

# **Funciones de coste para la gestión de residuos de estaciones depuradoras de aguas residuales.**

María Molinos Senante, Francesc Hernández Sancho  
*Departamento de Economía Aplicada II  
Universidad de Valencia.*

Ramón Sala Garrido  
*Departamento de Matemáticas para la Economía y la Empresa  
Universidad de Valencia.*

## **RESUMEN**

La depuración de aguas residuales conlleva la generación de lodos junto con otro tipo de residuos que deben ser gestionados correctamente para evitar efectos negativos sobre el medio ambiente. La progresiva implementación de la Directiva 91/271/CEE, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas, ha supuesto un drástico incremento en las cantidades de lodos generados, lo cual implica, que en la actualidad, la gestión de dichos residuos supone elevados costes para las empresas explotadoras de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs). Por ello, con el objetivo de contribuir a un mejor conocimiento sobre la estructura de costes, predecir las repercusiones económicas ante cambios en la cantidad de residuos generados y en definitiva, ayudar a reducir los costes relativos a la gestión de los residuos generados en el proceso de depuración de aguas residuales, en este trabajo se desarrollan dos funciones de coste que relacionan el coste de gestión de estos residuos con la cantidad de lodos, arenas, residuos asimilables a urbanos y grasas generadas en una EDAR.

**Palabras claves:** estructura de costes, gestión de fangos, gestión de residuos, modelización de coste, tratamiento de aguas residuales.

**Área temática:**

## **ABSTRACT**

Wastewater treatment has associated the generation of sewage sludge with other types of waste that must be managed correctly to avoid negative effects on the environment. The progressive implementation of Directive 91/271/EEC, on urban wastewater treatment, has meant a important increase in the quantities of sewage sludge generated, which means that nowadays, the management of such waste involves high costs for wastewater treatment plants (WWTPs) operators. Therefore, in order to contribute to a better understanding on the cost structure, predict the economic impact to changes in the amount of waste generated, and ultimately, help to reduce costs related to the management of the waste generated in the process of wastewater treatment, this work develops two cost functions relating the cost managing of these waste with the amount of sludge, sand, urban waste and oily waste generated in a WWTP.

**Keywords:** cost modelling, cost structure, sewage sludge management, waste management, wastewater treatment.

### *Agradecimientos:*

Los autores quieren agradecer la ayuda financiera recibida por el Gobierno de España a través del proyecto NOVEDAR-Consolider Project (CSD 2007-00055) y del Programa de becas FPU (AP2007-03483).

## 1. INTRODUCCIÓN

La depuración de aguas residuales conlleva la generación de un residuo no deseado denominado genéricamente lodo residual o biosólido. Así, el tratamiento de las aguas residuales no termina una vez que el efluente de la estación depuradora de aguas residuales (EDAR) es vertido al medio ambiente, sino que continúa hasta que el lodo es transformado en un material inerte e inocuo (Aragón, 2009).

La entrada en vigor de la Directiva 91/271/CEE relativa al tratamiento de aguas residuales urbanas junto con los Planes Nacionales de Saneamiento y Depuración del periodo 1995-2005 y, más reciente, de 2007 – 2015 han supuesto que para el conjunto de España, según datos del Registro Nacional de Lodos (RNL), la producción de lodos haya incrementado en un 41% en el periodo de 1997 -2007. La figura 1 muestra la cantidad de fango generado por año en dicho periodo de tiempo.

