" (calcio, magnesio, sodio y potasio) osciló entre el 0,02 y el 0,04%, en los tres casos estudiados, y que el contenido en un metal poco habitual, como el cobalto (ligado a prácticas hospitalarias), superó al de mercurio, variando entre el 0,02% y el 0,03%.

3.3. Posibilidad de aprovechamiento agrícola de los biosólidos

Referidos más arriba los requerimientos exigidos para aprovechamiento agrícola de lodos de depuración (RD 1310/90), se trata ahora de comparar los datos disponibles de los seis metales pesados limitados por la normativa, con los límites aplicables (Tabla 3).

Tanto si se aplican las limitaciones para el caso de suelos básicos, como de suelos ácidos (situación más exigente), puede apreciarse que los valores medios de los metales pesados limitados a lo largo del quinquenio 2002-2006, para las tres EDAR estudiadas, no superaron ningún valor paramétrico, siendo además sensiblemente más bajos. Los contenidos que más se aproximaban a los límites fueron los de zinc y cobre, para los tres biosólidos, representando en porcentaje sobre valor máximo del 46% en La Golondrina, el 65% para Cerro Muriano y el 31% para Cardeña, en el caso del cobre, y del 19% para La Golondrina, el 45% para Cerro Muriano y el 28% para Cardeña, en el caso del zinc. Nótese el relativamente alto contenido de los biosólidos de Cerro Muriano en estos dos metales.

Por otra parte, se puede ser más conservativo en estos cálculos y comparar los límites más exigentes del RD con los máximos del contenido en metales limitados que pudi-

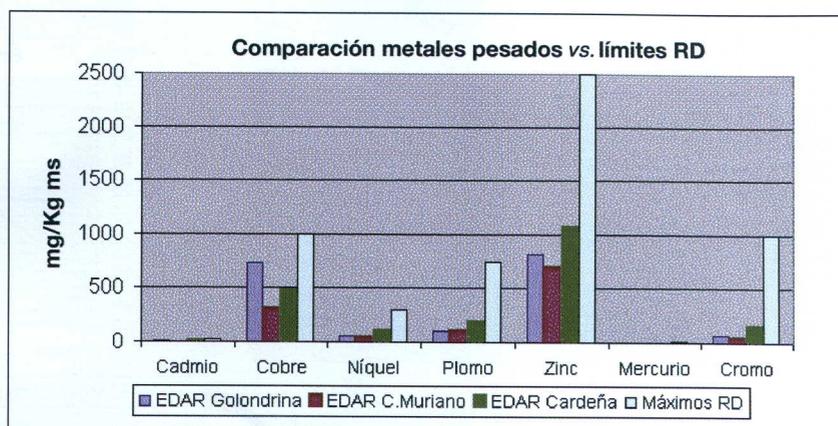


Figura 9. Comparación del máximo contenido en metales pesados limitados de los biosólidos vs. límites del RD para suelos ácidos (situación más desfavorable).

mos datar durante el período investigado. Ésta es la situación recogida en la Figura 9. Se continúa apreciando, también ahora, que los máximos de los seis metales limitados tampoco superan en ningún caso, y para ningún biosólido, los máximos exigibles. Asimismo, comparados los máximos de cobre y zinc (en %) con los valores paramétricos para suelos ácidos se obtiene que el cobre alcanzó el 74% en La Golondrina, el 80% para Cerro Muriano y el 48% para Cardeña, y el zinc el 33% para La Golondrina, el 83% para Cerro Muriano y el 43% para Cardeña.

Para finalizar este apartado, y teniendo en cuenta que los suelos del término municipal de Córdoba son suelos de carácter básico, se deduce que la incorporación de los biosólidos procedentes de las tres EDAR gestionadas por Emacsa puede ser una práctica de gestión perfectamente aplicable. En este sentido, del orden de la tercera parte de los biosólidos comentados son habitualmente enviados para compostaje. Esto implica un seguimiento periódico y exhaustivo a fin de comprobar que se respetan los límites del RD.

