

**Resumen**

La variedad de los procesos de depuración instalados en las pequeñas estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) de la provincia de Castellón, nos permite analizar comparativamente estos sistemas en función de la capacidad de tratamiento de los mismos. Comparamos factores tales como el rendimiento energético, el rendimiento de eliminación de materia orgánica carbonosa o los costes derivados del mantenimiento y explotación de éstos.

**Palabras clave:**

Depuración, pequeñas EDAR, análisis de costes, rendimiento energético.

**Abstract**

*A comparative analysis of waste water treatment processes in different towns in the province of Castellón (Spain)*

The variety of waste water treatment processes installed in small waste water treatment plants (WWTP) in the province of Castellón allows us to analyse comparatively these systems according to the capacity of treatment of the same. We compare factors such as energy efficiency, the efficiency of carbonaceous organic matter elimination or the maintenance and operation cost of the above mentioned.

**Keywords:**

Waste water treatment, small WWTP, cost analysis, energy efficiency.

# Análisis comparativo entre procesos de tratamiento de agua residual de pequeñas poblaciones de la provincia de Castellón

Por: Ferrer, C. (\*); Miguel, D. (\*); Ferrer, L. (\*); Alonso, S. (\*); Sangüesa, I. (\*\*); Basiero, A. (\*\*); Bernacer, I. (\*\*); Morenilla, J.J. (\*\*)

(\*) **Fomento Agrícola Castellonense, S.A. (Facsa)**

C/ Mayor, 82-84  
12001 Castellón  
E-mail: cferrer@facsa.com

(\*\*) **Diputación de Castellón**

Oficina Técnica  
Avda. Vall d'Uixò, 25  
12004 Castellón

(\*\*\*) **Entitat Pública de Sanejament d'Aigües Residuals de la Generalitat Valenciana**

C/ Álvaro de Bazán, 10, Entlo.  
46010 Valencia

**1. Introducción**

En un futuro inmediato, el II Plan de Depuración va a suponer la ejecución de una serie de actuaciones en la provincia mediante un nuevo convenio entre la Diputación de Castellón y la Generalitat Valenciana. En él se incluye la ejecución de estaciones depuradoras (EDAR) en los municipios con poblaciones de 200 a 500 habitantes que han quedado por realizar, la modificación y mejora de las estaciones depuradoras existentes que no cumplen los requisitos establecidos por la normativa en vigor y la construcción de estaciones depuradoras en municipios menores de 200 habitantes que vierten sus aguas residuales al río Mijares, con el fin de garantizar la calidad de sus aguas.

Actualmente, las EDAR de pequeños municipios de la provincia de Castellón emplean cuatro procesos en sus sistemas de depuración: fangos activos en aireación prolon-

gada, biodiscos, filtros percoladores y lechos de turba.

Respecto a las actuaciones incluidas en el II Plan de Depuración, en general, las instalaciones basadas en sistemas de lechos de turba no cumplen con la Directiva 91/271 CEE y, por ello, deberán ser adecuadas implementando otro proceso de tratamiento que garantice la calidad del vertido. Así mismo, existe una elevada cantidad de poblaciones que se deberán dotar de instalaciones de nueva construcción, principalmente aquellas poblaciones con una dotación inferior a 200 habitantes equivalentes.

Facsa, desde enero de 2001, es la adjudicataria del servicio de explotación y mantenimiento de las instalaciones municipales de saneamiento y depuración controladas y dirigidas por la Diputación de Castellón. El pliego de condiciones de dicho concurso regulaba la incorporación, durante su ejecución, de nuevas instalaciones a medida que

finalizasen sus obras de construcción. La experiencia acumulada en la explotación y mantenimiento de pequeñas instalaciones municipales de depuración nos permite analizar qué proceso, desde el punto de vista del rendimiento de depuración y de los costes de mantenimiento y explotación, es el más idóneo para dotar pequeñas instalaciones de depuración.

## 2. Objetivo

El objetivo del presente estudio es analizar las instalaciones de depuración de pequeños y medianos municipios de Castellón desde tres puntos de vista, la eficiencia del tratamiento, el rendimiento energético y el coste de mantenimiento. Para ello agruparemos las instalaciones en función del proceso empleado y el tamaño de la misma.

