

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

**Una solución de compromiso para el reparto de
costes del agua en una zona acotada del
Guadalquivir.**

Autor: Eduardo Moyano García

Tutores: Andrés Jiménez Losada
Manuel Ordóñez Sánchez

**Dep. De Matemática Aplicada II
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Una solución de compromiso para el reparto de costes del agua en una zona acotada del Guadalquivir.

Autor: Eduardo Moyano García

Tutores: Andrés Jiménez Losada

Manuel Ordóñez Sánchez

Departamento de Matemática Aplicada II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Grado: Una solución de compromiso para el reparto de costes del agua en una

zona acotada del Guadalquivir.

Autor: Eduardo Moyano García

Tutores: Andrés Jiménez Losada

Manuel Ordoñez Sánchez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mis tutores, Andrés y Manuel, su amabilidad, implicación, colaboración y valiosísima ayuda durante toda la elaboración del trabajo. Sin duda, la realización de este proyecto no hubiera sido posible sin ellos y sin las molestias que por mi se han tomado.

También quiero acordarme de quiénes han sido fundamentales en esta etapa en la escuela: mis amigos. Principalmente a mis amigos Jesús, Miguel, Tomás y Gabriel con los que he compartido tantísimas horas de clases, prácticas y biblioteca, pero sin olvidarme de los momentos de descanso y de deporte que con ellos he disfrutado. Mis años en la escuela no hubieran significado tanto para mí si ellos no hubiesen estado siempre ahí.

Para terminar, quisiera agradecer también a mi familia todo el apoyo que me han mostrado tanto en los buenos como en los malos momentos. Siempre dándome ánimos y haciéndome ver el lado bueno de las cosas cuando yo no lo veía. Siempre contentos con mi esfuerzo y no dándole tanta importancia a los resultados.

Eduardo Moyano García

Sevilla, 2018

Resumen

En este trabajo hemos dado un posible reparto de los costes a un conjunto de cuatro agentes que emplean las diversas infraestructuras hidrográficas que están a su servicio en una zona determinada del río Guadalquivir. Para ello hemos empleado la teoría de juegos cooperativos y en particular hemos usado un valor conocido como valor de compromiso.

El valor de compromiso es definido como un reparto del costo total común del servicio que se encuentra entre las mejores y peores expectativas de pago. El valor de compromiso sólo puede ser calculado para ciertos juegos. Se construirá un juego cooperativo representando la situación y para ello los distintos agentes involucrados en el problema se agruparán según sus intereses. Se probará que dicho juego es admisible para el valor de compromiso.

Hemos distinguido 4 tipos de agentes que llamaremos jugadores siguiendo la teoría de juegos.

- Usos urbanos (Jugador 1): representados por las unidades de demanda urbana de Sevilla, Dos Hermanas, Córdoba y Huelva abastecidos por las empresas Emasesa, Emacsa y Aguas de Huelva respectivamente. Se agrupan en el primer jugador por ser los puntos urbanos seleccionados con más agua requerida para satisfacer el abastecimiento de la población.
- Usos semiurbanos (Jugador 2): representados por los usuarios de demanda de agua urbana de Utrera, Lebrija, Aracena y Almodóbar del Río los cuales son abastecidos por la empresa Aguas de Huesna, el embalse de Aracena y el pantano de La breña II respectivamente. Situadas en las provincias de Sevilla, Huelva y Córdoba.
- Usos agrícolas (Jugador 3): representados por los Campos de cultivo de Girasol, situados al norte de la localidad de Sevilla, por otro lado Los Palacios y Villafranca, situado al sur, La Sierra Norte (Hornachuelos) de Sevilla y Córdoba y la Campiña Sur Cordobesa (Comarca de pueblos cordobeses). Los dos primeros abastecidos por el embalse de Huesna, aunque los Campos de Girasol también son abastecidos por el embalse de Melonares por ser un área mucho más extensa. Por otro lado la Sierra Norte será abastecida por el embalse de Bembézar y la Campiña Sur por el pantano de La breña II, ambos situados en Córdoba.
- Usos agrícolas especiales (Jugador 4): formado por el municipio de Coría del Río, el cual se abastece del embalse de Melonares. Éste tiene la particularidad de que para llegar el agua hasta este punto se utiliza el canal, aspecto que tendrá una gran influencia en los

aspectos económicos.

El resultado de nuestro análisis es que si los jugadores 3 y 4 quieren usar todas las infraestructuras su coste duplicaría al individual pero como compensación tendría más seguridad en cuanto a recursos disponibles. Los jugadores 1 y 2 podrían perfectamente apoyar la cooperación ya que su coste sería inferior, aunque ligeramente, al que tendrían individualmente. Todo radica en la decisión de 3 y 4 sobre el acceso a más cantidad. Si cooperan estaría justificado debido a que son zonas agrícolas importantes que no pueden permitirse una escasez prolongada debido al tipo de cultivo.

Abstract

In this work we have tried to give a possible distribution of costs to a group of four players who use the different hydrographic infrastructures that are at their service. For this we have used the theory of cooperative games and in particular we have used a value known as tau-value.

The τ -value is defined as the efficient assignment τ , i.e. $\sum_{i=1}^n \tau_i = v(N)$, such that $\tau = m + \alpha(M - m)$ for some α , where M and m are the payments of utopia and the vector of respective minimum rights. The τ -value can only be calculated for admissible commitment games.

We have distinguished 4 types of players:

- Urban uses (Player 1): represented by the urban demand units of Seville, Dos Hermanas, Córdoba and Huelva supplied by the companies Emasesa, Emacsa and Aguas de Huelva respectively. They are grouped in the first player because they are the selected urban points with more water required to satisfy the population's supply.
- Semi-urban uses (Player 2): represented by users of urban water demand in Utrera, Lebrija, Aracena and Almodóbar del Río, which are supplied by the company Aguas de Huesna, the Aracena reservoir and the La Breña II reservoir respectively. Located in the provinces of Seville, Huelva and Córdoba.
- Agricultural uses (Player 3): represented by the Sunflower cultivation fields, located north of the town of Seville, on the other hand Los Palacios y Villafranca, located to the south, the northern sierra (Hornachuelos) of Seville and Córdoba and La Campiña South Córdoba (District of Cordovan towns). The first two are supplied by the Huesna reservoir, although the Sunflower Fields are also supplied by the Melonares reservoir because it is a much more extensive area. On the other hand, the northern Sierra will be supplied by the Bembézar reservoir and the South Campiña by the La Breña II reservoir, both located in Córdoba.
- Special agricultural uses (Player 4): formed by the municipality of Coría del Río, which is supplied by the Melonares reservoir. This has the particularity that to get the water to this point the channel is used, an aspect that will have a great influence on the economic aspects.

