

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de Organización Industrial

“ANÁLISIS POR ENVOLTURA DE DATOS DE EMPRESAS DE SANEAMIENTO EN ESPAÑA”

Autora: María Dolores Moreno Moreno

Tutora: María Rodríguez Palero

**Dpto. de Organización Industrial y Gestión de
Empresas II**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Organización Industrial

“ANÁLISIS POR ENVOLTURA DE DATOS DE EMPRESAS DE SANEAMIENTO EN ESPAÑA”

Autora:

María Dolores Moreno Moreno

Tutora:

María Rodríguez Palero

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Grado: "ANÁLISIS POR ENVOLTURA DE DATOS DE EMPRESAS DE SANEAMIENTO EN ESPAÑA"

Autora: María Dolores Moreno Moreno

Tutora: María Rodríguez Palero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

*“Pregúntate si lo que estás
haciendo hoy te acerca al lugar
en el que quieres estar mañana.”*

Walt Disney

Agradecimientos

Este Trabajo Fin de Grado es el punto final a años de estudio y de sacrificio, decidí seguir formándome tras acabar el Grado de Ingeniería de la Edificación. La verdad que alguna persona pensó que estaba cometiendo un error, que debería seguir con la rama de la Arquitectura. Pero cuando uno siente que no es su mundo, que no está hecho para ella, no veo sentido a seguir ese camino. Me arriesgué, porque pensaba que la edad sería un hándicap cuando acabase esta segunda carrera, pero el paso de los años me demostró todo lo contrario, que tenía que continuar, que esa edad de la que tenía miedo era mi mejor baza, sería la experiencia en el trabajo que hoy desempeño lo que me ayudaría a encontrarme a mí misma y a sacar lo mejor de mí. Por esto, quiero agradecer con todo mi corazón a mis padres y a mi hermana Isabel, que me han animado estos años a no rendirme, sabían que sería más duro por estar compaginando estudios y trabajo, pero confiaron en que podría sacarlo adelante. También tengo que devolver toda esa confianza en forma de escrito a Antonio, por que él ha llevado de la mejor manera posible el día a día de este camino. Imposible olvidarme de mi compañera de aula Ana Teresa, que nos conocimos en la Escuela Superior de Ingenieros, pero que sin saberlo el destino nos unió ya en la Escuela de Aparejadores. Sin ella estos años de carrera no hubiesen sido lo mismo.

Y, por último, mis amigas, amigas que tengo desde los cuatro años. Amigas que me han ayudado, motivado y animado a seguir adelante, me han apoyado cuando creía que no podía continuar.

Muchas gracias a todos. De todo corazón.

María Dolores Moreno Moreno

Sevilla, 2022

El presente documento quiere analizar a las empresas de saneamiento de aguas en España y así ofrecer una visión general de la situación actual de cada una de ellas en el ámbito de la eficiencia mediante el análisis de envoltorio de datos.

Primero se realiza una investigación y búsqueda de datos que aportan las empresas en sus bases de datos, y así poder realizar una selección en función de la disponibilidad de los mismo. Seguidamente se desarrollan las variables de entrada y de salida de manera general, considerándose 7 entradas y 9 salidas. Posteriormente se analizarán en tres modelos distintos enfocados a un plano económico, al propio aprovechamiento de los recursos de las empresas y un tercer modelo de sostenibilidad.

Este análisis se ejecutará con orientación de salida y en los casos de retorno de escala constante y variable y así realizar comparación entre ambos. Se llevará a cabo mediante el software EMS, a través del cual se obtendrán las unidades eficientes e ineficientes para poder evaluarlas.

La intención de este trabajo es visualizar la situación actual de las empresas de saneamiento por su importancia en referencia a la población tanto a nivel económico como social.

Abstract

This document aims to analyze the water treatment companies in Spain and thus provide an overview of the current situation of each of them in the field of efficiency by means of data envelopment analysis.

First, an investigation and search for data provided by the companies in their databases is carried out, in order to be able to make a selection based on the availability of the data. Next, the input and output variables are developed in a general way, considering 7 inputs and 9 outputs. Subsequently, they will be analysed in three different models focused on an economic level, on the companies' own use of resources and a third model of sustainability.

This analysis will be carried out with output orientation and in the cases of constant and variable scale return and thus make a comparison between the two. It will be carried out using the EMS software, through which the efficient and inefficient units will be obtained in order to evaluate them.

The intention of this work is to visualise the current situation of the sanitation companies due to their importance in reference to the population at both economic and social levels.

| | |
|---|-------------|
| Agradecimientos | ix |
| Resumen | xi |
| Abstract | xii |
| Índice | xiii |
| Índice de Tablas | xv |
| Índice de Figuras | xvii |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 <i>Objeto general</i> | 1 |
| 1.2 <i>Estructura del documento</i> | 1 |
| 2 Análisis por envoltura de datos | 3 |
| 2.1 <i>Conceptos básicos</i> | 3 |
| 2.2 <i>Tecnología</i> | 4 |
| 2.3 <i>Modelos DEA</i> | 11 |
| 2.3.1 Modelos con retorno de escala constante (CCR) | 11 |
| 2.3.2 Modelos con retorno de escala variable (VRS) | 15 |
| 2.3.3 Modelos no orientados | 19 |
| 3 Caso práctico | 21 |
| 3.1 <i>Ciclo Integral del Agua</i> | 21 |
| 3.2 <i>Modelo de Estudio</i> | 24 |
| 3.2.1 Planteamiento del caso práctico | 24 |
| 3.2.2 Selección de empresas incluidas en el estudio | 27 |
| 3.2.3 Datos incluidos en el estudio | 29 |
| 3.2.4 Modelos utilizados | 34 |
| 3.2.5 Aplicación Software EMS | 45 |
| 4 Análisis de Resultados | 55 |
| 4.1 <i>Modelo 1</i> | 55 |
| 4.2 <i>Modelo 2</i> | 61 |
| 4.3 <i>Modelo 3</i> | 67 |
| 5 Conclusión | 74 |
| Referencias | 77 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Ciclo Integral del Agua | 22 |
| Tabla 2. Empresas Saneamiento Agua principales provincias españolas | 24 |
| Tabla 3. Relación empresas saneamiento agua resultante | 29 |
| Tabla 4. Datos de Entrada. Inputs | 30 |
| Tabla 5. Obtención datos entrada | 31 |
| Tabla 6. Datos de Salida. Outpup | 32 |
| Tabla 7. Obtención datos salidas | 34 |
| Tabla 8. Relación empresas Modelo 1 | 35 |
| Tabla 9. Cálculo datos Modelo 1 | 37 |
| Tabla 10. Datos Definitivos Modelo | 38 |
| Tabla 11. Relación empresas Modelo 2 | 39 |
| Tabla 12. Porcentaje agua reutilizada frente agua depurada | 40 |
| Tabla 13. Cálculo datos Modelo 2 | 41 |
| Tabla 14. Datos definitivos Modelo 2 | 41 |
| Tabla 15. Relación empresas Modelo 3 | 42 |
| Tabla 16. Cálculo datos Modelo 3 | 43 |
| Tabla 17. Datos definitivos Modelo 3 | 44 |
| Tabla 18. Datos EMS Modelo 1 CRS-RAD-OUT | 47 |
| Tabla 19. Datos EMS Modelo 1 VRS-RAD-OUT | 48 |
| Tabla 20. Datos EMS Modelo 2 CRS-RAD-OUT | 50 |
| Tabla 21. Datos EMS Modelo 2 VRS-RAD-OUT | 51 |
| Tabla 22. Datos EMS Modelo 3 CRS-RAD-OUT | 52 |
| Tabla 23. Datos EMS Modelo 3. VRS-RAD-OUT | 53 |
| Tabla 24. Modelo 1 Ranking Score CRS-RAD-OUT | 55 |
| Tabla 25. Modelo 1 Ranking Score VRS-RAD-OUT | 56 |
| Tabla 26. Modelo 1 Benchmarks DMU eficientes CRS | 57 |
| Tabla 27. Modelo 1 Benchmarks DMU eficientes VRS | 57 |
| Tabla 28. Modelo 1 Targets y Mejoras CRS Energía Total Consumida | 59 |
| Tabla 29. Modelo 1 Targets y Mejoras VRS Energía Total Consumida | 60 |
| Tabla 30. Modelo 2 Ranking Score CRS-RAD-OUT | 61 |
| Tabla 31. Modelo 2 Ranking Score VRS-RAD-OUT | 62 |
| Tabla 32. Modelo 2 Benchmarks DMU eficientes VRS | 63 |
| Tabla 33. Modelo 2 Benchmarks DMU eficientes CRS | 63 |
| Tabla 34. Modelo 2 Targets y Mejoras CRS Agua Reutilizada | 65 |
| Tabla 35. Modelo 2 Targets y Mejoras VRS Agua Reutilizada | 66 |

| | |
|---|----|
| Tabla 36. Modelo 3 Ranking Score CRS-RAD-OUT | 67 |
| Tabla 37. Modelo 3 Ranking Score VRS-RAD-OUT | 68 |
| Tabla 38. Modelo 3 Benchmarks DMU eficientes CRS | 69 |
| Tabla 39. Modelo 3 Benchmarks DMU eficientes VRS | 69 |
| Tabla 40. Modelo 3 Targets y Mejoras CRS Emisiones <i>CO2</i> | 71 |
| Tabla 41. Modelo 3 Targets y Mejoras VRS Emisiones <i>CO2</i> | 72 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Representación gráfica DMU | 3 |
| Figura 2. Representación gráfica tecnología VRS | 6 |
| Figura 3. Tecnología VRS. Orientación de entrada y salida Fuente: Elaboración propia | 7 |
| Figura 4. Representación gráfica tecnología CRS | 8 |
| Figura 5. Tecnología CRS. Orientación entrada y salida Fuente: Elaboración propia | 8 |
| Figura 6. Fronteras eficientes CRS y VRS | 9 |
| Figura 7. Representación gráfica tecnología NIRS | 9 |
| Figura 8. Representación gráfica tecnología NDRS | 10 |
| Figura 9. Representación gráfica tecnología FDH | 10 |
| Figura 10. Representación modelo CCR-INPUT | 13 |
| Figura 11. Representación modelo CCR-OUTPUT | 15 |
| Figura 12. Representación modelo BCC-INPUT | 17 |
| Figura 13. Representación modelo BCC-OUTPUT | 19 |
| Figura 14. Representación modelo Aditivo | 20 |
| Figura 15. Ciclo Integral del Agua | 21 |
| Figura 16. Proceso Cogeneración | 26 |
| Figura 17. Objetivos Sostenibles | 27 |
| Figura 18. Modelo Económico | 35 |
| Figura 19. Modelo Aprovechamiento | 39 |
| Figura 20. Modelo Sostenible | 42 |
| Figura 21. Modelo 1 Gráfica comparación eficiencia DMU's | 57 |
| Figura 22. Modelo 1 Gráfico distribución proyecciones CRS | 58 |
| Figura 23. Modelo 1 Gráfico distribución proyecciones VRS | 58 |
| Figura 24. Modelo 1 Porcentaje mejoras CRS Energía Total Consumida | 60 |
| Figura 25. Modelo 1 Porcentaje mejoras VRS Energía Total Consumida | 61 |
| Figura 26. Modelo 2 Gráfica comparación eficiencia DMU's | 63 |
| Figura 27. Modelo 2 Gráfico distribución proyecciones CRS | 64 |
| Figura 28. Modelo 2 Gráfico distribución proyecciones VRS | 64 |
| Figura 29. Modelo 2 Porcentaje mejoras CRS Agua Reutilizada | 66 |
| Figura 30. Modelo 2 Porcentaje mejoras VRS Agua Reutilizada | 67 |
| Figura 31. Modelo 3 Gráfica comparación eficiencia DMU's | 68 |
| Figura 32. Modelo 3 Gráfico distribución proyecciones CRS | 70 |
| Figura 33. Modelo 3 Gráfico distribución proyecciones VRS | 70 |
| Figura 34. Modelo 3 Porcentaje mejoras CRS Emisiones CO ₂ | 72 |
| Figura 35. Modelo 3 Porcentaje mejoras VRS Emisiones CO ₂ | 73 |

1 INTRODUCCIÓN

El agua es un bien básico y escaso, tanto para los ciudadanos como para la actividad económica de cualquier sector. Por lo tanto, existe la necesidad de garantizar un suministro de agua seguro, predecible y, sobre todo, de buena calidad. Para ello se necesita una combinación de infraestructuras de almacenamiento, desinfección, distribución y depuración de aguas, además de un modelo de gestión integral de las mismas, siendo este conjunto el “ciclo integral del agua”. Este sector ha experimentado una gran transformación en los últimos 25 años, logrando importantes avances como la mejora del saneamiento de aguas residuales o el propio desarrollo de la reutilización del agua. El sector del agua en España se enfrenta a una serie de retos medioambientales urgentes e importantes. Por un lado, se enfrenta la escasez de agua, que se ve agravada por el alto riesgo de desertificación. Desde un punto de vista económico, este sector se enfrenta también al déficit estructural de inversiones lo cual dificulta la obtención de los objetivos medioambientales. Pero es aquí donde surgen las preguntas, ¿es suficiente?, ¿las empresas hacen todo lo necesario por ser eficientes?, ¿están aprovechando al máximo los recursos de los que disponen?

1.1 Objeto general

Es en la búsqueda de las respuestas a las preguntas antes indicadas donde surge este trabajo, teniendo por objetivo principal analizar los niveles de eficiencia de los servicios prestados por las empresas españolas, privadas, públicas o mixtas, centrándose en el proceso de saneamiento y depuración de aguas residuales. Por la consecución de este objetivo general se desarrollarán tres objetivos particulares los cuales serán la eficiencia a la hora de consumir energía en el ciclo del agua y en el propio proceso de saneamiento o de generarla, el aprovechamiento del agua que es depurada o reutilizada y la sostenibilidad de los sistemas en base a las emisiones generadas de CO_2 y al porcentaje de lodos que han sido valorizados. Es de estos objetivos particulares de donde se obtienen los modelos propuestos a estudiar. Para llevar a cabo este análisis, se utilizará la tecnología de análisis por envoltura de datos (DEA).

1.2 Estructura del documento

El documento se estructura en tres bloques, el primero donde se realiza una introducción y se contextualiza la tecnología a utilizar. Un segundo bloque en el cual se realiza una breve explicación del ciclo integral del agua, seguidamente se plantea el caso práctico con las principales 52 empresas de saneamiento en España y los 7 inputs y 9 outputs con las correspondientes variables a analizar. También se explica el proceso mediante el cual se han obtenido los datos necesarios y cómo y por qué se han reducido las empresas para el planteamiento definitivo. Tras ello, se exponen los tres modelos sobre los que se realizará el análisis, estando orientados al análisis de la eficiencia económica, la eficiencia en el uso de los recursos y la eficiencia en sostenibilidad. Este segundo bloque finaliza con la obtención de los resultados del análisis DEA mediante el software EMS. El tercer y último bloque, se examina y comparan los resultados obtenidos en las tecnologías utilizadas presentando las conclusiones alcanzadas en el presente Trabajo Fin de Grado.

2 ANÁLISIS POR ENVOLTURA DE DATOS

En este primer capítulo se va a explicar la metodología Data Envelopment Analysis (DEA), con la cual en capítulos posteriores se evaluará la eficiencia relativa de diversas empresas de saneamiento de agua a nivel nacional.

2.1 Conceptos básicos

El Análisis por Envoltura de Datos (DEA) se basa en modelos de programación lineal, fue introducido formalmente en 1978 por Charnes, Cooper y Rhodes, para estudiar la eficiencia relativa de una serie de unidades de decisión.

Esta técnica permite evaluar la eficiencia de una serie de elementos, denominados usualmente Unidades de toma de Decisión (DMU's: Decision Making Unit), comparándolos entre ellos.

Para realizar dicha comparación, las unidades deben ser medibles cuantitativamente, semejantes y se emplearán múltiples recursos (entradas o inputs) y productos (salidas u outputs) en unidades homogéneas.

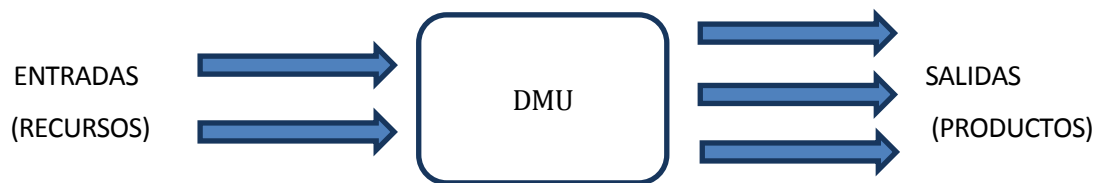


Figura 1. Representación gráfica DMU

Fuente: Elaboración propia

La metodología pretende identificar entre un número de DMU's admisibles cuál es más eficiente y compararla con el resto de las unidades. De esta forma se define una frontera eficiente formada por las unidades productivas, pudiendo medir la distancia que existe entre dicha frontera y el resto de las unidades que sean ineficientes y en este caso cuántos grados de ineficiencia posee.

DEA facilita un nuevo enfoque para analizar y organizar datos. Llegando a ser una alternativa y un complemento a los análisis tradicionales de tendencias centrales añadiendo un nuevo punto de vista para los análisis de coste-beneficio, estimación de fronteras, diseño de estrategias, aprovechamiento de características de los elementos punteros e inducción de teorías a partir de observaciones externas.

La productividad (según Farrell, 1957) de una determinada unidad productiva se define como la relación existente entre los resultados que obtiene y los recursos empleados en su producción. Es una forma de medir el nivel de aprovechamiento de los recursos.

Según Farrell la expresión matemática que define la productividad para solo una entrada y una salida es:

$$Productividad = \frac{Producción\ Creada}{Recurso\ Consumido} = \frac{Salida}{Entrada}$$

En la realidad pocas veces encontraremos esta situación, ya que normalmente se evaluará varios recursos con los que obtener varios resultados producidos. Es por ello que para el cálculo de la productividad se utilizará la siguiente fórmula:

$$Productividad = \frac{Suma Ponderada de Salidas}{Suma Ponderada de Entradas}$$

Esta suma ponderada tiene la dificultad de tener que agrupar recursos y productos de distintas naturalezas, por lo que puede arrojar un resultado poco real debido a esas unidades de medidas. Para solucionar esta discrepancia de unidades se agregarán las entradas y salidas mediante un peso para que el resultado sea adimensional y de esta manera sea totalmente independiente la escala que se utilice en los datos aportados.

Sea x_{ij} la cantidad de entrada o recurso 'i' utilizado por la unidad 'j' y y_{kj} a la cantidad de salida o resultado 'k' que produce 'j', quedando así las expresiones:

$$Entrada\ virtual_j = \sum_{i=1}^m u_{ij} x_{ij}$$

$$Salida\ virtual_j = \sum_{k=1}^s v_{kj} y_{kj}$$

Donde m es el número de entradas, s el número de salidas y u_{ij} y v_{kj} son los pesos que corresponden a cada entrada y a cada salida. Pudiendo definirse la productividad como:

$$Productividad_j = \frac{\sum_{k=1}^s v_{kj} y_{kj}}{\sum_{i=1}^m u_{ij} x_{ij}}$$

Este dato de forma aislada no nos ofrece información relevante de cómo se están aprovechando los recursos existentes con respecto a otras unidades similares. Por ello se comparan los datos de productividad de cada DMU, apareciendo así la eficiencia relativa.

$$Eficiencia_j = \frac{Productividad_j}{Productividad_0} = \frac{Salida\ virtual_j / Entrada\ virtual_j}{Salida\ virtual_0 / Entrada\ virtual_0}$$

Se pueden distinguir varios tipos de eficiencias relativas en función de la unidad de referencia que se utilice:

- Eficiencia global: La unidad de referencia es la de mayor productividad de entre las que están en el estudio.
- Eficiencia técnica: La unidad de referencia es la de mayor productividad de entre las unidades de su tamaño.
- Eficiencia de escala: Es el cociente entre la eficiencia global y la eficiencia técnica.

2.2 Tecnología

Para comprender de mejor manera la metodología DEA, al ser un método no paramétrico que se basa en la muestra, se formará una tecnología a partir de las DMU's escogidas. Esta tecnología conocida como

“Production Possibility Set (PPS)” se basa en la productividad delimitando el conjunto de posibilidades de producción que tiene el problema a abordar, definiendo las distintas cantidades de recursos que se emplearán para producir ciertas cantidades de productos.

Mediante la muestra y diferentes hipótesis se puede definir la tecnología o conjunto de posibilidades de producción. Los axiomas para la definición de la tecnología son los descritos a continuación:

1. Envoltura (Envelopment): Todos los puntos observados son factibles. Esto significa que todas las DMUs estarán contenidas en la frontera, siendo las que marcan esta frontera las DMUs eficientes. Por tanto, pertenecen al conjunto de posibilidades de producción T.

$$(X_i, Y_j) \in T \quad \forall j$$

2. Libre disponibilidad (Free disposability): Si una observación pertenece al conjunto de posibilidades de producción T, todos los puntos que consumen más y producen menos son posibles.

$$(X_i, Y_j) \in T \rightarrow (\hat{x}, \hat{y}) \in T \quad \forall \hat{x} \geq x, \hat{y} \leq y$$

3. Convexidad (Convexity): Dados dos puntos pertenecientes a la tecnología, todos los puntos intermedios, combinación convexa de ellas dos, pertenecen también al conjunto de posibilidades de producción.

$$\left. \begin{array}{l} (X_1, Y_1) \in T \\ (X_2, Y_2) \in T \end{array} \right\} \lambda(X_1, Y_1) + (1-\lambda)(X_2, Y_2) \in T \quad 0 \leq \lambda \leq 1$$

4. Escalabilidad (Scalability): Si (X,Y) pertenecen al conjunto de posibilidades de producción, entonces $\lambda(X,Y)$ pertenece también, para todo escalar de λ mayor o igual que cero.

$$(X_1, Y_1) \in T \rightarrow (\lambda X, \lambda Y) \in T \quad \forall \lambda \geq 0$$

- a) Downward Scalability: Solo se puede afirmar que pertenecen a la tecnología los puntos escalados hacia abajo.

$$(X_1, Y_1) \in T \rightarrow (\lambda X, \lambda Y) \in T \quad \forall \lambda \in [0,1]$$

- b) Upward: Solo se puede afirmar que pertenecen a la tecnología los puntos escalados hacia arriba.

$$(X_1, Y_1) \in T \rightarrow (\lambda X, \lambda Y) \in T \quad \forall \lambda \geq 1$$

Según cuáles de estos axiomas anteriormente identificados se cumpla se pueden producir diferentes tipos de fronteras tecnológicas:

- F.D.H. (Free Disposal Hull): Aplicando hipótesis 1 y 2.
- V.R.S. (Variable Returns to Scale): Aplicando hipótesis 1,2 y 3
- C.R.S. (Constant Returns to Scale): Aplicando hipótesis 1,2,3 y 4

Si bien es verdad, que las dos alternativas más frecuentes de uso son las de Retorno de Escala Constante (CRS) y Retornos de Escala Variable (VRS).

Para poder elegir qué alternativa se adapta de mejor forma al problema que se va a plantear, se deberá tener en cuenta si en base a las DMU's eficientes de referencia el tamaño del resto es parecido o, por el contrario, el tamaño de las unidades de decisión es distinto entre sí sabiendo que cada unidad ineficiente deberá tender a parecerse a las que sí sean eficientes.

- Retornos de Escala Variables (VRS)

Esta tecnología considera que algunas unidades de tamaño diferente al de las eficientes pueden no ser capaces de conseguir la productividad de éstas. Esto puede dar lugar a que solo se puedan comparar aquellas unidades que se ajusten a la magnitud. Así solo se tendrán en cuenta como admisibles las combinaciones lineales convexas y la eficiencia a utilizar será la técnica.

El conjunto de puntos admisibles viene dado por:

$$T_{VRS} = \{(\vec{x}, \vec{y}) : \exists \vec{\lambda} \geq 0, \vec{\lambda}X \leq \vec{x}; \vec{\lambda}Y \geq \vec{y}; \vec{\lambda}\vec{e}^T = 1\}$$

Se observa que el sumatorio de λ^j es equivalente a la unidad, de este modo se facilita que las unidades de distinto tamaño a las eficientes puedan compararse con ellas.

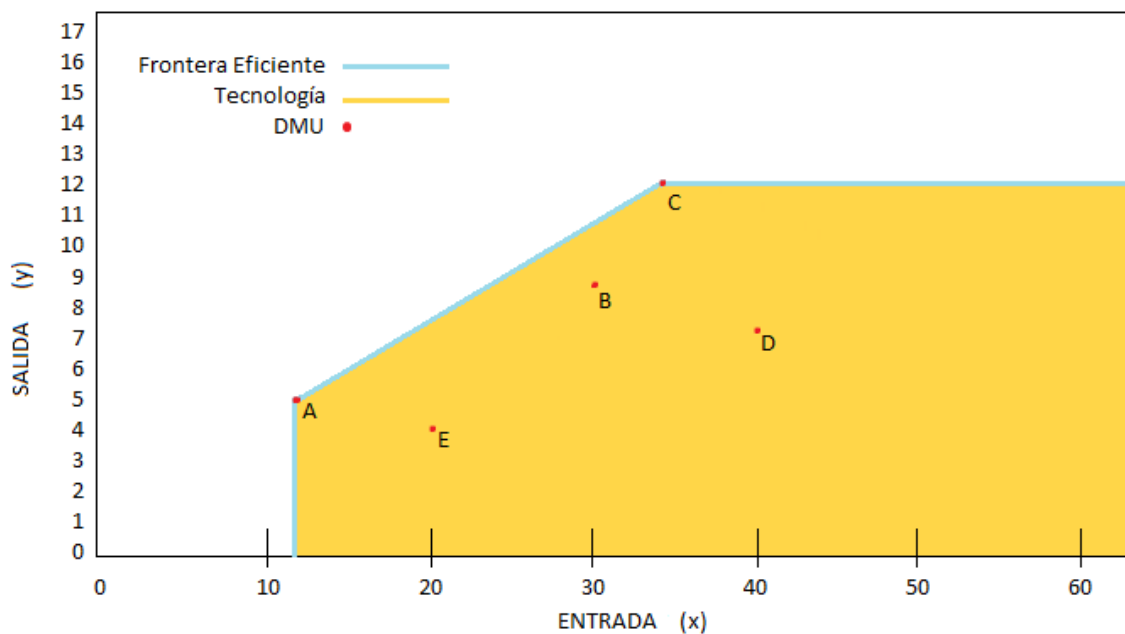


Figura 2. Representación gráfica tecnología VRS

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se ha representado el caso de una entrada y una salida, donde se observa que la frontera eficiente está comprendida por las DMU's A y C. Son éstas las unidades eficientes de este ejemplo. La zona sombreada refleja la tecnología, donde el resto de DMU's son menos eficientes al no estar en la propia frontera. Por otro lado, la región situada por encima de la frontera eficiente es donde los niveles de producción que allí se encuentran se consideran inalcanzables.

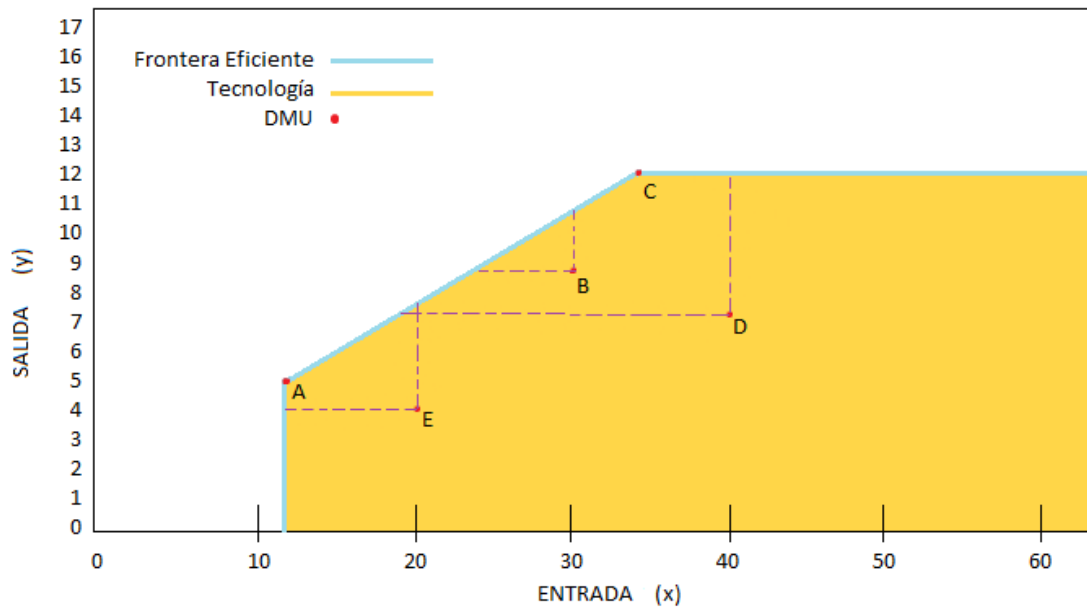


Figura 3. Tecnología VRS. Orientación de entrada y salida
Fuente: Elaboración propia

En la figura 3 se observan las proyecciones sobre la frontera eficiente técnica de las DMU's ineficientes B, D y E, buscando así mejorar la propia eficiencia. Se podrá realizar con orientación de entrada o de salida, sabiendo que la eficiencia variará según cuál se escoja.

En DEA se trata el término “proyección” de las unidades sobre otras para explicar los resultados que se obtienen tras la resolución del problema.

Es importante conocer que cuando se pretende reducir los recursos que se consumen o aumentan en base a la productividad a costa de disminuir los recursos, se habla de orientación de entrada (Input Orientation). Por otro lado, al querer aumentar los productos o aumentar la productividad incrementando las salidas, el problema tiene orientación de salida (Output Orientation).

- Retornos de Escala Constante (CRS)

Al aplicar el principio de mínima extrapolación y considerar el mínimo conjunto de puntos que cumplen las cuatro propiedades, se obtiene esta tecnología. Se caracteriza por considerar que cualquier unidad puede alcanzar la productividad de las eficientes, independientemente del tamaño.

De esta manera todas las unidades de decisión tienen como unidad de referencia la de mayor productividad, calculándose la eficiencia global.

Se puede representar entonces el siguiente conjunto:

$$T_{CRS} = \{ (\vec{x}, \vec{y}) : \exists \vec{\lambda} \geq 0, \vec{\lambda}X \leq \vec{x}; \vec{\lambda}Y \geq \vec{y} \}$$

Aquí $\vec{\lambda}$ es un vector con tantas componentes como DMU's tiene el sistema. Siendo X e Y las matrices de entradas y salidas observadas en las unidades. Estas matrices tienen como filas las DMU's, teniendo X tantas columnas como entradas e Y tantas columnas como salidas.

Como se puede observar, la figura 4 corresponde a una tecnología CRS cuyas DMUs están compuestas por una única entrada y salida. En este caso la frontera tecnológica se crea con la DMU A, siendo quien trabaja con mayor eficiencia. Esta DMU eficiente define la pendiente que se trata de la frontera eficiente y cualquier unidad productiva que se encuentre en ella lo es también.