## 3. Materiales y método

Durante un año se han estudiado todas las instalaciones de depuración que dan servicio a pequeños municipios de la provincia de Castellón y que emplean como proceso de depuración tratamientos secundarios biológicos mediante cultivo en suspensión (fango activo en aireación prolongada) o en soporte sólido (biodiscos y filtros percoladores).

No se tuvieron en cuenta, por tanto, las instalaciones dotadas con lechos de turba, dada la incapacidad de dicho proceso para cumplir con la calidad de vertido exigida actualmente, ni tampoco las instalaciones mixtas que, en paralelo o en línea, están dotadas de dos procesos distintos haciendo imposible un análisis de costes riguroso para cada uno de ellas. En la **Figura 1** se puede observar la distribución geográfica, por procesos y por caudal tratado, de las instalaciones estudiadas.

En total se han estudiado 39 instalaciones de depuración, 6 instalaciones dotadas de biodiscos, 28 emplean sistemas de fangos activos en aireación prolongada y 5 filtros percoladores.

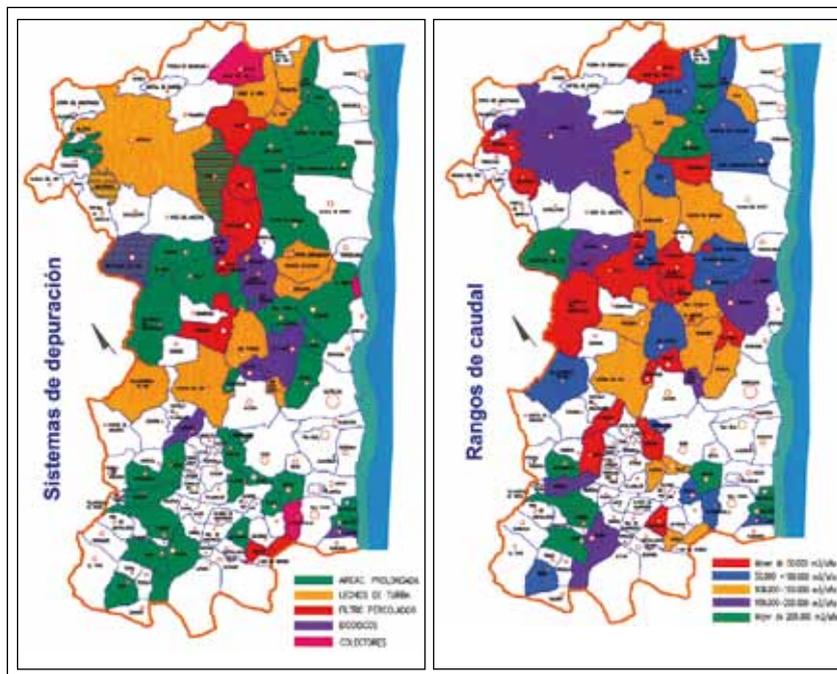


Figura 1: Sistemas de saneamiento y depuración en pequeños municipios de la provincia de Castellón.

Instalación	Biodiscos	Filtro percolador	Aireación prolongada
< 750 he	Costur Ludiente Sierra Engarcerán	—	Almedijar Fanzara Figueroles La Poble Tornesa Salzadella La Barona Cirat Culla Els Ibarsos
750-2.000 he	La Llosa Vilar de Canes	Xert Atzeneta del Maestrat Tirig	Borriol Eslida Caudiel Ribesalbes San Jorge Tales-Sueras Vall d'Alba Bejis Cervera Forcall Vistabella
> 2.000 he	Vilafamés	Albocacer Soneja	Benasal Cabanes Sant Mateu Viver Artana Jérica Montanejos Les Coves de Vinromà

Tabla 1. EDAR estudiadas clasificadas en función de su proceso y habitantes equivalentes.

Las instalaciones analizadas tratan aguas residuales urbanas con escaso o nulo componente industrial. De hecho, atendiendo a la biodegradabilidad de los afluentes expresada como el ratio DQO/DBO<sub>5</sub> (Henze *et al.*, 2002), comprobamos que todas las instalaciones estudiadas se sitúan en un rango de 1,5 a 2,5, valores típicos de aguas con una biodegradabilidad normal o alta (Ferrer *et al.*, 2007).