Al margen de esto, pero totalmente relacionado con ello, hay que mencionar lo crítico que es el control de vertidos industriales a la red de saneamiento, puesto que la presencia de altas cantidades de metales en las aguas residuales integradas que llegan a nuestras EDAR ur-

banas se acumulan en los biosólidos, pudiendo plantear posteriormente problemas en su gestión. Insistiendo en este aspecto, y en el caso concreto y práctico de Córdoba, existe una correspondencia inmediata entre los incrementos de niveles de cobre y zinc en el agua residual bruta que accede a la EDAR La Golondrina y el aumento de cobre y zinc en biosólidos, lo que ha hecho que históricamente se hayan exigido a las varias empresas del cobre radicadas en la ciudad sistemas de depuración eficaces.

Como ejemplo, durante el año 2005 se detectaron algunos vertidos puntuales de algunas empresas de transformados de cobre de Córdoba, que presentaron valores de cobre y zinc en sus vertidos superiores al máximo establecido en la Ordenanza de Vertidos (6,0 mg/l para Cu y 10,0 mg/l para Zn) lo que, aparte de las actuaciones previstas y llevadas a cabo por Emacsa, implicaron que los contenidos en el agua residual de entrada a la EDAR La Golondrina superasen puntualmente el valor de 1,0 mg/l de cobre y de 0,5 mg/l de zinc. Esto provocó que en abril y mayo de 2005 los biosólidos generados en la depuradora presentaran valores en estos metales mucho más altos que los habituales (≈ 1.000 mg/kg ms de cobre y ≈ 1.300 mg/kg ms de zinc), aproximándose al límite paramétrico para el empleo agrícola de estos biosólidos.

3.4. Transferencia de la contaminación del agua residual a los biosólidos

En un trabajo anterior ya se investigó sobre el aspecto de que los biosólidos actúan lógicamente como receptores de la contaminación existente en origen en un agua residual. Una forma de aproximarnos más a este tema puede ser comparar el contenido en diferentes contaminantes (carga orgánica, metales, etc.) del agua residual y el contenido acumulado en la práctica en el biosólido. Para poder obtener datos coherentes ha de considerarse que tenga el mismo significado analítico la expresión de una concentración en mg/l en el agua residual y la de mg/kg en el biosólido, realizando la aproximación de que la densidad del agua residual sea aproximadamente 1, con lo que 1 l equivaldría a 1 kg, o lo que es lo mismo, que 1 mg/l equivaldría a 1 mg/kg.

El primer dato sobre este aspecto es el de que la transferencia de las materias constatada en la EDAR La Golondrina (fangos activos) implicó la generación de 1,6 kg de biosólido por m³ de agua residual (Tabla 1), mientras que en las EDAR que operan por biodiscos esta transferencia fue sensiblemente más baja, generando 0,3 kg de biosólido por m³ de agua residual para Cerro Muriano y 0,5 kg de biosólido por m³ de agua residual para Cardeña. No existe una clara relación entre tamaño de la EDAR o tipo de población y producción de biosólidos, pero los fangos activos sí parecen ser más eficientes que los biodiscos en este aspecto.

Además, en las EDAR en realidad lo que se genera es un lodo o biosólido con una parte de materia seca y otra de humedad. Así, parece más adecuado expresar los contenidos de sustancias en el biosólido, no sobre materia seca, sino sobre la materia real que compone aquél, es decir, integrando el porcentaje de agua del lodo. Hecho esto se ha confeccionado la Tabla 4. En ella se observa que dividiendo la concentración de sustancias en el biosólido entre la concen-

tración de aquéllas en el agua residual bruta, se puede estimar la tasa de transferencia o de concentración de sustancias desde el agua residual bruta al producto final.

Comparando los tres tipos de biosólidos disponibles se aprecia que la transferencia de materia orgánica global (media aritmética de DBO₅ y DQO, no se ha tenido en cuenta aquí la pequeña cantidad de materia orgánica ligada a los sólidos en suspensión) oscilaba entre un factor de 319 para La Golondrina y otro de 592 para Cardeña, con un valor medio de 424 para Cerro Muriano. Es decir, la carga orgánica de las aguas residuales se transformaba en 162 g/kg para La Golondrina, en 117 g/kg para Cerro Muriano y en 175 g/kg para Cardeña.

