

REVISTA DE ESTUDIOS REGIONALES

I.S.S.N.: 0213-7585

2º EPOCA Mayo-Agosto 2014



100

SUMARIO

Artículos

Jorge Martínez-Vázquez, Panupong Panudulkitti y Andrey Timofeev. Urbanization and the poverty level

Inmaculada Caravaca Barroso, Gema González-Romero y Paloma López Lara. Crisis y desarrollo territorial en las ciudades de Andalucía

María Molinos-Senante, Trinidad Gómez, Rafael Caballero y Ramón Sala-Garrido. Evaluación de la eficiencia económica de estaciones depuradoras de aguas residuales: Un enfoque basado en la metafrontera

Eduardo Ramos y Dolores Garrido. Estrategias de desarrollo rural territorial basadas en las especialidades rurales. El caso de la marca *Calidad Rural*® en España

Ferran Sancho y Manuel Alejandro Cardenete. Instrumentos multisectoriales para la detección de sectores clave en el análisis regional

Luis Ángel Hierro Recio, Pedro Atienza Montero y Rosario Gómez-Álvarez Díaz. Incidencia de factores políticos en los convenios de inversión del estado con las comunidades autónomas

María José Álvarez, Rosa I. Fernández y Rosario Romera. ¿Es la eco-innovación una estrategia inteligente de especialización para Andalucía? Una aproximación desde el análisis multivariante

Manuel Delgado, Oscar Carpintero, Pedro Lomas y Sergio Sastre. Andalucía en la división territorial del trabajo dentro de la economía española. Una aproximación a la luz de su metabolismo socioeconómico, 1996-2010

Patricio Sánchez Fernández, Elena Gallego Rodríguez, Dolores Rivero Fernández y Santiago Lago Peñas. El impacto de la actividad exportadora sobre las empresas: Evidencia empírica para el caso gallego

Roberto Montero Granados, Angeles Sánchez Domínguez y Juan de Dios Jiménez Aguilera. El voto económico de los andaluces: Una aproximación dinámica por municipios

Evaluación de la eficiencia económica de estaciones depuradoras de aguas residuales: Un enfoque basado en la metafrontera¹

Assessment of the economic efficiency of wastewater treatment plants: A metafrontier approach.

María Molinos-Senante

Universidad de Valencia

Trinidad Gómez

Rafael Caballero

Universidad de Málaga

Ramón Sala-Garrido

Universidad de Valencia

Recibido, Febrero de 2014; Versión final aceptada, Julio de 2014.

PALABRAS CLAVE: Análisis envolvente de datos; Depuración de aguas residuales; Eficiencia; Metafrontera.

KEYWORDS: Data envelopment analysis (DEA); Wastewater treatment; Efficiency; Metafrontier.

Clasificación JEL: C61, L89, M20, Q2

RESUMEN:

La implementación de la Directiva 91/271/CEE ha supuesto un significativo incremento en el número de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) en operación. Es por ello que la evaluación de su eficiencia, como herramienta para reducir sus costes operacionales, ha despertado un creciente interés. Sin embargo, los análisis tradicionales únicamente permiten comparar unidades homogéneas desde el punto de vista del proceso productivo. En este trabajo, haciendo

1 Rafael Caballero Fernández y Trinidad Gómez Núñez agradecen la ayuda financiera recibida de la Junta de Andalucía a través del Proyecto Excelencia P10-TIC-6618. María Molinos-Senante quiere agradecer la ayuda financiera recibida por parte de la Generalitat Valenciana a través del programa VALi+d (APOSTD/2013/110). Los autores desean además expresar su agradecimiento a los evaluadores anónimos, por sus comentarios y sugerencias al trabajo original.

uso del concepto de metafrontera, se compara la eficiencia de tres grupos de EDARs cuyo influente presenta diferente carga contaminante. Posteriormente, se estima la ratio de brecha tecnológica como indicador del potencial ahorro económico en las EDARs. Las conclusiones de este estudio son de especial interés para los reguladores del ciclo urbano del agua ya que se evidencian las dificultades de realizar procesos de benchmarking a nivel estatal cuando las instalaciones están afectadas por distinta climatología.

ABSTRACT:

The implementation of the Directive 91/271/EEC has involved a significant increase in the number of wastewater treatment plants (WWTPs). Hence, the assessment of their efficiency, as a tool to save operational costs, has awakened increasing interest. Nevertheless, the traditional assessment of the efficiency only allows comparing homogeneous units from a production process perspective. This limitation can be overcome by using the concept of metafrontier which is the envelopment of the frontiers of each technology evaluated. Therefore, the assessment of the efficiency of the units is decomposed into two steps. Firstly, it is evaluated the efficiency using the frontier of each technology as reference. Subsequently, all the units to be analysed are integrated and they are assessed using the metafrontier. The assessment of the units by considering their own frontier and the metafrontier allows estimating the technological gap ratio (TGR). It informs about the potential of saving inputs keeping the production of outputs. Nowadays, the pollution load of the WWTPs' influent is variable depending mainly on the industrial contribution and also on the precipitation since most of the sewerage networks are unitary. In this context, the aim of this paper is to check the following hypothesis: the efficiency of the WWTPs is affected by the pollution load of their influent. By using the concept of metafrontier, it was compared the efficiency of three groups of WWTPs whose influent has different pollutant load –low, moderate and high-. Each of the production frontiers and the metafrontier were estimated using data envelopment analysis (DEA) methodology considering variable returns to scale. Since the objective of WWTPs is to treat the influent minimizing economic costs, an input orientation was followed. Subsequently, it was estimated the TGR as indicator of the WWTPs' potential economic savings. An empirical application was performed using a sample of 86 Spanish WWTPs. Three inputs (labour costs, energy costs and other costs) and one output (treated water) were considered. The categorisation of the WWTPs was done based on the concentration of suspended solids and chemical oxygen demand in the influent. The main findings of this study are as follows: (i) there are statistical significant differences in the efficiency of the three groups of WWTPs; (ii) considering the frontier of each group, plants with high pollution load are the best performed since 41% of them are efficient. Nevertheless, the scores of efficiency of the three groups evaluated are quite similar; (iii) when the efficiency is estimated using the metafrontier as reference, the group of plants with low pollution load is the one with the largest scores of efficiency; (iv) the assessment of the TGR evidenced that WWTPs with low pollution load are the ones with the lowest potential for saving costs. In particular, the potential economic savings of WWTPs with moderate and high pollution load in the influent was around 30% of current costs. From a policy perspective, results of this study illustrate the difficulties of performing benchmarking at national level. Therefore, the conclusions of this study are of special interest for the regulators of the urban water services. Future research on this topic should be focused on isolate the major contribution of the different pollutant loads in the influent. Hence, policy makers and WWTP operators could take decisions aimed to improve the performance of the plants contributing to save economic costs.