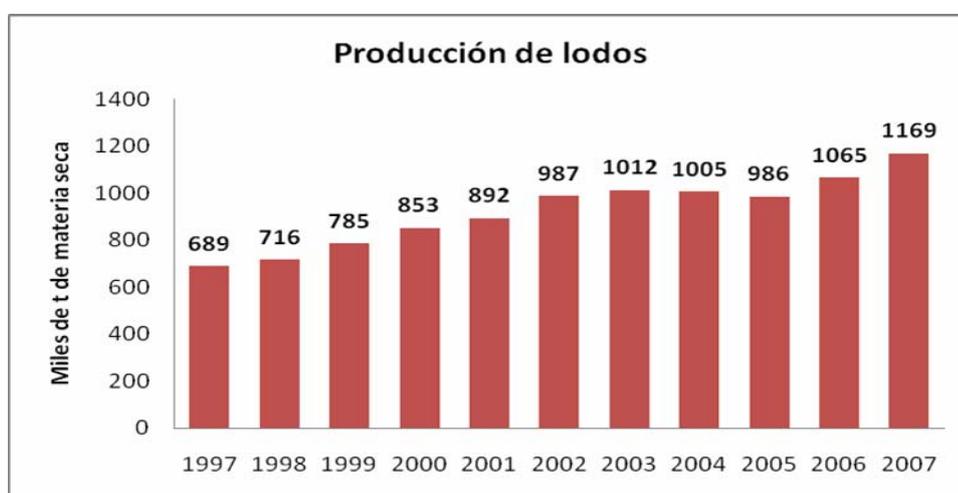


Figura 1: Evolución de la generación de lodos de depuradora en España.

Fuente: Registro Nacional de Lodos.

Como consecuencia del incremento en el volumen de lodos a gestionar en los últimos años, los problemas de almacenamiento y eliminación de los mismos se han agravado. En este sentido, el destino final que se les suele dar a los lodos de depuradora se puede clasificar en 2 bloques:

1. Métodos que consideran los lodos como un residuo sin valor. En este grupo se incluye la incineración sin recuperación energética y el almacenamiento en vertedero.
2. Métodos que consideran los lodos como un subproducto a valorizar. En este caso, se considera que el lodo puede utilizarse con fines agrícolas como fertilizante y para la regeneración de terrenos y reforestación.

Siguiendo el principio de prevención de la contaminación recogido por la Directiva Marco de Residuos (Directiva 2008/98/CE) y la Ley 10/1998 de residuos, la jerarquía de actuación en materia de gestión de lodos, tal y como se muestra en la figura 2, pasa por reducir su generación seguido por su reciclaje y valorización con recuperación energética, siendo la deposición en vertedero la opción menos adecuada.

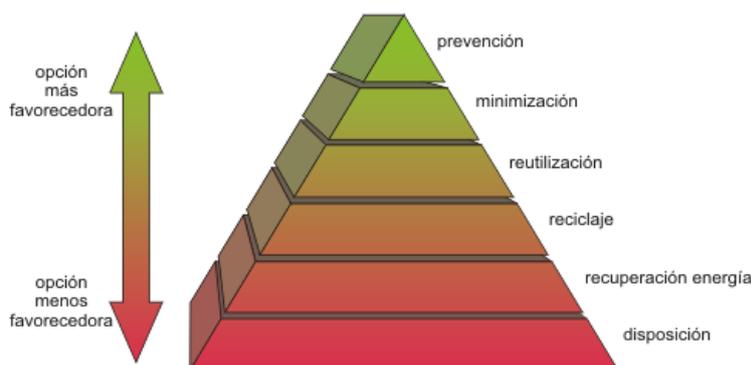


Figura 2: Jerarquía en la gestión de residuos (Ley 10/1998).

Es por ello, que el uso agrícola de lodos de EDAR es la alternativa más plausible, pues implica el concepto de reciclaje al considerar el lodo como una materia prima con valor económico. Ello, unido al actual problema existente en la agricultura en relación con el drástico descenso de materia orgánica de los suelos, principalmente en las regiones áridas y semiáridas, ha permitido que en España, la aplicación de lodos de depuradora con fines agrícolas esté siendo una práctica habitual, habiéndose duplicado su consumo en el periodo de 1997-2007. La figura 3 muestra el destino del fango generado por año en dicho periodo de tiempo.