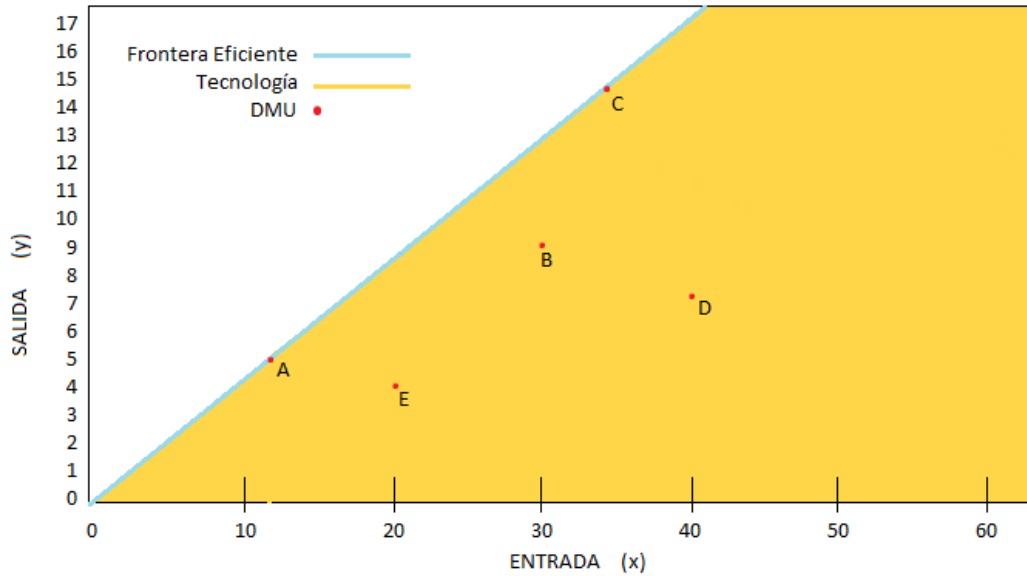


Figura 4. Representación gráfica tecnología CRS
Fuente: Elaboración propia

En la figura 5 se proyectan las DMUs que son ineficientes sobre la frontera, de igual modo que en el caso VRS.

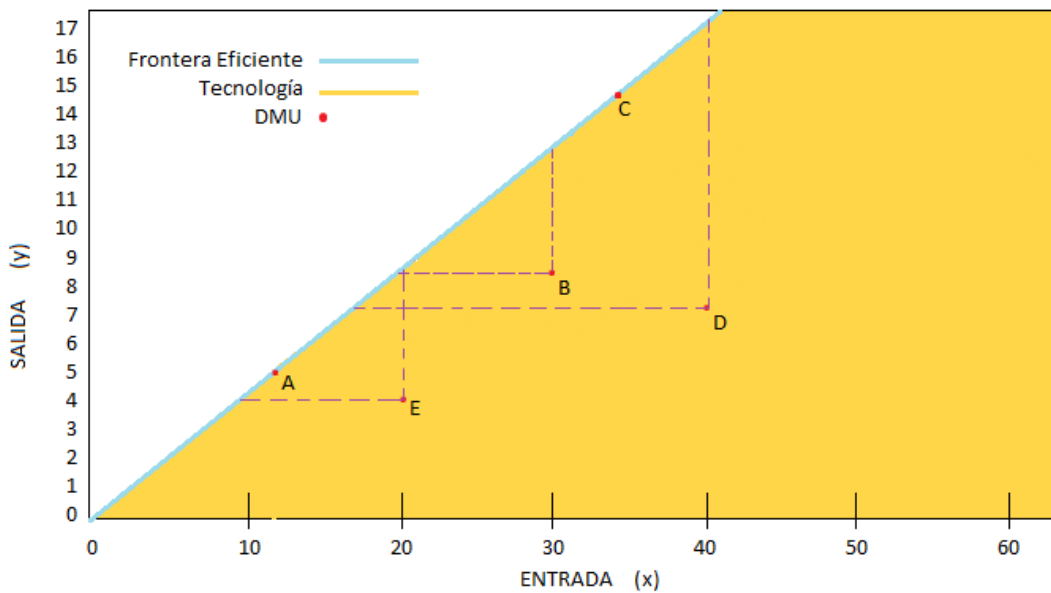


Figura 5. Tecnología CRS. Orientación entrada y salida
Fuente: Elaboración propia

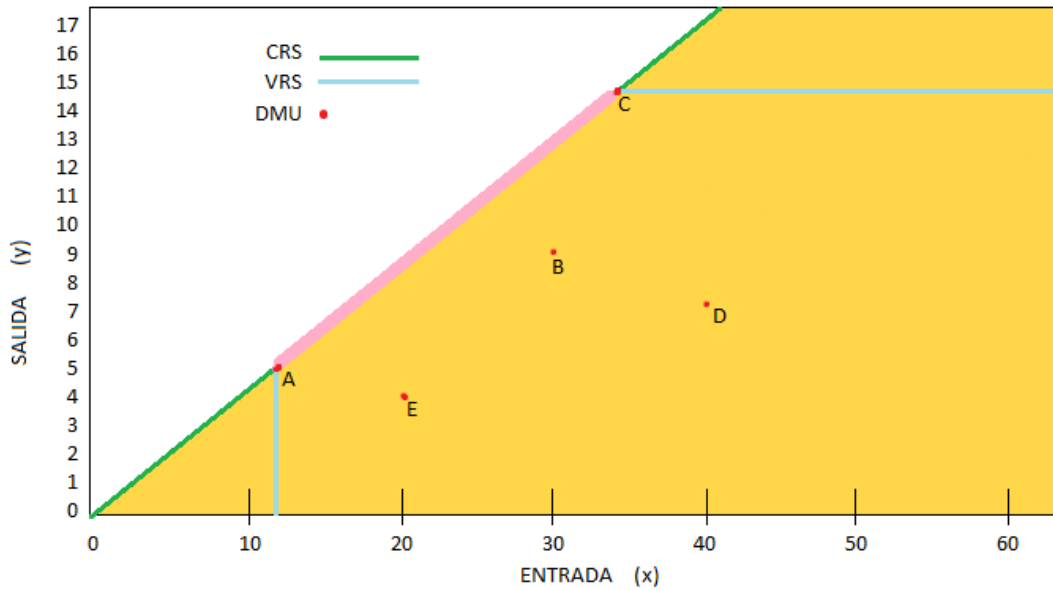


Figura 6. Fronteras eficientes CRS y VRS
Fuente: Elaboración propia

Al representar de manera conjunta las fronteras eficientes de la tecnología CRS y VRS, se observa que ésta última es más restrictiva. Las DMU's eficientes A y C su eficiencia de escala igual es a 1, estando representados ambos en la zona rosa que tiene el tamaño de escala más productivo denominada esta zona MPSS (Most Productive Scale Size).

Existen dos tecnologías intermedias entre VRS y CRS que se crean al dividir el cuarto axioma de escalabilidad: Tecnología Non Increasing Returns to Scale (NIRS) con escalabilidad hacia abajo (Figura 7), y Tecnología Non Decreasing Returns to Scale (NDRS) con escalabilidad hacia arriba (Figura 8).

$$T_{NIRS} = \{ (\vec{x}, \vec{y}) : \exists \vec{\lambda} \geq 0, \vec{\lambda}X \leq \vec{x}; \vec{\lambda}Y \geq \vec{y}; \sum_j \lambda_j \leq 1 \}$$

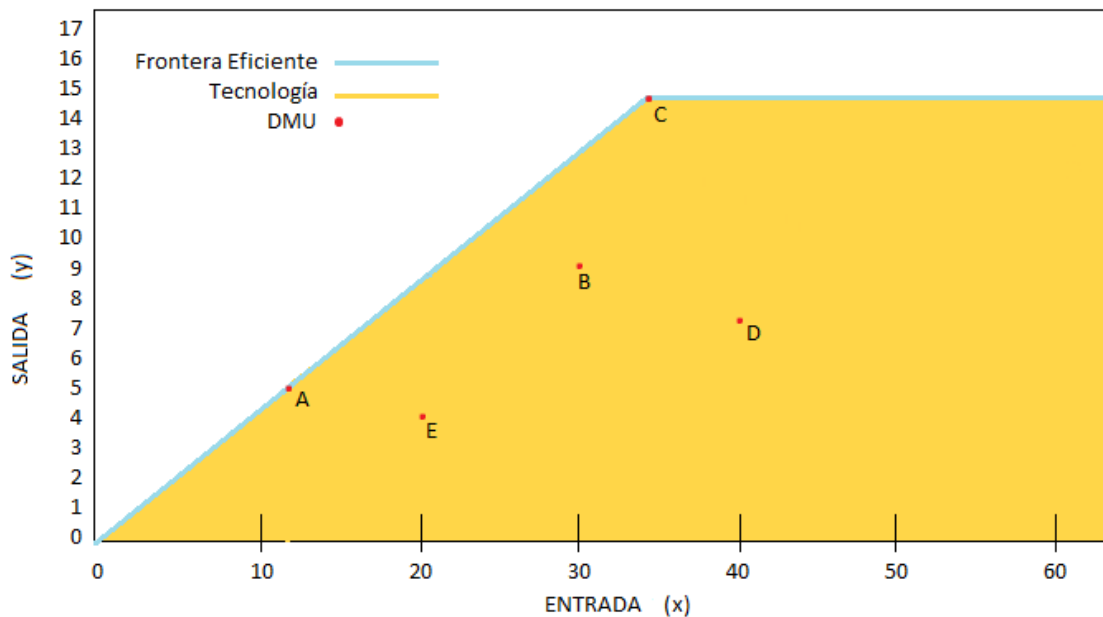


Figura 7. Representación gráfica tecnología NIRS
Fuente: Elaboración propia

$$T_{NDRS} = \{(\vec{x}, \vec{y}) : \exists \vec{\lambda} \geq 0, \vec{\lambda}X \leq \vec{x}; \vec{\lambda}Y \geq \vec{y}; \sum_j \lambda_j \geq 1\}$$

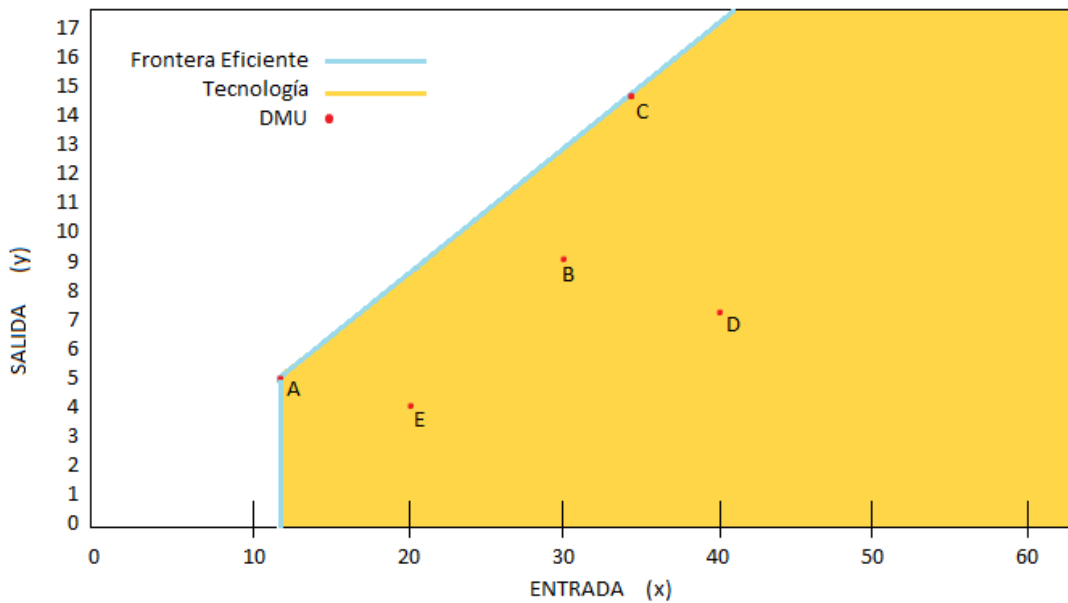


Figura 8. Representación gráfica tecnología NDRS
Fuente: Elaboración propia

- Free Disposal Hull (FDH)

Y la última tecnología a describir es Free Disposal Hull (FDH) donde únicamente se tienen en cuenta los axiomas de envoltura y libre disponibilidad.

$$T_{FDH} = \{(\vec{x}, \vec{y}) : \exists \vec{\lambda} \geq 0, \vec{\lambda}X \leq \vec{x}; \vec{\lambda}Y \geq \vec{y}; \vec{\lambda} \vec{e}^T = 1, \lambda_j \in \{0,1\}\}$$

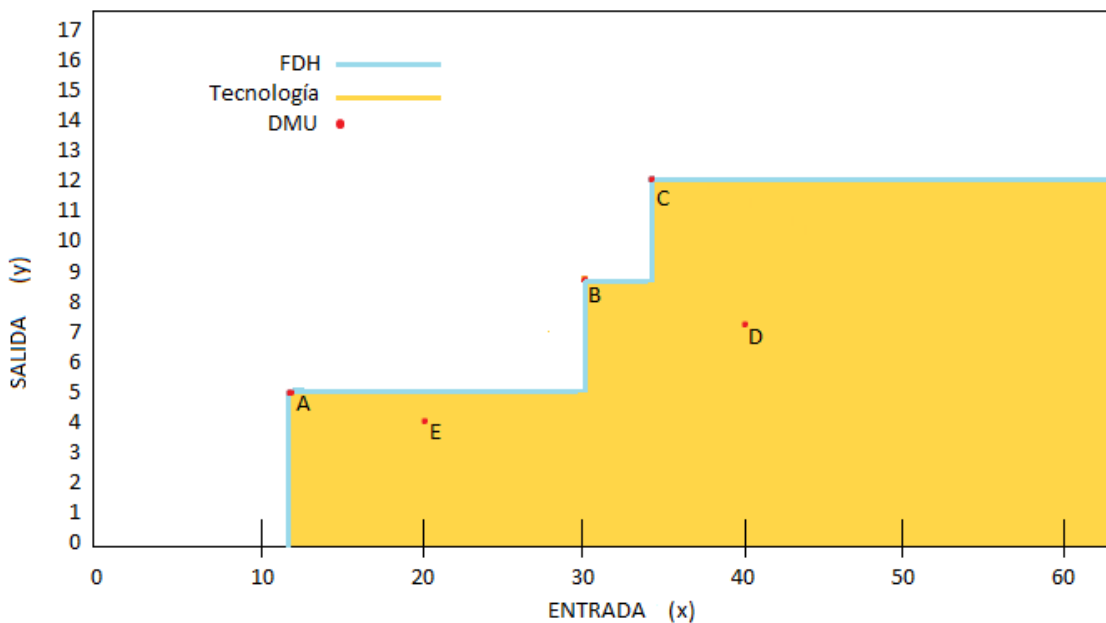


Figura 9. Representación gráfica tecnología FDH
Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que sólo una de las componentes del vector $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ será uno y las demás cero, por lo que no existe una frontera eficiente como tal, si no que habrá un conjunto de DMU's eficientes sobre las que se proyectarán las no eficientes.

2.3 Modelos DEA

Una vez explicadas las tecnologías existentes, en este siguiente apartado se van a exponer los modelos que derivan de ellas, que, según las características de los datos a utilizar, se requerirá emplear un modelo u otro.

En estos modelos se pretende maximizar la función objetivo siendo está la eficiencia, pudiendo calcularse la inversa dependiendo si el modelo tiene orientación de entrada o de salida.

2.3.1 Modelos con retorno de escala constante (CCR)

Modelos que han sido desarrollados por Charnes, Cooper y Rhodes (1978), de ahí las siglas CCR donde se considera que cualquier unidad pueda alcanzar la productividad de las eficientes, sin importar el tamaño de esa unidad. La DMU de referencia será la que tenga mayor productividad, es decir, que consuma menos recursos. De este modo se estudia la eficiencia global, ya que todas las DMU's tienen como unidades de referencia a las de mayor productividad.

- Modelo Ratio

Este primer modelo sirve como base para el desarrollo de los demás modelos. Cada unidad compara su productividad con el resto de las que estén en estudio utilizando en cada comparación los pesos con los que su eficiencia es la mejor. El modelo ratio se denomina así debido al cociente que existe en la función objetivo, convirtiendo este problema en uno no lineal y teniendo una difícil resolución.

Analíticamente se expresa:

$$\text{MAX} \left[h_j = \frac{\sum_{k=1}^s v_{kj} y_{kj}}{\sum_{i=1}^m u_{ij} x_{ij}} \right]$$

s.a:

$$\frac{\sum_{k=1}^s v_{kj} y_{kj}}{\sum_{i=1}^m u_{ij} x_{ij}} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$v_{kj} \geq \varepsilon \quad k = 1, 2, \dots, p$$

$$u_{ij} \geq \varepsilon \quad i = 1, 2, \dots, m$$

En este modelo hay una restricción por cada unidad existente en el problema, obligando a que ninguna DMU pueda tener una eficiencia mayor a la unidad. Aparece el número real ε que es estrictamente positivo, valor que representa una constante arquimediana obligando a los pesos a ser siempre distintos de cero.

Como en este modelo se opera con retornos de escala constantes, se comparan las DMUs únicamente con la más eficiente buscando replicar su comportamiento, lo que provoca en muchos casos variaciones de entradas y salidas inasumibles en la realidad.

- Modelo CCR-INPUT

Para resolver las dificultades que se observaron en el modelo Ratio se transforma en un problema lineal equivalente sustituyendo los ratios que aparecen por expresiones lineales.

La manera más frecuente de expresar este modelo es mediante su dual pudiendo analizar posteriormente los resultados.

$$\begin{aligned}
 & \text{MIN } \theta_j - \varepsilon [\sum_{k=1}^s h_k^+ + \sum_{i=1}^m h_i^-] \\
 & \text{s.a:} \\
 & \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j = \theta_j x_{iJ} - h_i^- \quad i=1,2,\dots,m \\
 & \sum_{j=1}^n y_{kj} \lambda_j = y_{kJ} + h_k^+ \quad k=1,2,\dots,s \\
 & \lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0 \\
 & \theta_j \text{ libre}
 \end{aligned}$$

A este modelo se le define como forma envolvente, en el cual el número total de DMU's que intervienen es n, siendo m el número total de entradas y p el de salidas de cada DMU.

Las n variables λ_j , utilizadas para generar la frontera tecnológica, corresponden a las n restricciones primeras del primal, θ_j corresponde a la restricción restante y h_i^- , h_k^+ son variables de holgura. La variable h_i^- determina cuánto se deben reducir las entradas para alcanzar la eficiencia y h_k^+ determina cuánto tienen que ampliarse las salidas. Ambas variables deben ser siempre mayores o iguales a 0.

En cuanto a los subíndices, J hace referencia a la DMU que se encuentra en ese momento en estudio, el subíndice i hace referencia a la entrada a la que se refiere la variable, k a la salida y el subíndice j a la DMU.

La resolución del modelo dual se realiza en dos fases debido a la poca influencia de la constante ε en la minimización del problema.

PRIMERA ETAPA. FASE I

$$\begin{aligned}
 & \text{MIN } \theta_j \\
 & \text{s.a:} \\
 & \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j = \theta_j x_{iJ} - h_i^- \quad i=1,2,\dots,m \\
 & \sum_{j=1}^n y_{kj} \lambda_j = y_{kJ} + h_k^+ \quad k=1,2,\dots,s \\
 & \lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0 \\
 & \theta_j \text{ libre}
 \end{aligned}$$

Con la solución de este primer modelo θ_j^* se resuelve la segunda etapa:

SEGUNDA ETAPA.FASE II

$$MIN - [\sum_{k=1}^s h_k^+ + \sum_{i=1}^m h_i^-]$$

s.a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}\lambda_j = \theta_j^* x_{ij} - h_i^- \quad i=1,2,\dots,m$$

$$\sum_{j=1}^n y_{kj}\lambda_j = y_{kj} + h_k^+ \quad k=1,2,\dots,s$$

$$\lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0$$

En la primera fase (llamada fase radial) se busca acercar el punto lo máximo posible a la frontera tecnológica, reduciendo proporcionalmente todas las entradas. Es en ésta donde se obtiene el valor óptimo θ_j^* .

La fase radial puede llevar a la unidad a proyectarse sobre la frontera tecnológica, pero puede que los puntos que componen esta sean ineficiente, ya sea por consumir más recurso o por producir menos productos que en la frontera eficiente. Es por ello que se debe realizar una segunda etapa donde se puedan aplicar desplazamientos sobre esa frontera.

En la segunda fase, donde se parte de θ_j^* se determina el valor de las holguras que llevan el punto a la frontera eficiente. Es aquí donde se produce una reducción rectangular que disminuye las entradas que influyen para alcanzar la eficiencia. Se puede verificar que la DMUJ será eficiente en el momento que el multiplicador θ_j sea igual a 1 y las holguras h_i^-, h_k^+ sean nulas, esto quiere decir cuando no queden mejoras por aplicar. En el caso de que las holguras no sean nulas se necesitará una proyección paralela al eje de la holgura.

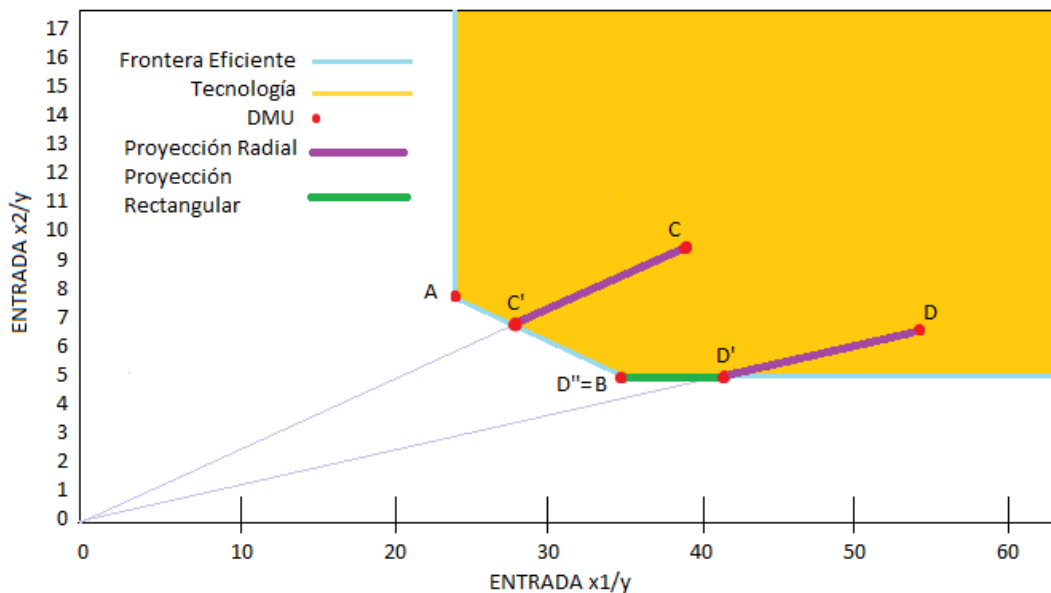


Figura 10. Representación modelo CCR-INPUT

Fuente: Elaboración propia

En la figura 10 se ha representado gráficamente el modelo, donde se puede apreciar que el multiplicador θ_j es la proporción de entradas que han de utilizarse para conseguir la eficiencia. El punto C se proyecta en la frontera eficiente como C' mediante proyección radial, aplicándose la primera fase únicamente. En el caso

del punto D que se proyecta como D' sobre la frontera es necesario utilizar las dos fases para obtener la mayor eficiencia posible terminando como D'' coincidiendo con el punto B situado en la propia frontera eficiente.

- Modelo CCR-OUTPUT

En el caso de tener orientación de salida la estructura es parecida al modelo anterior pero la función objetivo viene dada por el inverso de la eficiencia relativa de la unidad de decisión J, siendo siempre mayor o igual a la unidad.

Quedando expresada el modelo dual de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & \text{MAX } \gamma_J + \varepsilon [\sum_{k=1}^s h_k^+ + \sum_{i=1}^m h_i^-] \\ & \text{s.a:} \\ & \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j = x_{iJ} - h_i^- \quad i=1,2,\dots,m \\ & \sum_{j=1}^n y_{kj} \lambda_j = \gamma_J y_{kJ} + h_k^+ \quad k=1,2,\dots,s \\ & \lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0 \\ & \gamma_J \text{ libre} \end{aligned}$$

La variable γ_J denota la amplificación radial que deberá de aplicarse a las salidas para considerarse eficientes, de ahí que su valor será mayor o igual que la unidad, pues su finalidad será la de incrementar los productos resultantes. De igual modo que en el modelo anterior, si γ_J es igual a la unidad y las variables de holgura h_i^-, h_k^+ son nulas, corresponde a una unidad diferente, en contra posición cuando sean no nulas las holguras será necesario realizar una proyección paralela al eje de la variable de holgura.

En este modelo también es necesario realizar dos fases, una primera para poder aplicar la proyección radial y una segunda para la proyección rectangular.

PRIMERA ETAPA. FASE I

$$\begin{aligned} & \text{MAX } \gamma_J \\ & \text{s.a:} \\ & \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j \leq x_{iJ} \quad i=1,2,\dots,m \\ & \sum_{j=1}^n y_{kj} \lambda_j \geq \gamma_J y_{kJ} \quad k=1,2,\dots,s \\ & \lambda_j \geq 0 \\ & \gamma_J \text{ libre} \end{aligned}$$

Con la solución de este primer modelo γ_J^* se resuelve la segunda etapa:

SEGUNDA ETAPA.FASE II

$$MAX [\sum_{k=1}^s h_k^+ + \sum_{i=1}^m h_i^-]$$

s.a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}\lambda_j = x_{ij} - h_i^- \quad i=1,2,\dots,m$$

$$\sum_{j=1}^n y_{kj}\lambda_j = \gamma_j^* y_{kj} + h_k^+ \quad k=1,2,\dots,s$$

$$\lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0$$

En la figura siguiente se ha representado gráficamente el modelo donde se puede observar que el punto C se proyecta en la frontera eficiente como C' mediante proyección radial. Posteriormente hay que aplicarle la segunda etapa para una proyección rectangular dando lugar al punto C'' situado junto al punto A. El punto D se proyecta como D' sobre la frontera mediante una proyección radial únicamente, ya que no tiene margen de mejora con la proyección rectangular.

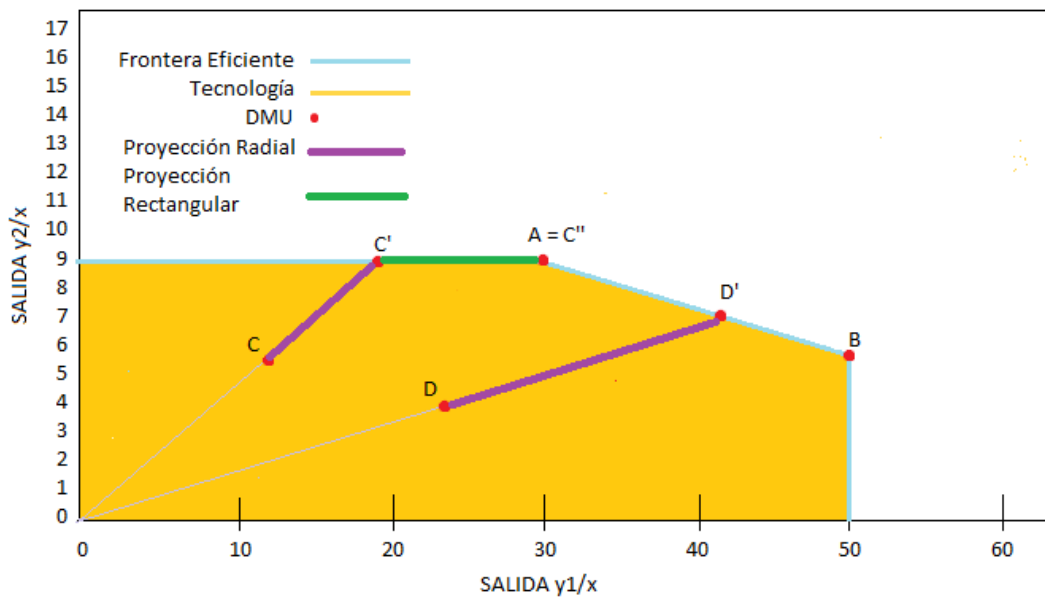


Figura 11. Representación modelo CCR-OUTPUT
Fuente: Elaboración propia

2.3.2 Modelos con retorno de escala variable (VRS)

Estos modelos se plantean debido a la imposibilidad de utilizar los modelos anteriores cuando se tienen retornos de escala variable. El modelo establecerá alguna variable o especificación que compare las diferentes unidades con las de su tamaño y no con las que difiera, con el propósito de que se considere los retornos de escala variable.

- Modelo BCC-INPUT

En este modelo se considera el retorno de escala variable, a partir del modelo Ratio se añade alguna restricción o variable para que cada unidad DMU_j sea comparada con las que son de igual tamaño y no con todas las unidades representadas en el problema.

La expresión que define al modelo es la siguiente:

$$MIN \theta_j - \varepsilon [\sum_{k=1}^s h_k^+ + \sum_{i=1}^m h_i^-]$$

s.a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j = \theta_j x_{ij} - h_i^- \quad i=1,2,\dots,m$$

$$\sum_{j=1}^n y_{kj} \lambda_j = y_{kj} + h_k^+ \quad k=1,2,\dots,s$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0$$

$$\theta_j \text{ libre}$$

A la vista del modelo matemático se observa que aparece una restricción más, $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$, donde se obliga a que la proyección de la unidad se realice sobre el hiperplano que forman las unidades más productivas de su tamaño. Es por ello que en este caso habrá unidades que en el modelo de escala constante no eran eficientes y aquí sí lo serán. Para realizar este modelo, se deberán ejecutar dos fases también.

PRIMERA ETAPA. FASE I

$$MIN \theta_j$$

s.a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j = \theta_j x_{ij} - h_i^- \quad i=1,2,\dots,m$$

$$\sum_{j=1}^n y_{kj} \lambda_j = y_{kj} + h_k^+ \quad k=1,2,\dots,s$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0$$

$$\theta_j \text{ libre}$$

Con la solución de este primer modelo θ_j^* se resuelve la segunda etapa:

SEGUNDA ETAPA.FASE II

$$MIN - [\sum_{k=1}^s h_k^+ + \sum_{i=1}^m h_i^-]$$

s.a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}\lambda_j = \theta_j^* x_{ij} - h_i^- \quad i=1,2,\dots,m$$

$$\sum_{j=1}^n y_{kj}\lambda_j = y_{kj} + h_k^+ \quad k=1,2,\dots,s$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0$$

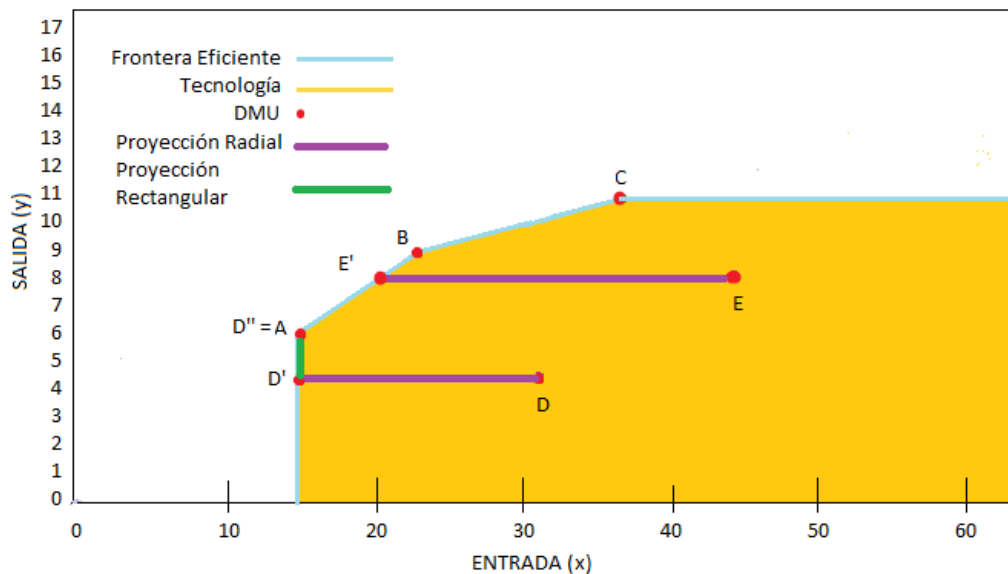


Figura 12. Representación modelo BCC-INPUT

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se representa un problema donde las DMU's D y E se encuentran fuera de la frontera eficiente, teniendo que aplicar en ellas reducciones para poder alcanzar dicha frontera y obtener mayor eficiencia. El punto D necesita de la aplicación de ambas fases, reducción radial y posterior rectangular para poder llegar a proyectarse en la frontera eficiente formada por A, B y C. En cambio, el punto E solo necesita la aplicación de proyección radial para llegar a esa eficiencia requerida.