Once the cost game has been calculated e compute the saving game as the sum of the

individual costs of the coalition players minus the cost of the coalition itself.

Next we calculate the tau-value for this saving game. Finally, the individual cost is computed as the individual cost minus the tau-value.

Índice

1.	Introducción.....	18
2.	Financiación del servicio del agua	19
2.1.	<i>El marco normativo europeo.....</i>	19
2.1.1.	Directiva Marco de Aguas	19
2.1.2.	Artículo 5. Análisis económico del uso del agua.....	19
2.1.3.	Artículo 9. Recuperación del coste de los servicios.....	19
2.1.4.	Artículo 11. Programa de medidas	20
2.1.5.	Anexo III. Contenidos del análisis económico.....	20
2.2.	<i>Organización de los servicios del agua en España</i>	21
2.2.1.	Servicios de captación, embalse y transporte	22
2.2.2.	Servicios de abastecimiento, alcantarillado y depuración de aguas urbanas.....	22
2.2.3.	Servicios de distribución del agua de riego.....	22
2.3.	<i>Régimen económico-financiero de las aguas continentales en España</i>	23
3.	La teoría de juegos cooperativos	24
3.1.	<i>Juegos cooperativos.....</i>	24
3.1.1.	Concepto de juego cooperativo.....	24
3.1.2.	Soluciones de juegos cooperativos.....	24
3.1.3.	Un ejemplo de juego cooperativo.	25
3.2.	<i>El valor de compromiso.....</i>	27
3.2.1.	Un ejemplo de juego cooperativo	29
3.3.	<i>Juegos de repartos de costos.....</i>	29
4.	Explicación de la metodología	33
4.1.	<i>Análisis del sistema hídrico.....</i>	34
4.2.	<i>Definición del juego cooperativo.....</i>	34
4.3.	<i>Cálculo de la función característica.....</i>	35
4.3.1.	Solución del juego cooperativo.....	35
5.	Aplicación de la metodología al caso del río Guadalquivir	36
5.1.	<i>El sistema hídrico del río Guadalquivir.....</i>	36
5.1.1.	Descripción general del sistema	37

5.1.2.	Prioridades y reglas de gestión	40
5.1.3.	Demandas del Sistema	40
5.1.4.	Tomas fuera de comisión de desembalse	42
5.1.5.	Infraestructuras presentes en el Sistema.....	43
5.2.	<i>Caracterización económica de la cuenca</i>	43
5.3.	<i>Cálculo de las funciones de coste</i>	44
5.3.1.	Embalses	44
5.3.2.	Canales.....	54
5.3.3.	Bombeos.....	55
5.3.4.	Reutilización de las aguas residuales del área urbana	57
5.3.5.	Desalinización	57
5.3.6.	Laminación de avenidas	58
5.4.	<i>Definición del juego y formación de las coaliciones</i>	61
5.4.1.	Demandas consuntivas.....	62
5.5.	<i>Aplicación del modelo de optimización</i>	62
5.5.1.	Aclaraciones del modelo	63
5.5.2.	Optimización de las coaliciones	66
5.5.3.	Función característica	73
5.5.4.	El juego de ahorro	76
5.5.5.	Asignación de costes.....	76
6.	Conclusiones	79
7.	Referencias	80
8.	Glosario	82

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Organización de los servicios del agua en España (MIMAM, 2007)	21
Tabla 5.1. Demandas por municipios del río Guadalquivir	41
Tabla 5.2. Características del embalse del Huesna	44
Tabla 5.3 Características del embalse de Melonares	45
Tabla 5.4 Características del embalse de Aracena	47
Tabla 5.5. Características del embalse de Zufre	48
Tabla 5.6. Características del embalse de Bembezar	50
Tabla 5.7. Características del embalse de San Rafael de Navallana	51
Tabla 5.8. Características del embalse de La Breña II	53
Tabla 5.9. Costes bombeos en Sevilla	57
Tabla 5.10. Abastecimiento de agua	64
Tabla 5.11. Precios unitarios	65
Tabla 5.12. Coalición 1	67
Tabla 5.13. Coalición 2	67
Tabla 5.14. Coalición 3	67
Tabla 5.15. Coalición 4	68
Tabla 5.16. Coalición 12	68
Tabla 5.17. Coalición 13	69
Tabla 5.18. Coalición 14	69
Tabla 5.19. Coalición 23	70
Tabla 5.20. Coalición 24	70
Tabla 5.21. Coalición 34	71
Tabla 5.22. Coalición 123	71
Tabla 5.23. Coalición 124	72
Tabla 5.24. Coalición 134	72

Tabla 5.25. Coalición 234	73
Tabla 5.26. Función característica	75
Tabla 5.27. Juego ahorro	76
Tabla 5.28. Tau valor	77
Tabla 5.29. Costo vía el tau-valor	78

Índice de Figuras

Figura 3.1. Núcleo del juego v	27
Figura 4.1. Esquema de la metodología	33
Figura 5.1. Consumo del agua del río Guadalquivir	42
Figura 5.2. Planos del embalse del Huesna	45
Figura 5.3. Planos del embalse de Melonares	46
Figura 5.4. Planos del embalse del Aracena	48
Figura 5.5. Planos del embalse de Zufre	49
Figura 5.6. Planos del embalse de Bembezar	51
Figura 5.7. Planos del embalse de San Rafael de Navallana	52
Figura 5.8. Planos del embalse de la Breña II	54
Figura 5.9. Función de coste, Canal del Bajo Guadalquivir	55
Figura 5.10. Parametrización de costes (MIMAM, 2002)	56
Figura 5.11. Volumen anual del embalse Huesna	58
Figura 5.12. Volumen anual del embalse de Melonares	58
Figura 5.13. Volumen anual del embalse de Aracena	59
Figura 5.14. Volumen anual del embalse de Zufre	59
Figura 5.15. Volumen anual del embalse de Bembézar	60
Figura 5.16. Volumen anual del embalse de San Rafael de Navallana	60
Figura 5.17. Volumen anual del embalse de la Breña II	61
Figura 5.18. Esquema de abastecimiento	63
Figura 5.19. Gráfico de coaliciones y su coste	75
Figura 5.20. Tau-valor y su pertenencia al core	78

1. INTRODUCCIÓN.

Sin duda, el agua, es uno de los recursos indispensables para que el hombre pueda subsistir. De ahí que, a lo largo del siglo pasado principalmente, se haya pensado tanto sobre como obtener el agua de forma eficaz y se hayan construido numerosas infraestructuras para su disposición.

Por otro lado, los cambios demográficos y sociales y los avances tecnológicos ocurridos en el último siglo han puesto a prueba a los distintos gobiernos, que tenían que asegurar el abastecimiento eficiente de las diversas poblaciones así como del sector industrial y agrario.