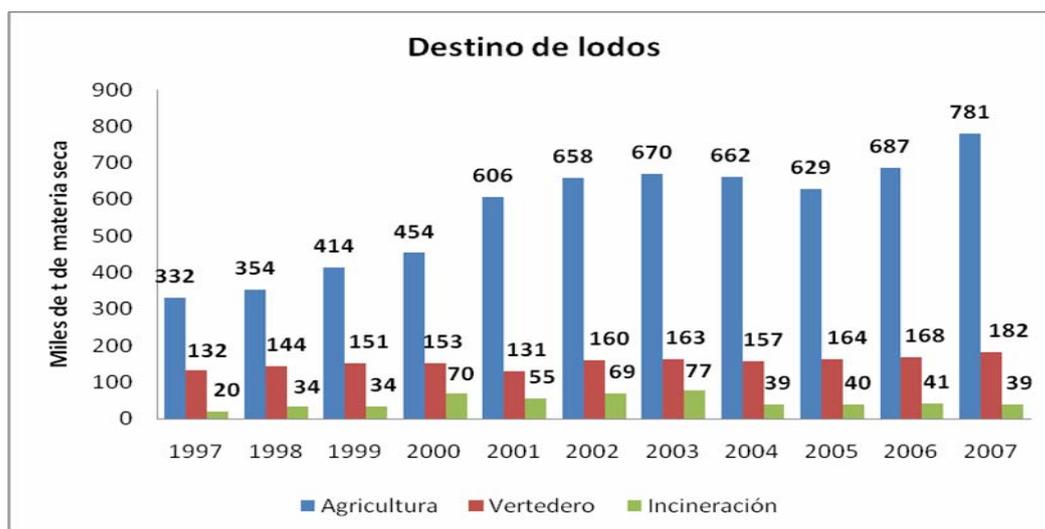


Figura 3: Evolución del destino de lodos de depuradora en España.

Fuente: Registro Nacional de Lodos.

A pesar de las potenciales ventajas de tipo agronómico que supone el uso de lodos de EDAR como enmienda orgánica, no debemos olvidar que existen importantes limitaciones en la aplicación agrícola de estos residuos en función de los niveles de elementos contaminantes que contiene el lodo, especialmente de metales pesados. En este sentido, la Directiva 86/278/CEE relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura y el II Plan Nacional de Lodos de Depuradora (2008-2015) establecen las concentraciones máximas admisibles de metales pesados contenidos en el lodo para su disposición agrícola.

Junto con los factores ambientales, otro de los aspectos a considerar en la gestión de los lodos es su coste económico ya que el tratamiento de los lodos de depuradora implica un elevado coste, el cual se ha estimado entre el 25 y 65% de los costes de operación de las estaciones depuradoras (Horan, 1999; Zhao y Kugel, 1997).

Entre las operaciones de gestión de lodos que deben realizar las empresas explotadoras de EDARs se incluye la caracterización del suelo receptor con el objetivo de determinar la máxima cantidad de lodo que puede ser aplicado en el terreno, la caracterización del lodo que incluye el análisis de parámetros agronómicos, metales pesados y compuestos orgánicos y microbiológicos y el transporte del lodo al terreno donde va a ser aplicado.

Por otra parte, los lodos no son el único residuo generado en las EDARs ya que durante el proceso de depuración también se eliminan las arenas, los residuos asimilables a urbanos (RSU) y las grasas contenidas en el agua residual. Estos residuos, al igual que los lodos, deben ser gestionados de forma adecuada para evitar impactos negativos sobre el medio ambiente. En este sentido, es especialmente importante la gestión de las grasas ya que estas son consideradas como residuo peligroso y por lo tanto requieren de un gestor autorizado de este tipo de residuos.

Teniendo en cuenta la variedad y cantidad de residuos generados como consecuencia de la depuración de las aguas residuales, las empresas explotadoras de las EDARs tienen que asumir costes ciertamente elevados ya que en la mayoría de las ocasiones, son éstas las encargadas de la gestión directa de estos residuos. A pesar de la importancia relativa que tiene la gestión de los residuos en los costes totales de operación y mantenimiento de las EDARs, lo cierto es que la información disponible relativa a los mismos es muy limitada. En este sentido, en el trabajo de Molinos 2009, se estima que el coste medio de gestión de residuos en las EDARs de la Comunidad Valenciana es un 14% del coste total de operación y mantenimiento. Sin embargo, en este trabajo no se diferencia el coste asociado a la gestión de cada uno de los residuos generados en las EDARs (arenas, RSU, grasas y lodos).