Es en este momento donde se hace alusión al término *peer group*, definiéndose al conjunto de unidades eficientes de la que la proyección de una determinada unidad es combinación lineal. Como en el caso de la DMU E.

- Modelo BCC-OUTPUT

Este modelo tiene orientación de salida, obteniéndose una analogía del modelo anterior, por lo que las modificaciones realizadas para alcanzar la frontera eficiente se harán mediante un aumento del nivel de producción.

Representando el modelo matemático de la siguiente manera:

$$MAX \gamma_J + \varepsilon [\sum_{k=1}^s h_k^+ + \sum_{i=1}^m h_i^-]$$

s.a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j = x_{iJ} - h_i^- \quad i=1,2,\dots,m$$

$$\sum_{j=1}^n y_{kj} \lambda_j = \gamma_J y_{kJ} + h_k^+ \quad k=1,2,\dots,s$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0$$

$$\gamma_J \text{ libre}$$

La variable γ_J es un multiplicador utilizado para saber cuánto se debe aumentar proporcionalmente las salidas para desplazar el punto en concreto hacia la frontera eficiente.

Se describen las dos etapas en que se divide el modelo para las proyecciones radiales y rectangulares:

PRIMERA ETAPA. FASE I

$$MAX \gamma_J$$

s.a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j \leq x_{iJ} \quad i=1,2,\dots,m$$

$$\sum_{j=1}^n y_{kj} \lambda_j \geq \gamma_J y_{kJ} \quad k=1,2,\dots,s$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j \geq 0$$

$$\gamma_J \text{ libre}$$

Con la solución de este primer modelo γ_J^* se resuelve la segunda etapa:

SEGUNDA ETAPA.FASE II

$$MAX [\sum_{k=1}^s h_k^+ + \sum_{i=1}^m h_i^-]$$

s.a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j = x_{iJ} - h_i^- \quad i=1,2,\dots,m$$

$$\sum_{j=1}^n y_{kj} \lambda_j = \gamma_J^* y_{kJ} + h_k^+ \quad k=1,2,\dots,s$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0$$

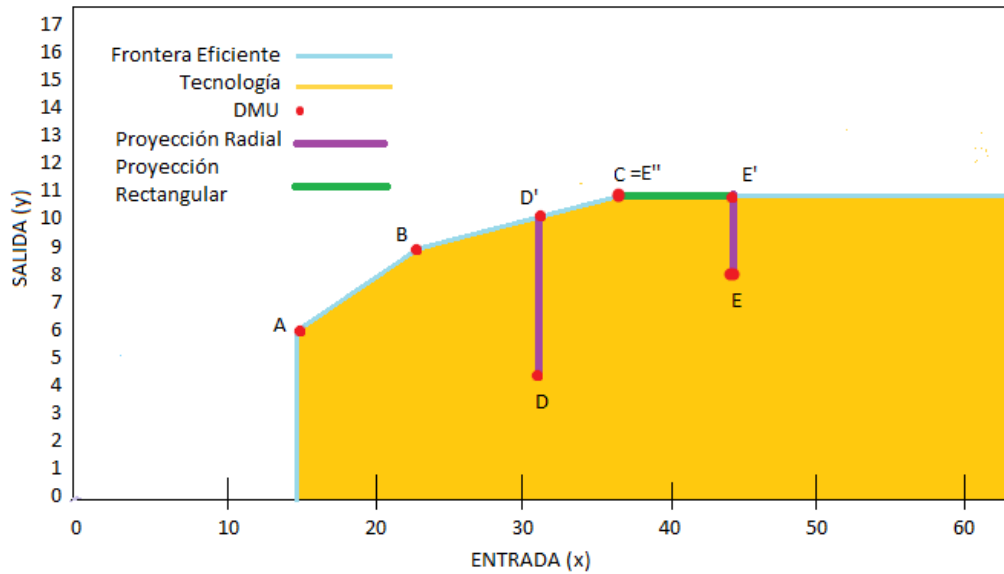


Figura 13. Representación modelo BCC-OUTPUT
Fuente: Elaboración propia

Se expresa en la figura 13 las DMU's que buscan proyectarse en la frontera tecnológica, realizándolo principalmente mediante una proyección radial aumentando las salidas con un valor γ_j^* como es el caso de los puntos D y E. Es este último punto quien necesita un segundo desplazamiento rectangular para alcanzar la eficiencia disminuyendo sus entradas para proyectarse en el punto C.

2.3.3 Modelos no orientados

- Modelo Aditivo

El modelo que a continuación se va a describir opera con retornos de escala variable, ejecutándose únicamente la proyección rectangular en una sola fase. Es decir, el modelo maximizará las holguras independientemente de si tiene orientación de entrada o de salida, lo que implica que cada entrada o salida se aumenta o disminuye sin depender de las demás y sin afectar a todas. Es por ello que se denomina no orientado.

Este modelo fue introducido por Charnes en 1985, siendo Banker quien lo elaborase posteriormente en 1989.

El modelo matemático quedará expresado como:

$$\begin{aligned}
 & \text{MAX} [\sum_{k=1}^s h_k^+ + \sum_{i=1}^m h_i^-] \\
 & \text{s.a:} \\
 & \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j = x_{ij} - h_i^- \quad i=1,2,\dots,m \\
 & \sum_{j=1}^n y_{kj} \lambda_j = y_{kj} + h_k^+ \quad k=1,2,\dots,s \\
 & \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\
 & \lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0
 \end{aligned}$$

En este modelo aparecerán las mismas unidades que en el modelo BBC creando la misma frontera eficiente, aunque en el caso de que una DMU sea ineficiente puede dar eficiencias distintas para cada modelo debido a que se utilizan distintas métricas.

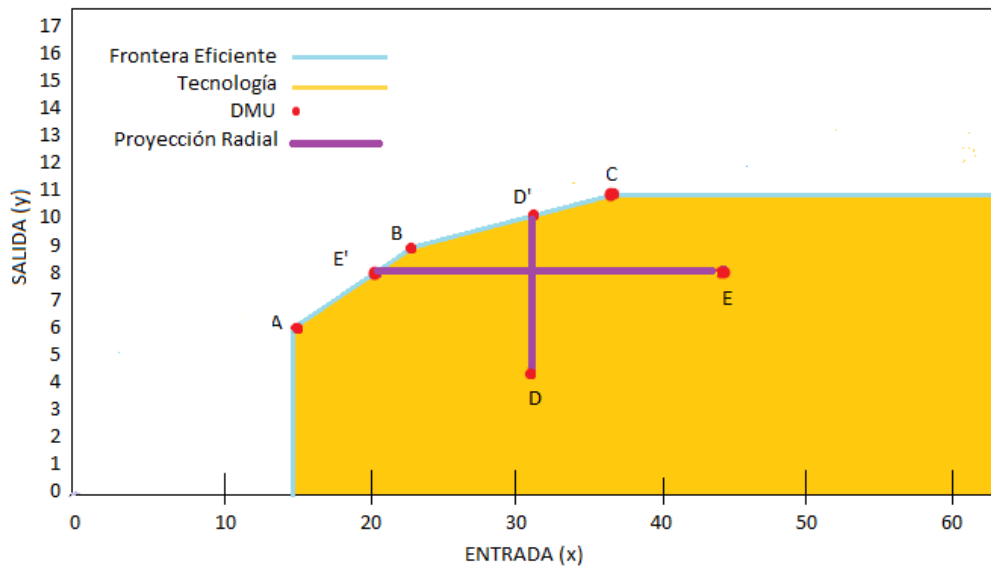


Figura 14. Representación modelo Aditivo
Fuente: Elaboración propia

Mediante la anterior ilustración gráfica (Figur 14) se puede verificar como las DMUs menos eficientes D y E se proyectan en la frontera por medio de un aumento de la magnitud de salida y una reducción de la de entrada respectivamente, debido a que se buscará obtener mejoras independientemente de la orientación que tomen como se ha especificado con anterioridad.

3 CASO PRÁCTICO

EL agua es un bien muypreciado para la sociedad como para las empresas que realizan actividades en cualquier sector, por ello es imprescindible garantizar un suministro seguro y de calidad.

Para poder realizarlo se necesita un conjunto de infraestructuras para almacenar, distribuir, depurar y reutilizar el agua, así como un modelo de gestión integral de todas ellas. Este modelo es lo que llamamos Ciclo Integral del Agua.

Este documento se centrará en la parte del ciclo encargada de recoger y transportar las aguas residuales, depurarlas y la final regeneración o valorización de la misma.

El saneamiento del agua en España está gestionado por administraciones o por empresas con concesiones gestionándose así de una forma más integrada. También existe la opción de generar contratos para actividades más concretas y a corto plazo. Al hacer un estudio de las empresas que gestionan el sistema de saneamiento se puede apreciar que la presencia de empresas privadas es bastante relevante.

Las infraestructuras de agua de manera general han sido, en gran parte, financiadas por el conjunto de las Administraciones Públicas en cada comunidad. Por tanto, se debe tener en cuenta que el capital privado que es añadido forma un pilar muy importante de cara a las inversiones necesarias para nuevos proyectos o mejoras de los ya existentes.

La situación de escasez de agua que existe en la actualidad y la necesidad de la sociedad en su conjunto por el uso de esta hacen reflexionar si las empresas en España gestionan de manera eficiente los recursos de los que disponen.

3.1 Ciclo Integral del Agua

Se describe el Ciclo Integral del Agua como el conjunto de actividades que engloban los servicios prestados por los organismos relacionados con los usos del agua en los núcleos de población.

Existen dos bloques diferenciados, los sistemas en alta y los sistemas en baja. Los primeros hacen referencia a las actividades dentro de la cadena de valor en la captación del agua, almacenamiento y transporte hasta las plantas de tratamiento o potabilizadoras para su posterior consumo humano. Los sistemas en baja concentran las actividades relacionadas con la potabilización, distribución, saneamiento, depuración y reutilización del agua (Ver Figura 15 y Tabla 1).



Figura 15. Ciclo Integral del Agua
Fuente: Emasesa

Se muestra a continuación de forma más detallada las actividades que forman el ciclo integral del agua, así como una breve explicación de las mismas.

| TABLA 1. CICLO INTEGRAL DEL AGUA | | | | |
|--|--|---|--|---|
| SISTEMA EN ALTA | SISTEMA EN BAJA | | | |
| Abastecimiento | Potabilización | Distribución | Saneamiento y Depuración | Reutilización |
| Captación del agua de diversas fuentes y posterior almacenamiento y transporte a zonas de utilización. | El agua es tratada para lograr unos parámetros que garanticen el consumo humano. | Se almacena el agua en depósitos y posteriormente se conduce por tuberías hasta los usuarios. | Recogida de las aguas residuales urbanas de los núcleos de población a través de las redes de alcantarillado para su depuración en las plantas y posterior vertido a cauces naturales. | Tratamientos adicionales de regeneración del agua para ser reutilizada en distintos usos. |

Tabla 1. Ciclo Integral del Agua

- **CAPTACIÓN**

Lo primero a realizar es conseguir el volumen de agua necesaria para abastecer todas las necesidades de la sociedad. Este proceso depende de las fuentes de recursos que haya en cada localización geográfica, por ello puede realizarse desde aguas superficiales (embalses, lagos, ríos) o desde aguas subterráneas (manantiales o pozos). Existe la posibilidad que esta captación se realice desde procesos de reutilización, utilizándose para uso distinto al consumo humano.

- **POTABILIZACIÓN**

Cuando se ha captado el agua necesaria, se debe tratar para que sea apta para el consumo humano. Ello se desarrolla en estaciones de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) o plantas de potabilización. El tratamiento se realiza mediante una serie de procesos físico-químicos encadenados que dependen de las características del agua a tratar. La secuencia más habitual del mismo es la siguiente:

- Peroxidación: Dentro del agua se introduce de un agente químico oxidante, capaz de eliminar cualquier materia que pueda oxidarse, tanto orgánica como inorgánica disueltas en el agua.
- Coagulación y floculación: Se adicionan reactivos para facilitar la agrupación de las partículas responsables del color y la turbidez del agua.
- Decantación: Con el agua casi en reposo y por la acción de la gravedad, se depositan en el fondo las partículas y agrupaciones formadas en el proceso anterior, creando un fango que posteriormente se trata y seca.
- Filtración sobre arena: En este proceso se retienen las partículas que no pudieron ser extraídas en el proceso anterior haciendo pasar el agua por unos filtros.
- Neutralización: La acidez del agua es ajustada mediante reactivos químicos para evitar que corroa las tuberías.

- Desinfección final: Aquí se eliminan los microorganismos que hayan sobrevivido a los procesos anteriores con la adición de reactivos, normalmente cloro y amoníaco para formar cloraminas, y así se garantiza la calidad del agua durante todo el recorrido por la red de distribución.

- DISTRIBUCIÓN

Esta etapa del ciclo es la encargada de llevar el agua a través de una red de distribución a los usuarios. Ésta se divide en dos escalas de redes: red en alta, encargada de la abducción y distribución del agua desde las potabilizadoras y red en baja, la cual distribuye el agua hacia cada usuario.

- SANEAMIENTO

Esta parte del ciclo es donde se recoge correctamente el agua que ha sido desechada mediante la red de saneamiento. Esta red está formada por tuberías que recogen y transportan el agua residual y el agua de lluvia hasta las plantas de depuración. El diseño de la red debe contemplar diversas variables, como diámetro de secciones, orografía y parámetros que tengan en cuenta el comportamiento de la red ante eventos de lluvias intensas.

- DEPURACIÓN

El agua residual que ha sido recogida por la red de saneamiento llega a las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), donde se realiza un complejo proceso para eliminar o reducir los contaminantes potencialmente peligrosos para la naturaleza y permitir así reutilizar parte del agua para usos secundarios. Estos procesos se dividen en distintas etapas:

- Pretratamiento: Etapa de preparación del agua para que inicie de la manera más eficiente su proceso de limpieza, es decir, libre de las impurezas más visibles. Así se protegen las instalaciones de la depuradora de sufrir daños en el proceso por objetos de gran tamaño.
- Decantación Primaria: En esta fase se eliminan al menos el 50% de los sólidos suspendidos menores de 2 mm que puedan sedimentarse y el 20% de la materia orgánica. En un depósito, llamado decantador primario, la velocidad es casi nula y por eso la materia se deposita en el fondo donde son arrastrados hacia otra instalación para su posterior aprovechamiento.
- Decantación Secundaria: Como en el proceso anterior se ha dejado aislada la materia orgánica, lo siguiente será intentar eliminarla y separar los posibles nutrientes. Para llevar a cabo este proceso se pueden utilizar medios químicos o usar microorganismos que devoran la materia orgánica. Este proceso se lleva a cabo en el reactor biológico donde se inyecta oxígeno para favorecer el crecimiento de estos seres. También es posible aprovechar el metano que expulsan para disponer de una fuente de combustible. La eliminación de estos organismos se realiza posteriormente en un decantador secundario mediante sedimentación donde pueden ser devueltos al reactor biológico o se transportarán hacia otra instalación donde serán tratados como fangos.
- Tratamiento terciario: Este último tratamiento sirve para asegurar que el agua que ha llegado hasta aquí está totalmente limpia y libre de impurezas. Para ello se eliminan pequeños fragmentos de materia orgánica o nutrientes asociados a ellos filtrándolo por un lecho de materia granular compuesto por arena y grava o con filtros sintéticos. Cuando el agua llega a este punto, se desinfecta para evitar que los patógenos puedan entrar en contacto con el medio.
- Reutilización: Es en este punto donde se puede reutilizar el agua depurada para distintos usos diferentes al consume humano, tales como riego, agricultura o industrial.

3.2 Modelo de Estudio

Como se ha comentado en puntos anteriores, se va a analizar la eficiencia de las principales empresas de saneamiento en España. Para ello se presenta a continuación el caso práctico realizado en este Trabajo Fin de Grado.

3.2.1 Planteamiento del caso práctico

A la hora de abordar el caso práctico, lo primero que se ha realizado es una búsqueda de las 52 empresas que gestionan en la actualidad las redes de saneamiento y la depuración de aguas en cada provincia española, la cual se presenta a continuación.

| EMPRESAS SANEAMIENTO AGUA PRINCIPALES PROVINCIAS | | | |
|--|--|----|--|
| 1 | AGUAS DE ALBACETE | 28 | AGUAS DE LEÓN |
| 2 | AGUAS DE ALICANTE | 29 | AQUALIA LLEIDA |
| 3 | AQUALIA ALMERÍA | 30 | AQUALIA BARREIROS (LUGO) |
| 4 | AMVISA (ÁLAVA) | 31 | CANAL DE ISABEL II MADRID |
| 5 | EMPRESA MUNICIPAL DE AGUAS DE GIJÓN | 32 | EMASA (MÁLAGA) |
| 6 | AQUALIA ÁVILA | 33 | EMUASA (MURCIA) |
| 7 | AQUALIA BADAJOZ | 34 | MANCOMUNIDAD DE LA COMARCA DE PAMPLONA |
| 8 | EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 35 | VIAQUA OURENSE |
| 9 | AIGÜES DE BARCELONA | 36 | AQUONA PALENCIA |
| 10 | CONSORCIO DE AGUAS BILBAO BIZKAIA | 37 | EMALSA (LAS PALMAS) |
| 11 | AGUAS DE BURGOS | 38 | VIAQUA PONTEVEDRA |
| 12 | CANAL DE ISABEL II LANZAROTE | | AYUNTAMIENTO DE LOGROÑO (LA RIOJA) |
| 13 | CANAL DE ISABEL II CÁCERES | 39 | AQUALIA SALAMANCA |
| 14 | AGUAS DE CÁDIZ | 40 | EMMASA (SANTA CRUZ DE TENERIFE) |
| 15 | AQUALIA SANTANDER | 41 | AYUNTAMIENTO DE SEGOVIA (SEGOVIA) |
| 16 | FACSA (CASTELLÓN DE LA PLANA) | 42 | EMASESA (SEVILLA) |
| 17 | AQUONA CIUDAD REAL | 43 | AGUAS DE SORIA |
| 18 | EMACSA (CÓRDOBA) | 44 | EMATSA (TARRAGONA) |
| 19 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 45 | SASTESA (TERUEL) |
| 20 | AGUAS DE CUENCA | 46 | TAGUS (GRUPO FACSA) (TOLEDO) |
| 21 | AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 47 | GLOBAL OMNIUM / AGUAS DE VALENCIA |
| 22 | AIGÜES DE GIRONA, SALT I SARRIÀ DE TER | 48 | AQUAVALL (ANTIGUA AGUAS DE VALLADOLID) |
| 23 | EMASAGRA (GRANADA) | 49 | AQUONA ZAMORA |
| 24 | GUADALAGUA (GUADALAJARA) | 50 | AQUARA (CALATAYUD, ZARAGOZA) |
| 25 | AGUAS DE HUELVA | 51 | ACEMSA (CEUTA) |
| 26 | AQUALIA FRAGA (HUESCA) | 52 | AYUNTAMIENTO DE MELILLA (MELILLA) |
| 27 | AQUALIA JAÉN | | |

Tabla 2. Empresas Saneamiento Agua principales provincias españolas

Con la lista ya generada, se prosigue analizando cuáles serían las posibles entradas y salidas al problema para

posteriormente realizar la búsqueda de dichos datos en cada empresa, siempre teniendo en cuenta la temática que se aborda.

Las variables de entrada propuestas en un principio son:

- Km red Saneamiento: Se tomará como primera variable de entrada la longitud de la red de saneamiento que recoge tanto el agua residual de los núcleos urbanos como la recogida por la lluvia. Se entiende que en una determinada región al tener una red de saneamiento lo suficientemente grande como para que sirva a la gran mayoría de población y tenga una capacidad de transporte acorde al entorno. Se tomará el valor en kilómetros.
- Población: Es dato importante saber a cuánta población sirve la empresa, ya que en ello se basa gran parte de los caudales recogidos por la red de saneamiento. El valor referenciado es el número de habitantes.
- Empleados: Al realizar el estudio sobre empresas es necesario saber qué cantidad de recursos tiene para garantizar el servicio a la población, y así tener una idea de si se está hablando de una empresa pequeña, mediana o grande. Este dato está cuantificado en número de empleados.
- Pluviometría: La red de saneamiento recoge a través de los imbornales el agua de la lluvia, siendo éste un dato muy importante para conocer la cantidad de agua que cae en cada zona o región. España es un país donde hay una notable diversidad climática debido a la orografía, la situación geográfica y las latitudes medias de la zona templada del hemisferio norte, de ahí la significación de conocer la pluviometría de cada zona ya que las cantidades de agua recogidas varían significativamente. A la hora de cifrar esta entrada será en milímetros (mm), unidad de longitud que resulta del cociente entre el volumen de agua recogido y una superficie determinada -litros de esa misma superficie.
- Capacidad Depuración: Esta entrada que se estudia es la capacidad de depuración que tienen las EDAR, cuánta agua se puede depurar al día o al año. Este dato suele expresarse con el término “habitante equivalente” (he), siendo ésta la unidad de medida para marcar la carga contaminante del agua residual bruta, es decir, la carga orgánica biodegradable que tiene una demanda bioquímica de oxígeno en cinco días (DBO_5) de 60 gr de oxígeno al día. Para este dato de entrada, se ha obtenido por la unidad $hm^3/día$, siendo base para realizar el estudio frente a el agua depurada real por las empresas.
- Ingresos Totales: Importe de la cifra de negocios de la empresa, siendo éste el importe neto de ventas y/o servicios de la empresa. Cuantificado en miles de euros.
- Ingresos por Saneamiento: Parte de la cifra de negocios obtenida por el proceso de saneamiento. Cuantificado en miles de euros.

Las variables de salida propuestas son:

- Agua Depurada: Cantidad de agua total depurada al año en las EDAR que tratan el agua recogida por cada empresa. Este dato se va a contabilizar en $hm^3/año$.
- Energía Consumida Total: La energía total que ha consumido la empresa al año en toda su actividad, en todas las actividades que componen el ciclo integral del agua, medido en GWh al año. Este dato se va a tratar como una salida que debe reducirse ya que, desde el punto de vista económico y sostenible lo más interesante sería reducir este consumo, por ello este dato será invertido ya que se trabaja con salidas positivas. Así a la hora de trabajar con los datos las unidades serán $\frac{1}{GWh}$.
- Energía Consumida Saneamiento: Energía que se ha consumido en todo el proceso de saneamiento, medido en GWh al año. Al igual que con la energía consumida total anual, la referente al saneamiento también será tratada de tal forma que lo que se maximice sea la reducción del

consumo. Las unidades empleadas serán $\frac{1}{GWh}$.

- **Energía Cogenerada:** Energía total que se ha generado en las estaciones de depuración de aguas residuales. En el proceso de digestión anaerobia los lodos que se han producido se somete a un proceso de digestión por parte de organismos anaerobios dando lugar a una conversión de materia orgánica en metano (CH_4) y anhídrido carbónico (CO_2). El biogás que se genera en este proceso contiene altas cantidades de metano que es susceptible de ser aprovechado energéticamente como biocombustible, para producir energía térmica y eléctrica. Este dato de energía cogenerada se expresa en MWh/año.

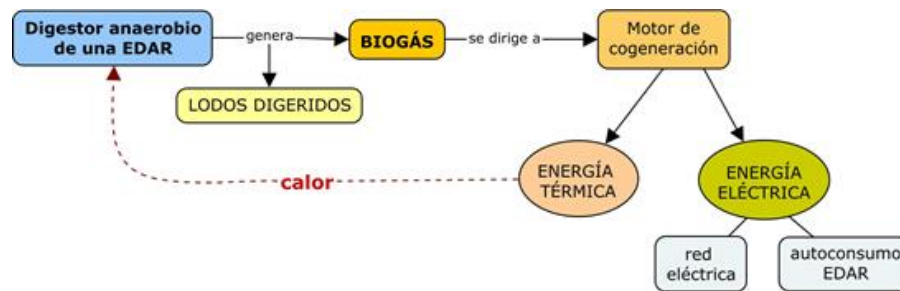


Figura 16. Proceso Cogeneración

- **Lodos Generados:** Cantidad de lodos que se han generado en los procesos de depuración en las EDAR al año. Este dato se expresaría en toneladas/año.
- **Lodos valorizados:** Cantidad de lodos que han sido valorizados en función del total generados. Los lodos procedentes de depuración se aprovechan, siendo sus principales destinos la aplicación agrícola, el abono y la valorización térmica. Los datos recogidos se expresan en toneladas/año.
- **Porcentaje lodos valorizados:** En esta salida se dará el porcentaje de lodos que han sido valorizados sobre el total de lodos generados en los procesos de depuración. Con este dato se verá de manera más clara esa eficiencia a la hora de darle una salida a este producto.
- **Agua reutilizada:** Cantidad de agua reutilizada al año tras su paso por las estaciones de depuración. El valor referenciado es $hm^3/año$.
- **Emisiones CO_2 :** Total de emisiones generadas al año de CO_2 , este dato es conocido como Huella de Carbono donde se tienen en cuenta 3 alcances para su obtención. Estos alcances son en base a la norma internacional ISO 14064-1:2018 de cuantificación de las emisiones y remociones de GEI y su versión oficial, en español, de la Norma Europea EN ISO 14064:2019: El alcance 1 incluye las emisiones de todos los focos directos de combustión, fundamentalmente, depuración de aguas residuales, combustión fija, combustión móvil y emisiones fugitivas. Son emisiones directas. El alcance 2 incluye las emisiones asociadas a consumo de energía, fundamentalmente, electricidad. Éstas son emisiones indirectas producidas como consecuencia de la generación eléctrica que se adquiere y consume en el desarrollo de las actividades y por último el alcance 3 que son las emisiones indirectas procedentes de actividades realizadas por terceros o por la utilización de productos o servicios ofrecidos por otros. El valor de las emisiones se cuantificará en toneladas de CO_2 equivalentes al año.

Todas estas variables que se han escogido vienen marcadas por la búsqueda de futuras mejoras en la gestión de los procesos de saneamiento y de forma paralela aunar el crecimiento económico, el bienestar social y la protección del medioambiente. Esto es lo que se denomina desarrollo sostenible, siendo capaz de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las de generaciones futuras.

Actualmente, muchas empresas están comprometidas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los cuales fueron adoptados en 2015 por la Organización de las Naciones Unidas para realizar una apelación a nivel universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que en el año 2030 todas las personas mejorasen su nivel de vida.



Figura 17. Objetivos Sostenibles

En esta relación de objetivos mundiales, las empresas de saneamiento apelan al buen hacer de las mismas y al compromiso que tienen con dichos objetivos:

1. Erradicar la pobreza en todas sus formas y para todos.
2. Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible.
3. Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades.
4. Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida.
5. Lograr la igualdad entre los géneros y el empoderamiento de todas las mujeres y niñas.
6. **Garantizar la disponibilidad de agua y su ordenación y saneamiento sostenible.**
7. Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos.
8. Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.
9. Construir infraestructura resiliente, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.
10. Reducir la desigualdad en y entre los países.
11. Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.
12. Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.
13. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.
14. Conservar y utilizar de forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible.
15. Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, efectuar una ordenación sostenible de los bosques, luchar contra la desertificación, detener y revertir la degradación de las tierras y poner freno a la pérdida de la diversidad biológica.
16. Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, facilitar el acceso a la justicia para todos y crear instituciones eficaces, responsables e inclusivas a todos los niveles.
17. Fortalecer los medios de ejecución y revitalizar la alianza mundial para el desarrollo sostenible.

3.2.2 Selección de empresas incluidas en el estudio

Cuando se ha realizado la búsqueda de cada uno de los datos tanto de entrada como de salida de cada empresa, dicha lista se ha reducido debido a que existen diversas empresas que gestionan y evalúan de manera conjunta a todos los municipios a nivel nacional a los que dan servicio. A continuación, se muestra una lista de dichas empresas:

- **AQUALIA:** Empresa internacional de gestión del agua que sirve a más de 25 millones de usuarios en 17 países, según el último ranking de Global Water Intelligence, es la cuarta empresa de agua de Europa por población servida y está entre las diez primeras del mundo. Esta empresa da servicio en España a las provincias de Salamanca, Lleida, Ávila, León, Jaén, Almería, Huesca, Badajoz, Lugo y

Santander. Aqualia ofrece datos públicos sobre su gestión del agua a nivel internacional y de forma agregada, por lo que no es posible obtener ciertos datos únicamente del territorio nacional.

- CANAL DE ISABEL II: Sociedad Anónima Canal de Isabel II es una empresa española cien por cien pública cuyo accionariado está en la Comunidad de Madrid. Gestiona el ciclo integral del agua en casi toda la Comunidad de Madrid, en concreto a 111 municipios. La empresa presta servicios tanto en España como en Latinoamérica, un total de 7,46 millones de usuarios. En España gestiona además de la propia Comunidad de Madrid, la delegación de Cáceres y de Lanzarote.
- FACSA: Sociedad de Fomento Agrícola Castellonense S.A., actualmente da servicio a 70 poblaciones en once comunidades autónomas (Comunidad Valenciana, Aragón, Región de Murcia, Castilla la Mancha, Navarra, Castilla León, Baleares, Madrid, Galicia, Asturias y Andalucía), suministrando agua a casi 1 millón de personas en total.
- VIAQUA: Empresa del sector del medio ambiente que gestiona el ciclo integral el agua en Galicia, en concreto en 48 municipios de las cuatro provincias (A Coruña, Lugo, Pontevedra y Ourense).
- AQUONA: Aquona Gestión de Aguas de Castilla, S.A.U. es una empresa medioambiental que centra su actividad en los servicios del ciclo integral del agua, siendo referente en Castilla-La Mancha y Castilla y León desde 1969. Esta empresa da servicio a 130 municipios, un total de 1,1 millón de habitantes servidos. Aquona participa en el accionariado de tres empresas mixtas para la gestión sostenible del agua: Aguas de León en Castilla y León, y Aguas de Albacete y Aguas de Puertollano en Castilla-La Mancha. Todos los datos que se muestren en adelante son conjuntos de todas las empresas en las que participa.
- GLOBAL OMNIUM: Global Omnium es un grupo empresarial especializado en diferentes áreas, relacionadas con la gestión del ciclo integral del agua. La empresa dominante, Aguas de Valencia S.A. constituida en 1890, la cual es la cabecera de un grupo de entidades dependientes que se dedican a actividades diversas y que constituyen, junto con ella, el Grupo Global Omnium. Este grupo gestiona todos los aspectos relacionados con la captación, tratamiento y distribución de agua en más de 400 municipios en todas las comunidades autónomas a excepción de Canarias, Baleares, Galicia y Asturias.
- AQUARA: Aquara Gestión Ciclo Integral Aguas Aragón, S.A.U. centra su actividad en los servicios del ciclo integral del agua en Aragón, donde opera desde 1994. Presta sus servicios en las tres provincias aragonesas, Huesca, Teruel y Zaragoza asistiendo a más de 754.000 habitantes en 26 poblaciones distintas.

Además de la unión de los datos en las empresas anteriormente citadas, a la hora de investigar los datos necesarios de cada una de las empresas, muchas de ellas no cuentan con informes de sostenibilidad con acceso público o datos volcados en la propia página web de la empresa para que los usuarios pudieran visualizarlos. Por este motivo se deben eliminar las siguientes empresas de la lista:

- Aguas de Cádiz
- Aguas de Cuenca
- Aigues de Girona
- Guadalagua
- Aguas de Huelva
- Aguas de León
- Emalsa (Las Palmas)
- Ayuntamiento de Logroño
- Ayuntamiento de Segovia
- Aguas de Soria

- Acemsa (Ceuta)
- Ayuntamiento de Melila

La empresa Aqualia ha sido eliminada debido a que los datos presentes en sus documentos son agregados mundialmente, por lo que no es posible discernir cuáles son datos a nivel nacional para poder evaluarla.