Con el fin de contemplar en el análisis de costes y rendimientos de depuración el factor de escala (tamaño de la instalación), consideramos la carga actual del agua residual y el caudal de diseño de las instalaciones como variables de tamaño mediante las que agrupamos las EDAR. Agrupamos las instalaciones en tres grandes categorías en función del tamaño de las mismas. Como variable de tamaño, seleccionamos los habitantes equivalente que trata cada instalación (variable integradora del caudal y carga afluente). En la **Tabla 1** listamos las instalaciones clasificadas según dos criterios, proceso empleado y tamaño.

### 3.1. Rendimientos de depuración

La serie temporal estudiada ha sido de un año, en concreto el 2007. Con ello integramos la variable temperatura y su efecto sobre los rendimientos de los sistemas en todas las instalaciones.

Para obtener los rendimientos de depuración, semanalmente se muestreó cada una de las instalaciones. Tomando afluente y efluente a planta, del total de analíticas, estudiaremos la influencia del proceso y tamaño de la instalación en el rendimiento de eliminación de DQO y DBO<sub>5</sub>.

### 3.2. Cálculo del consumo eléctrico

Uno de los objetivos del presente estudio es analizar el rendimiento energético de cada uno de los procesos empleados. Nos encontramos en este punto ante

Biodiscos	Filtro percolador	Aireación prolongada
Biodisco	Brazo distribución filtro percolador	Sistema de aireación
Bombas recirculación y purga	Bomba de elevación a filtro	Bombas recirculación y purga
Puente decantador secundario	Bombas recirculación y purga	Puente decantador secundario
	Puente decantador secundario	

Tabla 2: Equipos considerados para el cálculo del consumo eléctrico por proceso.

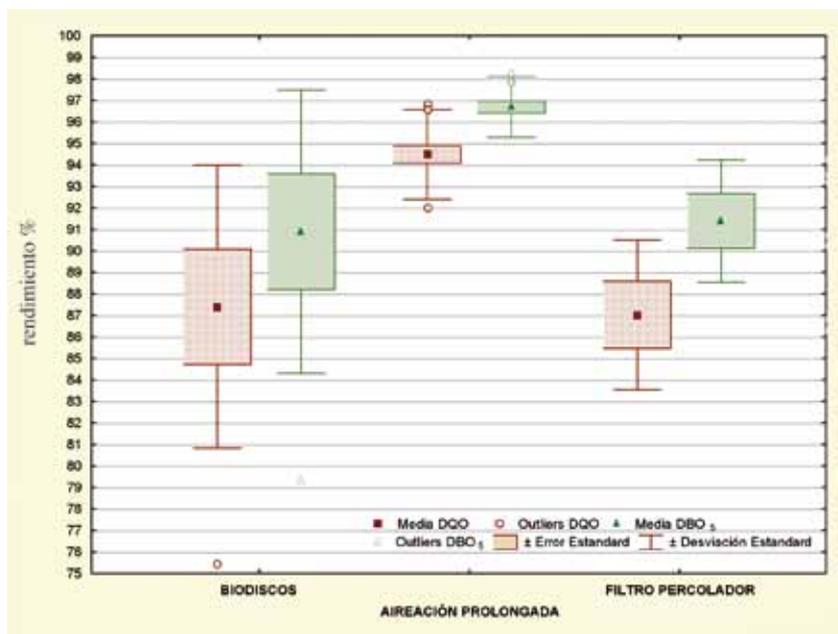


Figura 2. Rendimiento medio anual de eliminación de DQO y DBO<sub>5</sub> por procesos.

un importante escollo debido a la elevada diversidad de configuraciones existentes, incluso dentro de un mismo proceso. Con el fin de valorar exclusivamente el consumo energético de los elementos directamente implicados en el tratamiento secundario, procedimos a calcular el consumo teórico de estos a partir de las horas de funcionamiento de los mismos y el consumo real medio medido en cada equipo mediante pinza amperimétrica. En la **Tabla 2** se listan los equipos estudiados.

### 3.3. Cálculo de los costes de explotación y mantenimiento

Se han estudiado las principales partidas presupuestarias de cada

instalación. Se analizan los costes reales devengados del mantenimiento, del consumo eléctrico, y del personal.