1. INTRODUCCIÓN

La protección del medio ambiente es un pilar básico para alcanzar el desarrollo sostenible permitiendo proteger el capital natural y la salud y bienestar de las personas. Es por ello que la Unión Europea (UE) lleva desarrollando durante décadas algunas de las normas medioambientales más estrictas del mundo (Comisión Europea, 2013). En el ámbito de la protección de los ecosistemas acuáticos, la Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de aguas residuales (DTAR) marcó un “antes y después” ya que fue la primera norma comunitaria que tuvo por objetivo específico regular la depuración de aguas residuales (Molinos-Senante et al., 2012).

La consecuencia de la implementación de la DTAR ha sido un significativo incremento en el número de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) en toda la UE. Así, el porcentaje de población conectada a EDARs ha pasado de un 67% en 1990 a valores en torno al 90% en 2009 (WISE, 2014). En particular en España, antes de la aprobación de la DTAR únicamente el 50% del agua residual urbana era tratada en EDARs mientras que en 2008 dicho porcentaje había incrementado hasta el 92% (EEA, 2014).

A pesar de los innegables beneficios ambientales asociados a la depuración del agua residual, la construcción y operación de las EDARs implica importantes costes económicos. Así, se ha estimado que los costes relacionados con el saneamiento y depuración de agua en España en 2010 ascendieron a 1415,3 millones de euros (MAAMA, 2014). Estas cifras ponen de manifiesto la creciente importancia de los aspectos económicos asociados a la gestión de las EDARs.

La evaluación de la eficiencia de las EDARs constituye un primer paso para identificar el potencial ahorro económico en estas instalaciones (Berg, 2013). Sin embargo, los estudios realizados en los que se analiza específicamente la eficiencia económica de las EDARs continúan siendo relativamente escasos. No obstante, en los últimos años se han desarrollado algunos estudios que evalúan la eficiencia económica de las EDARs haciendo uso de la metodología Data Envelopment Analysis (DEA) (Sala-Garrido et al., 2011a; Mahmoudi et al., 2012; Cruz et al., 2013; Molinos-Senante et al., 2014; entre otros).

DEA es un método no paramétrico que permite integrar múltiples inputs y outputs medidos en distintas unidades. El hecho de permitir la integración de unidades económicas (inputs) y unidades físicas como outputs (contaminantes eliminados o volumen de agua tratado) hace que sea un método muy adecuado para estimar la eficiencia de las EDARs. Al ser un método no paramétrico, no es necesario definir la forma funcional de la frontera de producción. Dicha característica, es simultáneamente una ventaja y un inconveniente. En este sentido, la metodología DEA sólo puede ser utilizada para evaluar la eficiencia de unidades cuyas caracte-

rísticas y tecnologías son similares (Lozano-Vivas et al., 2002). En otras palabras, DEA permite comparar la eficiencia de unidades similares desde el punto de vista de su frontera de producción.

Un enfoque distinto que permite comparar unidades con diferentes tecnologías es el análisis de metafrontera (Assaf y Matawie, 2010). La metafrontera puede ser considerada como un paraguas (superior o inferior, dependiendo de la orientación del modelo) de las distintas fronteras de producción de las unidades cuyas tecnologías son heterogéneas. Es decir, la metafrontera se puede definir como la envolvente de las distintas fronteras de producción (Du et al., 2014). El concepto de metafrontera ha sido aplicado para comparar la eficiencia de unidades que pueden ser clasificadas en distintos grupos en una amplia variedad de contextos como por ejemplo agricultura (Pourzand y Bakhshoodeh, 2014; Villano et al., 2010); hoteles (Assaf et al., 2010; Huang et al., 2013); jugadores de fútbol (Tiedemann et al., 2011; Caballero Fernández et al., 2012); aeropuertos (Assaf, 2009); empresas franquiciadoras (Medal-Bartual et al., 2012); entre otros.

En el ámbito de la evaluación de la eficiencia de las EDARs, destaca el trabajo desarrollado por Sala-Garrido et al. (2011b) quienes haciendo uso del concepto de metafrontera comparan la eficiencia de cuatro tecnologías de tratamiento de agua residual: fangos activados, lagunas aerobias, filtros percoladores y biodiscos. Este trabajo pone de manifiesto que las EDARs como unidades productivas pueden operar bajo distintas fronteras de producción y por lo tanto, en la evaluación de su eficiencia debe prestarse especial atención a esta característica.

En el ámbito de los análisis de segunda etapa, Molinos-Senante et al. (2014) evidenciaron que la eficiencia de las EDARs está afectada por su tamaño y por el tipo de tecnología tanto de la línea de agua como de la línea de fango. Por otra parte, Rodríguez-García et al. (2011) pusieron de manifiesto que el coste de tratar un metro cúbico de agua en EDARs localizadas en clima atlántico es inferior a si éstas están ubicadas en el ámbito mediterráneo. A pesar de dicha conclusión, no se ha realizado ningún estudio dirigido a evaluar cómo la carga contaminante del influente puede afectar a la eficiencia de las EDARs.