En el caso del nitrógeno, la tasa o factor de transferencia variaba entre 252 para Cardeña, 311 para La Golondrina y 351 para Cerro Muriano. El caso del fósforo es algo distinto, pues las cantidades eran razonablemente similares para Cerro Muriano (320) y Cardeña (113), pero para el biosólido de La Golondrina, el factor fue sensiblemente más alto (1.070). En cualquier caso, podría estimarse como media ponderada,

que las materias orgánicas de un agua residual urbana se concentraban del orden de unas 450-500 veces en los biosólidos producidos.

En el caso de la tasa de transferencia de especies metálicas, sólo pueden ofrecerse datos del biosólido de La Golondrina, pues no se disponen de suficientes datos del contenido en metales de las aguas residuales de las otras dos depuradoras como para extraer conclusiones fundamentadas. En la ya referida Tabla 4 se comprueba que las tasas de concentración de los cuatro metales mayoritarios en el biosólido, que también lo son en el agua residual urbana de Córdoba (hierro, zinc, cobre y manganeso) se concentran entre 256 y 1.153 veces, siendo la tasa total de concentración de los 16 metales investigados de 869 veces. Puede destacarse que a medida que la concentración en el agua residual del metal es más alta, estadísticamente se comprueba que el factor de transferencia también es más alto. Para finalizar este apartado, los 2,8 mg/l de metales totales del agua residual se transforman en 2.434 mg/kg de biosólido.

Resumiendo todos los datos ofrecidos, tanto de transferencia de ma-

Tabla 4

Parámetro	EDAR La Golondrina			EDAR Cerro Muriano			EDAR Cardeña		
	Agua	Biosólido	Transf.	Agua	Biosólido	Transf.	Agua	Biosólido	Transf.
DBO ₅	424	-	382	176	-	667	192	-	914
DQO	590	-	274	378	-	311	401	-	438
Mat. Orgánica	-	161.841	319	-	117.400	424	-	175.440	592
Nitrógeno	50	15.549	311	41	14.400	351	40	17.544	252
Fósforo	8,6	9.198	1.070	20	6.400	320	23	10.062	113
Hierro	1,86	2.144	1.153	-	3.343	-	-	2.607	-
Zinc	0,18	106	586	-	223	-	-	181	-
Cobre	0,19	101	534	-	130	-	-	80	-
Manganeso	0,21	54	256	-	137	-	-	69	-
Total metales	2,8	2.434	869	-	3.918	-	-	3.025	-

Nota: Datos de concentraciones en el agua residual en mg/l y datos de contenidos en los biosólidos, en mg/kg sobre materia real.

Tabla 4. Transferencia de contaminantes desde el agua residual a los biosólidos.

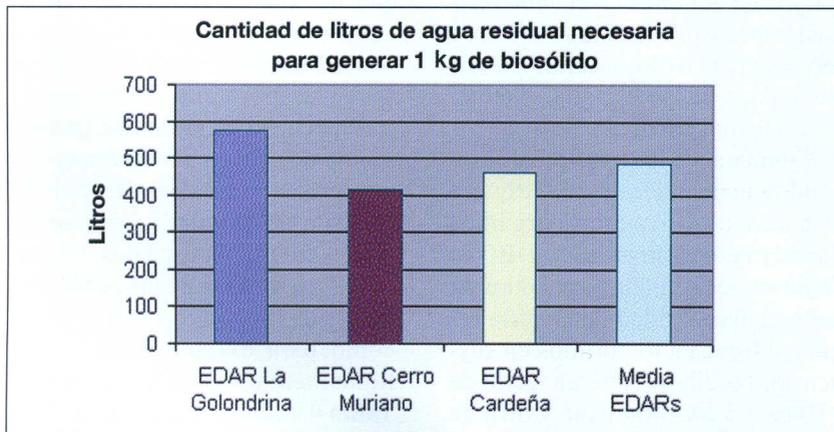


Figura 10. Estimación en la producción de biosólidos.

terias orgánicas como de metales, se deduce que la concentración de componentes del agua residual al biosólido es de 575 veces en La Golondrina, 415 en Cerro Muriano y de 462 en Cardeña. Esto, en términos prácticos, quiere indicar que 575 l de agua residual urbana de Córdoba depurados en la EDAR La Golondrina generaron 1 kg de biosólidos, que 415 l de agua residual urbana de Cerro Muriano depurados generaron 1 kg de biosólidos, y que 462 l de agua residual urbana de Cardeña produjeron 1 kg de biosólidos (Figura 10), todos ellos aptos para su aprovechamiento agrícola.