No se han tenido en cuenta los costes derivados del empleo de reactivos, relacionados generalmente con la deshidratación de los fangos o con la precipitación química de fósforo, ya que no todas las instalaciones están dotadas de estos sistemas. Tampoco se han considerado los costes derivados de la gestión de residuos dada la diversidad y rendimiento de pretratamientos y líneas de fango existentes.

El análisis de costes pretende, comparativamente, posicionar cada proceso con respecto al resto de procesos estudiados y no recoger, en orden de magnitud, el coste real

Parámetro	Biodiscos		Aireación prolongada		Filtros percoladores		ANOVA	
	Media	st	Media	st	Media	st	F (2,36)	P
DQO (%)	87,40	6,58	94,48	2,08	87,02	3,49	19,622	< 0,00000
DBO <sub>5</sub> (%)	90,89	6,58	94,18	3,38	91,38	2,84	14,654	= 0,00002

Tabla 3. Rendimiento de eliminación de DQO y DBO<sub>5</sub>: media, desviación estándar y resultados del ANOVA.

de tratamiento. Por ello, los datos relativos a costes se expresan en uc (unidad de coste), no correspondiéndose ésta con ninguna moneda de curso legal.

#### 4. Resultados y discusión

Al proyectar una nueva instalación de depuración, la elección del proceso a emplear es lo que situará a la planta en un rango u otro en cuanto a costes de construcción, explotación y mantenimiento.

La elección de la proceso la realizaremos atendiendo a varios factores, entre los que destacan la calidad y cantidad de las aguas a tratar (en cuanto a origen y a carga), la calidad de vertido requerido (se vierte o no a zona sensible), los recursos económicos y la disponibilidad de suelo. En definitiva, buscaremos el proceso óptimo con el que, teóricamente, obtengamos los rendimientos de depuración necesarios al mínimo coste.

#### 4.1. Análisis del rendimiento de depuración por procesos

Agrupando por procesos las instalaciones, en la **Figura 2** podemos observar los valores medios y el grado de dispersión (la caja corresponde al error estándar y la cota a la desviación estándar) del rendimiento medio anual de eliminación de DQO y DBO<sub>5</sub>.

Destacar en la **Figura 2** la baja dispersión de resultados del proceso aireación prolongada frente a la elevada desviación estándar observada en los biodiscos y, en menor grado, en los filtros percoladores. Los procesos de fangos activos se sitúan así como sistemas más robustos que garantizan no sólo un mayor rendimiento de depuración, sino

*Los procesos de fangos activos son sistemas robustos que garantizan un mayor rendimiento de depuración*

también una menor variación de su rendimiento independientemente de la época del año.

En la **Tabla 3** recogemos los datos medios anuales y desviación estándar de los rendimientos de eliminación de DQO y DBO<sub>5</sub> por proceso. Así mismo, presentamos los resultados del análisis de la varianza de una vía (ANOVA) mediante el que comprobamos que las diferen-

cias observadas son estadísticamente significativas.

Independientemente del proceso, en todos los casos se cumple sobradamente con los rendimientos mínimos exigidos en la normativa vigente.

#### 4.2. Análisis del rendimiento energético por procesos

El ratio energético de una instalación es importante desde dos puntos de vista, el ambiental y el económico. En ambos casos, el ratio de rendimiento energético es directamente proporcional a estos factores: a mayor ratio energético, mayor consumo (para una misma carga o caudal tratado) y, por tanto, mayor coste de la partida de energía y más emisiones de anhídrido carbónico (procedentes de la generación de energía eléctrica).