Con el objetivo de contribuir a un mejor conocimiento sobre la estructura de costes y ayudar a reducir los costes relativos a la gestión de los residuos generados en el proceso

de depuración de aguas residuales, proponemos dos funciones de costes que permitan predecir los costes relativos a la gestión de estos residuos conocida la cantidad de arenas, RSU, grasas y lodos generados en una EDAR. La relación entre el coste y la cantidad de residuos generados puede abordarse a través de un análisis de regresión mediante varias formulaciones (Gonzalez-Serrano et al., 2006; Friedler y Pisanty, 2006; Chen y Chang, 2002; Sipala et al., 2005).

## 2. METODOLOGÍA

Las funciones de coste son una herramienta ampliamente utilizada en diferentes sectores productivos. En el contexto del tratamiento de aguas residuales, Sipala et al. (2005) cuantificó el coste unitario del tratamiento de aguas residuales para distintas tecnologías y bajo diferentes escenarios de reutilización de las aguas regeneradas. Estos autores utilizan datos empíricos para desarrollar un modelo lineal en el que el coste de operación y mantenimiento se relaciona con la capacidad de tratamiento de la planta, expresada como habitantes equivalentes. Así la formulación de la función de coste es:

$$Y = a - bx \quad (1)$$

Donde  $Y$  = coste unitario en £/m<sup>3</sup>;  $x$  = capacidad de la planta en habitantes equivalentes;  $a, b$  = parámetros.

En otros trabajos (Chen y Chang, 2002, por ejemplo) se han desarrollado metodologías más complejas y se han propuesto otras formulaciones para determinar las correspondientes funciones de coste. Sin embargo, se ha demostrado que en el ámbito del tratamiento de aguas residuales, es la función potencial la que proporciona los mejores resultados.

Esta aproximación metodológica es utilizada por González-Serrano et al. (2006) para obtener dos funciones de coste, una relativa a los costes de inversión y otra para los costes de operación y mantenimiento de distintas opciones de tratamiento de aguas residuales. La función de coste de inversión se formula como:

$$I = A Q^n \quad (2)$$

Donde  $I$  = coste total de inversión (€);  $Q$  = caudal de agua residual tratado (m<sup>3</sup>/hora);  $A, n$  = parámetros.

En relación a los costes de operación y mantenimiento, el ajuste propuesto es:

$$C = -\alpha \ln Q + \beta \quad (3)$$

Donde  $C$  = coste total de operación y mantenimiento (€m<sup>3</sup>);  $Q$  = caudal de agua residual tratado (m<sup>3</sup>/hora);  $\alpha, \beta$  = parámetros.

Para el caso específico de la gestión de residuos generados en el tratamiento de aguas residuales, no existen referencias bibliográficas previas que desarrollen la correspondiente función de coste. Por ello, y como primera aproximación, en este trabajo se ha elaborado una función de coste que relaciona la cantidad de lodo generado con el coste de gestión del mismo. En este sentido, tras diversas comprobaciones, se ha determinado que el ajuste lineal proporciona un mejor coeficiente de determinación en relación a otros ajustes de tipo no lineal. Así, la formulación propuesta es:

$$C = a * F + b \quad (4)$$

Donde  $C$  = coste total de gestión de lodos (€año);  $F$  = Fango evacuado (Kg materia húmeda/año);  $a, b$  = parámetros.

En un segundo paso y teniendo en cuenta, tal y como se ha explicado en la introducción, que además de lodo, el tratamiento de aguas residuales implica la generación de arenas, RSU y grasas, se ha ajustado una función de coste que tome en consideración los cuatro tipos de residuos. Al igual que para la función de coste de gestión de lodos, el ajuste que proporciona los mejores resultados es el de tipo lineal. La función de coste se formula como:

$$C = a + b * F + c * A + d * B + e * G \quad (5)$$

Donde  $C$  = coste total de gestión de residuos (€año);  $F$  = Fango evacuado (Kg materia húmeda/año);  $A$  = Arenas evacuadas (Kg/año);  $B$  = Residuos sólidos asimilables a urbanos evacuados (Kg/año);  $G$  = Grasas evacuadas (Kg/año);  $a, b, c, d, e$  = parámetros.

Tanto para la función de coste de lodos como para la de residuos, el ajuste se ha realizado a través del programa SPSS y para obtener las funciones de coste dependientes de las distintas variables se ha utilizado el programa GAMS.