Por todo ello, en la tabla 3 se muestra cuáles han sido las empresas resultantes:

| RELACIÓN EMPRESAS SANEAMIENTO AGUA RESULTANTE | | | |
|---|-------------------------------------|----|--|
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 14 | CANAL DE ISABEL II MADRID |
| 2 | AMVISA (ÁLAVA) | 15 | EMASA (MÁLAGA) |
| 3 | EMPRESA MUNICIPAL DE AGUAS DE GIJÓN | 16 | EMUASA (MURCIA) |
| 4 | EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 17 | MANCOMUNIDAD DE LA COMARCA DE PAMPLONA |
| 5 | AIGÜES DE BARCELONA | 18 | VIAQUA |
| 6 | CONSORCIO DE AGUAS BILBAO BIZKAIA | 19 | AQUONA |
| 7 | AGUAS DE BURGOS | 20 | EMMASA (STA CRUZ DE TENERIFE) |
| 8 | CANAL DE ISABEL II LANZAROTE | 21 | EMASESA (SEVILLA) |
| 9 | FACSA | 22 | EMATSA (TARRAGONA) |
| 10 | EMACSA (CÓRDOBA) | 23 | GLOBAL OMNIUM / AGUAS DE VALENCIA |
| 11 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 24 | AQUAVALL (VALLADOLID) |
| 12 | AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 25 | AQUARA |
| 13 | EMASAGRA (GRANADA) | | |

Tabla 3. Relación empresas saneamiento agua resultante

3.2.3 Datos incluidos en el estudio

Una vez que se obtiene la lista de empresas con las que se pretende realizar el análisis por envoltura de datos, se procede a la búsqueda de todos los datos de entrada y de salida de cada una de ellas. Seguidamente se muestra la tabla 4 con los valores correspondientes a los inputs. Los datos que no se han podido hallar aparecen marcados con un guión.

| DATOS ENTRADAS (INPUTS) | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------------------|----------------|-----------|-----------|-----------------|---------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| | | Km Red Saneam. | Población | Empleados | Pluimetría (mm) | Capac Dep (hm3/día) | Cifra Negocios Totales (Miles €) | Cifra Negocios San. (Miles €) |
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 801 | 366.976 | 353 | 336 | 135 | 78.791,26 | 12.488,46 |
| 2 | AMVISA (ÁLAVA) | 1.002 | 254.085 | 72 | 400 | 185 | 24.298,65 | 9.005,35 |
| 3 | EMPRESA MUNICIPAL AGUAS DE GIJÓN | 1.071 | 54.386 | 159 | 1.580 | 70 | 15.947,48 | - |
| 4 | EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 1.100 | 500.000 | 485 | 134 | 68 | 88.564,02 | 12.764,65 |
| 5 | AIGÜES DE BARCELONA | 1.368,79 | 3.386.008 | 1.084 | 640 | 525 | 425.304,25 | - |
| 6 | CONSORCIO DE AGUAS DE BILBAO BIZKAIA | 414 | 1.234.285 | 381 | 1.159 | 350 | 108.638,00 | 61.895,63 |
| 7 | AGUAS DE BURGOS | 825,34 | 175.181 | 90 | 726 | 156 | 21.019,63 | 10.157,81 |
| 8 | CANAL ISABEL II LANZAROTE | 399 | 204.393 | 254 | 5 | 28,10 | 34.100 | - |
| 9 | FACSA | 3.700 | 1.000.000 | 833 | 6.768 | 250 | 103.167 | - |

| | | Km Red Saneam. | Población | Empleados | Pluviometría (mm) | Capac Dep (hm ³ /día) | Cifra Negocios Totales (Miles €) | Cifra Negocios San. (Miles €) |
|----|-------------------------------|----------------|-----------|-----------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 10 | EMACSA(CÓRDOBA) | 897 | 155.000 | 2137 | 536 | 89,38 | 37.945,88 | 11.256,37 |
| 11 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 207,29 | 135.781 | 122 | 1.008 | 76 | 22.859,40 | 3.072,50 |
| 12 | AGUAS DE AÑARBE (GUIPUZKOA) | 75 | 318.310 | 29 | 779 | 388,80 | 18.831,40 | 6.141,57 |
| 13 | EMASAGRA (GRANADA) | 1.430 | 387.847 | 216 | 357 | 24 | 47.354,07 | - |
| 14 | CANAL ISABEL II MADRID | 14.441 | 5.680.102 | 2.897 | 436 | 2800 | 887.010 | - |
| 15 | EMASA (MÁLAGA) | 1.300 | 700.000 | 500 | 524 | 183 | 75.848 | 24.730,39 |
| 16 | EMUASA (MURCIA) | 1.614 | 400.000 | 234 | 301 | 120,30 | 74.077,10 | 18.750,57 |
| 17 | MANCOM. COMARCA DE PAMPLONA | 1.678 | 595.226 | 475 | 721 | 112,32 | - | - |
| 18 | VIAQUA | 4.141 | 760.000 | 544 | 4.600 | 159,036 | 59.594 | 23.333 |
| 19 | AQUONA | 2.270 | 166.134 | 204 | 1.066 | 83 | 56.784 | 15.931 |
| 20 | EMMASA (STA CRUZ DE TENERIFE) | 800 | 209.000 | 188 | 557 | 40 | 35.005,65 | - |
| 21 | EMASESA (SEVILLA) | 3.009 | 382.926 | 845 | 534 | 459,65 | 131.404,63 | 26.041,28 |
| 22 | EMATSA (TARRAGONA) | 291 | 147.224 | 132 | 504 | 35 | 22.318,24 | - |
| 23 | GLOBAL OMNIUM | 12.000 | 5.000.000 | 2.507 | 454 | 776,88 | 138.864 | 47.697 |
| 24 | AQUAVALL | 730 | 344.600 | 163 | 435 | 259,20 | 27.041,66 | 14.449,02 |
| 25 | AQUARA | 556 | 754.694 | 148 | 318 | 259,20 | 12.317 | - |

Tabla 4. Datos de Entrada. Inputs

Algunas de las cifras de la Tabla 4 se han tenido que obtener por diversos métodos ya que no se disponían de ellos de manera directa, en la tabla posterior (Tabla 5) se detallan los cálculos realizados.

En el caso de los datos de pluviometría de Facsa, Viaqua y Aquona se ha realizado la suma del valor pluviométrico de las principales ciudades en las que dan servicio.

Para la capacidad de depuración de las empresas Viaqua y Global Omnium se obtiene esta capacidad, pero referenciada en habitantes equivalentes (he), como este valor se quiere en hm³/día hay que realizar una conversión.

Las unidades de habitantes equivalentes se comentaron anteriormente en este subcapítulo que depende de la carga contaminante del agua residual, al no disponer de este valor no se puede realizar la conversión directamente a hm³/día, por ello se va a realizar una regla de proporcionalidad con la empresa sevillana Emasesa, ya que de ésta si se disponen de ambos valores.

Emasesa gestiona en total las siguientes seis estaciones de depuración de agua con sus correspondientes habitantes equivalentes:

- Edar San Jerónimo: 350.000 he
- Edar Copero: 950.000 he
- Edar Ranilla: 350.000 he
- Edar Tablada: 200.00 he
- Edar Mairena - El Viso: 41.000 he
- Edar El Ronquillo: 2.316 he

Esto hace un total de 1.893.316 he gestionandos en las Edar por Emasesa, dato que se utilizará para realizar la conversión por proporcionalidad.

Respecto a las cifras de negocios por saneamiento de Amvisa y Aquavall se ha tenido que realizar una regla de proporcionalidad, debido a que se dispone de la cifra de negocios total del año 2.019 y del 2.018 pero únicamente de la parte correspondiente a saneamiento del año 2.018.

Las empresas Emuasa y Emalcsa facilitan los datos de la cifra de negocios de saneamiento de manera desgregada por diversos conceptos en el documento de las cuentas anuales de 2.019, por ello se procede a su sumatorio para obtener el valor total.

| INFORMACIÓN OBTENCIÓN DATOS ENTRADA | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------|---|---|---|
| Pluviometría (mm) | FACSA | $454 + 318 + 301 + 357 + 721 + 556 + 427 + 436 + 973 + 534 + 1.691 = 6.768$ | C. Valenciana, Aragón, Región de Murcia, Castilla La Mancha, Navarra, Castilla y León, Baleares, Madrid, Galicia, Asturias y Andalucía. | Sumatorio datos pluviométrico de las capitales de las comunidades autónomas con servicio. |
| | VIAQUA | $1.008 + 1.084 + 817 + 1.691 = 4.600$ | A Coruña, Lugo, Pontevedra y Ourense | Sumatorio datos pluviométricos de las principales ciudades con servicio. |
| | AQUONA | $307 + 396 + 363 = 1.066$ | Zamora, Palencia y Ciudad Real | |
| Capacidad Depuración ($hm^3/día$) | VIAQUA | $(655.078 * 459,65) / 1.893.316 = 159,036$ | El dato facilitado son las 33 EDAR que gestionan, se realiza una búsqueda de ellas y se obtiene que gestionan en total 655.078 he. Regla de proporcionalidad con EMASESA. | |
| | GLOBAL OMNIUM | $(3.200.000 * 459,65) / 1.893.316 = 776,88$ | El dato que facilita la empresa es que entre todas las EDAR se gestionan 3,2 millones de he. Se realiza una regla de proporcionalidad con los datos de EMASESA. | |
| Cifra Negcios Tot (Miles €) | MANCOMUNIDAD PAMPLONA | - | No hay informe en SABI ni en el propio documento de Sostenibilidad de la empresa. | |
| Cifra Negocios Saneamiento (Miles €) | AMVISA (ÁLAVA) | $(24.298,65 * 8.824,74) / 23.811,33 = 9.005,35$ | - | Este dato se ha obtenido mediante el uso de la regla de proporcionalidad con datos de Ingresos Totales de 2.019 y datos de Ingresos Saneamiento del año 2.018 |
| | AQUAVALL | $(27.041,66 * 15.390,26) / 28.803,23 = 14.449,02$ | | |
| | AGUAS DE GIJON | EMASAGRA (GRANADA) | - | No hay informe en SABI ni en el propio documento de Sostenibilidad de la empresa |
| | AIGÜES DE BARCELONA | EMMASA (SANTA CRUZ TENERIFE) | | |
| | CANAL ISABEL II LANZAROTE | MANCOMUNIDAD COMARCA PAMPLONA | | |
| | FACSA | EMATSA (TARRAGONA) | | |
| | | AQUARA | | |
| | | EMALCSA (LA CORUÑA) | $(44379,06 + 631102 + 1033879,94 + 1153365,03 + 42869,2 + 166902,55) = 3.072,50$ | Sumatorio de diversos conceptos desgregados en Cifra de Negocios de las Cuentas Anuales 2.019 |
| | EMUASA (MURCIA) | $(8.491,898 + 7.019,629 + 3.239,044) = 18.750,57$ | Sumatorio varios conceptos: Alcantarillado, Depuración y Vertidos | |

Tabla 5. Obtención datos entrada

Seguidamente se encuentra la tabla 6 con los valores de salida de las empresas, que al igual que en la tabla 4 los datos que no han sido encontrados o las empresas no los facilitan aparecen señalados con un guión.

La mayoría de las empresas a la hora de calcular la huella de carbono (emisiones de CO_2) solo representan los dos primeros alcances, por eso en este estudio se va a hacer referencia a ambos, aunque alguna empresa tuviera contabilizado el alcance 3.

| DATOS SALIDAS (OUTPUTS) | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------------------------|--|--|---|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------|---|--|
| | | Agua Depurada (hm ³ /año) | Energía Consumida Total (GWh/año) | Energía Consumida Saneam (GWh/año) | Energía Cogenerada (GWh/año) | Lodos Generados (Tn/año) | Lodos Valorizados (Tn/año) | % Lodos Valorizados | Agua Reutilizada (hm ³ /año) | Emisiones CO ₂ (Tn Equiv/año) |
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 28,82 | 27,12 | 23,013 | 2,500 | 29.810,49 | 29.810,49 | 100 | 8,02 | 331.929 |
| 2 | AMVISA (ÁLAVA) | 34,58 | 14,46 | - | 5,009 | 17.351,70 | 15.880,50 | 91,52 | 1,03 | 5.140 |
| 3 | EMPRESA MUNICIPAL AGUAS DE GIJÓN | 25,13 | 13,857 | 12,833 | 6,831 | 14.033 | - | - | - | 2.819,84 |
| 4 | EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 28 | 38,733 | - | 10,295 | 25.115 | - | - | 4,85 | - |
| 5 | AIGÜES DE BARCELONA | 265,31 | 204,097 | 102,721 | 32,699 | 87.370,45 | 84.825,68 | 97,09 | 12,39 | 79.003,58 |
| 6 | CONS. DE AGUAS DE BILBAO BIZKAIA | 113,31 | 81,00 | 69,00 | 6,100 | 95.930 | 89.191 | 92,89 | 1,36 | 27.149 |
| 7 | AGUAS DE BURGOS | 34,88 | - | - | - | 43.621,56 | 43.621,56 | 100 | - | 12.596 |
| 8 | CANAL ISABEL II LANZAROTE | 8,17 | - | - | - | - | - | - | 3 | - |
| 9 | FACSA | 146,27 | 138,541 | - | - | 142.029 | 140.588,91 | 98,99 | - | 224.071 |
| 10 | EMACSA(CÓRDOBA) | 24,12 | - | 7,450 | - | 36.780 | 36.683 | 99,74 | - | 3.986,06 |
| 11 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 46,83 | 42,02 | 25,24 | 2,765 | 20.445 | 4.479 | 21,91 | 1,14 | 27.000 |
| 12 | AGUAS DE AÑARBE (GUIPUZKOA) | 39,99 | 27,935 | - | 31,826 | 4.789 | 4.500 | 93,97 | - | 19.786 |
| 13 | EMASAGRA (GRANADA) | 25,22 | 12,172 | - | 4,148 | 26.846,53 | 25.732 | 95,85 | 21,68 | 7.159 |
| 14 | CANAL ISABEL II MADRID | 452,67 | 490,760 | 302,525 | 363,960 | 425.579 | 96.440 | 22,66 | 15,88 | 96.479 |
| 15 | EMASA (MÁLAGA) | 6,06 | - | - | 54,890 | - | - | - | - | 1.990,32 |
| 16 | EMUASA (MURCIA) | 41,55 | 22,768 | - | 6,56 | 31.131,46 | 31.131,46 | 100 | 41,55 | 8.353 |
| 17 | MANCOM. COMARCA DE PAMPLONA | 37,59 | - | - | - | 41.294 | - | - | - | - |
| 18 | VIAQUA | 72,38 | - | 67,057 | 32,574 | 31.365 | 31.152 | 99,32 | - | - |
| 19 | AQUONA | 44,30 | 5.514 | 1.914 | 21,00 | 39.671 | 39.671 | 100 | 0,76 | 1.016 |
| 20 | EMMASA (STA CRUZ DE TENERIFE) | 8,12 | 42,842 | - | - | 10.984,84 | 0 | 0 | 8,12 | - |
| 21 | EMASESA (SEVILLA) | 75,37 | - | - | 42,079 | 84.975 | 84.975 | 100 | 0,28 | 13.535 |
| 22 | EMATSA (TARRAGONA) | 10,65 | - | - | - | - | 11.591 | - | - | - |
| 23 | GLOBAL OMNIUM | 280,39 | 204,486 | - | 18,065 | 153.554 | 143.000 | 93,13 | 120,56 | 13.551,08 |
| 24 | AQUAVALL | 44,97 | - | 15,013 | 6,186 | 9.125 | 9.125 | 100 | - | 8.350 |
| 25 | AQUARA | 0,85 | 422,00 | 102,00 | - | 974 | 974 | 100 | - | 223 |

Tabla 6. Datos de Salida. Output

Del mismo modo que con la tabla de valores de entrada (Tabla 4), se ha creado una tabla para explicar la obtención de ciertos valores de los datos de salida.

Los lodos totales generados por la Empresa Municipal de Aguas de Gijón vienen referenciados por la cantidad que cada Edar por separado genera y son enviados a la empresa COGERSA (Consortio para la Gestión de los Residuos Sólidos de Asturias). La empresa Emaya el dato que ofrece es la cantidad de lodos que retira la empresa TIRME (Parque de Tecnologías Ambientales de Mallorca). El Consorcio de Aguas de Bilbao cita los datos de lodos generados totales de cada una de las cuatro Edar que gestiona.

En relación con la cantidad de lodos valorizados las empresas Aquona, Emasesa, Emuasa, Aguas de Burgos y Aguas de Alicante citan que valorizan el 100% de todos los lodos que han generado en el año 2.019, así se obtiene el dato de manera directa con los lodos generados de los cuales ofrecen valores en sus correspondientes informes de sostenibilidad. Como consecuencia de no disponer de ciertos datos de los lodos generados o valorizados, no se puede calcular el porcentaje de lodos valorizados con el cual posteriormente realizaremos los modelos para el análisis con la tecnología Dea.

| INFORMACIÓN OBTENCIÓN DATOS SALIDA | | | | |
|--|--|--|---|--|
| | EMPRESA | CÁLCULO | REFERENCIA | |
| Lodos Generados (Tn) | EMPRESA MUNICIPAL AGUAS DE GIJÓN | 13.565,86 + 266,04 + 201,10 = 14.033 | Cantidad total retirada de las EDAR que las gestiona la empresa COGERSA. | |
| | EMAYA (Palma de Mallorca) | 25.115 | Cantidad total retirada de las EDAR que las gestiona la empresa TIRME. | |
| | CONSORCIO DE AGUAS BILBAO BIZKAIA | 83.110 + 12.820= 95.930 | Cantidad lodos generados en las 4 EDAR gestionadas. | |
| | CANAL ISABEL II LANZAROTE | No ofrecen datos. | Por tanto, de estas empresas no se puede obtener el porcentaje de lodos que han sido valorizados. | |
| | EMASA (MÁLAGA) EMATSA (TARRAGONA) | | | |
| Lodos Valorizados (Tn) | AGUAS DE GIJÓN | No hay datos ya que la gestión la realiza COGERSA. | Por tanto, de estas empresas no se puede obtener el porcentaje de lodos que han sido valorizados. | |
| | EMAYA (Palma de Mallorca) CANAL ISABEL II LANZAROTE EMASA (MÁLAGA) | No ofrecen datos. | | |
| | MANCOMUNIDAD COMARCA PAMPLONA EMMASA (SANTA CRUZ DE TENERIFE) | | | |
| | AGUAS DE ALICANTE AGUAS DE BURGOS EMASESA (SEVILLA) EMUASA (MURCIA) AQUONA | | | La empresa en el documento de Sostenibilidad cita que se han valorizado el 100 % de los lodos. |
| | Emisiones CO2 (Tn CO ₂ Eq) | EMAYA (Palma de Mallorca) VIAQUA | Estas empresas ofrecen la cifra de la cantidad total de emisiones que han evitado en el año 2.019, pero no de las que han generado. | |
| | | EMATSA (TARRAGONA) | EMMASA (SANTA CRUZ DE TENERIFE) | No hay datos. |
| | | MANCOMUNIDAD COMARCA PAMPLONA | CANAL ISABEL II LANZAROTE | |
| | | Energía Consumida Total (MWh) | AGUAS DE BURGOS CANAL ISABEL II LANZAROTE | VIAQUA MANCOMUNIDAD DE LA COMARCA DE PAMPLONA |
| EMACSA (CÓRDOBA) EMSASESA (SEVILLA) | EMASA (MÁLAGA) AQUAVALL | | | |
| EMATSA (TARRAGONA) | | | | |

| | | | |
|-------------------------------------|--|--|------------------|
| Energía Consumida Saneamiento (MWh) | AMVISA (ÁLAVA) | EMASAGRA (GRANADA) | No ofrece datos. |
| | EMAYA (Palma de Mallorca) | EMMASA (SANTA CRUZ DE TENERIFE) | |
| | AGUAS DE BURGOS | GLOBAL OMNIUM | |
| | CANAL ISABEL II LANZAROTE | EMASESA (SEVILLA) | |
| | FACSA | EMATSA (TARRAGONA) | |
| | AGUAS DE AÑARBE (GIPUZKOA) | MANCOMUNIDAD DE LA COMARCA DE PAMPLONA | |
| | EMUASA (MURCIA) | EMASA (MÁLAGA) | |
| Energía Cogenerada (MWh) | AGUAS DE BURGOS | FACSA | No ofrece datos. |
| | CANAL ISABEL II LANZAROTE | EMACSA (CÓRDOBA) | |
| | MANCOMUNIDAD DE LA COMARCA DE PAMPLONA | EMATSA (TARRAGONA) | |
| | AQUARA | | |
| Agua Reutilizada (hm^3 /año) | EMATSA (TARRAGONA) | EMPRESA MUNICIPAL AGUAS DE GIJÓN | No ofrece datos. |
| | AGUAS DE BURGOS | AQUAVALL | |
| | FACSA | AQUARA | |
| | EMACSA (CÓRDOBA) | EMASA (MÁLAGA) | |
| | AGUAS DE AÑARBE (GIPUZKOA) | VIAQUA | |
| | MANCOMUNIDAD DE LA COMARCA DE PAMPLONA | | |

Tabla 7. Obtención datos salidas

3.2.4 Modelos utilizados

Se procede en este subcapítulo a presentar los modelos que se van a utilizar posteriormente para analizar la eficiencia de las empresas en cada uno de los ámbitos creados. Estos modelos se han generado a partir de las entradas y salidas, la relación que existen entre ellas y de qué manera se influyen unas a otras.

En todo modelo DEA la existencia de un gran número de variables o de unidades implica la tendencia de considerar un mayor número de unidades como eficientes al 100%, de manera que se reduce la efectividad discriminatoria del análisis (Nunamaker, 1985). Para determinar si el modelo realizado tiene una dimensión adecuada existen varias reglas Golany y Roll (1989), Charnes et al. (1994) o Murias (2004).

La primera de las reglas propuestas Golany y Roll (1989) indica que un modelo DEA tendrá una dimensión adecuada si n (número de DMU's) es mayor o igual a 2 multiplicado por $p+q$ (inputs y outputs respectivamente). La segunda opción de regla es parecida a la primera, pero esta vez se multiplica por 3 Charne et al (1994) y la tercera sugerencia hecha por Murias (2004) sería considerar que el número de unidades debe ser lo más alto posible al multiplicarse por pq .

Golany y Roll (1989): $n \geq 2 \times (p + q)$

Charnes et al (1990): $n \geq 3 \times (p + q)$

Murias (2004): $n \geq (p \times q)$

Se irán comprobando en cada uno de los tres modelos propuestos en este apartado las tres versiones de reglas para corroborar que están bien dimensionados.

○ 1. MODELO ECONÓMICO

El primer modelo se ha enfocado a un ámbito económico de las empresas, como entradas se cuenta con los datos que dan un valor monetario o aportan en cierta manera un patrimonio a la propia empresa. Por ello se cuenta con el número de empleados, los km de red de saneamiento del que dispone para la evacuación, la

población que abastece y ambas cifras de negocios. Como datos de salida de este primer modelo se referencia la energía, tanto la consumida como la cogenerada. Debido a que se pretende maximizar los datos de salida, se observa que la energía consumida en ningún caso se pretende maximizar, si no todo lo contrario, se desea minimizar y así las empresas serán más eficientes consumiendo menos con los mismos recursos de los que disponen (Figura 18).

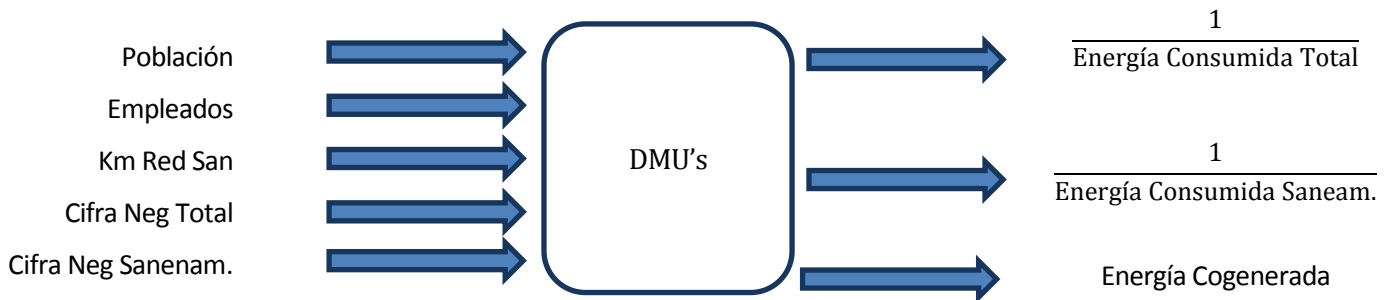


Figura 18. Modelo Económico

Para analizar este modelo se eliminan las empresas que no tienen dos de las tres salidas o carecen de todas ellas, las cuales son: Ematsa, Aguas de Burgos, Canal Isabel II Lanzarote, Mancomunidad de Pamplona, Emasesa, Emmasa y Emasa.

Permaneciendo por tanto las siguientes ciudades indicadas en la tabla 8.

| RELACIÓN EMPRESAS MODELO 1 | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|----|-----------------------------------|
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 10 | AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) |
| 2 | AMVISA (ÁLAVA) | 11 | EMASAGRA (GRANADA) |
| 3 | EMPRESA MUNICIPAL DE AGUAS DE GIJÓN | 12 | CANAL DE ISABEL II MADRID |
| 4 | EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 13 | EMUASA (MURCIA) |
| 5 | AIGÜES DE BARCELONA | 14 | VIAQUA |
| 6 | CONSORCIO DE AGUAS BILBAO BIZKAIA | 15 | AQUONA |
| 7 | FACSA | 16 | GLOBAL OMNIUM / AGUAS DE VALENCIA |
| 8 | EMACSA (CÓRDOBA) | 17 | AQUAVALL (VALLADOLID) |
| 9 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 18 | AQUARA |

Tabla 8. Relación empresas Modelo 1

Se comprueba la dimension correcta de este primer modelo:

- ✓ Golany y Roll (1989): $18 \geq 2 \times (5 + 3)$
- ✓ Charnes et al (1990): $18 \geq 3 \times (5 + 3)$
- ✓ Murias (2004): $18 \geq (5 \times 3)$

Ante la falta de ciertos datos en algunas de las empresas de este modelo, se ha realizado una serie de cálculos y estimaciones para aproximar los posibles valores a un enfoque realista. A la hora de calcular la cantidad de energía consumida total y en saneamiento de cada empresa se ha optado por buscar datos

semejantes en el resto de las empresas y así poder relacionarlas.

Para estimar la energía cogenerada se ha tenido en cuenta que ésta depende del gas que se produce tras la digestión anaerobia de los lodos. Por tanto, es lógico utilizar este dato para relacionar empresas entre sí, los lodos generados totales. Primero se ha intentado valorar de la misma manera que con la energía consumida, relacionando empresas con datos similares, dado que no todas las empresas aprovechan de la misma manera este recurso que se genera en las EDAR o no disponen de las instalaciones necesarias para poder realizar la valorización térmica de los lodos, se ha desartado esta opción. Por este motivo, la mejor manera de obtener estos datos ha sido agrupando las empresas de las que sí se disponen los datos por rangos según la cantidad de lodos que generan al año y calculando la media de la energía cogenerada de dichas empresas, quedando por tanto tres bloques repartidos de la siguiente manera:

Rango 1. (80.000-160.000 Tn lodos generados al año):

- Global Omnium: 153.554 Tn Lodos → 18,07 GWh Energía Cogenerada
- Consorcio de Aguas de Bilbao Bizkaia: 95.930 Tn Lodos → 61 GWh Energía Cogenerada
- Aigües de Barcelona: 87.370,45 Tn Lodos → 32,70 GWh Energía Cogenerada

Media Energía Cogenerada = 37,256 GWh

Media Lodos generados al año = 112.284,66 Tn

Rango 2 (20.000 – 40.000 Tn Lodos generados al año):

- Aquona: 39.671 Tn Lodos → 21 GWh Energía Cogenerada
- Viaqua: 31.365 Tn Lodos → 32,57 GWh Energía Cogenerada
- Emuasa (Murcia): 31.131 Tn Lodos → 6,56 GWh Energía Cogenerada
- Aguas de Alicante: 29.810 Tn Lodos → 2,50 GWh Energía Cogenerada
- Emasagra (Granada): 26.847 Tn Lodos → 4,15 GWh Energía Cogenerada
- Emalcsa (La Coruña): 20.445 Tn Lodos → 2,77 GWh Energía Cogenerada

Media Energía Cogenerada = 11,59GWh

Media Lodos generados al año= 29.878,16 Tn

Rango 3 (4.000 – 20.000 Tn lodos generados al año):

- Amvisa (Álava): 17.351,7 Tn Lodos → 5,01 GWh Energía Cogenerada
- Aquavall: 9.125 Tn Lodos → 6,19 GWh Energía Cogenerada
- Aguas del Añarbe: 4.789 Tn Lodos → 31,83 GWh Energía Cogenerada

Media Energía Cogenerada = 14,343 GWh

Media Lodos generados al año = 10.421,9 Tn

Una vez que se dispone de los datos de la energía cogenerada en cada rango, ésta se utilizará para realizar una regla de proporcionalidad con la empresa la cual se pretenda aproximar el dato.