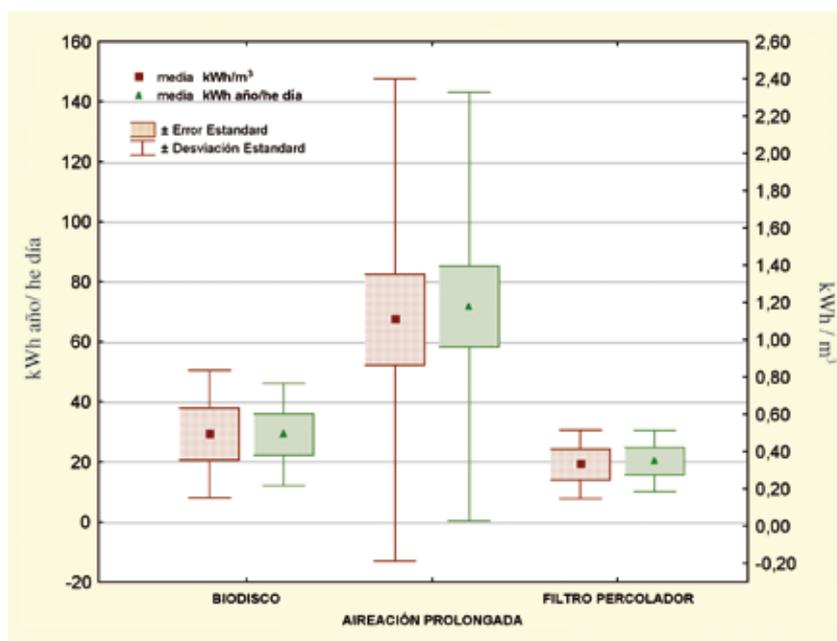


Figura 3. Ratios de rendimiento energético en función del proceso.

Tabla 4								
Rendimiento energético	Biodiscos		Aireación prolongada		Filtros percoladores		ANOVA	
	Media	st	Media	st	Media	st	F (2,36)	P
KWh/m <sup>3</sup>	0,49	0,34	1,11	1,29	0,33	0,18	1,4910	=0,2387
KWh año/he día	29,11	16,99	71,76	71,42	20,22	10,16	2,2484	=0,12019

Tabla 4. Ratios de rendimiento energético medio, desviación estándar y resultados del ANOVA.

Tabla 5						
Rango he	Coste eléctrico			Coste mantenimiento		
	Aireación prolongada	Biodisco	Filtro percolador	Aireación prolongada	Biodisco	Filtro percolador
> 2.000	61,6 %	24,7 %	40,9 %	38,4 %	75,3 %	59,1 %
750 - 2.000	55,4 %	28,1 %	35,1 %	44,6 %	71,9 %	64,9 %
< 750	60,4 %	25,9 %		39,6 %	74,1 %	

Tabla 5. Porcentajes relativos de coste eléctrico y de mantenimiento en función del tamaño de la instalación.

Minimizar el coste energético de una instalación ya no tiene solamente como objetivo el minimizar los costes de explotación, sino también reducir la contaminación derivada del funcionamiento de la misma.

En la **Figura 3** podemos observar que los filtros percoladores se sitúan como el proceso con mejor rendimiento energético. Destacar la baja dispersión del ratio de rendimiento energético para las instalaciones con tratamientos secundarios de película fija frente a las instalaciones que emplean cultivos en suspensión.

El consumo eléctrico en las instalaciones con procesos de película fija sigue un patrón lineal, mientras que una instalación de fangos activos presenta una curva de carga simétrica al caudal afluente y en la que se aprecia, incluso, estacionalidad debido al efecto de la temperatura (requerimientos de aporte de aire para mantener los niveles deseados de oxígeno disuelto).

El principal consumo eléctrico en el proceso de aireación prolongada es el originado por el sistema de aireación. Un deficiente control del mismo conlleva rendimientos energéticos inadecuados. Asimismo, el sobredimensionado de las instalaciones de fangos activos conlleva,

en mayor medida que en el resto de procesos, un incremento del ratio de rendimiento energético.

En la **Tabla 4** podemos presentar las medias y desviaciones estándar del ratio de rendimiento energético (expresado como consumo con respecto a caudal o carga tratada) de cada uno de los procesos. Al realizar el análisis de la varianza comprobamos que, estadísticamente, no existen diferencias significativas entre éstos.

#### 4.3. Distribución de los costes de explotación y mantenimiento

Los principales costes de una instalación de depuración son los debidos a la energía, el mantenimiento (preventivo y correctivo especialmente), gestión de residuos y personal.

Los costes derivados de la evacuación de residuos no se han analizado por procesos, dado que dependen más de la gestión (tratamiento, evacuación y disposición) de los mismos que de la cantidad producida.

Respecto al coste de personal, podemos diferenciar entre:

← Personal de explotación: coste del personal cuya función principal es la operación y limpieza de la instalación. El coste de este personal es directamen-

te proporcional al tamaño de la instalación (capacidad de tratamiento) y, por tanto, independiente del tipo de proceso implantado.