En cuanto al abastecimiento del agua, los principales problemas que se encuentran en la actualidad son: la poca importancia que la mayoría de los ciudadanos otorgan a la ecología, la falta de infraestructuras en los países menos desarrollados y el elevado coste del agua en otras zonas del mundo.

Además los gobiernos de los distintos países así como los organismos financieros europeos han elaborado nuevas políticas más restrictivas, lo que provoca notables limitaciones al modelo tradicional de financiación hidráulica del dominio público basado en su mayor parte en subvenciones estatales. Esto ha provocado que, en la actualidad, se haya pasado del antiguo modelo de financiación hidráulica a las técnicas de facturación por servicio, también denominadas economías maduras del agua.

Las políticas relacionadas con los precios de un servicio, es decir, las políticas tarifarias se basan en técnicas de asignación de costes lo que es fundamental para el correcto uso del agua de todos los agentes implicados.

En este proyecto estudiaremos un modelo de asignación de costes del agua, basado en “la teoría de juegos cooperativos” a un conjunto de agentes representados dentro de la parte occidental de Andalucía. En concreto representados en las provincias de Huelva, Sevilla y Cádiz. El coste total del proceso será completamente asignado al conjunto de agentes en función del uso que hagan del servicio.

2. FINANCIACIÓN DEL SERVICIO DEL AGUA

En este capítulo vamos a analizar la normativa que regula el uso de los recursos hídricos, haciendo especial atención a los aspectos económicos. Vamos a revisar la normativa nacional en materia de políticas tarifarias y de asignación del agua, tratando de cumplir con la normativa europea vigente en la actualidad.

2.1. El marco normativo europeo

2.1.1. Directiva Marco de Aguas

La *Directiva 2000/60/CE* del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 octubre de 2000, más bien conocida como la Directiva Marco Europea de Aguas (DMA) se crea ante la necesidad de unificar las actuaciones en materia de gestión del agua en la Unión Europea (UE). Es uno de los grandes motivos que ha provocado el cambio de orientación de la política de los Estados Miembros de la UE.

La DMA admite la necesidad de establecer en cada demarcación hidrográfica un programa de medidas (Artículo 11) con el fin de alcanzar los objetivos ambientales previstos en el Artículo 4, que incluye los aspectos relativos a la recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua, incluidos los costes medioambientales y los referidos a los recursos (Artículo 9), teniendo en cuenta los resultados de los análisis económicos del uso del agua (Artículo 5 y Anexo III)

2.1.2. Artículo 5. Análisis económico del uso del agua

Éste artículo de la DMA establece que cada Estado Miembro será responsable de velar porque se efectúen los siguientes requisitos en cada demarcación:

- un análisis de las características de la demarcación;
- un estudio de las repercusiones de la actividad humana en el estado de las aguas superficiales y de las aguas subterráneas;
- un análisis económico del uso del agua, de acuerdo con las especificaciones técnicas fijadas en el anexo III.

2.1.3. Artículo 9. Recuperación del coste de los servicios

“Los Estados miembros tendrán en cuenta el principio de la recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua, incluidos los costes medioambientales y los relativos al recurso, a la vista del análisis económico efectuado con arreglo al Anexo III, y en particular de conformidad

con el principio de que quien contamina paga.”

Según el Artículo 2 de la DMA se entiende por servicios relacionados con el agua todos los servicios a los hogares, las instituciones públicas o cualquier actividad económica, consistentes en:

- La extracción, el embalse, el depósito, el tratamiento y la distribución de aguas superficiales o subterráneas;
- La recogida y depuración de aguas residuales, que vierten posteriormente en las aguas superficiales.

Como se puede ver, no se tiene como objetivo la recuperación íntegra de costes, ni siquiera a largo plazo, lo que se considera lógico considerando los objetivos ambientales de la Directiva y la naturaleza no comercial del agua. La lógica dicta que unos precios adecuados, capaces de reflejar el efectivo del coste de servicio del agua para cada usuario, conllevaría un uso más eficiente del recurso, y por consiguiente un menor consumo y unas mejores condiciones ambientales. Esto es lo que se entiende como el principio de transparencia en la economía del agua.

Este artículo recoge también la necesidad de una contribución adecuada de los diversos usos del agua basado en el análisis económico efectuado en consonancia con el Anexo III, como se definirá más adelante.

2.1.4. Artículo 11. Programa de medidas

“Los Estados miembros velarán por que se establezca para cada demarcación hidrográfica, o para la parte de una demarcación hidrográfica internacional situada en su territorio, un programa de medidas, teniendo en cuenta los resultados de los análisis exigidos con arreglo al Artículo 5, con el fin de alcanzar los objetivos ambientales planteados en el Artículo 4. Estos programas de medidas podrán hacer referencia a medidas derivadas de la legislación adoptada a nivel nacional y que cubran la totalidad del territorio de un Estado miembro. En su caso, un Estado miembro podrá adoptar medidas aplicables a todas las demarcaciones hidrográficas y/o a las partes de demarcaciones hidrográficas internacionales situadas en su territorio.”

Las medidas básicas son los requisitos mínimos que deberán cumplirse y consistirán, entre otros, en la *“las medidas que se consideren adecuadas a efectos del Artículo 9”*.

2.1.5. Anexo III. Contenidos del análisis económico

“El análisis económico contendrá la suficiente información lo suficientemente detallada (teniendo en cuenta los costes asociados con la obtención de los datos pertinentes) para:

- *efectuar los cálculos necesarios para tener en cuenta, de conformidad con el Artículo 9, el*

principio de recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua, tomando en consideración los pronósticos a largo plazo de la oferta y la demanda de agua en la demarcación hidrográfica y, en caso necesario, las previsiones del volumen, los precios y los costos asociados con los servicios relacionados con el agua, y

- estudiar la combinación más rentable de medidas que, sobre el uso del agua, deben incluirse en el programa de medidas de conformidad con el Artículo 11, basándose en las previsiones de los costes potenciales de dichas medidas.”

En este anexo se define el objetivo del análisis económico previsto en el Artículo 5 como el de generar los datos necesarios para poder efectuar los cálculos de recuperación de costes y para poder estudiar la combinación óptima de medidas básicas en sus previsiones de costes.