La carga contaminante en el influente está condicionada fundamentalmente por dos factores: (i) precipitación del área afectada por la EDAR y (ii) aportes de agua de origen industrial. Por una parte, en municipios con redes de saneamiento unitarias, es decir, que transportan tanto agua residual doméstica como agua de lluvia, la carga contaminante del influente está condicionada por la precipitación ya que ésta diluye la concentración de contaminantes. Por otra parte, si bien las EDARs tratan mayoritariamente agua residual de origen doméstico, tanto industrias individuales como polígonos industriales pueden conectarse a la red general de colectores para que su agua sea tratada en las EDARs municipales. El volumen y

características de dicha agua también puede afectar considerablemente a la carga contaminante del influente de las EDARs.

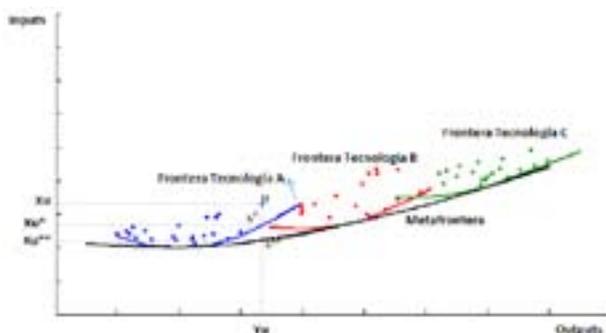
El objetivo de este trabajo es verificar la siguiente hipótesis: la carga contaminante del influente afecta significativamente a la eficiencia de las EDARs siendo más eficientes las plantas cuya carga contaminante en el influente es menor. Para ello, comparamos la eficiencia de tres grupos de EDARs que se caracterizan por presentar un influente con carga contaminante definida como baja, moderada y alta. Desde el punto de vista metodológico, se hace uso del concepto de metafrontera el cual nos permite estimar también la ratio de brecha tecnológica (RBT) que informa sobre el potencial ahorro de costes en la operación de las EDARs.

El interés en contrastar dicha hipótesis radica en evitar falsas conclusiones cuando se compara la eficiencia de EDARs localizadas en regiones afectadas por un régimen de precipitaciones diferente, como puede ser el caso de España. Este tipo de análisis adquiere especial importancia en países como Inglaterra y Gales donde tanto el suministro como el tratamiento de agua residual ha sido privatizado y se encuentra regularizado a nivel estatal (Ofwat, 2014). En estos países, el regulador (Ofwat) tiene la competencia para establecer la máxima tarifa (los servicios de abastecimiento y depuración de agua están integrados) que cada una de las empresas puede cobrar a los usuarios. Para ello, el regulador sigue un esquema de tipo RPI+K. Donde RPI (Retail Prices Index) es equivalente al IPC en el caso de España y el factor K se compone a su vez de dos factores, X y Q. El primero de ellos es un factor de eficiencia y es determinado a través de un proceso de benchmarking en el que se compara el rendimiento de todas las empresas del país. Por otra parte, el factor Q está asociado al coste de realizar determinadas inversiones de carácter obligatorio tanto en materia de protección del medio ambiente como de mejora de la calidad del servicio. De ahí la importancia de que en el análisis de eficiencia se evalúen unidades que realmente sean comparables entre sí.

2. METODOLOGÍA

El concepto de metafrontera parte de la premisa de que la relación funcional entre los inputs y outputs de las unidades evaluadas es diferente. Por lo tanto, no es posible comparar la eficiencia de dichas unidades ya que operan bajo diferentes tecnologías. La Figura 1 muestra dicha premisa gráficamente.

FIGURA 1
CONCEPTO DE METAFRONTERA



Fuente: Elaboración propia

Bajo el enfoque de metafrontera, cada unidad (EDAR en nuestro caso) es evaluada bajo dos fronteras diferentes. En primer lugar, se estima la eficiencia de cada unidad en relación a la frontera de producción de la tecnología a la que pertenece. En un segundo paso, se estima la eficiencia de la unidad en relación a la metafrontera, la cual está determinada por todas las unidades que forman parte de la muestra, y no sólo por las que pertenecen a su misma tecnología. Así, de acuerdo con la Figura 1, si la unidad U pertenece a la tecnología A, el cociente entre la distancia Y_U^* y la distancia Y_U indica la eficiencia (orientación input) respecto a su propia tecnología. Por otro lado, el cociente entre la distancia Y_U^{**} y la distancia Y_U es la estimación de la eficiencia de la unidad U en relación a la metafrontera. En este caso (Figura 1), la metafrontera envuelve inferiormente a las fronteras de cada grupo, debido a que se representa un ejemplo con orientación input.

Desde que a finales de la década de los 70, Hayami (1969) y Hayami y Ruttan (1970, 1971) desarrollaran el concepto de metafrontera, éste ha sido aplicado en diversos trabajos con diferentes propósitos. Dicha frontera, puede ser estimada bajo un enfoque de tipo estocástico (Battese y Rao, 2002; Boshrabadi et al., 2007; Assaf, 2009; Wang and Rungsuriyawiboon, 2010; Drine, 2012; Yu-Ying Lin et al., 2013; Pourzand y Bakhshoodeh, 2014) o bajo un enfoque de tipo no paramétrico (O'Donnell et al., 2008; Zibaei et al; 2008; Assaf et al., 2010; Sala-Garrido et al., 2011b; Wang et al., 2013; Du et al., 2014). La principal ventaja de los métodos no paramétricos es que no requieren de la definición de la forma funcional ofreciendo una gran flexibilidad (Medal-Bartual y Sala-Garrido, 2011). Es por ello, que para desarrollar nuestra aplicación empírica, optamos por dicho enfoque.