### **3. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA DE DATOS.**

La muestra utilizada en esta aplicación empírica está compuesta por 71 EDARs localizadas en la Comunidad Valenciana. Todas las plantas utilizan la tecnología de aireación prolongada para realizar el proceso de depuración y el destino de los lodos generados es la agricultura. La información estadística ha sido proporcionada por la

Entitat de Sanejament d'Aigües – EPSAR y corresponde al año 2009. La tabla 1 muestra la descripción de las variables utilizadas.

Tabla 1: Descripción de la muestra.

	<b>Coste gestión residuos (€/año)</b>	<b>Fango Evacuado (Kg MH/año)</b>	<b>Arenas (Kg/año)</b>	<b>Basuras (Kg/año)</b>	<b>Grasas (Kg/año)</b>
<b>MEDIA</b>	109.574	3.045.236	46.009	120.040	6.767
<b>DESVIACIÓN</b>	199.996	96.536	96.536	289.174	19.228
<b>MÁXIMO</b>	1.072.069	26.961.950	648.00	1.771.100	152.580
<b>MÍNIMO</b>	148	2.500	77	257	25

#### 4. RESULTADOS.

Utilizando los costes reales correspondientes a la gestión de residuos de las 71 EDARs objeto de estudio, se han estimado las funciones de coste tal y como se ha descrito en el apartado de metodología. Además con el objetivo de evaluar la variabilidad entre los costes reales y los estimados, ambos han sido representados gráficamente, y se ha determinado para cada una de las funciones su coeficiente de determinación. Este coeficiente mide la proporción de variabilidad total de la variable dependiente en relación a su media, que es determinada a través del modelo de regresión. Su valor está comprendido entre 0 y 1. Por lo general, un ajuste se considera aceptable cuando valor del coeficiente de determinación es mayor que 0,5 y cuanto más próximo a 1, mejor es la calidad del ajuste.

La tabla 2 recoge las funciones de coste relativas a la gestión de lodos y a la gestión de residuos generados en el proceso de depuración del agua residual y su coeficiente de determinación.

Tabla 2: Funciones de coste y coeficiente de determinación.

	<b>Función de coste</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>G. de lodos</b>	$C = 0,0378 F - 2883,4$	0,8015
<b>G. de residuos</b>	$C = 0,12585 + 0,03275 F + 0,34801 A + 0,01248 B + 0,009358 G$	0,7763

Donde C es el coste de gestión en €/año; F es la cantidad de lodo evacuado expresado en Kg de materia húmeda/año; A es la cantidad de arenas evacuadas en Kg/año; B es la cantidad de residuos asimilables a urbanos en Kg/año y G es la cantidad de grasas en Kg/año.

Tanto para la gestión de lodos como para la de residuos, las funciones de coste estimadas son de tipo lineal. De esta manera, se pone de manifiesto que esta partida de costes no se encuentra afectada por economías de escala.

La función de coste relativa a la gestión de lodos muestra que por cada tonelada de fango que es evacuada, se produce un incremento de los costes de 37,8 €/año. Con respecto a la calidad del ajuste de esta función, podemos decir que es buena ya que el valor del coeficiente de determinación es superior a 0,8. Así mismo, la figura 4 recoge los costes de gestión de lodos reales y los estimados a través de la función de coste.