Como corolario, no se han encontrado especiales diferencias entre los biosólidos obtenidos en tres EDAR de diferente tamaño, que depuran aguas urbanas de poblaciones de distinto tamaño y que operan con sistemas biológicos distintos, una con fangos activos y dos con biodiscos, estableciéndose asimismo como, en valor medio, la carga contaminante de cada 484 l de agua residual se "concentra" en 1 kg de biosólidos o lodos de depuración.

4. Conclusiones

La producción de biosólidos o lodos de depuración en EDAR urbanas puede expresarse matemáticamente mediante una función exponencial de la forma $y=ax^{2.5575}$. A medida que se incrementa el caudal

depurado lo hace la generación de estos subproductos.

Las características globales de los biosólidos no dependen del tamaño de la población servida ni del proceso depurador aplicado, si bien el sistema de deshidratación mediante centrifugación con polielectrolito garantiza su homogeneidad en el tiempo. Su sequedad media está en torno al 20-25%; la materia orgánica, entre el 60 y el 75%; y el nitrógeno y el fósforo oscilaron, respectivamente, alrededor del 7% y del 4% sobre materia seca.

Los metales mayoritarios del biosólido fueron, por este orden: Fe (85% por sí solo, sobre ms), Zn, Cu y Mn, suponiendo estos cuatro el 97% del total de metales en los tres casos estudiados (11 a 19 g/kg ms). El minoritario fue el Hg y debe destacarse la detección de Co (0,02-0,03%). Del orden de 2,5 g de metales componían, en materia real, el biosólido.

Los tres tipos de biosólidos cumplen con la norma para su aprovechamiento agrícola. En este aspecto, paralelamente, se demuestra crítico un sistemático y eficaz control de vertidos industriales al saneamiento para obtener biosólidos aptos para uso agrícola.

La transferencia de contaminación desde agua residual a biosólidos parece ser más eficaz en depuradoras por fangos activos (575 l se concentran en 1 kg de biosólido) que mediante biodiscos (438 l se

concentran en 1 kg de biosólido), estimándose con los datos disponibles, que la materia orgánica exhibía un factor medio de transferencia de 417, y los metales de 869. Finalmente, y con independencia del sistema de depuración aplicado, la contaminación existente en cada 484 l de agua residual ha dado lugar a 1 kg de lodo de depuración.

5. Agradecimientos

A todos los integrantes del Servicio de Control de Calidad de Emacsa.

6. Bibliografía

- [1] AWWA. Standard Methods for the examination of water and wastewater, 21st ed. Washington (2005).
- [2] Elías, X. (2004). Gestión y post-tratamientos de fangos de EDAR. Las directivas de la UE condicionan su reutilización e inducen a la valoración energética. Tecnología del Agua, 249, pp. 34-52.
- [3] Marín Galvín, R. (2005). Caracterización de fangos de la EDAR La Golondrina (Emacsa-Córdoba): su función como receptores finales de la contaminación del agua residual urbana. Tecnología del Agua, 260, pp. 36-44.
- [4] Marín Galvín, R. (2006). Relaciones entre microfauna del fango activo y depuración en la EDAR La Golondrina (Emacsa-Córdoba). Ponencia presentada a las XX Jornadas Técnicas de la Asociación de Abastecimientos de Agua y Saneamientos de Andalucía. Actas.
- [5] Memorias anuales de Emacsa, años 2001-2005.
- [6] Metcalf; Hedí Inco. (2003). Wastewater Engineering. Treatment and reuse, 4th ed. Ed. McGraw Hill. New York.
- [7] Nemerow, N.L.; Dasgupta, A. (1998). Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos. Ed. Díaz de Santos. Madrid.
- [8] RD 1310/1990, BOE 262 de 1-11-90, regulando la utilización de los lodos de depuración.