Independientemente de que la metafrontera se estime haciendo uso de métodos paramétricos o no paramétricos, es necesario agrupar las unidades analizadas

en base a su tecnología de producción. Asumiendo que la muestra de datos está formada por K grupos ($K > 1$) que operan bajo diferentes tecnologías siendo x e y un vector de inputs y outputs no negativos de dimensiones $m \times 1$ y $s \times 1$, respectivamente, la tecnología del grupo k ($k = 1, 2, \dots, K$) es definida como todas las combinaciones de inputs y outputs disponibles para una unidad en dicho grupo:

$$T^k = \{(x, y) \in R_+^{m+s}: x \text{ puede producir } y \text{ en el grupo } k\}$$

Teniendo en cuenta el concepto de metafrontera (ver Figura 1), la frontera de producción de cada grupo k es envuelta por una frontera global (metafrontera). Así, si un vector de outputs y puede ser producido utilizando un vector de inputs x en uno de los grupos, entonces (x, y) están incluidos en el conjunto T que se define como:

$$T = \{(x, y) \in R_+^{m+s}: x \text{ puede producir } y \text{ en algún grupo } T^k (k=1, 2, \dots, k)\}$$

De esta forma, $T = \{T^1 \cup T^2 \cup \dots \cup T^K\}$. Los conjuntos de inputs asociados a T^k y a T se definen respectivamente como:

$$L^k(y) = \{x: (x, y) \in T^k\}$$

$$L(y) = \{x: (x, y) \in T\}$$

La función distancia para cada uno de los grupos k se define como:

$$D^k(x, y) = \min_{\theta} \{\theta > 0: x\theta \in L^k(y)\} \quad k=1, 2, \dots, K$$

Análogamente, la función metadistancia se define como:

$$D(x, y) = \min_{\theta} \{\theta > 0: x\theta \in L(y)\}$$

Tanto la función distancia como la función metadistancia (con orientación input) indican la máxima contracción radial de inputs que una unidad puede conseguir manteniendo constante su vector de outputs (Mbuvi et al., 2012). Su valor es igual o menor a la unidad siempre y cuando el vector de inputs de la unidad evaluada sea un elemento factible del conjunto de producción. En particular, la función distancia tiene un valor igual a la unidad si el vector de inputs está localizado en la frontera de producción.

La estimación de la frontera de producción a través de la metodología DEA puede realizarse considerando retornos de escala constantes (CCR) (Charnes et al., 1978) o variables (BCC) (Banker et al., 1984). Los valores de ineficiencia estimados bajo el enfoque CCR son el producto de la ineficiencia de escala y la ineficiencia técnica pura. Por el contrario, la ineficiencia estimada a través del enfoque BCC

únicamente integra la ineficiencia técnica. Por ello, en la evaluación de la eficiencia de unidades con economías de escala, como es el caso de las EDARs, es más adecuado hacer uso del modelo DEA-BCC (Saal et al., 2007). En relación a la orientación del modelo (output o input), en nuestro caso de estudio optamos por orientación input, ya que el objetivo del estudio es evaluar si las EDARs de la muestra de datos pueden reducir su consumo de inputs (costes operacionales) tratando un determinado volumen de agua residual (output). Así, el problema a resolver para cada EDAR del grupo k ($k = 1, 2, \dots, k$) es:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \theta^k \\
 & \text{s.a :} \\
 & \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq \theta^k x_{i0} \quad i = 1, \dots \\
 & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{r0} \quad r = 1, \dots, s \\
 & \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\
 & \lambda_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n_k
 \end{aligned} \tag{1}$$

Donde, x_{ij} e y_{rj} representan, respectivamente, la cantidad de inputs i ($i = 1, 2, \dots, m$) y outputs r ($r = 1, 2, \dots, s$) para la unidad j ($j = 1, 2, \dots, n_k$), siendo x_{i0} e y_{r0} los valores asociados a la unidad evaluada; n_k es el número de unidades en el grupo k ; θ^k es un escalar cuyo valor indica la eficiencia de la unidad evaluada siendo $\theta^k \in [0, 1]$. Así, una unidad es eficiente con respecto a la frontera de su grupo k , si $\theta^k = 1$ y las holguras de todas las restricciones del modelo (1) son cero. Por ejemplo, si una unidad tiene un valor de $\theta^k = 0,8$, ello significa que dicha EDAR podría reducir en un 20% su consumo de inputs produciendo el mismo output, siempre dentro de su grupo tecnológico k . Este procedimiento debe ser repetido para cada unidad dentro del grupo k y para uno de los grupos k ($k = 1, 2, \dots, K$).

En el caso de la metafrontera, el procedimiento es idéntico salvo que en este caso se integran en la evaluación todas las EDARs pertenecientes a los diferentes grupos k . Así, el número total de unidades es la suma del número de unidades de cada grupo, es decir, $n = n_1 + n_2 + \dots + n_k$. El modelo a aplicar es el mismo que en el caso anterior (modelo 1). El índice de eficiencia (θ^*) bajo esta aproximación es menor o igual al índice de eficiencia obtenido para cuando se estima la frontera respecto a su tecnología (θ^k) dado que las restricciones del modelo (1) son un subconjunto de las restricciones del modelo de metafrontera. Es por ello que la metafrontera envuelve todas las tecnologías (Figura 1).

Cuando existe una desigualdad estricta entre la función distancia del grupo k y la correspondiente a la metafrontera, es posible estimar la brecha (o proximidad) de la frontera del grupo k a la metafrontera (Caballero Fernández et al., 2012). Battese et al. (2004) definen la ratio de brecha tecnológica (RBT) como:

$$RBT^k = \frac{D(x,y)}{D^k(x,y)} = \frac{\theta^*}{\theta^k} \leq 1 \quad (2)$$

El siguiente ejemplo permite interpretar el significado de la RBT. Supongamos una unidad cuyo valor de θ^* es 0,7 y su valor de θ^k es 0,9, es decir, su RBT es 0,78. Este valor significa que produciendo el mismo output, dicha EDAR podría reducir su consumo de inputs en un 22% adicional si operase en la metafrontera en lugar de operar bajo la frontera de su grupo k .

3. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA DE DATOS

El estudio se ha realizado sobre una muestra de 86 EDARs localizadas en España. Todas las plantas analizadas presentan el mismo tipo de tratamiento tanto en la línea de agua como en la de fango. El tratamiento secundario es aireación prolongada sin eliminación de nutrientes. Así, los principales contaminantes eliminados son sólidos en suspensión y materia orgánica. Por otra parte, el fango es tratado a través de digestión aerobia. El hecho de que todas las EDARs cuenten con la misma tecnología es fundamental en nuestro estudio ya que Sala-Garrido et al. (2011b) evidenciaron que la frontera de producción de EDARs con distintos procesos es diferente. El volumen de agua tratado por cada una de las plantas es inferior a 1.000.000 m³/año, por lo que se trata de EDARs de pequeño tamaño.