2.2. Organización de los servicios del agua en España

Las prestaciones de los servicios del agua en España están caracterizadas por la gran participación de agentes públicos y privados, como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Organización de los servicios del agua en España (MIMAM, 2007)

Servicio	Agentes (Competentes o financiadores de infraestructuras)	Instrumentos de “Recuperación de Costes”
Embalses y transporte en alta (aguas superficiales)	Organismos de cuenca, sociedades estatales y otros agentes	Canon de regulación Tarifa de utilización de agua
Aguas subterráneas	Organismos de cuenca, colectivos de riego y usuarios privados (autoservicios)	Las fijadas por los ayuntamientos Las fijadas por las CCAA
Abastecimiento urbano	Ayuntamientos, mancomunidades, comunidades autónomas y otros	Tarifa de abastecimiento

Recogida de aguas residuales urbanas	Ayuntamientos, mancomunidades, comunidades autónomas y otros	Tasa de alcantarillado
Tratamiento de aguas residuales urbanas	Ayuntamientos, mancomunidades, comunidades autónomas y otros	Canon de saneamiento tarifas de servicio
Distribución de agua de riego	Organismos de cuenca, comunidades de regantes y otros colectivos de riego	Derramas y tarifas/cuotas de los colectivos de riego (Que incluyen el importe del pago de canon y tarifa a los organismos de cuenca)
Control de vertidos	Organismos de cuenca	Canon de control de vertidos

2.2.1. Servicios de captación, embalse y transporte

Conforme a la Ley de Aguas y El Reglamento del Dominio Público Hidráulico, tanto la extracción, el embalse como el transporte es competencia de las Confederaciones Hidrográficas en las cuencas intercomunitarias y de las Comunidades Autónomas (CCAA) en las cuencas intracomunitarias.

2.2.2. Servicios de abastecimiento, alcantarillado y depuración de aguas urbanas

Los servicios de abastecimientos (tratamiento y distribución del agua potable), alcantarillado y depuración de las aguas urbanas son competencia de los municipios como se indica en los Artículos 25 y 26 de la Ley 7/1985 de Bases de Régimen Local. Éstas a su vez pueden dar el servicio directamente o a través de concesiones a empresas públicas, privadas o mixtas. Conviene señalar que la depuración de las aguas residuales urbanas, en algunos casos, son tratadas por las administraciones autonómicas mediante la contratación de empresas especializadas.

2.2.3. Servicios de distribución del agua de riego

Los beneficiarios del agua superficial destinada al riego que posean la misma toma o concesión están constituidos en comunidades de regantes desde el año 1879 (Ley de Aguas del 13 de

junio). Las comunidades de regantes se encargan de gestionar la distribución, mantenimiento y reparto de las redes que llevan el agua desde los canales hasta las parcelas privadas.

2.3. Régimen económico-financiero de las aguas continentales en España

El Régimen económico-financiero de las aguas continentales en España se estructura en tres bloques de tributos:

- Tributos sobre el uso del dominio público hidráulico
- Tributos recuperadores del coste de infraestructuras
- Tributos ambientales

3. LA TEORÍA DE JUEGOS COOPERATIVOS

3.1. Juegos cooperativos.

3.1.1. Concepto de juego cooperativo.

Los juegos cooperativos fueron introducidos por von Neumann y Morgenstern en 1944. Si N es un conjunto finito entonces 2^N representa la familia de subconjuntos suyos. Un juego cooperativo de utilidad transferible, juego a partir de ahora, es un par (N, v) donde $N = \{1, \dots, n\}$ es un conjunto finito de elementos, denominados jugadores, y $v: 2^N \rightarrow \mathbb{R}$ es una función sobre los subconjuntos de jugadores llamados coaliciones que verifica $v(\emptyset) = 0$. La función v se denomina función característica. La interpretación de número $v(S)$ para cada coalición S es ser el pago que recibiría dicho grupo de jugadores por su cooperación, independientemente de las acciones de los jugadores exteriores a S , es decir lo mínimo que se pueden garantizar. Normalmente este pago se suele interpretar como una cantidad de dinero, aunque existen otros contextos donde se entiende de manera diferente. El pago puede ser un beneficio, un costo, una deuda, etc.

La teoría clásica de los juegos cooperativos se construye pensando en que el pago de las coaliciones es un beneficio. Algunas propiedades que usaremos de los juegos son las siguientes. Sea (N, v) un juego. El juego es monótono si para todo par de coaliciones verificando $S \subseteq T$ ocurre que $v(S) \leq v(T)$. Es decir, el juego es monótono cuando el beneficio se incrementa al construirse mayores coaliciones. El juego es superaditivo si para cualquier pareja de coaliciones disjuntas S, T con $S \cap T = \emptyset$ se tiene que

$$v(S \cup T) \geq v(S) + v(T).$$

Esto significa que la cooperación entre dos coaliciones espera recibir más beneficio que por separado. Siguiendo algunos autores como Shapley [7] o Owen [8] se consideran que los juegos tienen incluida la condición de ser superaditivos. En el juego superaditivo los jugadores tienen un interés claro en formar la gran coalición N .

3.1.2. Soluciones de juegos cooperativos.

Resolver un juego (N, v) es encontrar un vector $x \in \mathbb{R}^N$, llamado vector de pagos, de forma que cada coordenada x_i representa la parte del beneficio $v(N)$ que le correspondería al jugador

$i \in N$. Lógicamente parece normal exigirle a dicho vector que sea eficiente, es decir que cumpla que

$$\sum_{i \in N} x_i = v(N).$$

Los vectores de pago que son eficientes se denominan preimputaciones.

El principio de racionalidad individual para un vector de pagos dice que todo jugador debe obtener mayor resultado que su pago como coalición individual, es decir que para cada $i \in N$ se tiene que $x_i \geq v(i)$. Los vectores de pago eficientes y que verifican el anterior principio se llaman imputaciones. Todo juego superaditivo tiene imputaciones. El principio de racionalidad individual se puede generalizar para todas las coaliciones dando lugar al concepto de core de un juego como

$$C(N, v) = \left\{ x \in \mathbb{R}^N : \sum_{i \in N} x_i = v(N), \sum_{i \in S} x_i \geq v(S) \right\}.$$

Es decir una imputación donde toda coalición obtiene más beneficio que actuando por separado. El problema del core es que puede ser vacío para un juego superaditivo. Los juegos con core no vacío se llaman equilibrados. La condición de que el vector de pagos esté en el core es deseable ya que da estabilidad a la solución.

Un valor para juegos cooperativos es una aplicación que determina un único vector de pagos para cada juego. Normalmente se exige que sea una preimputación, que si el juego es superaditivo sea una imputación y sería aconsejable que fuese un elemento del core. Hay varios valores conocidos como el valor de Shapley [7], el nucléolo [6] o el valor de compromiso [9]. Este último será la herramienta que usaremos en el trabajo.

3.1.3. Un ejemplo de juego cooperativo.

Dado el juego de 3 agentes dado por:

$$v(i) = 0 \text{ para todo } i \in N \quad v(N) = 22$$

$$v(12) = 4 \quad v(13) = 6 \quad v(23) = 12$$

El juego v puede interpretarse como un juego de bancarrota con el patrimonio $E = 22$ y las tres afirmaciones $d = 10, d = 16, d = 18$.