← Personal de mantenimiento: dado el tamaño de las instalaciones, la gestión del mantenimiento está distribuida y, a su vez, concentrada en centros zonales desde los que se da servicio a todas las instalaciones geográficamente próximas. Si bien existen marcadas diferencias entre el tiempo dedicado por las brigadas en el mantenimiento preventivo y correctivo en función del proceso empleado (este es directamente proporcional a los costes analizados), la ubicación geográfica de las instalaciones con respecto al centro zonal es el factor más importante al cuantificar los costes del personal de mantenimiento.

← Personal técnico: la dedicación del personal técnico al control del proceso en sistemas de fangos activos es, como término medio, el doble de la empleada en el control de procesos de lecho fijo.

Como puede observarse en la **Tabla 5**, y en la **Figura 4**, independientemente del caudal tratado, en

procesos de aireación prolongada el coste eléctrico se sitúa por encima del coste de mantenimiento. En biodiscos y filtros percoladores son mayores los costes derivados del mantenimiento que de la factura eléctrica.

En la **Figura 4** vemos cómo el rendimiento en la eliminación de DQO en procesos de fangos activados es más elevado que el obtenido en procesos de película fija, independientemente del tamaño de la instalación. También observamos cómo este rendimiento mejora con el decremento del tamaño de la instalación en procesos de película fija. El ratio de costes en instalaciones de aireaciones prolongadas y filtro percolador sigue un patrón claro: a menor caudal tratado, más cara es la tecnología.

En la **Figura 5** podemos observar la distribución de los costes totales (costes de mantenimiento y coste energía) por procesos y tamaño de las instalaciones.

Atendiendo a la agrupación por tamaño de las instalaciones, los procesos de aireación prolongada son más costosos que los de película fija.

Respecto a la agrupación de las instalaciones por procesos, destacar que la dispersión de los datos (SD = desviación estándar) aumenta con el incremento de tamaño de la instalación. En los procesos de aireación prolongada, ésta es mayor que para el resto de procesos independientemente del tamaño de la instalación.

No existe desviación estándar en el grupo de instalaciones con biodisco de tamaño superior a los 2.000 habitantes equivalentes porque sólo encontramos una instalación que reúne estas características.

En la **Figura 6** comparamos los costes en instalaciones de pequeño tamaño (<750 he). En este grupo no encontramos ninguna instalación dotada con filtro percolador.

Atendiendo al ratio de coste o al coste total, las instalaciones con biodiscos se sitúan entorno a un 25% menos costosas que las instalaciones de aireación prolongada, presentando, además, datos menos dispersos fruto de una mayor linealidad del coste de explotación y mantenimiento con respecto a los procesos de fangos activos en aireación prolongada.

*Los procesos de aireación prolongada son más costosos que los de película fija*

### 5. Conclusiones

Los rendimientos en la depuración de todas las instalaciones muestreadas cumple holgadamente con la legislación vigente en cuanto a la remoción de materia orgánica carbonosa. Destacar que los procesos de fangos activos en aireación prolongada tienen un mayor rendimiento en la eliminación de carga contaminante que los procesos mediante cultivo sobre soporte sólido. A su vez, el rendimiento energético de estos últimos es del orden del 60% inferior (menor consumo eléctrico para eliminar la misma cantidad materia carbonosa) que el de los procesos mediante cultivos en suspensión. Así mismo, el coste de mantenimiento