En la siguiente tabla se muestran los cálculos hechos en cada empresa:

| OBTENCIÓN DATOS MODELO 1 | | | |
|--|----------------------------------|---|--|
| | EMPRESA | CÁLCULO | REFERENCIA |
| Cifra Negocios Saneamiento | EMPRESA MUNICIPAL AGUAS DE GIJÓN | $(15947,48 * 6.141,57) / 18.831,4 = 5.201,02$ | Se compara Gijón con Guipuzkoa por similitud en datos. |
| | FACSA | $(103.167 * 12.764,65) / 88.564,02 = 14.869,36$ | Se compara Facsa con Mallorca por similitud en datos. |
| | EMASAGRA (GRANADA) | $(47.354,07 * 15.931) / 56.784 = 13.285,39$ | Se compara Emasagra con Aquona por similitud en datos. |
| | AQUARA | $(12.317 * 6.141,57) / 18.831,4 = 4.017,00$ | Se compara Aquara con Guipuzkoa por similitud en datos. |
| | CANAL ISABEL II MADRID | $887.010,00 * 0.285 = 252.797,85$ | Ambas empresas tienen unos datos bastante elevados. |
| | AIGÜES DE BARCELONA | $425.304,25 * 0.285 = 121.211,71$ | Se realiza la media en porcentaje de Cifra de Negocios de Saneamiento del resto de empresas sobre el total y se obtiene que es un 32,5%. |
| Energía Consumida Total (GWh) | EMACSA(CÓRDOBA) | $(7,45 * 27,12) / 23,0133 = 8,779$ | Se compara Emacsa con Aguas de Alicante por ser la empresa que más se aproxima. |
| | VIAQUA | $(67,057 * 422) / 102 = 277,43$ | Se compara con los datos de Aquona por ser la empresa que más se aproxima. |
| | AQUAVALL | $(15,013 * 27,12) / 23,013 = 17,692$ | Se compara con Aguas de Alicante por ser la empresa que más se aproxima. |
| Energía Consumida Saneamiento (GWh) | AMIVSA (ÁLAVA) | $(14,46 * 1,02) / 13,86 = 1,064$ | Se compara con Aguas de Gijón por ser la empresa que más se aproxima |
| | EMAYA (PALMA MALLORCA) | $38,73 * 25,24 / 42,02 = 23,247$ | Se compara con Emalcsa (La Coruña) por ser la empresa que más se aproxima |
| | FACSA | $(138,54 * 102) / 422 = 33,485$ | Se compara con Aquona por ser la empresa que más se aproxima |
| | AGUAS DE AÑARBE | $(27,94 * 23,0133) / 27,12 = 23,709$ | Se compara con Aguas de Alicante por ser la empresa que más se aproxima |
| | EMASAGRA (GRANADA) | $(12,17 * 1,02) / 13,86 = 0,8956$ | Se compara con Aguas de Gijón por ser la empresa que más se aproxima |
| | EMUASA (MURCIA) | $(22,77 * 23,0133) / 27,12 = 19,322$ | Se compara con Aguas de Alicante por ser la empresa que más se aproxima |
| | GLOBAL OMNIUM | $(204,49 * 422) / 102 = 49,429$ | |
| Energía Cogenerada (GWh) | FACSA | $(142.029 * (37,256) / 112.284,66 = 47,125$ | Regla proporcionalidad con datos Rango 1 |
| | CANAL ISABEL II MADRID | $(425.579 * 37,256) / 112.284,66 = 141,20$ | |
| | EMACSA (CÓRDOBA) | $(36.780 * 11,59) / 29.878,16 = 14,267$ | Regla proporcionalidad con datos Rango 2 |
| | AQUARA | $(10.985 * 14,343) / 10.421,9 = 15,11$ | Regla proporcionalidad con datos Rango 3 |

Tabla 9. Cálculo datos Modelo 1

Quedando definitivamente los datos de este primer modelo recogidos en la tabla número 10, los cuales posteriormente serán utilizados para realizar el análisis de eficiencia.

| DATOS DEFINITIVOS MODELO 1 | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|---|---|---|---|---------------------------------------|
| | | Km Red {I} | Población {I} | Empleados {I} | Cifra Negocios Total {I} | Cifra Negocios San {I} | Energ. Consum. Total {O} | Energía Consum. Saneam {O} | Energía Cogenerada {O} |
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 801 | 366.967 | 353 | 78.791,26 | 12.488,46 | 27,12 | 23,013 | 2,500 |
| 2 | AMVISA (ÁLAVA) | 1.002 | 254.085 | 72 | 24.298,65 | 9.005,35 | 14,46 | 1,064 | 5,009 |
| 3 | EMPRESA MUNICIPAL AGUAS DE GIJÓN | 1.071 | 54.386 | 159 | 15.947,48 | 5.201,02 | 13,857 | 12,833 | 6,831 |
| 4 | EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 1.100 | 500.000 | 485 | 88.564,02 | 12.764,65 | 38,733 | 23,247 | 10,295 |
| 5 | AIGÜES DE BARCELONA | 1.368.97 | 3.386.008 | 1.084 | 425.304,25 | 121.211,71 | 204,097 | 102,721 | 32,699 |
| 6 | CONS. DE AGUAS DE BILBAO BIZKAIA | 414 | 1.234.285 | 381 | 108.638,00 | 61.895,63 | 81,00 | 69,00 | 6,100 |
| 7 | FACSA | 3.700 | 1.000.000 | 833 | 103.167 | 14.869,36 | 138,541 | 33,485 | 47,13 |
| 8 | EMACSA(CÓRDOBA) | 897 | 155.000 | 237 | 37.945,88 | 11.256,37 | 8,779 | 7,450 | 14,27 |
| 9 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 207,29 | 135.781 | 122 | 22.859,40 | 3.072,50 | 42,02 | 25,24 | 2,765 |
| 10 | AGUAS DE AÑARBE (GUIPUZKOA) | 75 | 318.310 | 29 | 18.831,40 | 6.141,57 | 27,935 | 23,709 | 31,826 |
| 11 | EMASAGRA (GRANADA) | 1.430 | 387.847 | 216 | 47.354,07 | 13.285,39 | 12,172 | 0,8956 | 4,148 |
| 12 | CANAL ISABEL II MADRID | 14.441 | 5.680.102 | 2.897 | 887.010 | 252.797,85 | 490,760 | 302,525 | 141,20 |
| 13 | EMUASA (MURCIA) | 1.614 | 400.000 | 234 | 74.077,10 | 18.750,57 | 22,768 | 19,322 | 656,00 |
| 14 | VIAQUA | 4.141 | 760.000 | 544 | 59.594 | 23.333 | 277,432 | 67,057 | 32,574 |
| 15 | AQUONA | 2.270 | 166.134 | 204 | 56.784 | 15.931 | 5.514 | 1.914 | 21,00 |
| 16 | GLOBAL OMNIUM | 12.000 | 5.000.000 | 2.507 | 138.864 | 47.697 | 204,486 | 49,426 | 18.065 |
| 17 | AQUAVALL | 730 | 344.600 | 163 | 27.041,66 | 14.449,02 | 17,692 | 15,013 | 6,186 |
| 18 | AQUARA | 556 | 754.694 | 148 | 12.317 | 4.017 | 422,00 | 102,00 | 1,34 |

Tabla 10. Datos Definitivos Modelo

○ 2. MODELO BASADO EN EL APROVECHAMIENTO

El segundo modelo creado se basa en el aprovechamiento, en esa capacidad que tienen las empresas con sus correspondientes EDAR de reutilizar o depurar el agua residual que les llega al año. Para ello los datos de entrada deben ser esos activos o los elementos que intervienen en ese proceso de depuración, tales como la población ya que influye de manera directa y es el principal generador de aguas residuales, además se cuenta con la pluviometría de la cual también depende en gran medida esa cantidad total que cargan las redes de saneamiento siendo los km de red fundamental en el proceso de análisis de este modelo. El último dato de entrada es la capacidad de depuración de las EDAR que cada empresa gestiona ya que este dato es primordial para poder abarcar la cantidad que llegue de aguas residuales y está relacionado directamente con las salidas.

Las salidas de este modelo serán dos, la cantidad de agua depurada y reutilizada al año, con ellas se predente

conocer de manera más concreta si las empresas llegan a sacarle todo el rendimiento a las plantas de depuración (Figura 19).

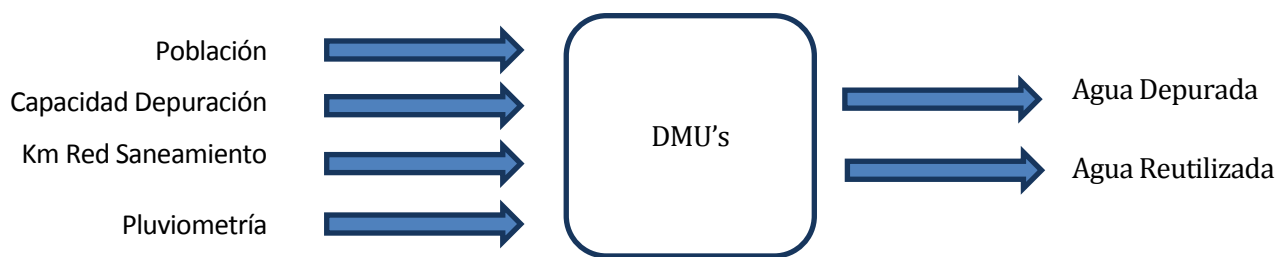


Figura 19. Modelo Aprovechamiento

En este modelo no se ha eliminado ninguna empresa ya que todas cuentan con datos para poder realizar el análisis.

| RELACIÓN EMPRESAS MODELO 2 | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|----|--|
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 14 | CANAL DE ISABEL II MADRID |
| 2 | AMVISA (ÁLAVA) | 15 | EMASA (MÁLAGA) |
| 3 | EMPRESA MUNICIPAL DE AGUAS DE GIJÓN | 16 | EMUASA (MURCIA) |
| 4 | EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 17 | MANCOMUNIDAD DE LA COMARCA DE PAMPLONA |
| 5 | AIGÜES DE BARCELONA | 18 | VIAQUA |
| 6 | CONSORCIO DE AGUAS BILBAO BIZKAIA | 19 | AQUONA |
| 7 | AGUAS DE BURGOS | 20 | EMMASA (STA CRUZ DE TENERIFE) |
| 8 | CANAL DE ISABEL II LANZAROTE | 21 | EMASESA (SEVILLA) |
| 9 | FACSA | 22 | EMATSA (TARRAGONA) |
| 10 | EMACSA (CÓRDOBA) | 23 | GLOBAL OMNIUM / AGUAS DE VALENCIA |
| 11 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 24 | AQUAVALL (VALLADOLID) |
| 12 | AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 25 | AQUARA |
| 13 | EMASAGRA (GRANADA) | | |

Tabla 11. Relación empresas Modelo 2

Se comprueba la dimension correcta del segundo modelo:

- ✓ Golany y Roll (1989): $25 \geq 2 \times (4 + 2)$
- ✓ Charnes et al (1990): $25 \geq 3 \times (4 + 2)$
- ✓ Murias (2004): $25 \geq (4 \times 2)$

Al igual que en el primero modelo, no se dispone de algunos datos de la cantidad de agua reutilizada en ciertas empresas. Lo primero será analizar qué porcentaje de agua se reutiliza sobre la cantidad depurada total en las empresas de las se disponen datos tal y como se muestra en la tabla 12. Observando los porcentajes, no parece existir una relación entre ellos y son bastante heterogéneos, lo cual confirma que la cantidad de agua reutilizada no depende de la depuración total de cada EDAR.

| PORCENTAJE AGUA REUTILIZADA FRENTE AGUA DEPURADA | | | |
|--|---------------|------------------|-------|
| | Agua Depurada | Agua Reutilizada | % |
| AGUAS DE ALICANTE | 28,82 | 8,02 | 27,83 |
| AMVISA (ÁLAVA) | 34,58 | 1,03 | 2,98 |
| EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 28 | 4,85 | 17,32 |
| AIGÜES DE BARCELONA | 265,31 | 12,39 | 4,67 |
| CONS. DE AGUAS DE BILBAO BIZKAIA | 113,31 | 1,36 | 1,20 |
| CANAL ISABEL II LANZAROTE | 8,17 | 3 | 36,72 |
| EMALCSA (LA CORUÑA) | 46,83 | 1,14 | 2,44 |
| EMASAGRA (GRANADA) | 25,22 | 21,68 | 85,96 |
| CANAL ISABEL II MADRID | 452,67 | 15,88 | 3,51 |
| EMUASA (MURCIA) | 41,55 | 41,55 | 100 |
| AQUONA | 44,30 | 0,76 | 1,72 |
| EMMASA (STA CRUZ DE TENERIFE) | 8,12 | 8,12 | 100 |
| EMASESA (SEVILLA) | 75,37 | 0,28 | 0,37 |
| GLOBAL OMNIUM | 280,39 | 120,56 | 43 |

Tabla 12. Porcentaje agua reutilizada frente agua depurada

La diversidad que caracteriza a las diferentes regiones de España explica que el uso de la reutilización dentro del país varíe enormemente y se concentre, de momento, mayoritariamente en zonas donde el estrés hídrico es más pronunciado como es el caso de la Comunidad Valenciana o Murcia.

Actualmente, a nivel nacional, la media de agua reutilizada se ubica en un 10,74 % (Datos Asociación Española de Desalación y Reutilización). Si se compara con empresas nacionales que consiguen reutilizar el 100% del agua depurada este dato parece bastante escaso, pero a nivel europeo, España se sitúa como líder en este ámbito.

Por ello, para la estimación en este modelo se va a utilizar ese valor nacional y así asemejar a la realidad los datos presentados.

| OBTENCIÓN DATOS MODELO 2 | | |
|---|--|---------------------------------|
| | EMPRESA | CÁLCULO |
| Agua Reutilizada (hm ³ /año) | EMPRESA MUNICIPAL AGUAS DE GIJÓN | 25,13 * 0,1074 = 2,699 |
| | AGUAS DE BURGOS | 34,88 * 0,1074 = 3,747 |
| | FACSA | 146,27 * 0,1074 = 15,709 |
| | EMACSA (CÓRDOBA) | 24,12 * 0,1074 = 2,59 |
| | AGUAS DEL AÑARBE (GUIPUZKOA) | 39,99 * 0,1074 = 4,294 |
| | EMASA (MÁLAGA) | 6,06 * 0,1074 = 0,651 |
| | MANCOMUNIDAD DE LA COMARMCA DE PLAMPLONA | 37,59 * 0,1074 = 4,038 |
| | VIAQUA | 72,38 * 0,1074 = 7,774 |
| | EMATSA (TARRAGONA) | 10,65 * 0,1074 = 1,143 |

| | | |
|--|-----------------|------------------------------|
| | AQUAVALL | 44,97* 0,1074 = 4,829 |
| | AQUARA | 0,85* 0,1074 = 0,091 |

Tabla 13. Cálculo datos Modelo 2

De esta manera se expone la tabla siguiente donde están todos los datos del segundo modelo, los cuales serán utilizados para realizar el análisis de eficiencia.

| DATOS DEFINITIVOS MODELO 2 | | | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|---|----------------------------------|-------------------------------------|
| | | Km Red {I} | Población {I} | Pluviometría {I} | Capacidad Depuración {I} | Agua Depurada {O} | Agua Reutilizada {O} |
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 801 | 366.967 | 336 | 135 | 28,82 | 8,02 |
| 2 | AMVISA (ÁLAVA) | 1.002 | 254.085 | 400 | 185 | 34,58 | 1,03 |
| 3 | AGUAS DE GIJÓN | 1.071 | 54.386 | 1.580 | 70 | 25,13 | 2,699 |
| 4 | EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 1.100 | 500.000 | 134 | 68 | 28 | 4,85 |
| 5 | AIGÜES DE BARCELONA | 1.368,97 | 3.386.008 | 640 | 525 | 265,31 | 12,39 |
| 6 | CONS. DE AGUAS DE BILBAO BIZKAIA | 414 | 1.234.285 | 1.195 | 350 | 113,31 | 1,36 |
| 7 | AGUAS DE BURGOS | 825,34 | 175.181 | 726 | 156 | 34,88 | 3,747 |
| 8 | CANAL ISABEL II LANZAROTE | 399 | 204.393 | 5 | 28,10 | 8,17 | 3 |
| 9 | FACSA | 3.700 | 1.000.000 | 6.314 | 250 | 146,27 | 15,709 |
| 10 | EMACSA(CÓRDOBA) | 897 | 155.000 | 536 | 89,38 | 24,12 | 2,590 |
| 11 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 207,29 | 135.781 | 1.008 | 76 | 46,83 | 1,14 |
| 12 | AGUAS DE AÑARBE (GUIPUZKOA) | 75 | 318.310 | 779 | 388,80 | 39,99 | 4,294 |
| 13 | EMASAGRA (GRANADA) | 1.430 | 387.847 | 357 | 24 | 25,22 | 21,68 |
| 14 | CANAL ISABEL II MADRID | 14.441 | 5.680.102 | 436 | 2.800 | 452,67 | 15,88 |
| 15 | EMASA (MÁLAGA) | 1.300 | 700.000 | 524 | 183 | 6,06 | 0,651 |
| 16 | EMUASA (MURCIA) | 1.614 | 400.000 | 301 | 120,30 | 41,55 | 41,55 |
| 17 | MANCOMUNIDAD PAMPLONA | 1.678 | 595.226 | 721 | 112,32 | 37,59 | 4,038 |
| 18 | VIAQUA | 4.141 | 760.000 | 4.600 | 159,04 | 72,38 | 7,774 |
| 19 | AQUONA | 2.270 | 166.134 | 1.066 | 83 | 44,30 | 0,76 |
| 20 | EMMASA (STA CRUZ DE TENERIFE) | 800 | 209.000 | 557 | 40 | 8,12 | 8,12 |
| 21 | EMASESA (SEVILLA) | 3.009 | 382.926 | 534 | 459,65 | 75,37 | 0,28 |
| 22 | EMATSA (TARRAGONA) | 291 | 147.224 | 504 | 35 | 10,65 | 1,143 |
| 23 | GLOBAL OMNIUM | 12.000 | 5.000.000 | 454 | 776,88 | 280,39 | 120,56 |
| 24 | AQUAVALL | 730 | 344.600 | 435 | 259,20 | 44,97 | 4,829 |
| 25 | AQUARA | 556 | 754.694 | 318 | 259,20 | 0,85 | 0,091 |

Tabla 14. Datos definitivos Modelo 2

○ 3. MODELO SOSTENIBLE

Por último, se ha establecido un tercer modelo que mide la sostenibilidad en el cual prima ese aprovechamiento de las materias generadas, cómo las empresas son capaces de lograr a partir de este proceso de saneamiento y depuración de aguas residuales obtener un beneficio o un bien para la población y para el entorno.

En este tercer caso, las entradas que se utilizarán serán también esos activos de los que disponen al igual que en el modelo dos, y las salidas empleadas son las emisiones de CO_2 y el porcentaje de lodos valorizados. Al igual que pasaba anteriormente con los datos de salida de la energía, en este caso tampoco se quiere maximizar las emisiones que se generan si no reducirlas al máximo (Figura 20).

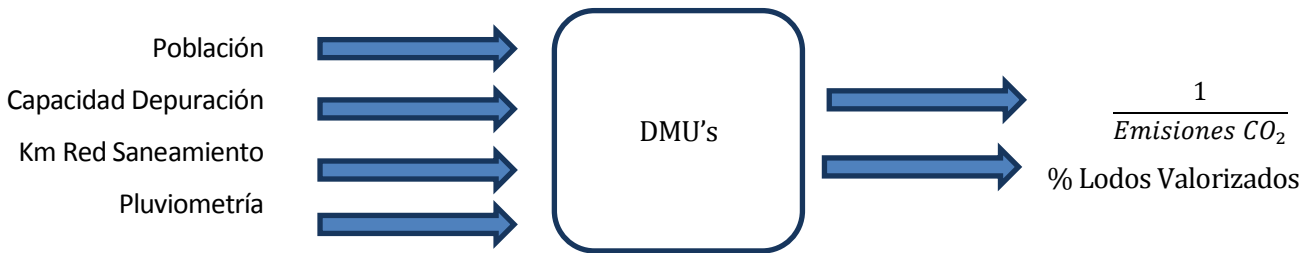


Figura 20. Modelo Sostenible

En este tercer modelo se deben eliminar cuatro empresas, Emaya, Emmasa, Ematsa y Canal Isabel II Lanzarote por no disponer de ninguno de los datos de salidas necesarios. Además, se elimina Emasa (Málaga) porque no dispone de los datos de lodos generados y lodos valorizados, por lo cual no es posible obtener de ninguna manera el porcentaje a evaluar. Quedando por tanto la lista tal y como se representa en la tabla próxima número 15.

| RELACIÓN EMPRESAS MODELO 3 | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|----|-----------------------------------|
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 11 | EMASAGRA (GRANADA) |
| 2 | AMVISA (ÁLAVA) | 12 | CANAL DE ISABEL II MADRID |
| 3 | EMPRESA MUNICIPAL DE AGUAS DE GIJÓN | 13 | EMUASA (MURCIA) |
| 4 | AIGÜES DE BARCELONA | 14 | MANCOMUNIDAD COMARCA PAMPLONA |
| 5 | CONSORCIO DE AGUAS BILBAO BIZKAIA | 15 | VIAQUA |
| 6 | AGUAS DE BURGOS | 16 | AQUONA |
| 7 | FACSA | 17 | EMASESA (SEVILLA) |
| 8 | EMACSA (CÓRDOBA) | 18 | GLOBAL OMNIUM / AGUAS DE VALENCIA |
| 9 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 19 | AQUAVALL (VALLADOLID) |
| 10 | AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 20 | AQUARA |

Tabla 15. Relación empresas Modelo 3

Se comprueba la dimension correcta del último modelo:

- ✓ Golany y Roll (1989): $20 \geq 2 \times (4 + 2)$
- ✓ Charnes et al (1990): $20 \geq 3 \times (4 + 2)$
- ✓ Murias (2004): $20 \geq (4 \times 2)$

En este modelo falta obtener el dato de porcentaje de lodos generados de la empresa Aguas de Gijón teniendo la cantidad de lodos que han valorizado en el año. La mayoría de las empresas de las que se tienen datos oficiales valorizan una media del 90% del total de lodos generados, una cifra bastante alta y optimista, por tanto, se tomará este valor para el cálculo.

Para calcular las emisiones de CO_2 que se generan al año en las empresas Viaqua, Emacsa (Córdoba), Consorcio aguas Bilbao Bizkaia y Mancomunidad de la comarca de Pamplona hay que tener en cuenta que éstas se producen durante todo el proceso de depuración de aguas residuales de forma directa y las asociadas al consumo de energía en el desarrollo de la actividad, por ello se va a tener en cuenta el dato de agua depurada anual. Se va a relacionar Viaqua con Emasesa por tener una cantidad de agua depurada total al año muy semejante, 72,38 hm³/año la primera y 78,37 hm³/año la segunda empresa.

| OBTENCIÓN DATOS MODELO 3 | | | |
|------------------------------|-------------------------------|--|--|
| | EMPRESA | CÁLCULO | REFERENCIA |
| % Lodos valorizados | AGUAS DE GIJÓN | $13565,86 / 0,90 = 15.073,17$ | Se dispone de cantidad lodos valorizados. |
| | MANCOMUNIDAD COMARCA PAMPLONA | $41.294 * 0,90 = 37.164,6$ | Se dispone cantidad lodos generados |
| Emisiones Co2 (Tn equiv/año) | VIAQUA | $(72,38 * 13.540) / 75,37 = 13.002,86$ | Se realiza una regla de proporcionalidad con Emasesa |

Tabla 16. Cálculo datos Modelo 3

Ya calculados todos los datos necesarios, se representan en la tabla 17.

| DATOS DEFINITIVOS MODELO 3 | | | | | | | |
|----------------------------|----------------------------------|------------|---------------|------------------|--------------------------|-------------|-------------------|
| | | Km Red {I} | Población {I} | Pluviometría {I} | Capacidad Depuración {I} | % Lodos {O} | Emisiones CO2 {O} |
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 801 | 366.967 | 336 | 135 | 100 | 331.930 |
| 2 | AMVISA (ÁLAVA) | 1.002 | 254.085 | 400 | 185 | 91,52 | 5.140 |
| 3 | AGUAS DE GIJÓN | 1.071 | 54.386 | 1.580 | 70 | 90 | 2.819,84 |
| 4 | AIGÜES DE BARCELONA | 1.368,97 | 3.386.008 | 640 | 525 | 97,09 | 79.003,58 |
| 5 | CONS. DE AGUAS DE BILBAO BIZKAIA | 414 | 1.234.285 | 1.195 | 350 | 92,98 | 27.149 |
| 6 | AGUAS DE BURGOS | 825,34 | 175.181 | 726 | 156 | 100 | 12.596 |
| 7 | FACSA | 3.700 | 1.000.000 | 6.314 | 250 | 98,99 | 224.071 |
| 8 | EMACSA(CÓRDOBA) | 897 | 155.000 | 536 | 89,38 | 99,74 | 3.986,064 |
| 9 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 207,29 | 135.781 | 1.008 | 76 | 21,91 | 27.000 |
| 10 | AGUAS DE AÑARBE (GUIPUZKOA) | 75 | 318.310 | 779 | 388,80 | 93,97 | 19.786 |
| 11 | EMASAGRA (GRANADA) | 1.430 | 387.847 | 357 | 24 | 95,85 | 7.159 |
| 12 | CANAL ISABEL II MADRID | 14.441 | 5.680.102 | 436 | 2.800 | 22,66 | 96.479 |

| | | | | | | | |
|----|----------------------------------|--------|-----------|-------|--------|-------|-----------|
| 13 | EMUASA (MURCIA) | 1.614 | 400.000 | 301 | 120,30 | 100 | 8.353 |
| 14 | MANCOMUNIDAD COMARCA PAMPLONA | 1.678 | 595.226 | 721 | 112,32 | 90 | 2.156,20 |
| 15 | VIAQUA | 4.141 | 760.000 | 4.600 | 159,04 | 99,32 | 13.002,86 |
| 16 | AQUONA | 2.270 | 166.134 | 1.066 | 83 | 100 | 1.016 |
| 17 | EMASESA (SEVILLA) | 3.009 | 382.926 | 534 | 459,65 | 100 | 13.535 |
| 18 | GLOBAL OMNIUM | 12.000 | 5.000.000 | 454 | 776,88 | 93,13 | 13.551,08 |
| 19 | AQUAVALL | 730 | 344.600 | 435 | 259,20 | 100 | 8.350 |
| 20 | AQUARA | 556 | 754.694 | 318 | 259,20 | 100 | 223 |

Tabla 17. Datos definitivos Modelo 3

3.2.5 Aplicación Software EMS

Terminado el proceso de obtención de datos necesarios para el análisis y la creación de los modelos necesarios, el siguiente paso es resolver los modelos planteados. Para ello se empleará el programa computacional EMS (Efficiency Measurement System) siendo una aplicación del entorno de Window. A la hora de ingresar los datos y ejecutar el programa es necesario organizarlos en una hoja de cálculo de MS Office Excel y posteriormente proceder a cargarlos y así establecer el tipo de modelo que se va a utilizar para obtener la eficiencia.

Los modelos serán con orientación de salida debido a la intención de aumentar la producción para alcanzar una mayor eficiencia, es decir, mejorar las salidas en cada caso y los resultados obtenidos informen del incremento que debe conseguir cada empresa para ser eficiente. Se realizará en cada ocasión tanto con retorno de escala constante como variable para así poder evaluar los datos obtenidos y contrastarlos.

Antes de introducir las tablas Excel en el programa, se deben invertir los valores de la energía total consumida, la energía consumida en el proceso de saneamiento y las emisiones de CO_2 , en este último dato además se deberán cambiar las unidades en las que están expresadas de toneladas a miles de toneladas, y posteriormente invirtiendo el dato. Esto se ha realizado, como se explicó en el punto 3.2.1 del presente documento, por la necesidad de maximizar las salidas para una mayor eficiencia.

A continuación, se muestran en las tablas de la 18 a la 23 los resultados obtenidos al introducirlos en el software EMS. La primera columna representa el score, dato que indica la eficiencia en tanto por ciento de cada DMU siendo las marcadas en amarillo las DMU's eficientes, una segunda columna denominada Benchmarking la cual muestra, para las DMU's eficientes, las veces que sirven de referencia de las no eficientes y, para estas últimas, las DMU's que constituyen su grupo de referencia (peer group), y entre paréntesis los valores lambdas que las relaciona, indicando tal valor la cercanía a la correspondiente DMU eficiente; a mayor valor lambda, mayor cercanía en términos de las condiciones de operación. El resto de las columnas hacen referencia a las holguras (slacks) de las DMU's ineficientes, cantidad que deben aumentar o disminuir para alcanzar esa eficiencia.

“ANÁLISIS POR ENVOLTURA DE DATOS DE EMPRESAS DE SANEAMIENTO EN ESPAÑA”

| MODELO 1. CRS-RAD-OUT | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------|-----------|--------------------------------------|------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|-------------|------------|-------------------|
| | DMU's | SCORE (%) | BENCHMARKS | {S} Km Red | {S} Poblacion | {S} Empleados | {S} Cifra Total | {S} Cifra San | {S} E Total | {S} E. San | {S} E. Cogenerada |
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 977,10 | 2(0,38) 3(0,33) 10(0,79) | 0 | 0 | 249 | 49279,1 | 24448,6 | 0 | 0 | 4,9 |
| 2 | AMVISA (ÁLAVA) | 100 | 9 | | | | | | | | |
| 3 | AGUAS DE GIJÓN | 100 | 7 | | | | | | | | |
| 4 | EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 474,63 | 2(0,10) 3(0,65) 10(1,38) | 198,09 | 0 | 334 | 49760,3 | 0 | 0,5 | 0 | 0 |
| 5 | AIGÜES DE BARCELONA | 1038,88 | 10(10,50) 15(0,26) | 0 | 0 | 727 | 212964,2 | 52623 | 4,1 | 0,3 | 0 |
| 6 | AGUAS BILBAO BIZKAIA | 1981,88 | 2(0,13) 3(0,0) 10(3,78) | 0 | 0 | 262 | 34393,9 | 37546,8 | 1,3 | 0 | 0 |
| 7 | FACSA | 163,51 | 10(2,42) | 3518,42 | 229339,41 | 763 | 57574,3 | 0 | 0,9 | 0,1 | 0 |
| 8 | EMACSA (CÓRDOBA) | 105,23 | 2(0,07) 3(0,75) 10(0,30) | 0 | 0 | 104 | 18578,6 | 4859,8 | 0,1 | 0 | 0 |
| 9 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 364,05 | 2(0,14) 10(0,29) | 44,74 | 6343,35 | 103 | 13902,9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | AGUAS DEL AÑARBE | 100 | 14 | | | | | | | | |
| 11 | EMASAGRA (GRANADA) | 120,12 | 2(1,43) 10(0,00) | 0 | 25212,87 | 113 | 12675,3 | 433,1 | 0 | 0 | 2,2 |
| 12 | CANAL DE ISABEL II MADRID | 420,48 | 10(14,78) 15(5,87) | 0 | 0 | 1270 | 275185,1 | 68462,2 | 5,8 | 0,6 | 0 |
| 13 | EMUJASA (MURCIA) | 580,63 | 2(0,18) 3(1,16) 10(0,68) 15(0,05) | 0 | 0 | 0 | 31414,2 | 4778,7 | 0,2 | 0 | 0 |
| 14 | VIAQUA | 238,25 | 3(1,15) 10(2,19) | 2745,64 | 0 | 298 | 0 | 3897,4 | 0,9 | 0,2 | 0 |
| 15 | AQUONA | 100 | 3 | | | | | | | | |
| 16 | GLOBAL OMNIUM | 1.298,93 | 10(7,37) | 11446,94 | 2652760,84 | 2293 | 0 | 2408,7 | 2,8 | 0,05 | 0 |
| 17 | AQUAVALL (VALLADOLID) | 473,50 | 2(0,27) 3(0,32) 10(0,81) | 48,45 | 0 | 68,44 | 0 | 5333,18 | 0,09 | 0 | 0 |
| 18 | AQUARA | 1.219,52 | 2(0,11) 10(0,50) | 411,08 | 569351,42 | 125,86 | 356,12 | 0 | 0,18 | 0 | 0 |

Tabla 18. Datos EMS Modelo 1 CRS-RAD-OUT

| MODELO 1. VRS-RAD-OUT | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------|-----------|---------------------------------------|------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|--------------|------------|-------------------|--|
| | DMU's | SCORE (%) | BENCHMARKS | {S} Km Red | {S} Poblacion | {S} Empleados | {S} Cifra Total | {S} Cifra San | {S} E. Total | {S} E. San | {S} E. Cogenerada | |
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 820,93 | 10(0,71) 11(0,29) | 334,03 | 28541,42 | 270 | 51708,9 | 4280,3 | 0,0 | 0,0 | 3,3 | |
| 2 | AMVISA (ÁLAVA) | 100 | 1 | | | | | | | | | |
| 3 | AGUAS DE GIJÓN | 100 | 1 | | | | | | | | | |
| 4 | EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 322,41 | 7(0,24) 10(0,67) 11(0,09) 12(0,00) | 0 | 0 | 240 | 44941,8 | 3310,5 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | |
| 5 | AIGÜES DE BARCELONA | 127,47 | 10(0,91) 12(0,09) | 0 | 2584752,3 | 797 | 328274,5 | 92853,4 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | |
| 6 | AGUAS BILBAO BIZKAIA | 543,96 | 10(0,95) 11(0,03) 12(0,02) | 0 | 803562,78 | 287 | 71046,4 | 50455,2 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | |
| 7 | FACSA | 100 | 5 | | | | | | | | | |
| 8 | EMACSA (CÓRDOBA) | 103,77 | 2(0,09) 3(0,55) 10(0,28) 15(0,09) | 0 | 0 | 118 | 16824,3 | 4500,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| 9 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 100 | 0 | | | | | | | | | |
| 10 | AGUAS DEL AÑARBE | 100 | 9 | | | | | | | | | |
| 11 | EMASAGRA (GRANADA) | 100 | 6 | | | | | | | | | |
| 12 | CANAL DE ISABEL II MADRID | 100 | 4 | | | | | | | | | |
| 13 | EMUASA (MURCIA) | 436,37 | 7(0,10) 10(0,73) 11(0,17) | 934,87 | 0 | 91 | 41707,6 | 10485,8 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | |
| 14 | VIAQUA | 120,43 | 7(0,48) 10(0,52) | 2313,9 | 112203,31 | 126 | 0,0 | 12973,0 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | |
| 15 | AQUONA | 100 | 1 | | | | | | | | | |
| 16 | GLOBAL OMNIUM | 279,04 | 7(0,91) 10(0,01) 11(0,03) 12(0,05) | 7882,84 | 3796385,19 | 1600 | 0,0 | 21371,3 | 0,0 | 0 | 0 | |
| 17 | AQUAVALL (VALLADOLID) | 418,84 | 7(0,02) 10(0,76) 11(0,22) | 296,39 | 0 | 79,68 | 533,71 | 6581,97 | 0,08 | 0 | 0 | |
| 18 | AQUARA | 100 | 0 | | | | | | | | | |