Además, el juego v puede verse como la versión de 3 personas cero-normalizada de un juego con respecto a 3-tupla $(1, 2, 3) \in R^3$ de números reales, es decir,

$$v(S) = \left(\sum_{j \in S} j \right)^2 - \sum_{j \in S} (j)^2 \quad \text{para todo } S \subset N$$

De estas dos interpretaciones derivamos que el juego v es convexo. Obtenemos de manera directa un vector superior $b^v (10,16,18)$ y el núcleo

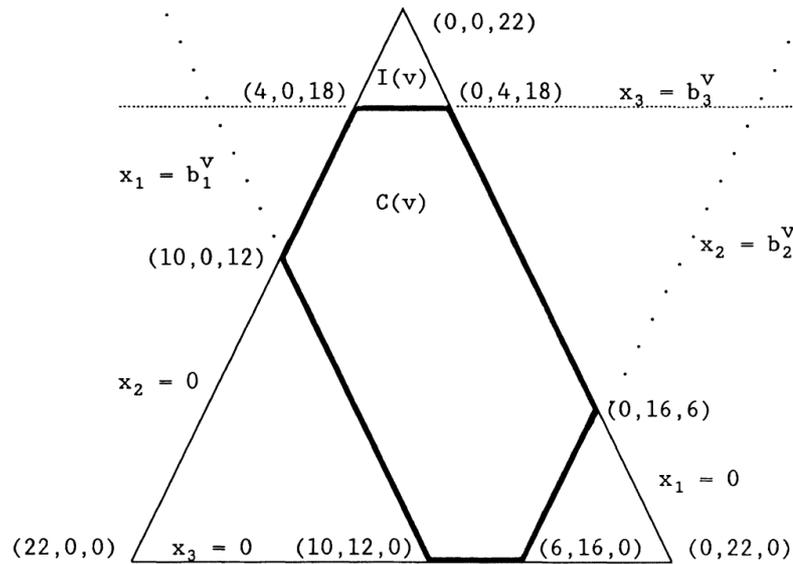
$$\begin{aligned} C(v) &= \{ x \in R_+^3 \mid x_1 + x_2 + x_3 = 22, \quad x_1 \leq b_1^v, x_2 \leq b_2^v, x_3 \leq b_3^v \} \\ &= \text{conv} \{ (10,0,12), (10,12,0), (6,16,0), (0,16,6), (0,4,18), (4,0,18) \} \end{aligned}$$

El núcleo del juego v se dibuja en la Figura 3.1. Tenga en cuenta que el núcleo es un hexágono dentro del conjunto de imputación. Los seis puntos extremos del núcleo $C(v)$ son los llamados vectores de valor marginal en el juego v . El término vector de valor marginal se explica por el hecho de que cada coordenada representa una contribución marginal del jugador correspondiente con respecto a una cierta coalición en el juego. Por ejemplo, el vector de valor marginal $(10,0,12)$ se obtiene de las contribuciones marginales

$$\begin{aligned} &v(123) - v(23) \text{ del jugador 1 y la coalición } \{2,3\} \\ &v(2) - v(\emptyset) \text{ del jugador 2 y la coalición } \emptyset \text{ y} \\ &v(23) - v(2) \text{ del jugador 3 y la coalición } \{2\} \end{aligned}$$

De hecho, estas tres contribuciones marginales están asociadas con el orden $(2\ 3\ 1)$ de los tres jugadores. Se deja al lector verificar que cualquier punto extremo del núcleo esté asociado con un solo orden del conjunto de jugadores.

Figura 3.1. Núcleo del juego v



El hexágono indicado representa el núcleo $C(v)$ del juego v convexo de 3 personas.

3.2. El valor de compromiso

El valor de compromiso fue introducido por Tijs en 1981. Originalmente fue llamado τ -valor por la letra que se utilizó para representarlo. Consiste en realizar un acuerdo eficiente para los jugadores que esté entre sus mejores expectativas y sus peores opciones.

Si partimos de un juego (N, v) donde la gran coalición será el resultado final, por ejemplo un juego superaditivo, la mayor expectativa para cada $i \in N$ es la contribución marginal a dicha gran coalición, esto es

$$M_i^v = v(N) - v(N \setminus i).$$

El vector formado por estas mayores expectativas para los jugadores es llamado el vector superior. La función diferencial es un nuevo juego cooperativo que mide la diferencia en cada coalición entre las máximas expectativas de sus jugadores y el valor en el juego de esa coalición, es decir (N, g^v) con

$$g^v(S) = \sum_{i \in S} M_i^v - v(S).$$

Para determinar el peor pago posible los jugadores piensan en que concesiones deberían hacer como mucho. Así, cada uno de ellos supone que cuando forma parte una coalición toda las expectativas de mejora (el valor diferencial) se lo llevan los otros jugadores, es decir para cada jugador ocurre que si forma parte de S entonces $g^v(S)$ debe dárselo a los otros jugadores de la coalición. Evidentemente, en esa situación el resto de jugadores no van a exigir más y por lo tanto el jugador puede elegir que en que coalición se incluye y garantizarse la diferencia con respecto su máxima expectativa. El vector de concesiones determina para cada jugador la concesión mínima que debe hacer para garantizarse un pago, si $i \in N$ entonces

$$l_i^v = \min\{g^v(S) : i \in S\}.$$

Finalmente el vector inferior se determina restando a la máxima expectativa de cada jugador su mínima concesión, es decir para cada $i \in N$ es

$$m_i^v = M_i^v - l_i^v.$$

El valor de compromiso es un vector de pagos que sea eficiente y esté en el segmento entre el vector superior y el vector inferior. Sin embargo, hacen falta ciertas condiciones sobre el juego para garantizar su existencia. Se dice que un juego es cuasi-equilibrado si se verifica que el vector inferior es realmente más pequeño que el vector superior, es decir $m_i^v \leq M_i^v$ para todo jugador $i \in N$, y además el conjunto de preimputaciones queda entre ambos vectores, es decir

$$\sum_{i \in N} m_i^v \leq v(N) \leq \sum_{i \in N} M_i^v.$$

Si el juego es cuasi-equilibrado se verifica que existe un único vector eficiente en el segmento entre el vector inferior y el vector superior, dicho vector se denomina valor de compromiso y lo denotamos para cada juego $t(N, v)$.