En cuanto a las variables seleccionadas para realizar el estudio, se han considerado tres inputs expresados en €/año: (i) coste de personal; (ii) coste en energía y (iii) otros costes en los que se integran los costes en reactivos, gestión de residuos y mantenimiento. En relación al output, los estudios previos siguen dos enfoques: (i) volumen de agua tratado (Tupper y Resende, 2004; Kumar y Managi, 2012) y (ii) rendimiento de eliminación de contaminantes (Sala-Garrido et al. 2012; Molinos-Senante et al., 2014). Teniendo en cuenta el objetivo de este trabajo, se ha considerado más adecuado seguir el primer enfoque. Así el volumen de agua tratado expresado en m³/año es el output considerado. La información estadística se refiere al año 2010. La Tabla 1 muestra la descripción de dichas variables.

El número de inputs y outputs considerados en este estudio también ha estado condicionado por el número de EDARs disponibles en cada uno de los grupos analizados. Una condición básica para aplicar cualquier modelo DEA es cumplir la conocida como “regla de Cooper” que implica que el número de unidades a evaluar

debe ser igual o mayor al donde es el número de inputs y es el número de outputs (Cooper, 2007). Teniendo en cuenta que en este estudio se han considerado tres inputs y un output, la “regla de Cooper” se cumple para los tres grupos de EDARs analizados.

CUADRO 1
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA. VALORES MEDIOS Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR EN PARÉNTESIS

	Baja carga	Moderada carga	Alta carga	Total
Número de EDARs	22	47	17	86
Coste personal	43.206 (24.477)	53.209 (33.203)	52.049 (54.775)	50.421 (36.438)
Inputs (€/año)				
Coste energía	19.676 (18.473)	22.421 (20.353)	19.269 (26.396)	21.095 (21.019)
Otros costes	29.532 (22.254)	30.313 (18.222)	30.293 (36.026)	30.109 (23.377)
Output (m ³ /año)				
Volumen agua tratada	271.726 (280.327)	214.710 (219.761)	127.357 (220.687)	212.028 (238.911)
[SS] (mg/l)	117,4 (29,1)	225,0 (38,0)	345,8 (60,5)	258,3 (104,5)
[DQO] (mg/l)	257,4 (80,4)	582,2 (117,0)	1285,4 (109,3)	705,7 (481,8)

Fuente: Agencias regionales de agua

Los tres grupos de EDARs a comparar han sido definidos en base a las características de su influente. Tal y como se muestra en el Cuadro 2, se han considerado la concentración de sólidos en suspensión (SS) y demanda química de oxígeno (DQO) en el agua de entrada. Así, las 86 EDARs analizadas han sido agrupadas en tres categorías: (i) EDARs con baja carga; (ii) EDARs con moderada carga y (iii) EDARs con alta carga.

CUADRO 2
CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DE LOS GRUPOS DE EDARs EVALUADAS

CARGA	SS (mg/l)	DQO (mg/l)
Baja	< 150	< 400
Moderada	150-300	400-1100
Alta	> 300	> 1100

Fuente: Adaptado de Metclaf y Eddy (2004)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El primer paso a realizar en este estudio fue comprobar que efectivamente los índices de eficiencia entre los tres grupos de EDARs definidos eran estadísticamente diferentes. Para ello, evaluamos la eficiencia de las 86 plantas haciendo uso del modelo DEA-BCC (Ec. 1). A continuación, agrupamos las EDARs en base a la carga contaminante de su influente (ver Cuadro 2) y realizamos un contraste de hipótesis. En particular, utilizamos el test no paramétrico de Kruskal-Wallis que es una extensión del test de Mann-Whitney para tres o más grupos. La hipótesis a contrastar era la siguiente:

H_0 : k muestras provienen de la misma población.

H : alguna muestra proviene de una población diferente al resto.

Se obtuvo un p -valor de 0,008 por lo que rechazamos la hipótesis de partida. En otras palabras, las muestras presentan diferencias significativas siendo, por tanto, grupos diferentes entre sí. Este resultado confirmó la idea que no se puede utilizar una única frontera de producción para comparar la eficiencia de EDARs cuyo influente presenta diferente carga contaminante.

Una vez validado que los tres grupos de EDARs operan bajo diferentes fronteras tecnológicas, el siguiente paso fue calcular la eficiencia respecto a cada frontera (θ^*) y respecto a la metafrontera (θ^*) para cada una de las 86 plantas evaluadas. Los principales resultados se muestran en el Cuadro 3. En primer lugar, comentaremos los índices de eficiencia obtenidos cuando se utiliza como referencia la frontera de producción de cada grupo. En relación al porcentaje de plantas eficientes, es decir, aquellas que son el referente dentro de cada tecnología, observamos que el grupo con mayor porcentaje de plantas eficientes es el de alta carga ya que el 41% de las EDARs presentan un índice de eficiencia igual a 1. Es decir, un 41% de las plantas operan en la frontera de producción. Por otra parte, el porcentaje de plantas eficientes en los grupos con moderada y baja carga es muy similar siendo del 21% y 23% respectivamente. Tal y como se muestra en el Cuadro 3, la eficiencia media de los tres grupos de EDARs es muy similar. En particular, el valor mínimo es de 0,677 para las plantas con baja carga y el valor máximo es de 0,795 para el grupo de EDARs con alta carga. Estos resultados muestran que la eficiencia media de los tres grupos considerados es bastante uniforme y que las plantas analizadas tienen una eficiencia relativamente alta en relación a su frontera de producción. Por ejemplo, la eficiencia media de las plantas con alta carga es de 0,795, lo cual indica que en valores medios, este grupo de EDARs podrían reducir sus inputs aproximadamente un 20%. Si bien el grupo de plantas con alta carga es el que presenta una mayor eficiencia media también es el que tiene una mayor

desviación estándar. En otras palabras, es el grupo más heterogéneo en relación a su índice de eficiencia. De hecho, el valor mínimo de eficiencia corresponde a una planta que pertenece a este grupo.