Tabla 19. Datos EMS Modelo 1 VRS-RAD-OUT

| MODELO 2. CRS-RAD-OUT | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------------|-----------|------------|----------|----------|----------|------------|---------------|------------------|------------------|-----------------|--------------------|
| | DMU's | SCORE (%) | BENCHMARKS | | | | {S} Km Red | {S} Poblacion | {S} Pluviometría | {S} Cap Depurac. | {S} Agua Depur. | {S} Agua Reutiliz. |
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 144,38 | 5(0,05) | 11(0,13) | 16(0,24) | 21(0,07) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | AMVISA (ÁLAVA) | 119,52 | 5(0,02) | 11(0,18) | 16(0,00) | 21(0,28) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | AGUAS DE GIJÓN | 100 | 0 | | | | | | | | | |
| 4 | EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 16,92 | 5(0,11) | 1(0,17) | 23(0,01) | | 596,47 | 21896,66 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | AIGÜES DE BARCELONA | 100 | 8 | | | | | | | | | |
| 6 | AGUAS BILBAO BIZKAIA | 100 | 0 | | | | | | | | | |
| 7 | AGUAS DE BURGOS | 124,42 | 11(0,62) | 16(0,09) | 21(0,14) | | 124,27 | 0 | 0 | 33,41 | 0 | 0 |
| 8 | CANAL ISABEL II LANZAROTE | 100 | 0 | | | | | | | | | |
| 9 | FACSA | 116,76 | 11(2,78) | | 13(1,60) | | 829,32 | 0 | 2936,16 | 0 | 0 | 19,6 |
| 10 | EMACSA (CÓRDOBA) | 142,55 | 5(0,01) | 11(0,49) | 16(0,07) | 21(0,09) | 409,57 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 100 | 11 | | | | | | | | | |
| 12 | AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 100 | 0 | | | | | | | | | |
| 13 | EMASAGRA (GRANADA) | 100 | 7 | | | | | | | | | |
| 14 | CANAL DE ISABEL II MADRID | 100 | 0 | | | | | | | | | |
| 15 | EMASA | 1205,55 | 5(0,16) | 11(0,31) | 16(0,13) | 21(0,12) | 425,14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | EMUASA (MURCIA) | 100 | 7 | | | | | | | | | |
| 17 | MANCOMUNIDAD PAMPLONA | 172,52 | 5(0,12) | 11(0,54) | 13(0,27) | | 1011,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,02 |
| 18 | VIAQUA | 155,27 | 11(1,66) | | 13(1,38) | | 1824,93 | 0 | 2437,27 | 0 | 0 | 19,72 |
| 19 | AQUONA | 115 | 5(0,01) | 11(1,05) | 13(0,01) | | 2027,45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,65 |

| | | | | | | | | | |
|----|-----------------------|---------|------------------------------------|---|----------|--------|-------|------|------|
| 20 | EMMASA | 209,34 | 13(0,24) 16(0,29) | 0 | 2785,17 | 386,34 | 0 | 0,84 | 0 |
| 21 | EMASESA | 100 | 5 | | | | | | |
| 22 | EMATSA | 216,54 | 11(0,42) 13(0,14) | 0 | 35259,53 | 34,25 | 0 | 0 | 1,11 |
| 23 | GLOBAL OMNIUM | 100 | 1 | | | | | | |
| 24 | AQUAVALL (VALLADOLID) | 100 | 3 | | | | | | |
| 25 | AQUARA | 7827,28 | 5(0,19) 11(0,09) 16(0,09) 24(0,18) | 0 | 0 | 0 | 95,67 | 0 | 0 |

Tabla 20. Datos EMS Modelo 2 CRS-RAD-OUT

| MODELO 2. VRS-RAD-OUT | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------------|-----------|---|------------|---------------|------------------|------------------|-----------------|--------------------|--|
| | DMU's | SCORE (%) | BENCHMARKS | {S} Km Red | {S} Poblacion | {S} Pluviometría | {S} Cap Depurac. | {S} Agua Depur. | {S} Agua Reutiliz. | |
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 133,34 | 5(0,03) 8(0,38) 11(0,14) 16(0,19) 21(0,04) 24(0,23) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 2 | AMVISA (ÁLAVA) | 107,89 | 8(0,40) 11(0,20) 21(0,22) 24(0,17) | 0 | 0 | 0 | 11,41 | 0 | 1,2 | |
| 3 | AGUAS DE GIJÓN | 100 | 1 | | | | | | | |
| 4 | EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 117,07 | 5(0,08) 8(0,71) 11(0,01) 13(0,20) | 414,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,9 | |
| 5 | AIGÜES DE BARCELONA | 100 | 6 | | | | | | | |
| 6 | AGUAS BILBAO BIZKAIA | 100 | 0 | | | | | | | |
| 7 | AGUAS DE BURGOS | 110,99 | 8(0,22) 11(0,68) 16(0,07) 21(0,03) | 404,87 | 0 | 0 | 76,92 | 0 | 0 | |
| 8 | CANAL ISABEL II LANZAROTE | 100 | 7 | | | | | | | |
| 9 | FACSA | 100 | 2 | | | | | | | |
| 10 | EMACSA (CÓRDOBA) | 100 | 0 | | | | | | | |
| 11 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 100 | 8 | | | | | | | |
| 12 | AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 100 | 1 | | | | | | | |
| 13 | EMASAGRA (GRANADA) | 100 | 4 | | | | | | | |

“ANÁLISIS POR ENVOLTURA DE DATOS DE EMPRESAS DE SANEAMIENTO EN ESPAÑA”

51

| | | | | | | | | | | |
|----|---------------------------|---------|--|---------|---------|--------|-------|---|------|------|
| 14 | CANAL DE ISABEL II MADRID | 100 | 0 | | | | | | | |
| 15 | EMASA | 1191,65 | 8(0,13) 11(0,68) 16(0,07) 21(0,03) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15,5 |
| 16 | EMUASA (MURCIA) | 100 | 5 | | | | | | | |
| 17 | MANCOMUNIDAD PAMPLONA | 171,40 | 5(0,12) 8(0,07) 11(0,54) 13(0,27) | 992,48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,17 |
| 18 | VIAQUA | 134,77 | 9(0,60)13(0,40) | 1354,62 | 6378,05 | 683,56 | 0 | 0 | 0 | 7,63 |
| 19 | AQUONA | 111,59 | 5(0,01) 9(0,01) 11(0,98) 21(0,01) | 1997,29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,52 |
| 20 | EMMASA | 101,69 | 13(0,09) 13(0,24) (0,05) 22(0,62) | 98,47 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8,78 | 0 |
| 21 | EMASESA | 100 | 5 | | | | | | | |
| 22 | EMATSA | 100 | 1 | | | | | | | |
| 23 | GLOBAL OMNIUM | 100 | 0 | | | | | | | |
| 24 | AQUAVALL (VALLADOLID) | 100 | 2 | | | | | | | |
| 25 | AQUARA | 7092,20 | 5(0,17) 8(0,56) 11(0,08) 12(0,15) 16(0,05) | 0 | 0 | 0 | 87,16 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 21. Datos EMS Modelo 2 VRS-RAD-OUT

| MODELO 3. CRS-RAD-OUT | | | | | | | | | |
|-----------------------|----------------------|-----------|-----------------------------------|------------|---------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| | DMU's | SCORE (%) | BENCHMARKS | {S} Km Red | {S} Población | {S} Pluviometría | {S} Cap Depurac. | {S} % Lodos Val | {S} Emisiones CO2 |
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 100 | 2 | | | | | | |
| 2 | AMVISA (ÁLAVA) | 101,89 | 1(0,19) 8(0,48) 13(0,26) 20(0,01) | 0 | 0 | 0 | 83,23 | 0 | 0 |
| 3 | AGUAS DE GIJÓN | 100 | 2 | | | | | | |
| 4 | AIGÜES DE BARCELONA | 208,56 | 13(0,23) 20(1,80) | 0 | 19396369,38 | 0 | 32,08 | 0 | 8,1 |
| 5 | AGUAS BILBAO BIZKAIA | 124,08 | 8(0,39) 10(0,81) | 0 | 915514,61 | 353,17 | 0 | 0 | 0,1 |
| 6 | AGUAS DE BURGOS | 101,84 | 3(0,12) 8(0,76) 10(0,16) | 0 | 0 | 0 | 17,51 | 0 | 0,2 |
| 7 | FACSA | 351,71 | 8(2,53) 11(1,00) | 0 | 219675,1 | 5055,37 | 0 | 0 | 0,8 |
| 8 | EMACSA (CÓRDOBA) | 100 | 8 | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|----|-----------------------------|--------|-----------------------------------|----------|------------|--------|---------|---|------|
| 9 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 161,92 | 8(0,22) 10(0,15) | 0 | 55643,79 | 777,58 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 100 | 4 | | | | | | |
| 11 | EMASAGRA (GRANADA) | 100 | 2 | | | | | | |
| 12 | CANAL DE ISABEL II MADRID | 639,23 | 13(1,45) | 12103,11 | 5100699,98 | 0 | 2625,74 | 0 | 0,1 |
| 13 | EMUASA (MURCIA) | 100 | 5 | | | | | | |
| 14 | MANCOMUNIDAD PAMPLONA | 100 | 0 | | | | | | |
| 15 | VIAQUA | 316,40 | 3(1,47) 8(0,17) 11(1,68) | 0 | 0,05 | 1578,3 | 0 | 0 | 0,6 |
| 16 | AQUONA | 100 | 0 | | | | | | |
| 17 | EMSASESA | 131,49 | 8(0,59) 13(0,73) | 1304,68 | 0 | 0 | 319,42 | 0 | 0,14 |
| 18 | GLOBAL OMNIUM | 161,96 | 13(1,51) | 9565,59 | 4396677,72 | 0 | 595,43 | 0 | 0,06 |
| 19 | AQUAVALL | 101,60 | 1(0,72) 8(0,15) 10(0,14) 20(0,02) | 0 | 0 | 0 | 90,24 | 0 | 0 |
| 20 | AQUARA | 100 | 3 | | | | | | |

Tabla 22. Datos EMS Modelo 3 CRS-RAD-OUT

| MODELO 3. VRS-RAD-OUT | | | | | | | | | |
|-----------------------|----------------------|-----------|---|------------|---------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| | DMU's | SCORE (%) | BENCHMARKS | {S} Km Red | {S} Población | {S} Pluviometría | {S} Cap Depurac. | {S} % Lodos Val | {S} Emisiones CO2 |
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 100 | 7 | | | | | | |
| 2 | AMVISA (ÁLAVA) | 100,69 | 1(0,37) 8 (0,43) 13(0,11) 14(0,08) 20(0,01) | 0 | 0 | 0 | 73,76 | 0 | 0 |
| 3 | AGUAS DE GIJÓN | 100 | 0 | | | | | | |
| 4 | AIGÜES DE BARCELONA | 103,00 | 1(0,25) 6 (0,07) 13(0,09) 16(0,00) 17(0,12) 19(0,15) 20(0,31) | 309,87 | 2911337 | 243,52 | 293,2 | 0 | 1,4 |
| 5 | AGUAS BILBAO BIZKAIA | 105,64 | 10 (0,30) 20 (0,70) | 0 | 608419,55 | 740,9 | 52,54 | 0 | 3,1 |
| 6 | AGUAS DE BURGOS | 100 | 6 | | | | | | |
| 7 | FACSA | 101,02 | 1(0,04) 6(0,27) 13(0,01) 16(0,30) | 2481,7 | 627761,88 | 6103,93 | 73,53 | 0 | 1,7 |

“ANÁLISIS POR ENVOLTURA DE DATOS DE EMPRESAS DE SANEAMIENTO EN ESPAÑA”

53

| | | | 17(0,02) 19(0,06) 20(0,30) | | | | | | |
|----|-----------------------------|--------|---|----------|-----------|---------|---------|---|------|
| 8 | EMACSA (CÓRDOBA) | 100 | 1 | | | | | | |
| 9 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 100 | 0 | | | | | | |
| 10 | AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 100 | 1 | | | | | | |
| 11 | EMASAGRA (GRANADA) | 100 | 0 | | | | | | |
| 12 | CANAL DE ISABEL II MADRID | 441,31 | 1(0,15) 6(0,03) 13(0,22) 16(0,01) 17(0,09) 19(0,10) 20(0,41) | 13355,06 | 5154294,1 | 71,64 | 2575,37 | 0 | 1,9 |
| 13 | EMUASA (MURCIA) | 100 | 7 | | | | | | |
| 14 | MANCOMUNIDAD PAMPLONA | 100 | 1 | | | | | | |
| 15 | VIAQUA | 100,68 | 1(0,07) 6(0,14) 13(0,04) 16(0,44) 17(0,03) 19(0,02) 20(0,26) | 2653,23 | 405489,47 | 3888,15 | 0,05 | 0 | 1,5 |
| 16 | AQUONA | 100 | 6 | | | | | | |
| 17 | EMSASESA | 100 | 5 | | | | | | |
| 18 | GLOBAL OMNIUM | 107,38 | 1(0,18) 6(0,02) 13(0,00) 16(0,01) 17(0,10) 19(0,05) 20(0,64) | 11122,24 | 4387779,6 | 93,3 | 522,78 | 0 | 2,82 |
| 19 | AQUAVALL | 100 | 6 | | | | | | |
| 20 | AQUARA | 100 | 8 | | | | | | |

Tabla 23. Datos EMS Modelo 3. VRS-RAD-OUT

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se va a analizar los resultados obtenidos del programa EMS de cada uno de los tres modelos.

4.1 Modelo 1

Lo primero que se observa son las DMU's eficientes en cada una de las tecnologías, obteniéndose en el caso de escala constante cuatro empresas AMVISA, Aguas de Gijón, Aguas del Añarbe y Aquona. Cuando se ejecuta EMS con el retorno de escala variable aparecen más empresas eficientes, en este caso nueve, AMVISA, Aguas de Gijón, Facsa, Emalcsa, Aguas del Añarbe, Emasagra, Canal de Isabel II Madrid, Aquona y Aquara. Se observa que las empresas que son eficientes en CRS lo son también en VRS, eso no es por la orientación ni la métrica, si no por la tecnología, es más generosa en el caso de escala variable.

Los datos de ineficiencia del resto de empresas son valores por encima del 100%, debido a la orientación, por ello para poder analizar con mayor visibilidad los resultados se van a escalar todos para estar por debajo de las DMU's eficientes invirtiendo los score.

En la tabla siguiente se muestran los valores de eficiencia de cada DMU, ordenados de manera decreciente, estando marcados en rojo los que se encuentran distantes de la frontera eficiente.

| RANKING EFICIENCIA CRS-RAD-OUT | | |
|--------------------------------|-----------------------------|-------|
| POSICIÓN | DMU | % |
| 1 | AMVISA (ÁLAVA) | 100 |
| 2 | AGUAS DE GIJÓN | 100 |
| 3 | AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 100 |
| 4 | AQUONA | 100 |
| 5 | EMACSA (CÓRDOBA) | 95,03 |
| 6 | EMASAGRA (GRANADA) | 83,25 |
| 7 | FACSA | 61,16 |
| 8 | VIAQUA | 41,97 |
| 9 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 27,47 |
| 10 | CANAL DE ISABEL II MADRID | 23,78 |
| 11 | AQUAVALL (VALLADOLID) | 21,12 |
| 12 | EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 21,07 |
| 13 | EMUASA (MURCIA) | 17,22 |
| 14 | AGUAS DE ALICANTE | 10,23 |
| 15 | AIGÜES DE BARCELONA | 9,63 |
| 16 | AQUARA | 8,20 |
| 17 | GLOBAL OMNIUM | 7,70 |
| 18 | AGUAS BILBAO BIZKAIA | 5,05 |
| PROMEDIO | | 46,27 |

Tabla 24. Modelo 1 Ranking Score CRS-RAD-OUT

| RANKING EFICIENCIA VRS-RAD-OUT | | |
|--------------------------------|-----------------------------|--------------|
| POSICIÓN | DMU | % |
| 1 | AMVISA (ÁLAVA) | 100 |
| 2 | AGUAS DE GIJÓN | 100 |
| 3 | FACSA | 100 |
| 4 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 100 |
| 5 | AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 100 |
| 6 | EMASAGRA (GRANADA) | 100 |
| 7 | CANAL DE ISABEL II MADRID | 100 |
| 8 | AQUONA | 100 |
| 9 | AQUARA | 100 |
| 10 | EMACSA (CÓRDOBA) | 96,37 |
| 11 | VIAQUA | 83,04 |
| 12 | AIGÜES DE BARCELONA | 78,45 |
| 13 | GLOBAL OMNIUM | 35,84 |
| 14 | EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 31,02 |
| 15 | AQUAVALL (VALLADOLID) | 23,88 |
| 16 | EMUASA (MURCIA) | 22,92 |
| 17 | AGUAS BILBAO BIZKAIA | 18,38 |
| 18 | AGUAS DE ALICANTE | 12,18 |
| PROMEDIO | | 72,34 |

Tabla 25. Modelo 1 Ranking Score VRS-RAD-OUT

De las tablas anteriores se extrae que todas las empresas mejoran su eficiencia al pasar de tecnología de escala constante a variable, pero destacan considerablemente Aquara, teniendo un 8,20% y convirtiéndose en eficiente con una mejora de 91,80 puntos, Emalcsa que partiendo de un 27,47% mejora su eficiencia hasta el 100% y Canal de Isabel II, la cual aumenta su eficiencia en 76,22 puntos sobre su valor en escala constante.

Puede observarse que el valor medio de eficiencia en el caso de CRS es bastante reducido, un 46,27% mejorando considerablemente para el caso VRS, 72,34%. De este dato se extrae también que el 66,6% de las empresas en el modelo VRS tienen puntuación por encima del promedio (12 de las 18 empresas), de las cuales 9 son eficientes lo que representa el 75% de las empresas, por lo que el 22,2% del total de las empresas presentan un buen desempeño. Por el contrario, bajo el modelo CRS únicamente un 38,8% del total se sitúan por encima del promedio (46,27%), y sólo un 22,2% del total de empresas consideradas son eficientes, es decir, 4 empresas de las 18.

Visualizando la siguiente gráfica (Figura 21) donde se representan ambas tecnologías del modelo 1 de todas las empresas, se puede observar de manera visual la diferencia comentada anteriormente en el caso de Aquona, Canal Isabel II Madrid y Emalcsa. Además, en el caso de CRS 11 de las 18 DMU's no alcanzan el 50% de eficiencia y en VRS son 6 las empresas que se quedan por debajo de este umbral obteniendo datos bastante bajos de eficiencia.

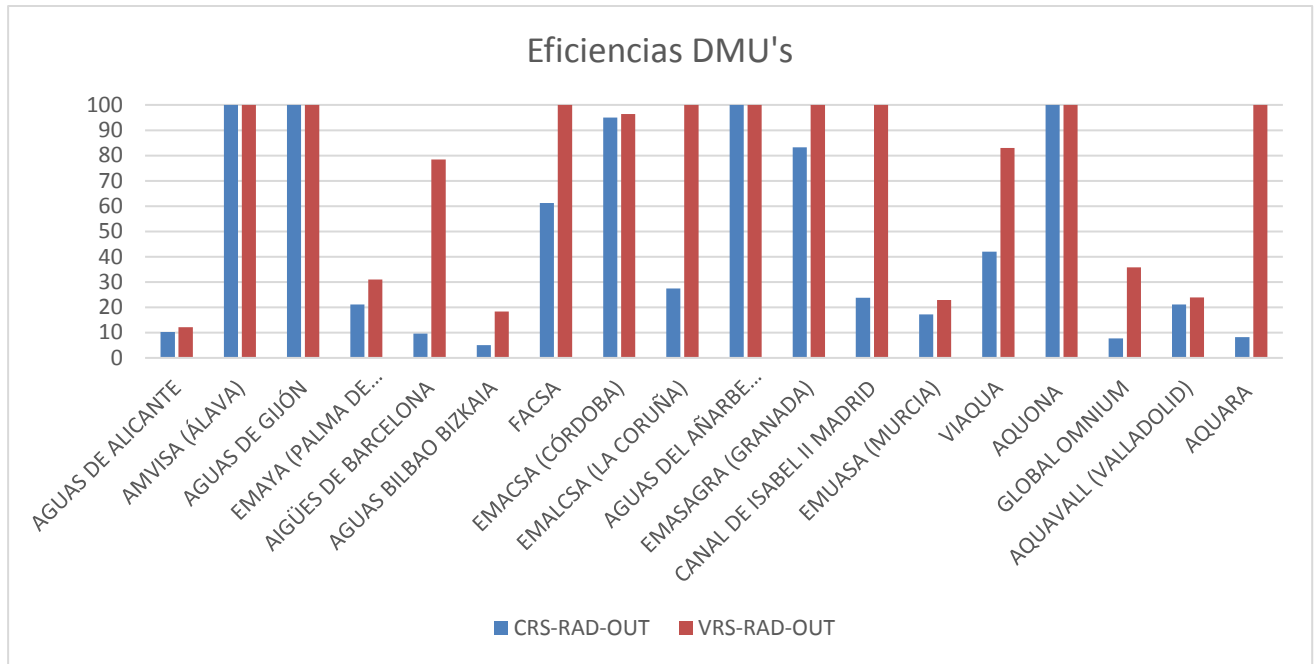


Figura 21. Modelo 1 Gráfica comparación eficiencia DMU's

De los resultados obtenidos también puede deducirse qué deberían hacer las unidades con eficiencias menores para alcanzar esa frontera deseada y convertirse en unidades con el 100%. Para ello en las tablas siguientes, tablas 26 y 27, están reflejadas por orden decreciente las DMU's eficientes según la cantidad de unidades ineficientes que la toman como base de referencia.

| BENCHMARKS CRS-RAD-OUT | |
|-----------------------------|------------|
| DMU EFICIENTE | Benchmarks |
| AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 14 |
| AMVISA (ÁLAVA) | 9 |
| AGUAS DE GIJÓN | 7 |
| AQUONA | 3 |

Tabla 26. Modelo 1 Benchmarks DMU eficientes CRS

| BENCHMARKS VRS-RAD-OUT | |
|-----------------------------|------------|
| DMU EFICIENTE | Benchmarks |
| AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 9 |
| EMASAGRA (GRANADA) | 6 |
| FACSA | 5 |
| CANAL DE ISABEL II MADRID | 4 |
| AMVISA (ÁLAVA) | 1 |
| AGUAS DE GIJÓN | 1 |
| AQUONA | 1 |
| EMALCSA (LA CORUÑA) | 0 |
| AQUARA | 0 |

Tabla 27. Modelo 1 Benchmarks DMU eficientes VRS

En las dos tecnologías la DMU más referenciada es Aguas del Añarbe con 14 en escala constante y 9 en escala variable, lo que significa que para todas las empresas ineficientes es referente en ambos casos y el 100% utilizan esta empresa como referente para mejorar. Cuando una unidad eficiente aparece un número elevado de veces, como es este caso de Aguas de Añarbe, se interpreta como una señal de que su eficiencia es genuina. Seguido por Amvisa en CRS que sirve para el 64,28% de las unidades ineficientes y Emasagra en VRS en la cual se reflejan el 66,6% del total de ineficientes. En cambio, tanto Aquara como Emalcsa en el supuesto de tecnología de escala variable ninguna DMU ineficiente se refleja en ella. Son eficientes, pero no

sirven de referente a las demás empresas. Es en este caso cuando se está delante de una observación anómala u "outlier" (Muriel et al. (2008)).

Es interesante también visualizar el porcentaje acumulado de las proyecciones sobre cada unidad eficiente debido a que informará sobre la importancia relativa que puede tener la unidad eficiente en el grupo de referencia de una unidad ineficiente (Figuras 22 y 23).

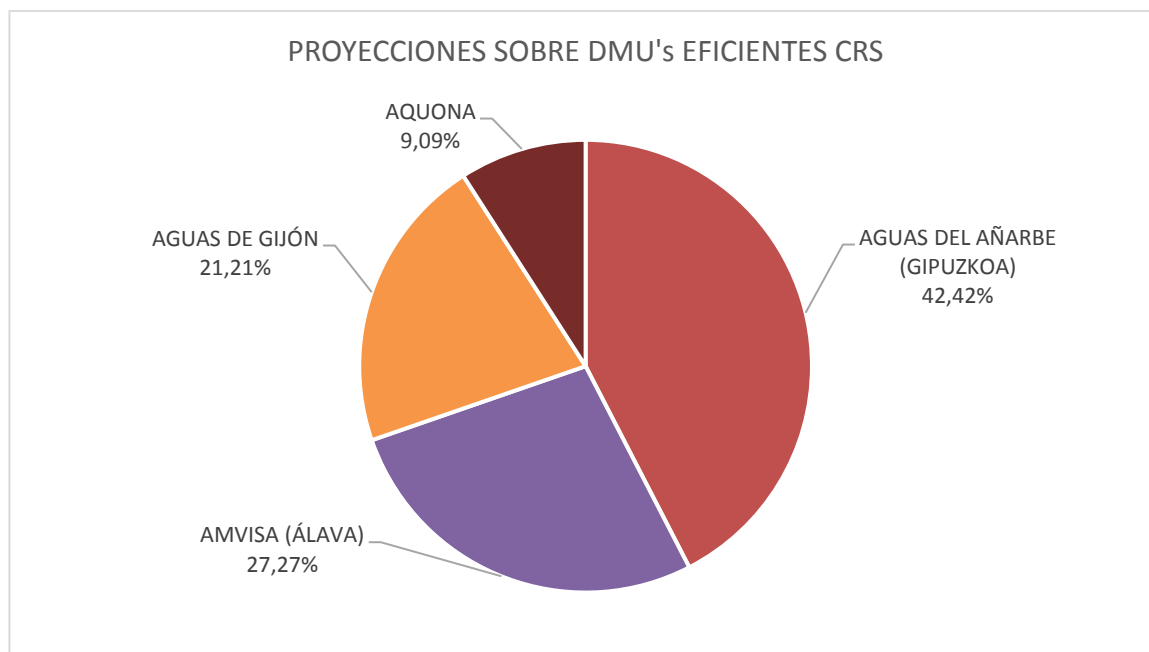


Figura 22. Modelo 1 Gráfico distribución proyecciones CRS

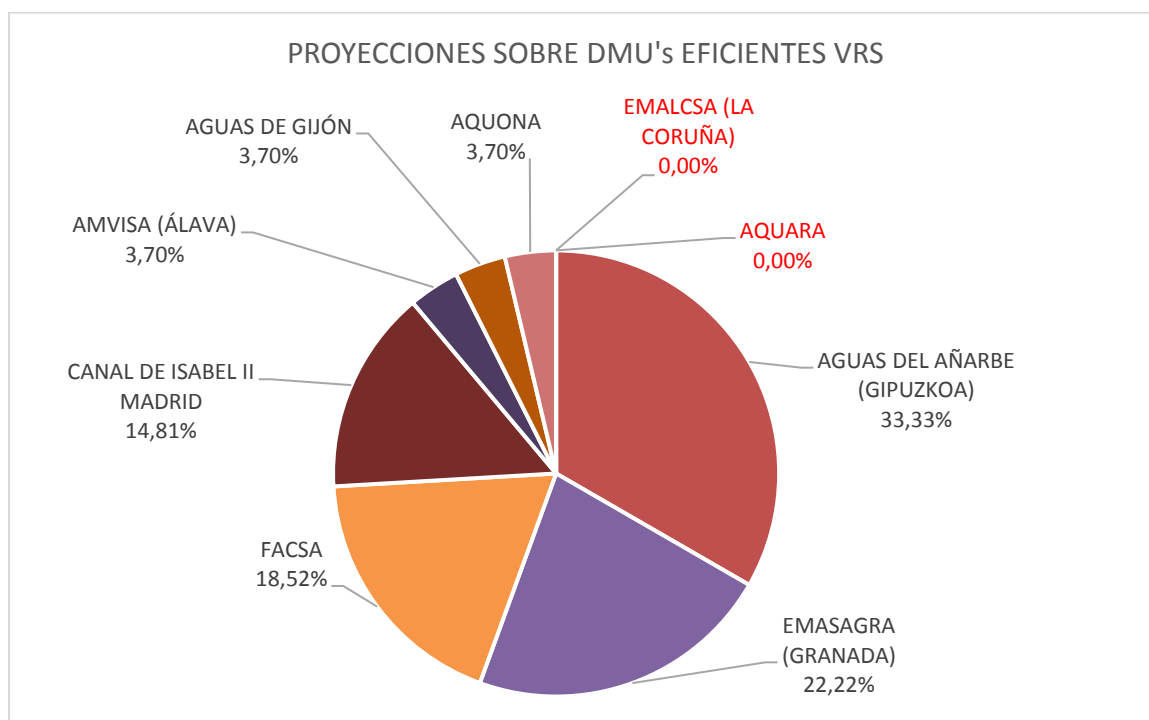


Figura 23. Modelo 1 Gráfico distribución proyecciones VRS

Se puede observar que en el modelo de retorno de escala variable Aguas del Añarbe y Emasagra juntos

componen el 55,55% de las proyecciones y en escala constante Aguas del Añarbe junto a Amvisa y Aguas de León forman el 90,9% queándose Aquona a bastante diferencia de éstas.