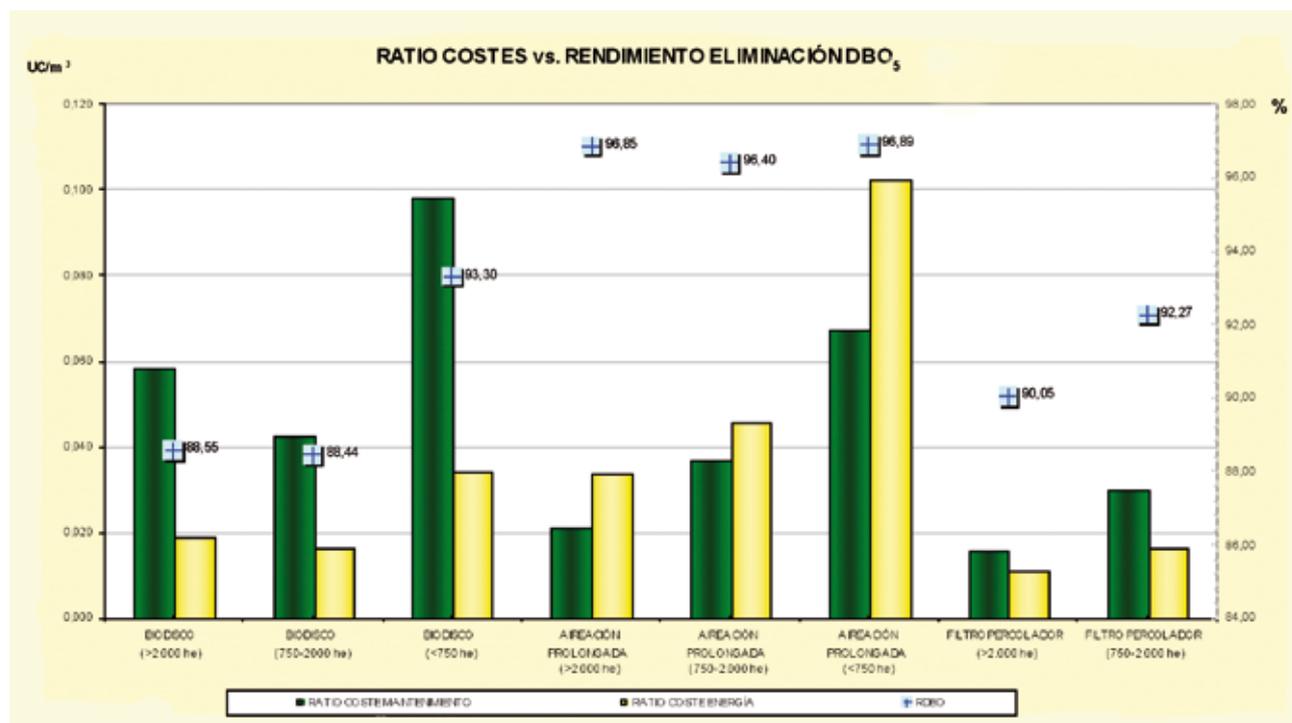


Figura 4. Costes y rendimientos eliminación DQO por procesos y carga tratada (he).

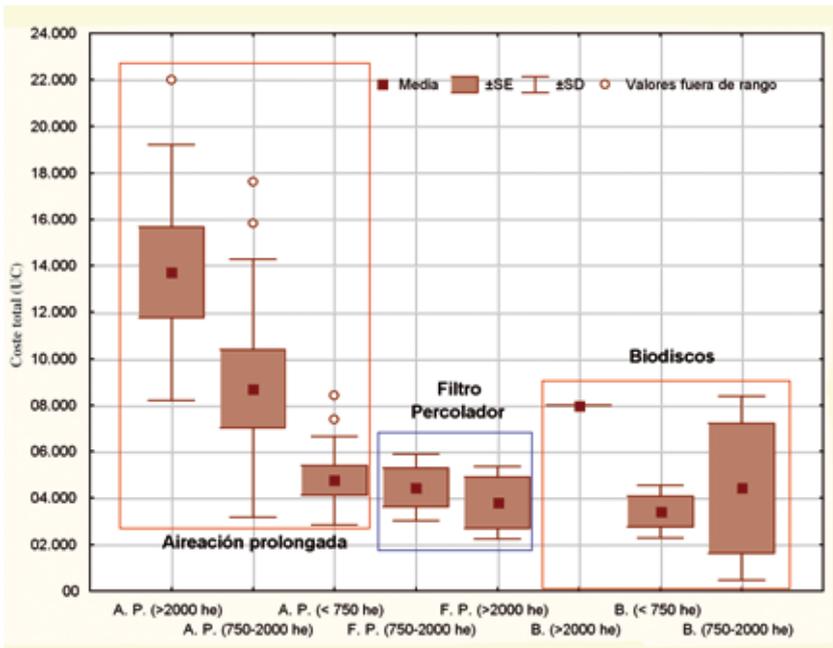


Figura 5. Ratio de coste total en función de la tecnología y capacidad de tratamiento de la instalación (AP = aireación prolongada, FP = filtro percolador, B = biodisco, SE = error estándar, SD = desviación estándar).