Partimos entonces de un juego cuasi-equilibrado. El valor de compromiso es siempre una imputación pero no necesariamente un elemento del core. Se sabe que si hay tres o menos jugadores entonces el valor sí está en el core, pero con más jugadores no se tiene seguridad. Driessen [9] introdujo condiciones equivalentes para determinar si el valor de compromiso está en el core. Una de ellas es la siguiente, que para toda coalición S con cardinal $2 \leq |S| \leq |N| - 2$ se verifique que

$$\frac{1}{g^v(S)} \sum_{i \in S} l_i^v \leq \frac{1}{g^v(N)} \sum_{i \in N} l_i^v.$$

3.2.1. Un ejemplo de juego cooperativo

Dado el juego de 4 agentes dado por:

$$v(12) = v(13) = v(23) = v(123) = v(N) = 3$$

$$v(s) = 0 \text{ en otro caso}$$

Entonces $b = (3,3,3,0)$, $g(4) = 0$, $g(S) = 6$ siempre que $|S| \geq 3$ y $g(s) = 3$ para todo $S \neq \emptyset$. Obtenemos $A = (3,3,3,0) = b$ y, por lo tanto, $\lambda(N) = 9 \geq 6 = g(N)$. Por tanto se ve que $v \in QB^4$ y $\tau(v) = \frac{1}{3}b = (1,1,1,0)$. Le corresponde al lector verificar que el núcleo del juego v está vacío, es decir, $C(v) = \emptyset$.

Además conviene destacar que dos juegos diferentes con núcleos idénticos pueden poseer diferentes τ valores, uno de ellos situados fuera del núcleo.

3.3. Juegos de repartos de costos

La teoría de juegos cooperativos comentada en la sección 3.1 y 3.2 está pensada para juegos con interpretación de beneficios. De hecho, normalmente se está pensando en juegos superaditivos. Sin embargo, otra familia de juegos cooperativos de utilidad transferible que son de gran interés son los juegos de distribución de costos. Formalmente un juego de costos es un juego (N, c) construido para determinar un reparto de los costos que hay que cubrir para la realización de un proyecto común entre un conjunto de agentes, los jugadores. La suma de esos costos es $c(N)$. El valor de cada coalición ahora tiene el sentido de considerar un proyecto similar para cada coalición de jugadores, pero sin la participación del resto. La monotonía es una propiedad también interesante en un juego de costos ya que es esperable que proyectos similares para grupos más grandes sean más caros. Sin embargo la condición de superaditivo no sirve en este caso como un aliciente para llevar acabo el

proyecto común ya que los jugadores significarían que el proyecto común de dos coaliciones es más caro que la suma de costos de ellas por separado. Así, en los juegos de costo se requiere habitualmente la condición de subaditivo en el sentido de que para todo par de coaliciones disjuntas S, T con $S \cap T = \emptyset$ se verifique

$$c(S) + c(T) \geq c(S \cup T).$$

Es decir, el costo del proyecto común de dos grupos siempre es más barato que la suma de los dos proyectos por separado. Lógicamente, en ese caso, sí es interesante para los jugadores llevar a cabo el proyecto común de todos, es decir la gran coalición.

Algo similar ocurre con las soluciones propuestas para juegos cooperativos. Si bien se busca también vectores de pagos para un juego de costos (N, c) que sean eficientes, es decir preimputaciones, sin embargo otros requerimientos no son deseables en este contexto. Así, la racionalidad individual o coalicional que define imputaciones y core nos dirían que cada individuo o cada grupo está estable si paga más que en su proyecto individual o de coalición. Eso no tiene sentido y habría que utilizar las desigualdades contrarias. Si (N, c) es un juego de costo, una imputación de costos es cualquier vector $x \in \mathbb{R}^N$ verificando ser eficiente,

$$\sum_{i \in N} x_i = c(N)$$

y de forma que para cada jugador i ocurra que $x_i \leq c(i)$. El core de costos es definido como

$$CC(c) = \left\{ x \in \mathbb{R}^N : \sum_{i \in N} x_i = c(N), \sum_{i \in S} x_i \leq c(S) \right\}.$$

Nuestro juego original, por ejemplo, es un juego de costos. Calcula el coste de que un conjunto de jugadores usen las infraestructuras conjuntamente. Los costes que no salen son los siguientes:

$$\text{Coalición 1} = 34,75$$

$$\text{Coalición 2} = 15,06$$

$$\text{Coalición 3} = 21,64$$

$$\text{Coalición 4} = 12,19$$

$$\text{Coalición 12} = 38,98$$

$$\text{Coalición 13} = 41,19$$

$$\text{Coalición 14} = 37,08$$

$$\text{Coalición } 23 = 22,01$$

$$\text{Coalición } 24 = 26,29$$

$$\text{Coalición } 34 = 27,42$$

$$\text{Coalición } 123 = 40,13$$

$$\text{Coalición } 124 = 41,18$$

$$\text{Coalición } 134 = 42,35$$

$$\text{Coalición } 234 = 31,53$$

$$\text{Coalición } 1234 = 42,35$$

A la hora de buscar vectores de pago para juegos de costos existen dos caminos: buscar conceptos específicos para estos juegos o bien intentar modificar aquellos dados para juegos cooperativos de beneficios. En nuestro trabajo analizaremos un juego de costos mediante el valor de compromiso modificado para juegos de costos. Por ello nos centraremos en este método. Asociado con un juego de costos (N, c) se puede definir un juego de beneficios (N, v^c) , llamado juego de ahorros, dado por

$$v^c(S) = \sum_{i \in S} c(i) - c(S)$$

para cada coalición S . Es decir el juego de ahorros mide lo que cada grupo se puede ahorrar realizando el proyecto común frente a los individuales. Luego cuanto más se ahorren mejor, esto es se trata de un juego de beneficios. El juego de ahorros es 0-normalizado en el sentido de que $v^c(i) = 0$ para cada jugador i . Además si (N, c) es subaditivo entonces (N, v^c) es superaditivo. Si se obtiene un vector de pagos $y \in \mathbb{R}^N$ para el juego de ahorros lo que se tiene es un reparto del ahorro producido al realizarse el proyecto común de la gran coalición, es decir lo que se ahorra cada jugador frente al costo del proyecto individual. Para determinar un vector de pagos del juego de costos, que es nuestro objetivo, tomamos $x \in \mathbb{R}^N$ con

$$x_i = c(i) - y_i$$

para cada jugador i . Se verifica que si y es una preimputación de (N, v^c) entonces x es una preimputación de (N, c) . Si y es una imputación de (N, v^c) entonces x es una imputación de costos de (N, c) . Por último, si $y \in C(v^c)$ entonces $x \in CC(c)$.

Driessen [9] explica el uso de la imputación de costos obtenida usando el valor de compromiso del juego de ahorros. Ese será el reparto de costos que se usará en nuestro proyecto.

4. EXPLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

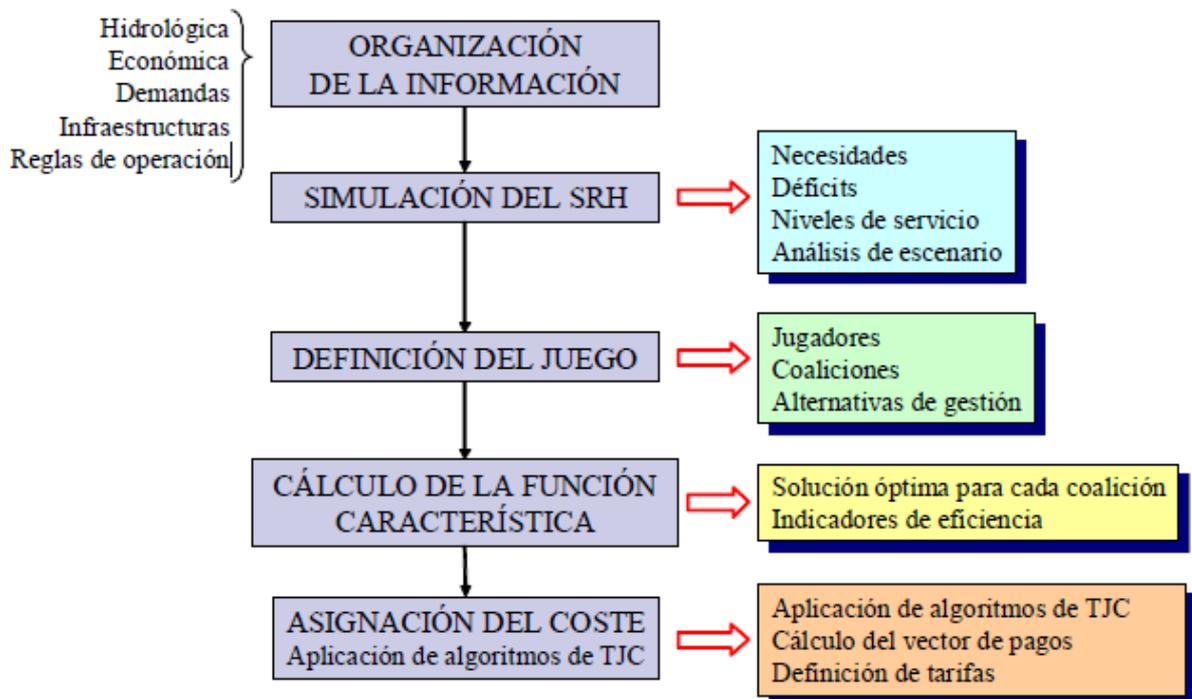
En esta parte del trabajo, se explica la metodología a seguir en la asignación de costes de los servicios del agua basada en la aplicación conjunta de modelos de gestión de sistemas hídricos y de la TJC.

La metodología desarrollada se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Análisis del sistema hídrico: desarrollo de las necesidades y conjunto de las alternativas de gestión de los niveles de servicio.
2. Definición del juego cooperativo: identificación de los agentes independientes y formación de coaliciones.
3. Cálculo de la función característica: de tal manera que se llegue a las alternativas de gestión de menor coste para cada coalición.
4. Solución del juego: aplicación de los algoritmos de TJC.

En la figura que se encuentra a continuación se muestra el proceso de la aplicación de la metodología esquemáticamente.

Figura 4.1. Esquema de la metodología



4.1. Análisis del sistema hídrico

El objetivo principal del análisis del sistema hidráulico es la identificación de los niveles de servicio que se quieren alcanzar y la definición de las actuaciones que se llevan a cabo en el servicio hídrico.

El estudio de sistemas hídricos complejos plantea la necesidad de manejar mucha información, entre las que se pueden destacar: niveles de embalses y acuíferos, usos de agua, recargas subterráneas, caudales, costes fijos y variables y niveles de eficiencia del sistema.

Existen modelos de simulación de sistemas hidráulicos, que permiten organizar toda esta información, analizar las relaciones entre los elementos y efectuar predicciones de los comportamientos bajo diferentes hipótesis.

En este trabajo se ha utilizado el modelo de simulación SIMGES para la modelización del sistema. Este permite una representación detallada del sistema hídrico, incluyendo datos físicos, las infraestructuras, las demandas, la hidrología y las reglas de la cuenca. Esta simulación ha sido aplicada en particular al caso del río Guadalquivir, que será el aspecto estudiado en este proyecto.

4.2. Definición del juego cooperativo

En este subcapítulo se debe determinar a los usuarios interesados por los servicios, cuyo número dependerá del tipo de agente y de sus objetivos. Se debe tener en cuenta que a medida que se elija un mayor nivel de discretización, conllevará complejidades en aspectos económicos que a menudo no están compensados.

Por consiguiente, en el proceso de definición del juego se considera una tarea imprescindible la identificación de los agentes independientes, que consiste en agrupar racionalmente a los usuarios del sistema en función de algunas características comunes, como por ejemplo:

- La localización geográfica
- El uso compartido de infraestructuras
- Los niveles de servicio requeridos
- La demanda mensual y anual
- La actividad económica del uso del agua

Cuando se tengan examinados los usuarios en agentes independientes se considera que estos usuarios se agrupan en base a los que comparten los mismos intereses en el juego. Cabe destacar que

la definición de un agente independiente está vinculada a la escala y el contexto, por lo que varios usuarios pueden actuar como agentes independientes y en otros casos agruparse para formar de esta manera un único jugador.

Una vez identificado el conjunto N de jugadores es posible definir el sistema $2^N - 1$ coaliciones. Los usuarios que forman parte de una coalición conservan los objetivos particulares pero en la coalición buscan la posibilidad de satisfacerlos a través de un proyecto común que les permita ahorrar parte de los costes de una actividad concreta.

4.3. Cálculo de la función característica

La función característica representa el conjunto de soluciones de menor coste calculadas para cada coalición, independientemente de las actuaciones realizadas por los jugadores que no pertenecen a la coalición. Al estar los usuarios interconectados y al beneficiarse de un bien público, se plantea la necesidad de determinar unos criterios para evaluar los niveles de servicios obtenidos por los jugadores pertenecientes a una coalición y al mismo tiempo controlar las posibles afecciones sobre los usuarios que no pertenecen a ella.

4.3.1. Solución del juego cooperativo

Una vez calculados los valores de la función característica, la solución del juego cooperativo se halla mediante la aplicación de los algoritmos descritos más adelante.

El método de resolución adoptado en este proyecto es el α -valor, que responde a la necesidad de garantizar una solución aceptable frente a características peculiares del sistema hídrico, como por ejemplo la incertidumbre en los costes finales del proyecto, la necesidad de proceder a la realización y financiación de proyecto por fases o la existencia de jugadores nulos. El α -valor representa una forma directa y simple de encontrar una solución racional y eficiente para un juego cooperativo de estas características, con independencia del número de jugadores.