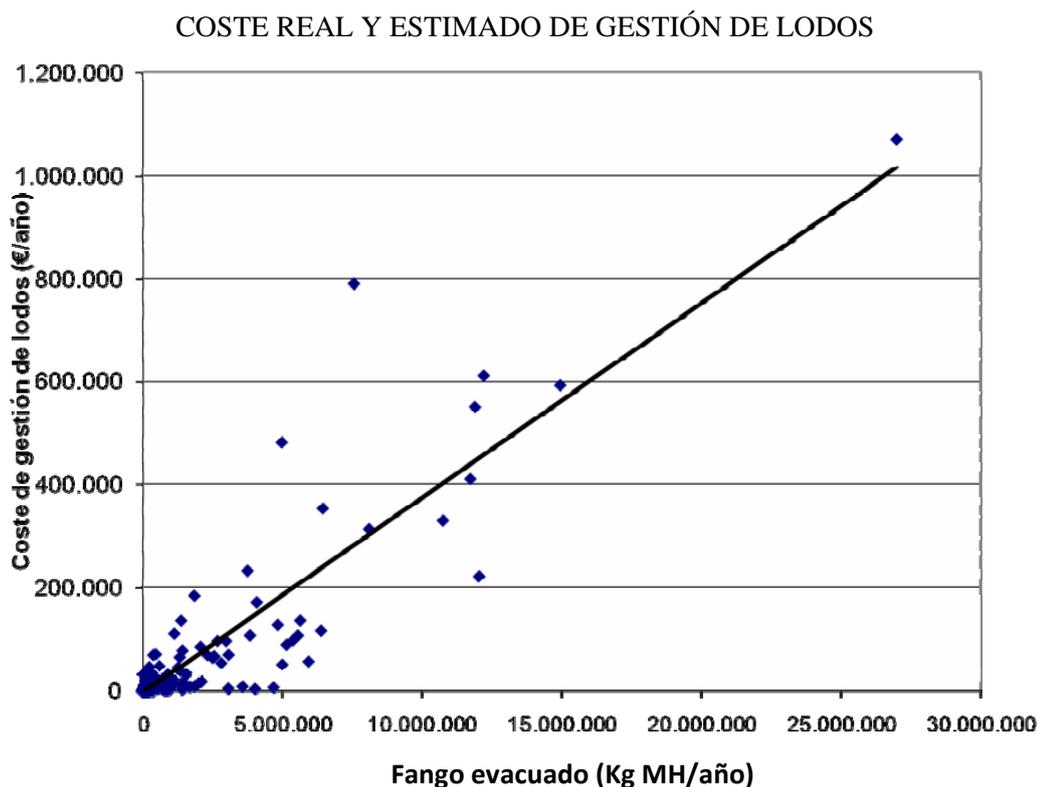


Figura 4: Coste real y estimado de la gestión de lodos de depuradora.

En relación a la función de coste de gestión de residuos, el término asociado a la gestión de los lodos es del mismo orden de magnitud que en la función de coste de gestión de lodos, ya que por cada tonelada de lodo evacuado, el coste incrementa en 32,75 €/año. En este caso, además de los lodos, se añaden los costes relativos a la gestión de las arenas, RSU y grasas. Si bien, podemos decir que su coste es poco significativo en relación al de los lodos ya que estos residuos se generan en mucha menor cantidad.

Por otra parte el valor del coeficiente de determinación es de 0,77, lo cual nos indica que la calidad del ajuste entre los costes reales y los costes estimados a través de la función de coste desarrollada es buena.

Una de las utilidades de este tipo de funciones es simular las repercusiones económicas en las diferentes unidades (EDARs) ante cambios en la cantidad de lodos y otro tipo de residuos generados. Así a título de ejemplo y para visualizar la utilidad de las funciones de coste desarrolladas, se han seleccionado dos plantas, una de tamaño medio-grande y otra de tamaño pequeño y se han analizado las diferencias entre los costes reales y los estimados relativos a la gestión de cada uno de los residuos generados en dichas EDARs.

En la tabla 3 se muestran los datos básicos relativos a la cantidad de residuos generados en las dos EDAR's seleccionadas, junto con el coste real y estimado de la gestión de dichos residuos. Como puede apreciarse las desviaciones entre el coste real y el estimado son muy pequeñas, de un 3,21% en el primer caso, y de un -3,32% en el segundo caso.

Tabla 3: Datos básicos de gestión de residuos de 2 EDARs.

<b>EDAR</b>	<b>Lodos (KgMH/año)</b>	<b>Arenas (Kg/año)</b>	<b>RSU (Kg/año)</b>	<b>Grasas (Kg/año)</b>	<b>Coste real (€año)</b>	<b>Coste estimado (€año)</b>
1	12.213.000	648.000	438.600	55.320	611.831,14	631.478,33
2	2.675.520	22.180	42.320	1.050	99.177,03	95.880,25

Si en la EDAR 1 se incrementa un 10 % la generación de lodos, es decir, se producen 13.434.300 Kg de lodos, el coste estimado será de 694.626,15 Euros, lo que supone un incremento del 13,53% sobre el coste original, cifra que prácticamente coincide con la desviación anterior más el correspondiente incremento del tratamiento de los lodos adicionales.