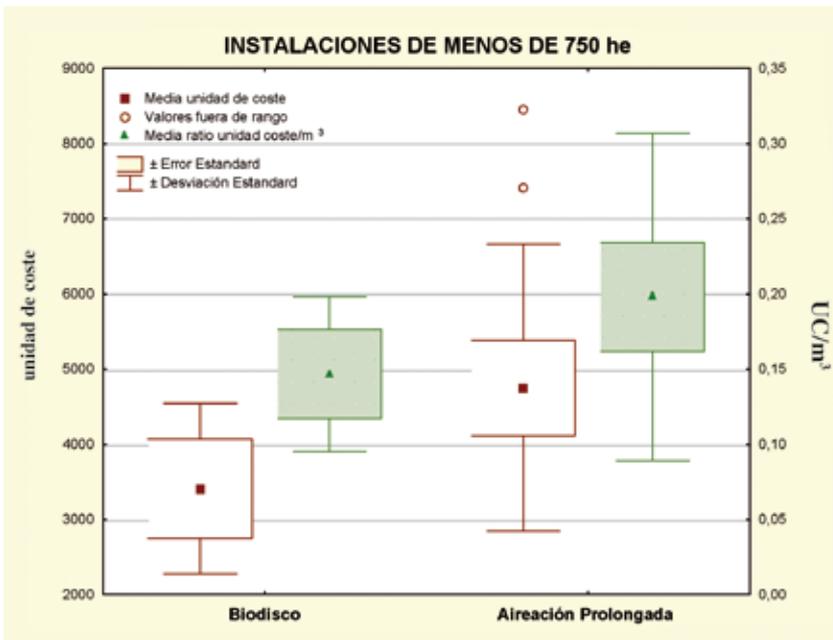


Figura 6. Comparación del coste total y ratio de coste para instalaciones de <750 he.

de los sistemas dotados de biodiscos o filtros percoladores es superior al de sistemas de aireación prolongada. Centrándonos en instalaciones de tratamiento de pequeño tamaño (<750 he), los rendimientos de depuración sitúan a todas las tecnologías por encima del 93%, siendo los sistemas con biodiscos mucho más eficientes energéticamente y

situándose en cuanto a costes (mantenimiento y energía) un 25% por debajo de los requerimientos de instalaciones de aireación prolongada. A estos costes debe de sumársele el tiempo requerido en tareas de control del proceso por parte de personal técnico, muy inferior en sistemas con biodiscos que en sistemas de fangos activos.

En pequeñas instalaciones, los procesos de película fija son óptimos para el tratamiento de aguas residuales urbanas si la eficiencia en la eliminación de los nutrientes inorgánicos (nitrógeno y fósforo) fuese pareja a la efectividad en la remoción de materia orgánica carbonosa. En este sentido, los fangos activos presentan una mayor eficiencia en la eliminación de nutrientes inorgánicos que los procesos de película fija. Este aspecto es especialmente relevante cuando el vertido se efectúa a zona sensible y, a menudo, es el motivo que restringe el empleo de procesos de película fija para el tratamiento de las aguas residuales de pequeñas poblaciones.

La investigación y desarrollo entorno a procesos que garanticen, de forma robusta, la eliminación de nutrientes inorgánicos en pequeñas instalaciones que empleen tecnología de película fija redundará en una considerable mejora medioambiental. Al menor coste social de las tareas de mantenimiento y explotación debemos sumarle el beneficio medioambiental directo fruto de la reducción del consumo energético y, por tanto, de las emisiones contaminantes.

## 6. Bibliografía

- [1] García, J.; Mujeriego, R.; Obis, J.M.; Bou, J. (2001). Wastewater treatment for small communities in Catalonia (Mediterranean Region). *Water Policy: Official journal of the World Water* 3(4): 341-350.
- [2] Henze, M. (1992). Characterisation of wastewater for modelling of activated sludge processes. *Wat. Sci. Tech.* 25: 1-15.
- [3] Henze, M.; Harremoës, P.; La Cour Jansen, J.; Arvin, E. (1997). *Wastewater treatment*. Springer, Berlin.
- [4] Ferrer, C.; Sangüesa, I.; Bécáres, E.; Llopis, J.A. (2007). *La depuración en pequeños municipios de Castellón*. Facsa y Diputación de Castellón. Castellón.