CUADRO 3
ÍNDICES DE EFICIENCIA RESPECTO A CADA GRUPO (θ^k) Y A LA METAFRONTERA (θ^*) Y RATIO DE BRECHA TECNOLÓGICA (RBT) PARA CADA UNO DE LOS GRUPOS DE EDARS.

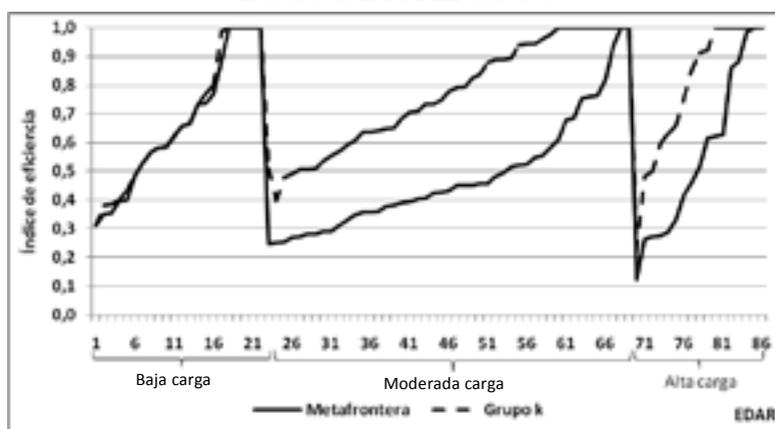
Grupo EDARs		Media	Des. Est.	Mínimo	Máximo	% EDARs eficientes
	θ^k	0,677	0,237	0,311	1,000	22,7
Baja carga	θ^*	0,665	0,236	0,311	1,000	22,7
	RBT	0,980	0,035	0,893	1,000	
	θ^k	0,768	0,189	0,395	1,000	21,3
Moderada carga	θ^*	0,481	0,197	0,249	1,000	4,3
	RBT	0,610	0,119	0,488	1,000	
	θ^k	0,795	0,241	0,219	1,000	41,2
Alta carga	θ^*	0,560	0,293	0,122	1,000	11,8
	RBT	0,669	0,194	0,454	1,000	

Fuente: Elaboración propia.

Para comparar la eficiencia de los tres grupos de EDARs analizamos los índices de eficiencia en relación a la metafrontera. Tal y como esperábamos desde el punto de vista teórico, los valores medios de eficiencia para todos los grupos de plantas son menores cuando se toma como referencia la metafrontera en lugar de la frontera de producción de cada grupo. Este resultado se muestra gráficamente en la Figura 2 en la que se representan los índices de eficiencia para cada EDAR bajo ambos enfoques. Se observa que el número de plantas eficientes decrece considerablemente cuando se utiliza como referencia la metafrontera. En particular, se pasa de un total de 22 plantas eficientes a 9. Sin embargo, dicha reducción en la eficiencia no afecta por igual a los tres grupos de EDARs. Así, el número de plantas eficientes en el grupo de baja carga se mantiene constante mientras que el número de plantas operando en la frontera de producción se reduce en un 17% y 29% para las plantas con moderada y alta carga, respectivamente. Los resultados muestran que cuando se toma como referencia la metafrontera, el grupo de EDARs con baja carga pasa a ser el que presenta mayor eficiencia mientras que cuando se evaluaba la eficiencia en relación a su propia frontera, era el grupo menos eficiente.

Este resultado evidencia la importancia de seleccionar una adecuada frontera de producción para evaluar la eficiencia de las EDARs. La eficiencia media de las 86 plantas analizadas es de 0,554 lo cual indica que para esta muestra de datos se podría reducir el consumo de inputs (costes operacionales) en un 45% si estas EDARs operasen en la metafrontera.

FIGURA 2
EFICIENCIA DE LAS EDARs CON REFERENCIA A LA METAFRONTERA Y LA FRONTERA DEL GRUPO



Fuente: Elaboración propia

La estimación de la metafrontera y de la frontera de producción para cada grupo de EDARs permite estimar la RBT haciendo uso de la Ec. (2). La RBT mide la distancia de la frontera del grupo-k a la metafrontera. Según la Ec. (2) un incremento en la RBT implica un descenso en la brecha entre la frontera del grupo considerado y la metafrontera. Tal y como se muestra en el Cuadro 3, el valor medio de RBT está comprendido entre 0,610 y 0,980. En particular, el grupo de EDARs con baja carga es que presenta una mayor RBT ya que su valor está muy próximo a la unidad, que es el máximo valor posible. De hecho, tal y como se observa en la Figura 3, 14 de las 22 EDARs de este grupo presentan una RBT unitario y el mínimo valor de RBT es de 0,9. Este resultado implica que estas 14 plantas están utilizando la mínima cantidad de inputs para producir un determinado output. Por el contrario, las plantas con moderada y alta carga presentan una RBT considerablemente más bajo, 0,610 y 0,669, respectivamente. Ello implica que dichas plantas podrían reducir en valores medios, un 39% y 33% de costes (inputs) tratando la misma cantidad de agua residual (output). La RBT media de los 3 grupos analizados es de 0,716 lo

cual indica que en valor medio esta muestra de EDARs tiene un potencial ahorro de costes del 28%. Los resultados obtenidos evidencian que el grupo de plantas con baja carga es el que tiene un mejor rendimiento en comparación con los otros dos grupos considerados ya que es el que tiene una RBT más próxima a la unidad. Por lo tanto, se confirma nuestra hipótesis de partida que asumía que las plantas cuyo influente presenta menor carga contaminante son más eficientes.