En el segundo caso podemos suponer que en dicha EDAR se produce un incremento del 10% en la generación de arenas, basuras y grasas, es decir, los nuevos valores de producción de residuos son de 24.398, 46.552 y 1.155 Kg, respectivamente. En este caso el coste estimado es de 96.705,93 Euros, es decir, una desviación respecto del coste original del -2,49%. Esta cifra es ligeramente inferior a la desviación obtenida respecto al valor anterior de costes de gestión de residuos.

## 5. CONCLUSIONES.

El objetivo de este trabajo es contribuir a un mejor conocimiento sobre la estructura de costes relativa a la gestión de los residuos generados en el proceso de depuración de aguas residuales para ayudar a reducir los costes incurridos, por parte de las empresas explotadoras de EDARs, en la gestión de los mismos.

Para ello, se han desarrollado dos funciones de coste, la primera de ellas relaciona el coste de gestión de lodos con la cantidad evacuada de los mismos, mientras que la

segunda incorpora junto con los lodos, las arenas, los RSU y las grasas con el objetivo de determinar el coste total de gestión de los residuos generados durante el proceso de tratamiento de las aguas residuales.

El uso de dichas funciones de coste permite predecir los costes relativos a la gestión de residuos y por ello, constituye una herramienta de gran utilidad para los operadores de las EDARs a la hora de evaluar las repercusiones económicas derivadas de cambios en la cantidad de lodos y otro tipo de residuos generados ante modificaciones en las condiciones de operación de las EDARs.

Los resultados obtenidos en la aplicación empírica realizada muestran que tanto los costes de gestión de lodos como de residuos, no están afectados por economías de escala ya que la formulación que proporciona mejores resultados es la de tipo lineal. Así mismo, la calidad del ajuste entre los costes reales y los estimados es buena ya que el valor del coeficiente de determinación es superior a 0,75 para ambas funciones.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

- Aragón, C. (2009) “Optimización del proceso de lodos activos para reducir la generación de fangos residuales”. Tesis doctoral. Universidad de Cadiz.
- Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas.
- Plan Nacional de Saneamiento y Depuración 1995-2005.
- Plan Nacional de Saneamiento y Depuración 2007 - 2015.
- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre residuos. (Directiva Marco de Residuos).
- Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos.
- Directiva 86/278/CE, del Consejo, de 12 de junio de 1986, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura.
- II Plan Nacional de Lodos de Depuradora 2008-2015.
- Horan, NJ. (1999). “Biological Wastewater Treatment Systems”. Chichester, UK: Wiley.

- Zhao, Q.L. y Kugel, G. (1997). “Thermophilic/Mesophilic digestión of sewage sludge and organic waste”. *Environmental Science Health*, 31: 2211-31.
- Molinos, M. (2009). “Análisis Coste Beneficio del tratamiento de aguas residuales con valoración económica de las externalidades ambientales”. Master Thesis. Universidad de Valencia.
- Gonzalez-Serrano, E., Rodriguez-Mirasol, J., Cordero, T., Koussis, A.D. y Rodriguez, J.J. (2006). “Cost of reclaimed municipal wastewater for applications in seasonally stressed semi-arid regions”. *Journal of Water Supply: Research and Technology- AQUA*; 54 (6): 355-369.
- Friedler, E. and Pisanty, E. (2006). “Effects of design flow and treatment level on construction and operation costs of municipal wastewater treatment plants and their implications on policy making”. *Water Research*. 40 (20): 3751-3758.
- Chen, H. and Chang, N. (2002). “A comparative analysis of methods to represent uncertainty in estimating the cost of constructing wastewater treatment plants”. *Journal of Environmental Management*. 65: 383-409.
- Sipala, S., Mancini, G. and Vagliasindi, F.G.A. (2005). “Development of a web-based tool for the calculation of costs of different wastewater treatment and reuse scenarios”. *Water Science and Technology: Water Supply*. 3 (4): 89 -96.