Al seguir una orientación de salida donde se busca maximizar los outputs, las DMU’s pueden mejorar su eficiencia manteniendo el número de recursos utilizados para su generación. Para ello se analizan las metas a conseguir por cada empresa calculando primero el target, que son los objetivos de mejora y posteriormente qué porcentaje de mejora tiene la unidad, la meta.

$$\text{TARGET} = (\text{score} * \text{dato}) + \text{holgura}$$

$$\text{MEJORA} = \frac{(\text{Target} - \text{Dato})}{\text{Dato}} * 100$$

Se va a analizar en cada tecnología de cada modelo el output que necesite una mayor cantidad de mejora, siendo en este primero modelo la energía total consumida la salida que tiene mayor promedio de rango de mejora con un 85,80% en escala constante y 81,30% en retorno escala variable (Véase tablas 28 y 29).

| TARGETS CRS-RAD-OUT | | |
|-------------------------|------------------|------------|
| ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA | | |
| DMU INEFICIENTE | TARGET (GWh/año) | MEJORA (%) |
| AGUAS DE ALICANTE | 0,3615 | 89,76 |
| EMAYA | 0,5934 | 95,61 |
| AIGÜES DE BARCELONA | 4,1419 | 99,87 |
| AGUAS DE BILBAO BIZKAIA | 1,4977 | 99,19 |
| FACSA | 0,9514 | 99,26 |
| EMACSA | 0,1798 | 36,67 |
| EMALCSA | 0,1266 | 81,20 |
| EMASAGRA | 0,0984 | 16,75 |
| CANAL ISABEL II MADRID | 5,8184 | 99,96 |
| EMUASA | 0,4454 | 90,13 |
| VIAQUA | 0,9485 | 99,62 |
| GLOBAL OMNIUM | 2,9049 | 99,82 |
| AQUAVALL | 0,3575 | 84,19 |
| AQUARA | 0,2043 | 99,02 |
| PROMEDIO | | 85,80 % |

Tabla 28. Modelo 1 Targets y Mejoras CRS Energía Total Consumida

Se observa que la empresa Canal Isabel II Madrid es la que tiene mayor objetivo de mejora representando un porcentaje de mejora bastante alto de 99,96% y en el lado opuesto está Emasagra que su margen de mejora es de 16,75% sobre su energía consumida total al año. A la luz de los datos arrojados en la tabla 28, todas las empresas ineficientes deben mejorar considerablemente, siendo Emasagra es la empresa que destaca por su escasa mejora respecto al resto.

| TARGETS VRS-RAD-OUT | | |
|----------------------------|------------------|---------------|
| ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA | | |
| DMU INEFICIENTE | TARGET (GWh/año) | MEJORA (%) |
| AGUAS DE ALICANTE | 0,3037 | 87,81 |
| EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 0,2738 | 90,50 |
| AIGÜES DE BARCELONA | 0,3563 | 98,59 |
| AGUAS BILBAO BIZKAIA | 0,3752 | 96,80 |
| EMACSA (CÓRDOBA) | 0,1581 | 27,99 |
| EMUASA (MURCIA) | 0,3020 | 85,40 |
| VIAQUA | 0,2043 | 98,23 |
| GLOBAL OMNIUM | 0,0139 | 64,16 |
| AQUAVALL (VALLADOLID) | 0,3166 | 82,15 |
| PROMEDIO | | 81,30% |

Tabla 29. Modelo 1 Targets y Mejoras VRS Energía Total Consumida

Respecto al modelo de escala variable Aguas de Barcelona es la empresa que debe mejorar en mayor medida con 98,59 % ya que tiene bastante target de mejora (0,3563 GWh/año) y Emacsa la cual debe mejorar un 27,99%.

Calculadas las mejoras que deben realizar las DMU's ineficientes para alcanzar esa perfección, en retorno de escala constante todas las empresas ineficientes se encuadran en unos rangos de mejoras bastante grandes, ninguna por debajo del 80% y con un promedio de 85,80%. El promedio es relativamente parecido al caso anterior, pero con la diferencia de que ahora todas las empresas necesitan mucha mejora (Figuras 24).

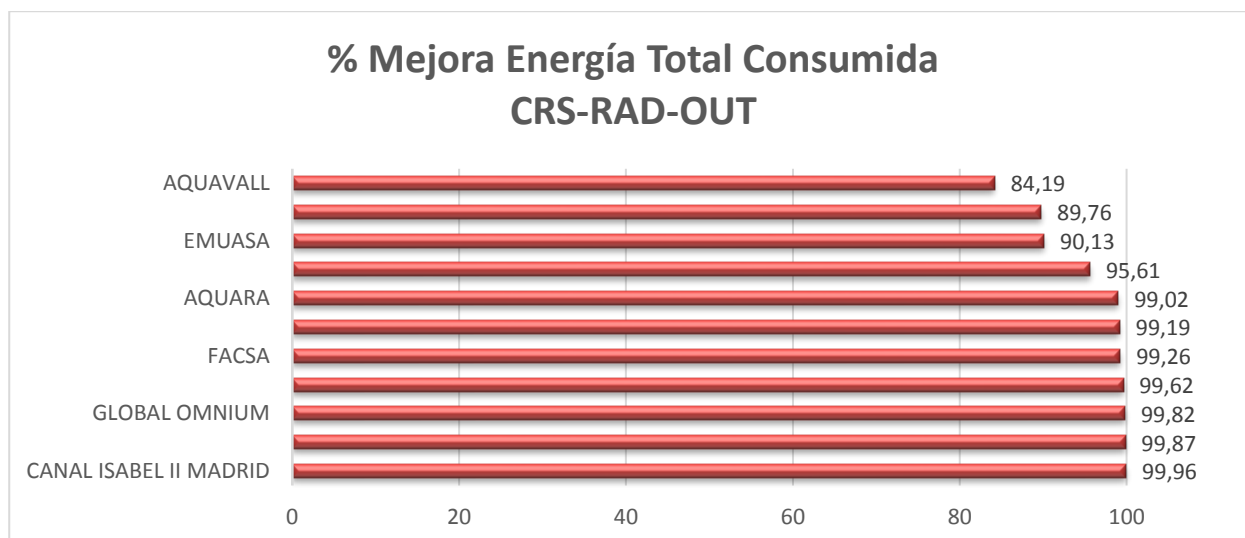


Figura 24. Modelo 1 Porcentaje mejoras CRS Energía Total Consumida

En el caso de las mejoras que deben realizar las DMU's ineficientes en VRS, se contempla que, a excepción de Emacsa, todas deben mejorar mucho su eficiencia para lograr el objetivo deseado ya que sus metas tienen un promedio del 81,30% de rango de mejora (Ver Figura 25).

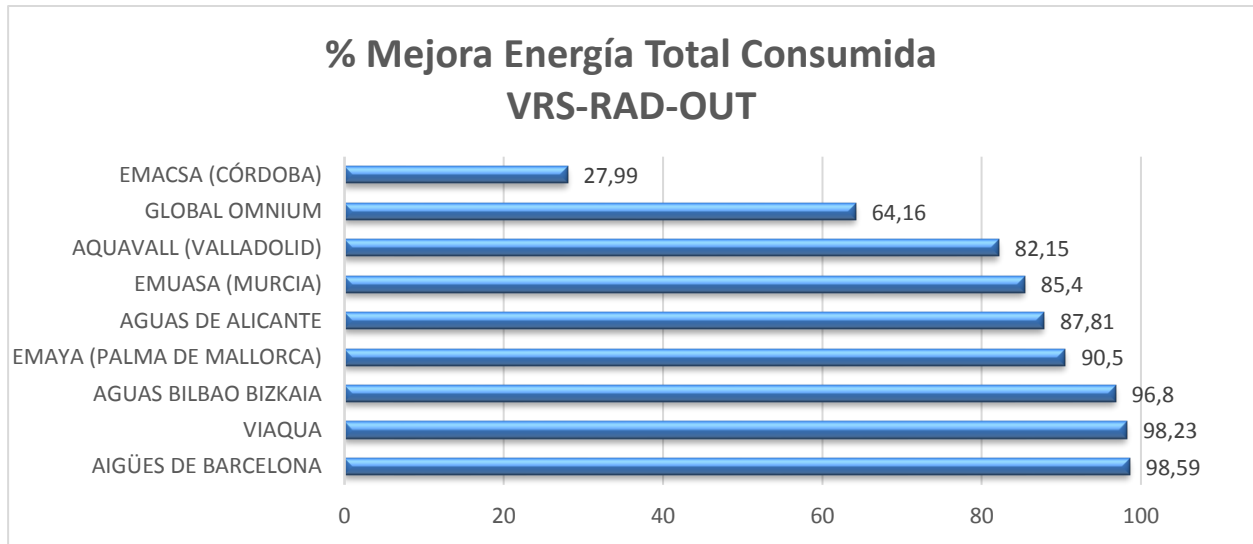


Figura 25. Modelo 1 Porcentaje mejoras VRS Energía Total Consumida

4.2 Modelo 2

Seguidamente se va a analizar el segundo modelo de aprovechamiento, al igual que en modelo 1 los datos de score que arroja EMS toman valores por encima de 100% por tanto para facilitar su interpretación se presenta su inversa, obtenido un dato comprendido entre 0 y 100%.

| RANKING EFICIENCIA CRS-RAD-OUT | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------|-----|--|---------|
| POS | DMU | % | POS | DMU | % |
| 1 | EMPRESA MUNICIPAL DE AGUAS DE GIJÓN | 100 | 14 | FACSA | 85,65 |
| 2 | AIGÜES DE BARCELONA | 100 | 15 | AMVISA (ÁLAVA) | 83,67 |
| 3 | CONSORCIO DE AGUAS BILBAO BIZKAIA | 100 | 16 | AGUAS DE BURGOS | 80,37 |
| 4 | CANAL DE ISABEL II LANZAROTE | 100 | 17 | EMAYA (MALLORCA) | 78,79 |
| 5 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 100 | 18 | EMACSA (CÓRDOBA) | 70,15 |
| 6 | AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 100 | 19 | AGUAS DE ALICANTE | 69,26 |
| 7 | EMASAGRA (GRANADA) | 100 | 20 | VIAQUA | 64,40 |
| 8 | CANAL DE ISABEL II MADRID | 100 | 21 | MANCOMUNIDAD DE LA COMARCA DE PAMPLONA | 57,96 |
| 9 | EMUASA (MURCIA) | 100 | 22 | EMMASA (TENERIFE) | 47,77 |
| 10 | EMASESA (SEVILLA) | 100 | 23 | EMATSA (TARRAGONA) | 46,18 |
| 11 | GLOBAL OMNIUM / AGUAS DE VALENCIA | 100 | 24 | EMASA (MÁLAGA) | 8,29 |
| 12 | AQUAVALL (VALLADOLID) | 100 | 25 | AQUARA | 1,28 |
| 13 | AQUONA | 86,96 | | | |
| PROMEDIO | | | | | 79,23 % |

Tabla 30. Modelo 2 Ranking Score CRS-RAD-OUT

| RANKING EFICIENCIA VRS-RAD-OUT | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|-----|-----|--|--------|
| POS | DMU | % | POS | DMU | % |
| 1 | EMPRESA MUNICIPAL DE AGUAS DE GIJÓN | 100 | 14 | GLOBAL OMNIUM / AGUAS DE VALENCIA | 100 |
| 2 | AIGÜES DE BARCELONA | 100 | 15 | AQUAVALL (VALLADOLID) | 100 |
| 3 | CONSORCIO DE AGUAS BILBAO BIZKAIA | 100 | 16 | EMMASA (STA CRUZ DE TENERIFE) | 98,34 |
| 4 | CANAL DE ISABEL II LANZAROTE | 100 | 17 | AMVISA (ÁLAVA) | 92,69 |
| 5 | FACSA | 100 | 18 | AGUAS DE BURGOS | 90,10 |
| 6 | EMACSA (CÓRDOBA) | 100 | 19 | AQUONA | 89,61 |
| 7 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 100 | 20 | EMAYA (PALMA DE MALLORCA) | 85,42 |
| 8 | AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 100 | 21 | AGUAS DE ALICANTE | 75,00 |
| 9 | EMASAGRA (GRANADA) | 100 | 22 | VIAQUA | 74,20 |
| 10 | CANAL DE ISABEL II MADRID | 100 | 23 | MANCOMUNIDAD DE LA COMARCA DE PAMPLONA | 58,34 |
| 11 | EMUASA (MURCIA) | 100 | 24 | EMASA (MÁLAGA) | 8,39 |
| 12 | EMASESA (SEVILLA) | 100 | 25 | AQUARA | 1,41 |
| 13 | EMATSA (TARRAGONA) | 100 | | | |
| PROMEDIO | | | | | 86,94% |

Tabla 31. Modelo 2 Ranking Score VRS-RAD-OUT

En las tablas 30 y 31 están ordenadas decrecientemente las 25 empresas que conforman este modelo, obteniéndose en el caso de escala constante 12 empresas eficientes, lo que supone un 48% sobre el total de empresas y en escala variable se amplía hasta las 15 unidades eficientes añadiéndose Facsa, Emacsa y Ematsa incrementándose hasta el 60% de las unidades totales.

A simple vista, el promedio de ambas tecnologías se sitúa alejada sólo un 7,70% y no existe una gran variabilidad en los porcentajes de las empresas, han aumentado, pero no hay un claro incremento de unas sobre otras.

En el modelo de escala constante 4 de las 13 empresas ineficientes superan el valor promedio de eficiencia lo que implica un 30,77% sobre las unidades ineficientes y en el caso del modelo de escala variable este valor baja a 16% respecto a las totales. Este dato aumenta al referenciar la escala variable siendo 4 de las 10 DMU's ineficientes las que están en el ranking por encima del promedio suponiendo un 40% sobre las ineficientes y un 16% respecto al total. Por tanto, ambos casos están muy cercanos en cuanto a porcentajes de unidades que han obtenido una eficiencia mejor que el propio promedio y por tanto son buenas para fijarse en ellas y analizar posibles mejoras.

La siguiente gráfica (Figura 25) permite una clara interpretación de los resultados. Se observa una eficiencia media elevada a excepción de Emasa, que cuenta con 8,29% en escala constante y 8,39% en escala variable, y Aquara con unos porcentajes de eficiencia muy escasos de 1,28% y 1,41% respectivamente, lo cual denotaría una preocupación respecto a ambas en temática de aguas depuradas y reutilizadas que son los puntos que se analizan en este modelo.

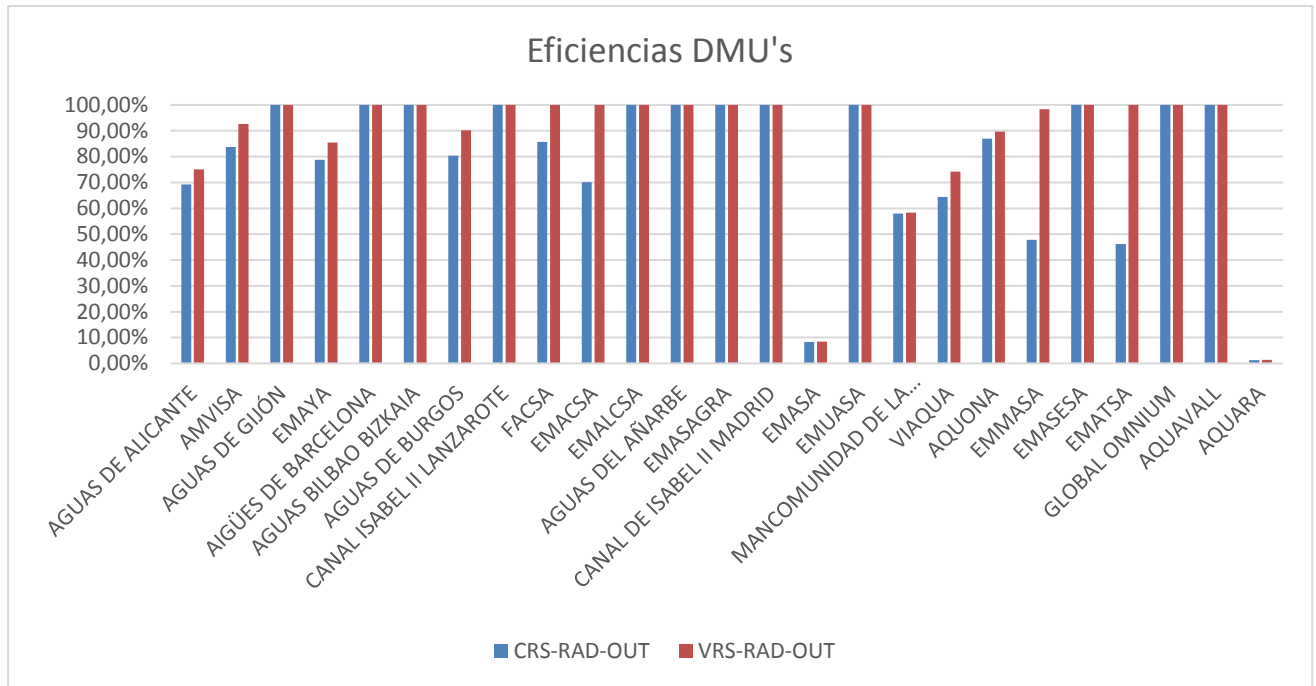


Figura 26. Modelo 2 Gráfica comparación eficiencia DMU's

De forma análoga al caso anterior, se analizarán los benchmark de las DMU's eficientes, integradas en las tablas próximas números 32 y 33 ordenadas de forma decreciente.

| BENCHMARKS CRS-RAD-OUT | |
|------------------------------|------------|
| DMU EFICIENTE | Benchmarks |
| EMALCSA (LA CORUÑA) | 11 |
| AIGÜES DE BARCELONA | 8 |
| EMASAGRA (GRANADA) | 7 |
| EMUASA (MURCIA) | 7 |
| EMASESA (SEVILLA) | 5 |
| AQUAVALL (VALLADOLID) | 3 |
| GLOBAL OMNIUM | 1 |
| AGUAS DE GIJÓN | 0 |
| AGUAS BILBAO BIZKAIA | 0 |
| CANAL DE ISABEL II LANZAROTE | 0 |
| AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 0 |
| CANAL DE ISABEL II MADRID | 0 |

Tabla 32. Modelo 2 Benchmarks DMU eficientes VRS

| BENCHMARKS VRS-RAD-OUT | |
|-----------------------------------|------------|
| DMU EFICIENTE | Benchmarks |
| EMALCSA (LA CORUÑA) | 8 |
| CANAL DE ISABEL II LANZAROTE | 7 |
| AIGÜES DE BARCELONA | 6 |
| EMUASA (MURCIA) | 5 |
| EMASESA (SEVILLA) | 5 |
| EMASAGRA (GRANADA) | 4 |
| FACSA | 2 |
| AQUAVALL (VALLADOLID) | 2 |
| AGUAS DE GIJÓN | 1 |
| AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 1 |
| EMATSA | 0 |
| AGUAS BILBAO BIZKAIA | 0 |
| EMACSA | 0 |
| CANAL DE ISABEL II MADRID | 0 |
| GLOBAL OMNIUM / AGUAS DE VALENCIA | 0 |

Tabla 33. Modelo 2 Benchmarks DMU eficientes CRS

En las dos tecnologías la empresa que tiene un mayor número de unidades ineficientes proyectadas sobre ella es Emalcsa, con 11 unidades en el caso de CRS y 8 en VRS, lo que supone un 84,61% y un 80% en CRS sobre las unidades ineficientes en cada tecnología respectivamente. Tanto en el primer caso como en el segundo (CRS y VRS), 5 de las 12 empresas que son eficientes tienen el benchmark a cero, lo que implica que ninguna de las unidades ineficientes se reflejará en ellas para obter a la eficiencia, lo que se considera un número bastante elevado (41,6% y 33,3% respecto a las unidades eficientes).

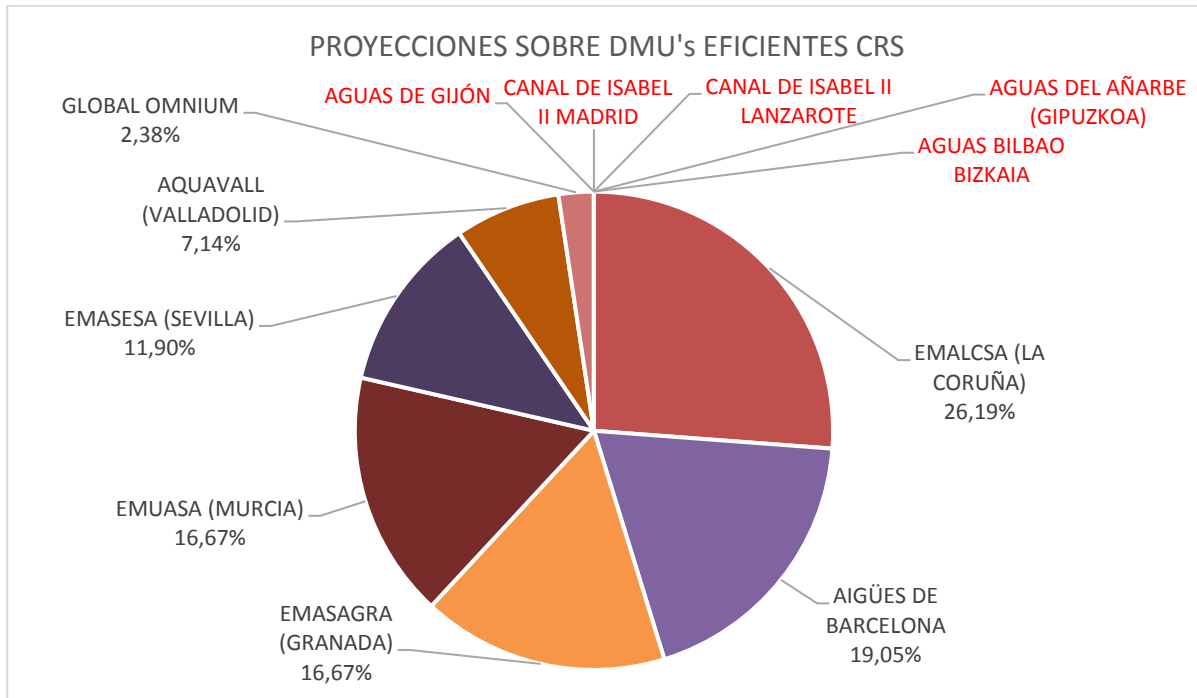


Figura 27. Modelo 2 Gráfico distribución proyecciones CRS

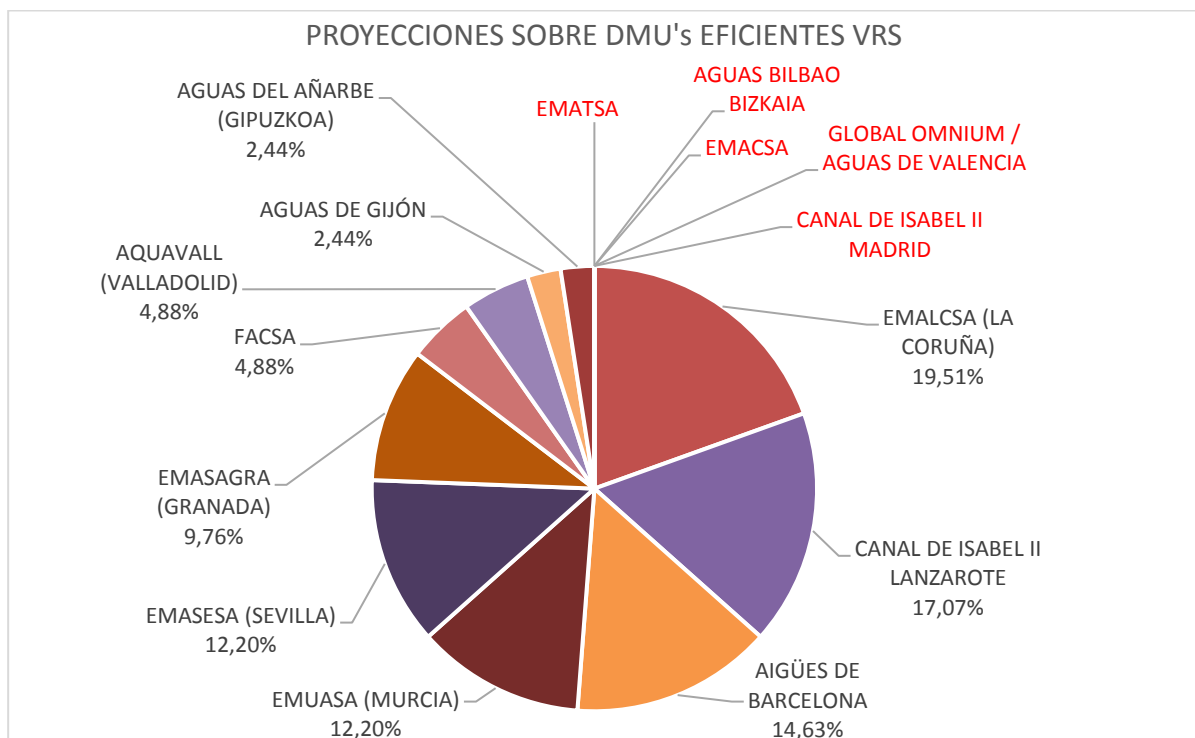


Figura 28. Modelo 2 Gráfico distribución proyecciones VRS

En las figuras 26 y 28 aparece representado el porcentaje acumulado de las proyecciones sobre las unidades eficientes, en color rojo están marcadas las cuales tienen un 0% de acumulado. En la gráfica primera no destaca ninguna DMU por encima de las demás, están Emalcsa, Lanzarote, Aigües de Barcelona, Emuasa y Emasesa situadas entre el 10 y el 20% cada una, está bastante repartido las proyecciones en general en VRS suponiendo este conjunto de empresas el 75.61% del total. En el caso de la gráfica de CRS Emalsa, Aigües de Barcelona, Emasagra, Emuasa y Emasesa son las que se sitúan entre el 10 y 20% de proyección acumulada, representando el 90,48% del total, una cifra bastante elevada pero que de manera disgregada cada empresa aporta relativamente poco.

Una vez analizadas los benchmarks, se procede a calcular los target y mejoras de este modelo.

$$\text{TARGET} = (\text{score} * \text{dato}) + \text{holgura}$$

$$\text{MEJORA} = \frac{(\text{Target} - \text{Dato})}{\text{Dato}} * 100$$

En este modelo ambos outputs tienen unas necesidades parecidas por promedio de mejora, pero es la salida agua reutilizada la que tiene un mayor valor de mejora, aunque por poca diferencia.

| TARGETS CRS-RAD-OUT | | |
|-----------------------|------------------------------|------------|
| AGUA REUTILIZADA | | |
| DMU INEFICIENTE | TARGET (m ³ /año) | MEJORA (%) |
| AGUAS DE ALICANTE | 11,58 | 30,70 |
| AMVISA | 1,23 | 16,30 |
| EMAYA | 6,16 | 21,20 |
| AGUAS DE BURGOS | 4,66 | 19,60 |
| FACSA | 37,95 | 58,60 |
| EMACSA | 3,69 | 29,80 |
| EMASA | 7,85 | 91,70 |
| MANCOMUNIDAD PAMPLONA | 7,99 | 49,40 |
| VIAQUA | 31,79 | 75,50 |
| AQUONA | 1,52 | 50,10 |
| EMMASA | 17,0 | 52,20 |
| EMATSA | 3,59 | 68,10 |
| AQUARA | 7,12 | 98,70 |
| PROMEDIO | | 50,90 % |

Tabla 34. Modelo 2 Targets y Mejoras CRS Agua Reutilizada

A tenor de los datos ofrecidos en la tabla 34, la empresa de saneamiento Amvisa es la que debe mejorar en menor medida para alcanzar la eficiencia deseada, un 16,30% pero las empresas Emasa y Aquara resaltan respecto del resto por tener mucho margen de mejora, 98,70% y 91,70% respectivamente.

| TARGETS VRS-RAD-OUT | | |
|--------------------------------|----------------------|------------|
| AGUA REUTILIZADA | | |
| DMU INEFICIENTE | TARGET ($m^3/año$) | MEJORA (%) |
| AGUAS DE ALICANTE | 10,69 | 25,00 |
| AMVISA | 2,32 | 55,60 |
| EMAYA | 7,53 | 35,60 |
| AGUAS DE BURGOS | 4,16 | 9,90 |
| EMASA | 23,28 | 97,20 |
| MANCOMUNIDAD COMPARCA PAMPLONA | 8,09 | 50,10 |
| VIAQUA | 18,11 | 57,10 |
| AQUONA | 1,37 | 44,40 |
| EMMASA | 8,26 | 1,70 |
| AQUARA | 6,46 | 98,60 |
| PROMEDIO | | 47,50 % |

Tabla 35. Modelo 2 Targets y Mejoras VRS Agua Reutilizada

Según los cálculos obtenidos en la tabla 35 Aquara y Emasa son ambas las que deben mejorar en mayor medida su cantidad de agua reutilizada al año, teniendo unos márgenes de 98,60% y 97,20% respectivamente. La empresa Emmasa ofrece buenos resultados de mejora, ya que únicamente obtiene un 1,7% suponiendo un margen bastante optimista para la empresa.

Una vez calculadas las mejoras de las DMU's ineficientes, se muestran a continuación dos gráficas con los porcentajes de mejora de cada una de las unidades a evaluar. En la primera (Figura 28), las mejoras de las unidades en escala constante destacan Aquara y Aguas de Alicante por tener valores altos de mejora, 98,70% y 91,70%. Respecto al promedio, 5 de las 11 empresas se sitúan por debajo de él siendo éste un 50,90%, representando un 45,45% sobre las ineficientes, valor muy semejante a la tecnología VRS.

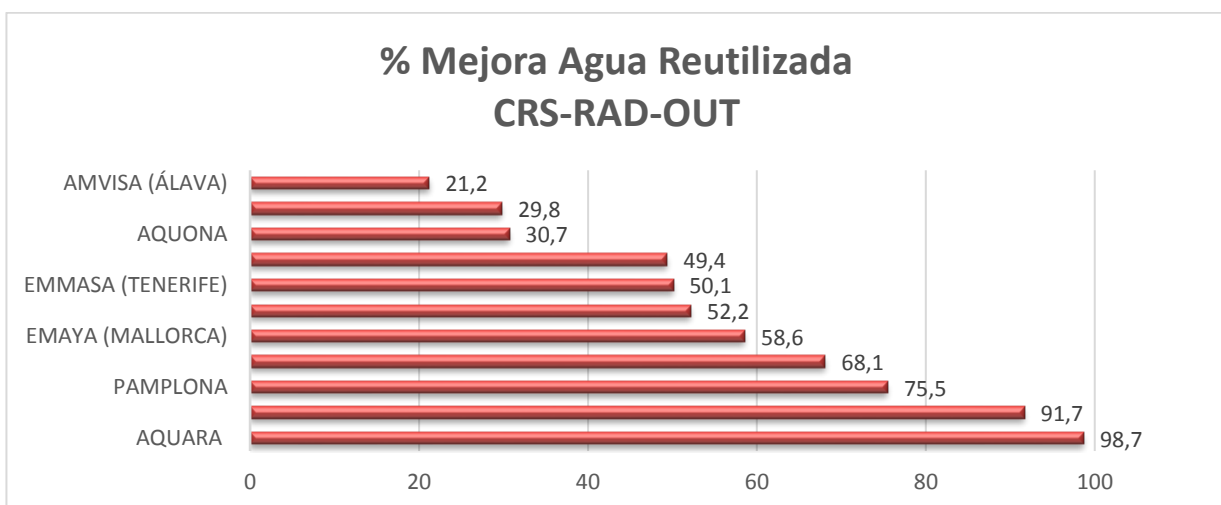


Figura 29. Modelo 2 Porcentaje mejoras CRS Agua Reutilizada

En el segundo caso (Figura 29) Emmasa y Aguas de Burgos tienen un porcentaje de mejora bastante positivo, un 1,7% y un 10%, es relativamente pequeño en comparación con el resto de las unidades. Por contraposición, destacan Aquara y Emasa, las cuales deben mejorar mucho sus datos para llegar a posicionarse como eficientes (98,62% y 97,20% respectivamente). El 50% de las unidades se encuentran por debajo del promedio (47,50%).