5. CONCLUSIONES

La evaluación de la eficiencia de las instalaciones de abastecimiento y tratamiento de agua es un procedimiento utilizado internacionalmente en el marco de la privatización y regulación de los servicios del ciclo urbano del agua. Sin embargo, desde el punto de vista metodológico, requiere que las unidades a comparar sean lo más homogéneas posible en cuanto a su tecnología de producción. El análisis de eficiencia basado en la metafrontera constituye una alternativa a los enfoques tradicionales ya que permite comparar la eficiencia de unidades que pueden ser clasificadas en distintos grupos.

Haciendo uso del concepto de metafrontera, en este trabajo se ha comparado la eficiencia de tres grupos de EDARs cuyo influente se caracteriza por presentar un influente con baja, moderada y alta carga contaminante. Así, cuando las EDARs son comparadas en relación a su propia frontera de producción, el grupo más eficiente es que presenta alta carga contaminante. Sin embargo, cuando el análisis se realiza respecto a la metafrontera, es decir, comparando todas las EDARs, son las que presentan baja carga contaminante las más eficientes. Dichos resultados, ponen de manifiesto la importancia de seleccionar una adecuada referencia en el análisis de eficiencia ya que de lo contrario pueden obtenerse conclusiones que no reflejan la realidad.

Por otra parte, la estimación de la eficiencia respecto a la frontera de cada grupo de EDARs y respecto a la metafrontera ha permitido cuantificar la RBT que indica el potencial de ahorro de costes, manteniendo constante el volumen de agua tratada, si las EDARs operasen en la metafrontera. Las plantas con baja carga contaminante son las que presentan un valor más próximo a la unidad y por lo tanto, son las que tienen menos potencial de ahorro económico. Las plantas con moderada y alta carga contaminante presentan un potencial ahorro de costes muy similar, en torno al 30%.

Tanto la metodología como las conclusiones de este estudio son de gran utilidad para la administración competente en la gestión del ciclo urbano del agua en general y para los reguladores en particular. Tal y como demuestran distintas experiencias internacionales, los procesos de benchmarking son de gran utilidad para mejorar

la gestión de los recursos hídricos y como mecanismo para actualizar las tarifas del agua pagadas por los usuarios. No obstante, tal y como este estudio muestra, se debe tener especial cuidado en la comparación de unidades que no son totalmente homogéneas. En el caso de países, como España, en los que la climatología puede afectar al funcionamiento de las instalaciones, se debe tener especial cuidado en el desarrollo de procesos de benchmarking a nivel estatal.

Si bien las conclusiones de este trabajo son de gran utilidad para los tomadores de decisiones, éste presenta una limitación que no podemos pasar por alto. Así, debido a la falta de datos empíricos, no ha sido posible comprobar si la diferente carga contaminante del influente de las EDARs analizadas es debida a razones climáticas o de vertidos industriales. Por ello, futuras investigaciones en este ámbito utilizando una muestra de plantas más amplia serían de gran utilidad para confirmar las conclusiones alcanzadas en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- ASSAF, A. (2009): "Accounting for size in efficiency comparisons of airports". *Journal of Air Transport Management*, 15 (5), 256-258.
- ASSAF, A., BARROS, C.P., JOSIASSEN, A. (2010): "Hotel efficiency: A bootstrapped metafrontier approach". *International Journal of Hospitality Management*, 29 (3), 468-475.
- ASSAF, A., MATAWIE, K.M. (2010): "A bootstrapped metafrontier model". *Applied Economics Letters*, 17 (6), 613-617.
- BANKER, R.D., CHARNES, A., COOPER, W.W. (1984): "Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis". *Management Science*, 30 (9), 1078-1092.
- BATTESE, G.E., RAO, D.S.P. (2002): "Technology gap, efficiency and a stochastic metafrontier function". *International Journal of Business and Economics*, 1 (2), 87-93.
- BATTESE, G.E., RAO, D.S.P., O'DONELL, C.J.A. (2004): "Metafrontier production function for estimation of technical efficiencies and technology gaps for firms operating under different technologies". *Journal of Productivity Analysis*, 21, 91-103.
- BERG, S.V. (2013): "Advances in benchmarking to improve water utility operations: A review of six IWA books". *Water Policy*, 15 (2), 325-333.
- BOSHRABADI, H.M., VILLANO, R., FLEMING, E. (2008): "Technical efficiency and environmental-technological gaps in wheat production in Kerman province of Iran". *Agricultural Economics*, 38, 67-76.
- CABALLERO FERNÁNDEZ, R., GÓMEZ NÚÑEZ, T., SALA GARRIDO, R. (2012): "Analysis of the Efficiency of Spanish Soccer League Players (2009/10) Using the Metafrontier Approach". *Estudios de Economía Aplicada*, 30, 565-578.
- CHARNES, A., COOPER, W.W., RHODES, E. (1978): "Measuring the efficiency of decision making units". *European Journal of Operational Research*, 2 (6), 429-444.
- COMISIÓN EUROPEA (2013): *Un medio ambiente sano y sostenible para las generaciones futuras*. Bruselas, Bélgica. Disponible en: http://europa.eu/pol/pdf/flipbook/es/environment_es.pdf
- COOPER, W.W., SEIFORD, L.M., TONE, K. (2007): *Data Envelopment Analysis*. New York, Springer.
- CRUZ, N.F.D., CARVALHO, P., MARQUES, R.C. (2013): "Disentangling the cost efficiency of jointly provided water and wastewater services". *Utilities Policy*, 24, 70-77.
- DRINE, I. (2012): "Institutions, governance and technology catch-up in North Africa". *Economic Modelling*, 29 (6), 2155-2162.
- DU, K., LU, H., YU, K. (2014): "Sources of the potential CO₂ emission reduction in China: A nonparametric metafrontier approach". *Applied Energy*, 115, 491-501.
- EEA (European Environment Agency) (2014): Disponible en: <http://www.eea.europa.eu/themes/water/dc>
- HAYAMI, Y. (1969): "Sources of Agricultural productivity gap among selected countries". *American Journal of Agricultural Economics*, 51, 564-575.
- HAYAMI, Y., RUTTAN, V.W. (1970): "Agricultural productivity differences among countries". *American Economic Review*, 60, 895-911.
- HAYAMI, Y., RUTTAN, V.W. (1971): *Agricultural development: An international perspective*. Baltimore: John Hopkins University Press.
- HUANG, C.-W., TING, C.-T., LIN, C.-H., LIN, C.-T. (2013): "Measuring non-convex metafrontier efficiency in international tourist hotels". *Journal of the Operational Research Society*, 64 (2), 250-259.
- KUMAR, S., MANAGI, S. (2012): "Productivity and convergence in India: A state-level analysis". *Journal of Asian Economics*, 23 (5), 548-559.
- LOZANO-VIVAS, A., PASTOR, J.T., PASTOR, J.M. (2002): "An efficiency comparison of European banking systems operating under different environmental conditions". *Journal of Productivity Analysis*, 18 (1), 59-77.
- MAAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente) (2014). *Libro Digital del Agua*. Disponible en: <http://servicios2.marm.es/sia/visualizacion/lda/>
- MAHMOUDI, M.J., FATHI, B., SAJADIFAR, H., SHAHSAVARI, A. (2012): "Measuring efficiency of water and wastewater company: A DEA approach". *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4 (12), 1642-1648.

- MBUVI, D., DE WITTE, K., PERELMAN, S.(2012):"Urban water sector performance in Africa: A step-wise bias-corrected efficiency and effectiveness analysis". *Utilities Policy*, 22, 31-40.
- MEDAL-BARTUAL, A., GARCÍA-MARTÍN, C. J., SALA-GARRIDO, R.(2012): "Efficiency analysis of small franchise enterprises through a DEA metafrontier model". *Service Industries Journal*, 32(15), 2421-2434.
- MEDAL-BARTUAL, A., SALA-GARRIDO, R. (2011):"Análisis de la eficiencia y liderazgo de los puertos españoles por áreas geográficas". *Revista de Estudios Regionales*, 91, 161-182.
- MOLINOS-SENANTE, M., SALA-GARRIDO, R., HERNÁNDEZ-SANCHO, F. (2012):"Marco jurídico del saneamiento y tratamiento de aguas residuales: Evolución en el Derecho comunitario, Estatal y Autonómico". *Medio Ambiente & Derecho: Revista de Derecho Ambiental*, 23.
- MOLINOS-SENANTE, M., HERNANDEZ-SANCHO, F., SALA-GARRIDO, R. (2014):"Benchmarking in wastewater treatment plants: A tool to save operational costs". *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16 (1), 149-161.
- O'DONELL, C.J., RAO, D.S.P., BATTESE, G.E. (2008):"Metafrontier frameworks for the study of firm-level efficiencies and technologies ratios". *Empirical Economics*,34, 231-255.
- OFWAT (The Water Services Regulation Authority) (2014):Disponible en: <http://www.ofwat.gov.uk/regulating/>
- POURZAND, F., BAKHSHOODEH, M. (2014): "Technical efficiency and agricultural sustainability-technology gap of maize producers in Fars province of Iran". *Environment, Development and Sustainability*, 16 (3), 671-688.
- RODRIGUEZ-GARCIA, G., MOLINOS-SENANTE, M., HOSPIDO, A., HERNÁNDEZ-SANCHO, F., MOREIRA, M.T., FEIJOO, G. (2011):"Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants". *Water Research*, 45 (18), 5997-6010.
- SAAL, D.S., PARKER, D., WEYMAN-JONES, T.(2007):"Determining the contribution of technical change, efficiency change and scale change to productivity growth in the privatized English and Welsh water and sewerage industry: 1985-2000". *Journal of Productivity Analysis*, 28 (1-2), 127-139.
- SALA-GARRIDO, R., HERNÁNDEZ-SANCHO, F., MOLINOS-SENANTE, M. (2012):"Assessing the efficiency of wastewater treatment plants in an uncertain context: A DEA with tolerances approach". *Environmental Science and Policy*, 18, 34-44.
- SALA-GARRIDO, R., HERNÁNDEZ-SANCHO, F., MOLINOS-SENANTE, M., MOCHOLÍ-ARCE, M. (2011a):"Estacionalidad en el proceso de depuración de aguas residuales: Impacto sobre la eficiencia y los costes de operación". *Revista Rect@*, 12, 21-31.
- SALA-GARRIDO, R., MOLINOS-SENANTE, M., HERNÁNDEZ-SANCHO, F. (2011b):"Comparing the efficiency of wastewater treatment technologies through a DEA metafrontier model". *Chemical Engineering Journal*, 173 (3), 766-772.
- TIEDEMANN, T., FRANCKSEN, T., LATACZ-LOHMANN, U. (2011):"Assessing the performance of German Bundesliga football players: A non-parametric metafrontier approach". *Central European Journal of Operations Research*, 19 (4), 571-587.
- TUPPER, H.C., RESENDE, M. (2004):"Efficiency and regulatory issues in the Brazilian water and sewage sector: An empirical study". *Utilities Policy*, 12 (1), 29-40.
- VILLANO, R., BOSHRABADI, H.M., FLEMING, E. (2010):"When is metafrontier analysis appropriate? An example of varietal differences in pistachio production in Iran". *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12 (4), 379-389.
- WANG, X., RUNGSURIYAWIBOON, S. (2010):"Agricultural efficiency, technical change and productivity in China". *Post-Communist Economies*, 22 (2), 207-227.
- WANG, Q., ZHANG, H., ZHANG, W. (2013):"A Malmquist CO₂ emission performance index based on a metafrontier approach". *Mathematical and Computer Modelling*, 58 (5-6), 1068-1073.
- WISE (Water Information System for Europe) (2014):Disponible en: <http://water.europa.eu/data-and-themes>
- YU-YING LIN, E., CHEN, P.-Y., CHEN, C.-C. (2013):"Measuring the environmental efficiency of countries: A directional distance function metafrontier approach". *Journal of Environmental Management*, 119, 134-142.

ZIBAEI, M., KAFI, M., BAKHSHOODEH, M. (2008): "The effects of veterinary services on technical efficiency of dairy farms in Iran: a DEA approach". *Iranian Journal of Veterinary Research, Shiraz University*, 9 (4), 371-377.