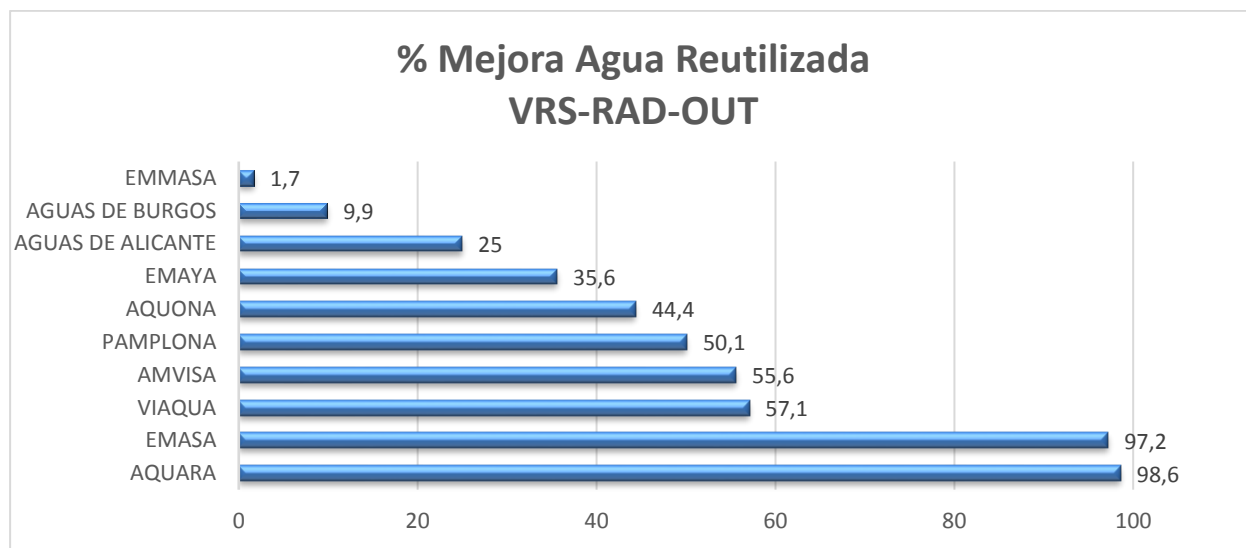


Figura 30. Modelo 2 Porcentaje mejoras VRS Agua Reutilizada

4.3 Modelo 3

Por último, se va a analizar el tercer modelo de sostenibilidad realizando la misma operación que en los dos casos anteriores, es decir, primero se va a invertir el valor de la eficiencia obtenida en EMS mostrándose en las siguientes dos tablas.

| RANKING EFICIENCIA CRS-RAD-OUT | | | | | |
|--------------------------------|--|-------|-----|-----------------------------------|---------------|
| POS | DMU | % | POS | DMU | % |
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 100 | 11 | AGUAS DE BURGOS | 98,19 |
| 2 | AGUAS DE GIJÓN | 100 | 12 | AMVISA (ÁLAVA) | 98,15 |
| 3 | EMACSA | 100 | 13 | AGUAS DE BILBAO BIZKAIA | 80,59 |
| 4 | AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 100 | 14 | EMASESA (SEVILLA) | 76,05 |
| 5 | EMASAGRA (GRANADA) | 100 | 15 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 61,76 |
| 6 | EMUASA (MURCIA) | 100 | 16 | GLOBAL OMNIUM / AGUAS DE VALENCIA | 61,74 |
| 7 | MANCOMUNIDAD DE LA COMARCA DE PAMPLONA | 100 | 17 | AIGÜES DE BARCELONA | 47,95 |
| 8 | AQUONA | 100 | 18 | VIAQUA | 31,91 |
| 9 | AQUARA | 100 | 19 | FACSA | 28,43 |
| 10 | AQUAVALL | 98,43 | 20 | CANAL ISABEL II MADRID | 16,64 |
| PROMEDIO | | | | | 79,94% |

Tabla 36. Modelo 3 Ranking Score CRS-RAD-OUT

| RANKING EFICIENCIA VRS-RAD-OUT | | | | | |
|--------------------------------|--|-----|-----|-----------------------------------|--------|
| POS | DMU | % | POS | DMU | % |
| 1 | AGUAS DE ALICANTE | 100 | 11 | EMASESA (SEVILLA) | 100 |
| 2 | EMPRESA MUNICIPAL DE AGUAS DE GIJÓN | 100 | 12 | AQUAVALL (VALLADOLID) | 100 |
| 3 | AGUAS DE BURGOS | 100 | 13 | AQUARA | 100 |
| 4 | EMACSA | 100 | 14 | VIAQUA | 99,32 |
| 5 | EMALCSA (LA CORUÑA) | 100 | 15 | AMVISA (ÁLAVA) | 99,31 |
| 6 | AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 100 | 16 | FACSA | 98,99 |
| 7 | EMASAGRA (GRANADA) | 100 | 17 | AIGÜES DE BARCELONA | 97,09 |
| 8 | EMUASA (MURCIA) | 100 | 18 | CONSORCIO DE AGUAS BILBAO BIZKAIA | 94,66 |
| 9 | MANCOMUNIDAD DE LA COMARCA DE PAMPLONA | 100 | 19 | GLOBAL OMNIUM / AGUAS DE VALENCIA | 93,13 |
| 10 | AQUONA | 100 | 20 | CANAL DE ISABEL II MADRID | 22,66 |
| PROMEDIO | | | | | 95,26% |

Tabla 37. Modelo 3 Ranking Score VRS-RAD-OUT

Este modelo está conformado por 20 empresas de saneamiento de agua, de las cuales 9 son eficientes en CRS y se amplía hasta las 13 en VRS. Esto implica que un 45% y 65 % de las empresas son eficientes en escala constante y variable respectivamente. La media de las eficiencias de la primera tecnología es el 79,94 % y aumenta hasta el 95,26%, lo que supone un 15,32% más. Respecto a este dato, son 4 de las 11 empresas ineficientes en la tecnología con retorno escala constante las que superan al promedio (36,36%) las cuales son Aquavall, Aguas de Burgos, Amvisa y Aguas de Bilbao. Observando el caso de retorno escla variable siguen siendo 4 las empresas ineficientes con valor superior al promedio, pero respecto a 7, lo que implica un 57,14%. Ambos casos, cuentan con un 20% de las empresas ineficientes sobre el total de las analizadas.

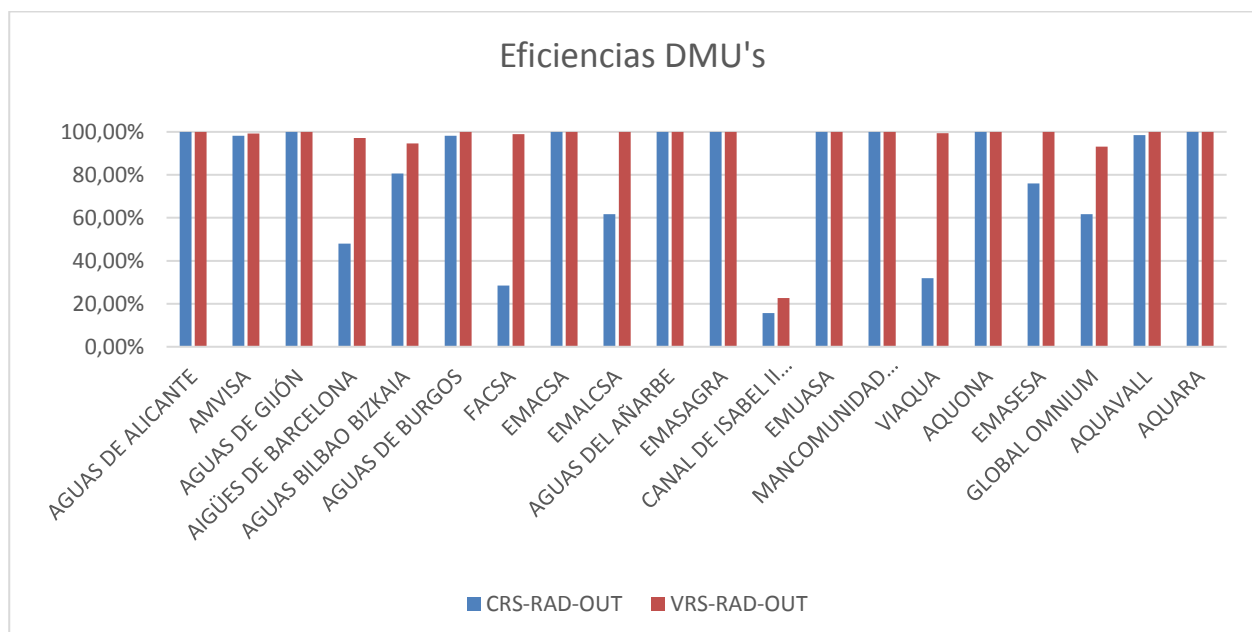


Figura 31. Modelo 3 Gráfica comparación eficiencia DMU's

Se puede observar en la figura número 31 como Canal Isabel II Madrid está muy por debajo del resto respecto a la eficiencia que tiene, un 16,64% en CRS y un 22,66% en VRS, lo cual indica una clara problemática de dicha empresa en cuanto a sostenibilidad respecto al resto. También llama la atención la diferencia que tiene la empresa Facsa, la cual con un 28,43% es la segunda menos eficiente en VRS, pero cambia drásticamente hasta el 98,99% en CRS.

Se presentan a continuación los datos de benchmarks de las empresas eficientes, expuestos los datos en las tablas próximas 38 y 39 ordenadas de forma decreciente para tener al principio de la tabla las que son más utilizadas por las unidades ineficientes. Las empresas Emacsa y Aquara son las que tienen un mayor número de unidades ineficientes que se proyectan sobre ellas, en concreto 8. Teniendo en cuenta el número de unidades ineficientes, es un valor elevado que indica que el 63,63% de las unidades toman como referencias dichas DMU's y el 100% de las unidades en VRS. El menor número de proyecciones son para la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona y Aquona, en CRS, y Aguas de Gijón, Emalcsa y Emasagra en VRS, siendo cero sus valores de benchmark.

| BENCHMARKS CRS-RAD-OUT | |
|-----------------------------|------------|
| DMU EFICIENTE | Benchmarks |
| EMACSA | 8 |
| EMUASA (MURCIA) | 5 |
| AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 4 |
| AQUARA | 3 |
| AGUAS DE ALICANTE | 2 |
| AGUAS DE GIJÓN | 2 |
| EMASAGRA (GRANADA) | 2 |
| MANCOMUNIDAD PAMPLONA | 0 |
| AQUONA | 0 |

Tabla 38. Modelo 3 Benchmarks DMU eficientes CRS

| BENCHMARKS CRS-RAD-OUT | |
|-----------------------------|------------|
| DMU EFICIENTE | Benchmarks |
| AQUARA | 8 |
| AGUAS DE ALICANTE | 7 |
| EMUASA (MURCIA) | 7 |
| AGUAS DE BURGOS | 6 |
| AQUONA | 6 |
| AQUAVALL (VALLADOLID) | 6 |
| EMASESA | 5 |
| EMACSA | 1 |
| AGUAS DEL AÑARBE (GIPUZKOA) | 1 |
| MANCOMUNIDAD PAMPLONA | 1 |
| AGUAS DE GIJÓN | 0 |
| EMALCSA | 0 |
| EMASAGRA (GRANADA) | 0 |

Tabla 39. Modelo 3 Benchmarks DMU eficientes VRS

Estos datos sobre las unidades que se proyectan en las eficientes para mejorar se representan en las figuras 31 y 32 con los porcentajes acumulados. Recordando que los valores marcados en azul son aquellas unidades que cuentan con un 0% de proyección. En retorno de escala constante, Emacsa es la empresa en la que se realizan el mayor porcentaje de proyecciones, un 30,77%, teniendo Aquara, Aguas del Añarbe y Emuasa valores del 19,23%, 15,38% y 11,54% respectivamente. El resto de las empresas tienen unos porcentajes por debajo del 10%. Por otro lado, en retornos de escala variable los datos acumulados están bastante repartidos, no habiendo ninguna empresa que destaque por un mayor valor respecto a las demás.

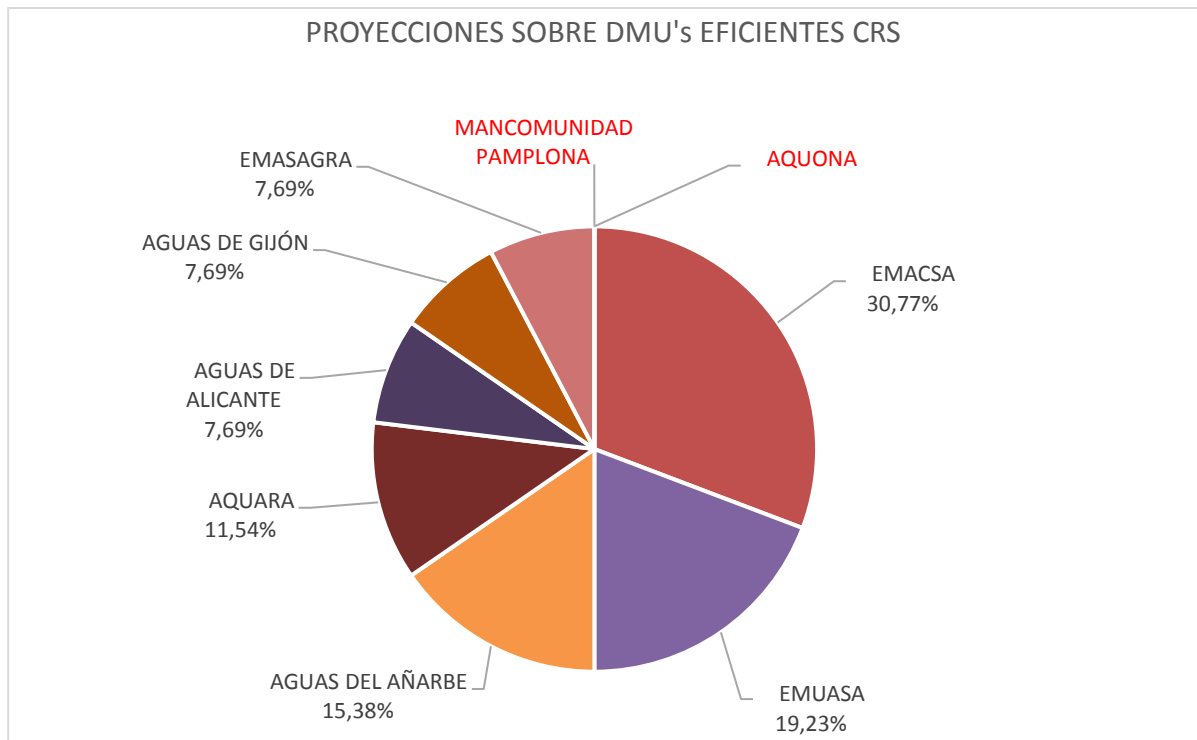


Figura 32. Modelo 3 Gráfico distribución proyecciones CRS

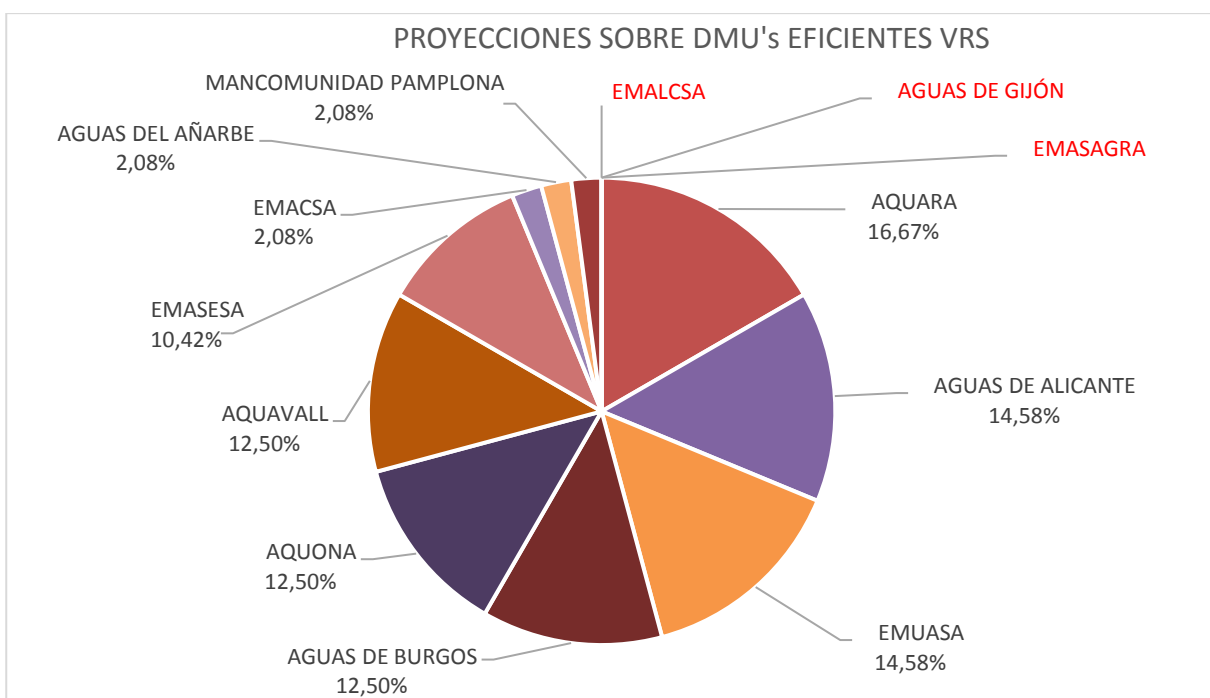


Figura 33. Modelo 3 Gráfico distribución proyecciones VRS

Una vez analizadas los benchmarks, se procede a calcular los target y mejoras de este modelo.

$$\text{TARGET} = (\text{score} * \text{dato}) + \text{holgura}$$

$$\text{MEJORA} = \frac{(\text{Target} - \text{Dato})}{\text{Dato}} * 100$$

Para analizar las mejoras que deben llevar a cabo cada una de las empresas ineficientes en este tercer modelo se observa el promedio calculado en ambas salidas en cada una de las tencologías, donde se observa una diferencia notable entre % Lodos valorizados que en ninguno de los casos sube del 30% de mejoras y el total de emisiones de CO₂, dato que se incrementa notablemente llegando hasta más del 80% de rangos de mejoras. Por ello se va a analizar esta última salida debido a ese gran margen de mejora que tienen sus unidades.

| TARGETS CRS-RAD-OUT | | |
|---------------------------|-----------------------------|------------|
| EMISIONES CO ₂ | | |
| DMU INEFICIENTE | TARGET (Tn Equivalente/año) | MEJORA (%) |
| AMVISA | 0,20 | 1,90 |
| AIGÜES DE BARCELONA | 8,08 | 99,80 |
| AGUAS BILBAO BIZKAIA | 0,14 | 71,40 |
| AGUAS DE BURGOS | 0,24 | 67,10 |
| FACSA | 0,77 | 99,50 |
| EMALCSA | 0,06 | 38,20 |
| CANAL ISABEL II MADRID | 0,17 | 94,30 |
| VIAQUA | 0,80 | 90,00 |
| EMASESA | 0,24 | 68,80 |
| GLOBAL OMNIUM | 0,18 | 58,90 |
| AQUAVALL | 0,12 | 1,60 |
| PROMEDIO | | 62,90 % |

Tabla 40. Modelo 3 Targets y Mejoras CRS Emisiones CO₂

Destacan en la tabla anterior las empresas Amvisa y Aquavall por tener mejoras del 1,90% y 1,60% respectivamente, datos muy reducidos que denotan el escaso valor de emisiones que deben reducir para obtener la eficiencia. En cambio, Facsa y Aigües de Barcelona deben mejorar considerablemente para llevar a ese nivel deseado de eficiencia, teniendo que mejorar en más de un 99% ambas empresas.

| TARGETS VRS-RAD-OUT | | |
|------------------------|-----------------------------|------------|
| EMISIONES CO_2 | | |
| DMU INEFICIENTE | TARGET (Tn equivalente/año) | MEJORA (%) |
| AMVISA | 0,20 | 0,68 |
| AIGÜES DE BARCELONA | 1,44 | 99,10 |
| AGUA BILBAO BIZKAIA | 3,17 | 98,70 |
| FACSA | 1,69 | 99,80 |
| CANAL ISABEL II MADRID | 1,89 | 99,50 |
| VIAQUA | 1,61 | 95,00 |
| GLOBAL OMNIUM | 2,90 | 97,40 |
| PROMEDIO | | 84,30 % |

Tabla 41. Modelo 3 Targets y Mejoras VRS Emisiones CO_2

Observando los datos obtenidos en retorno de escala variable en referencia a las mejoras en cuestión de emisiones de CO_2 , resalta la empresa Amvisa por su porcentaje de mejora tan bajo de un 0,68% y el resto de las empresas tienen ese margen bastante elevado de más del 95%.

Calculadas las mejoras de las DMU's ineficientes, se muestran a continuación dos gráficas representando los porcentajes de mejora de cada una de las unidades a evaluar. En la primera (Figura 33) Aquavall y Amvisa tienen un porcentaje de mejora bastante positivo, un 1,6% y un 1,9%. Por contraposición, destacan Viaqua, Canal Isabel II Madrid, Facsa y Aigües de Barcelona debiendo mejorar sus datos notablemente para llegar a posicionarse como eficientes (90%, 94,3%, 99,5% y 99,8% respectivamente). Únicamente 2 de las 11 empresas se encuentran por debajo del 62,90% (promedio), suponiendo el 18,18%.

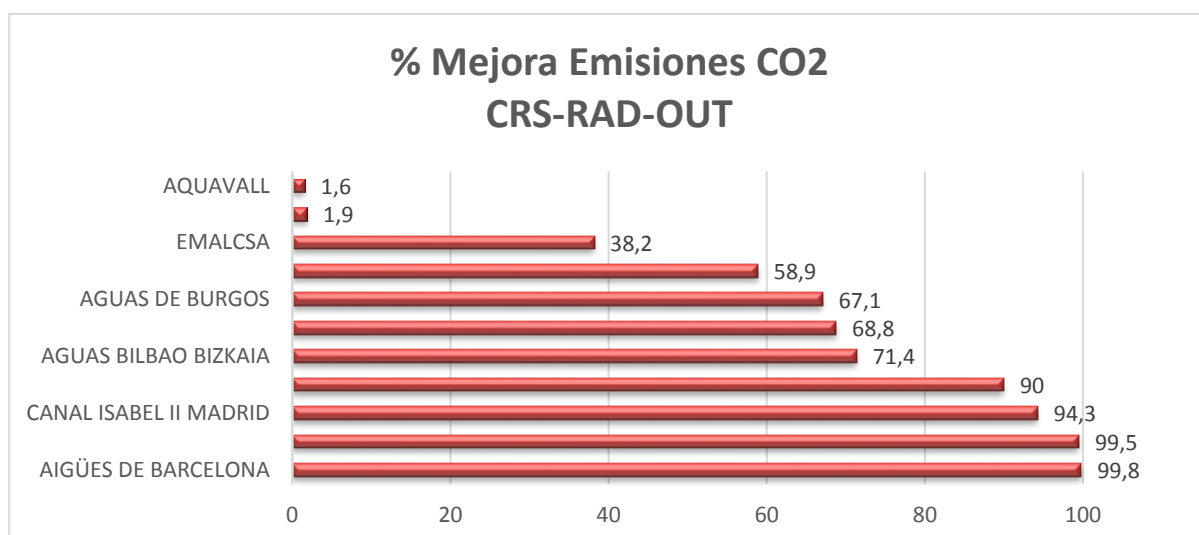


Figura 34. Modelo 3 Porcentaje mejoras CRS Emisiones CO_2

En las mejoras de las unidades en VRS destaca muy positivamente Amvisa con solo un 0,7% de mejora. Además, es ésta la única empresa que se sitúa por debajo del promedio, estando el resto por encima y teniendo que mejorar como mínimo en un 95% la empresa que tiene el valor más bajo.

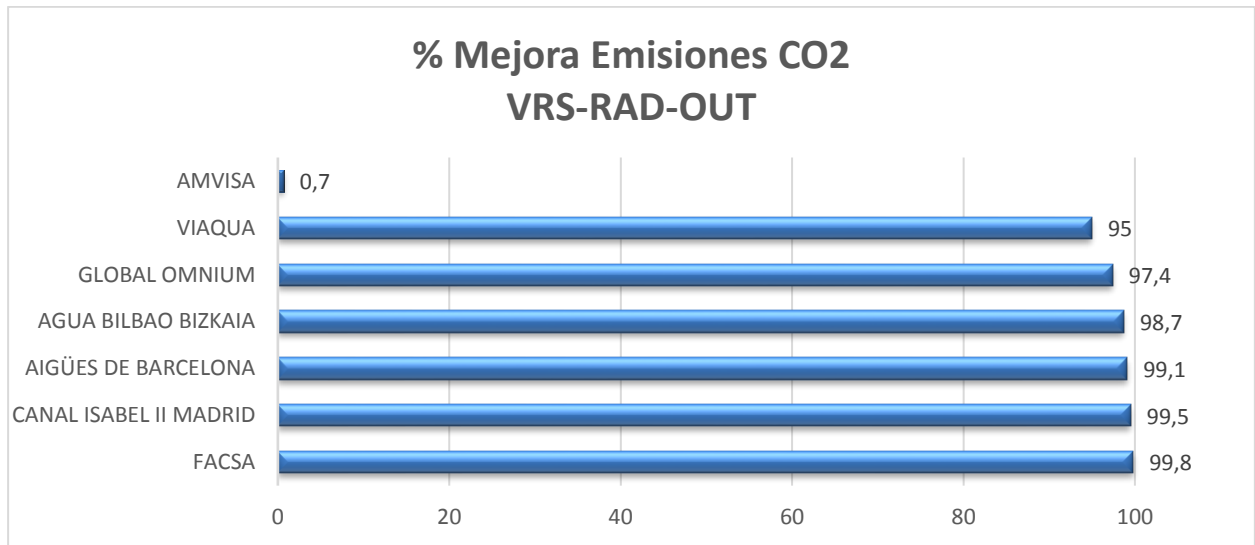


Figura 35. Modelo 3 Porcentaje mejoras VRS Emisiones CO₂

5 CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha analizado la eficiencia de las principales empresas de saneamiento de agua de España. Para ello se ha utilizado la metodología de análisis por envoltura de datos, DEA. Se ha hecho el análisis para conocer la eficiencia desde tres perspectivas. Tras el análisis se puede concluir que la metodología que se aplicó para dicho análisis ha sido la correcta, debido a que se ha podido realizar una clasificación de las unidades en eficientes e ineficientes, además de realizar diversos análisis más detallados en cada una de las perspectivas abordadas.

Este análisis se ha enfocado en tres direcciones, comparando variables distintas en cada uno de los modelos. Esto permite detectar que algunas empresas que son muy eficientes en un campo, no lo sean en otro, como es el ejemplo de Global Omnium o Ematsa, que son eficientes en el modelo 2 pero ineficientes en el resto. El haber realizado tres modelos da una visión más detallada del punto donde las empresas ineficientes necesitan focalizar sus esfuerzos para mejorar.

Tras el análisis de los datos obtenidos, lo primero que cabe destacar es que las empresas Aguas del Añarbe y Aguas de Gijón son las dos únicas empresas que son eficientes en los tres modelos, tanto en el caso de tecnología con retorno de escala constante y variable. Por lo que ambas unidades productivas son completamente eficientes, operando en el tamaño de escala óptimo eficiente.

Un segundo punto para identificar es la ineficiencia de las empresas del modelo 1 orientado a la gestión económica respecto a los otros dos modelos. Es aquí donde las tecnologías utilizadas obtienen valores de eficiencia casi un 30% menor respecto a los modelos 2 y 3, un 59,31% en concreto. Esto se debe al output de consumo de energía en todo el ciclo integral del agua donde las empresas tienen unos rangos de mejoras de más del 80% en promedio. La energía que se consume en el proceso de saneamiento también obtiene rangos de mejoras del 75,98% y 66,29% en CRS y VRS respectivamente. Estas instalaciones son las principales consumidoras de energía en ciclo integral del agua, suponiendo en torno a un 65%, por lo cual se debe prestar especial atención. Este consumo excesivo se debe al tamaño de la EDAR y de la población a la que da servicio, centrando su mayor parte de consumo eléctrico en el proceso de depuración por los sistemas de aireación que utilizan. Aguas de Alicante, Aguas de Bilbao, Canal de Isabel II Madrid y Aigües de Barcelona son las empresas que tienen mayores rangos de mejoras, siendo estas últimas tres de las cinco empresas que dan servicio a un mayor número de habitantes en el proceso de saneamiento (1.234.285, 5.680.102 y 3.386.008 respectivamente). En cambio, Aguas de Alicante sólo da servicio a 366.967 personas, pero consume más energía que el resto de las empresas citadas. Es aquí donde entraría a evaluarse las instalaciones de las que disponen las EDAR, ya que disponer de instalaciones nuevas para el tratamiento de aguas residuales y fomentar la investigación en este campo supondría una mejora clara y evidente en la eliminación de contaminantes, consiguiendo así una reducción del consumo energético y de costes.

Los dos modelos restantes disponen de unos valores en promedio de la eficiencia de sus unidades del 83,08% y del 87,6% respectivamente, considerándose una desviación estándar del 15,20% entre los tres modelos analizados. Esto ya supone un aumento considerable respecto al modelo 1, lo que implica que las empresas de saneamiento obtienen mejores datos a la hora de depurar el agua captada o valorizar los lodos gestionados. La cantidad de agua que deben reutilizar las empresas ineficientes se sitúa entorno al 50% de mejora, pero difieren mucho ya que Aquara y Emasa deben hacerlo en un 98% y 91% respectivamente y, en contraposición, está la empresa Amvisa con una mejora del 16,30%. Esta situación de extremos a la hora de necesidad de mejora en las empresas ineficientes también se visualiza en el tercer modelo, teniendo empresas como Aigües de Barcelona, Canal Isabel II Madrid o Facsa con valores de mejora del 99%, una ineficiencia máxima respecto a las emisiones de CO₂ que emiten, y estando Amvisa con un 0,68%. Si bien es verdad, que cada día se tiene más consciencia y compromiso a la hora de mejorar los datos de la huella de carbono, muchas empresas están lejos de obtener datos de reducciones deseados debido a la importante inversión que requerirían las instalaciones.

Es por todo esto que muchas empresas son eficientes a la hora de gestionar el sistema de saneamiento y depuración y obtener los mejores datos o valores, pero las que no son eficientes obtienen valores muy deficientes, es decir, tienen unos rangos de mejoras muy altos. Si bien es conocido que España se sitúa a la cabeza de Europa en temática de reutilización del agua, pero sólo un 10,4% del total. Este dato es muy dispar en el territorio nacional, entonces habría que ver el motivo real por el cual algunas empresas son capaces de llegar a reutilizar grandes cantidades de agua, o empresas como Aquona que no llegan ni al 2% sobre el total depurado.

En cuanto a porcentaje de lodos valorizados los datos son optimistas, debido a que tienen un campo de mejora del 36,5% o del 13,5%, según la tecnología utilizada, pero son cantidades respecto al resto de outputs que cuentan con mejores resultados por parte de las empresas.

Concluyendo, los datos invitan a una revisión de las actuaciones por parte de muchas empresas de saneamiento para mejorar los datos de eficiencia, tienen un amplio margen para conseguir unos resultados mejores. Sería interesante focalizarse en esas empresas y ver los motivos exactos por los que no consiguen buenos resultados en algunos ámbitos. Cabe hacer mención, que muchas empresas no muestran sus datos en relación con sus actividades en la gestión del ciclo integral del agua, por consiguiente, podría haber un mayor número de empresas que requerirían de mejoras en sus sistemas.

REFERENCIAS

1. A. Charnes, W. W. Cooper, and E. L. Rhodes, “Measuring the efficiency of decision making units,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 2, no. 6, pp. 429–444, 1978.
2. A. Charnes, W. W. Cooper, A. Y. Lewin, L. M. & Seiford, “Data Envelopment Analysis Theory, Methodology and Applications”. *Journal of the Operational Research Society*, vol 48, nº 3, pp. 332-333. (1997)
3. R. Banker, A. Charnes y W. Cooper, “Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis,” *Manag. Sci.*, no. 30, 1984.
4. M. Farrell, The measurement of productive efficiency *J. Royal stat. soc. series A (General)* 120 (1957) 253-290.
5. V. Coll Serrano and O. M. Blasco Blasco, *Evaluación de la eficiencia mediante el análisis envolvente de datos. Introducción a los modelos básicos*. Universidad de Valencia, 2006.
6. G. Villa Caro, “Análisis por envoltura de datos (DEA) nuevos modelos y aplicaciones.” Universidad de Sevilla, Sevilla, 2003.
7. Instituto Nacional de Estadística, “Instituto Nacional de Estadística (INE). <https://www.ine.es/index.htm>