El resultado de la aplicación del juego es un vector de pagos asociados a cada jugador presente en la gran coalición y relativo a la realización de las actuaciones contenidas en el proyecto de coalición más eficiente durante el período de tiempo considerado.

5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DEL RÍO GUADALQUIVIR

En este capítulo se resume la descripción del modelo utilizado para la asignación del coste de los servicios en el sistema de explotación del río Guadalquivir y se procede a la definición de un criterio de reparto de los costes de las infraestructuras existentes en la cuenca, basado en la estimación de la responsabilidad de cada usuario en el uso de las mismas.

A partir del estudio del esquema conceptual de la cuenca del río Guadalquivir se plantea el juego cooperativo mediante un proceso de racionalización y agrupación de usuarios y se define el modelo de optimización económica a partir del cual es posible calcular la función característica. Finalmente se procede al cálculo del χ -valor, para obtener el vector de pagos y al análisis de los resultados.

El carácter experimental del estudio concede una cierta libertad a la hora de definir la información económica del modelo, que no pretende reflejar fielmente y de forma detallada la realidad del sistema, sino permitir una representación, lo más objetiva posible, del problema con el fin de ofrecer un ejemplo de aplicación de la metodología a un caso de estudio. Por lo tanto, se advierte el lector que muchos aspectos del sistema hídrico han sido objeto de simplificaciones e idealizaciones y que los resultados obtenidos no pretenden ser una propuesta formal de tarifación. Para una aplicación práctica real, debería mejorarse la representación del sistema y estimarse con mayor precisión algunas características del mismo, entre ellas las funciones características.

5.1. El sistema hídrico del río Guadalquivir

El modelado del sistema es el primer paso para la aproximación al conocimiento del mismo, siendo éste el paso más largo y costoso debido a la cantidad de información a considerar. De hecho la definición de un esquema conceptual es un proceso que constituye un estudio por sí mismo. Siendo el sistema del río Guadalquivir muy estudiado, concretamente en las provincias de Sevilla, Huelva y Cádiz, ya que es el estudio principal de este proyecto. En el presente trabajo se encontrarán modelos de las diferentes partes que conforman el esquema de gestión de nuestro río, entre los que cabe destacar los siguientes:

- Las infraestructuras fundamentales (presas, canales, retornos, bombeos)
- Las conexiones entre elementos puntuales (tramos de río, conducciones, canales, tomas)

- Las demandas
- Las aportaciones hidrológicas
- Los acuíferos conectados hidráulicamente con el sistema superficial

5.1.1. Descripción general del sistema

El río Guadalquivir se encuentra localizado al sur de la Península Ibérica. Es el quinto río por longitud de la península. Recorre la comunidad autónoma de Andalucía de este a oeste. En cuanto a su nacimiento se considera que el Guadalquivir nace en la Cañada de las Fuentes en la Sierra de Cazorla (Jaén). Aunque el manantial más alejado que vierte aguas al río se sitúa en las cercanías de la aldea almeriense de Topares, donde nace el arroyo de la Cañada del Salar. Cuenta con 657 km de recorrido hasta su desembocadura, una superficie de la cuenca de 57.071 km² y un caudal medio de 164,3 m³/s.

Su cuenca hidrográfica comprende territorios de las ocho provincias andaluzas, así como algunas comarcas de las provincias de Badajoz, Ciudad Real, Albacete y Murcia. Desemboca en el Océano Atlántico por Sanlúcar de Barrameda, en un amplio estuario entre la provincia de Cádiz y la de Huelva. Entre Sevilla y el estuario, se sitúa una amplia zona húmeda: las Marismas del Guadalquivir.

En lo que se refiere a la provincia sevillana, el curso del río por ella es conocido como el curso bajo. El Guadalquivir entra en la provincia de Sevilla y pasa por Peñaflor, Lora del Río, Alcolea del Río, Tocina y Cantillana junto al cual recibe por la derecha al río Viar. Seguidamente sigue pasando por Villaverde del Río, Brenes, Alcalá del Río, La Rinconada y La Algaba bajo el cual recibe por la derecha al río Rivera de Huelva y por la izquierda el cauce artificial del Tamarguillo.

Pasa por el lado oeste de Sevilla. Al este el río cuenta con una gran dársena donde se encuentra el Puerto de Sevilla y, al final de esta, existe un tapón de tierra en el barrio de San Jerónimo. Prosigue por el Aljarafe, donde deja a la derecha Camas, San Juan de Aznalfarache y Gelves y, posteriormente, recibe por la izquierda al río Guadaíra.

Dejando a la derecha Coria del Río y la La Puebla del Río, se divide por debajo de estos en varios brazos y zonas semipantanosas llamadas las marismas del Guadalquivir, que pasan por la última ciudad de la provincia de Sevilla: la localidad de Lebrija. Al oeste se encuentra el Parque Nacional de Doñana. Formando línea divisoria entre las provincias de Cádiz y Huelva, desemboca en el océano Atlántico junto a los términos municipales de Almonte y Sanlúcar de Barrameda.

Posteriormente se tiene el embalse Huesna ubicado en el cauce del río Rivera del Huesna y que se encuentra en los términos municipales de Constantina y El Pedroso. Es la principal fuente de

abastecimiento del Consorcio de Aguas del Huesna, que gestiona el suministro de 18 municipios de la provincia –El Madroño, El Pedroso, El Real de la Jara, Villanueva del Río y Minas, Alcolea del Río, Cantillana, Tocina, Brenes, Carmona, El Viso del Alcor, Utrera, Los Molares, El Coronil, Lebrija, Las Cabezas de San Juan, Los Palacios y Villafranca, y El Cuervo–.

La presa acabó de construirse en 1990 y cuenta con un volumen de embalse de 134,6 hm³, de los que el consorcio tiene asignados 30,2 hm³. El embalse tiene 796,31 hectáreas de superficie y una superficie de cuenca de 479 km².

Se tendrá en cuenta otro embalse de la cuenca del Guadalquivir, llamado embalse de Melonares. En su concepción, la construcción tenía como objetivo aumentar el abastecimiento de agua potable al Área metropolitana de Sevilla, especialmente por el impacto de la sequía de 1992-1995. En 2001 se aprueba definitivamente el proyecto después de que en 1997 se resolviera como favorable la Declaración del Impacto Ambiental. Las obras para la construcción de la presa se llevaron a cabo desde 2003 hasta 2007, año en que se iniciarían las obras de la red de tuberías necesarias para unir el embalse a la red de suministro de Emasesa. La capacidad del embalse es de 180,4 hectómetros cúbicos, la superficie inundada es de 1.467 ha.

Por otro lado, en lo que se refiere a las provincias de Huelva y Cádiz, el río Guadalquivir desemboca entre ambas provincias, en concreto en los municipios de Almonte y Sanlúcar de Barrameda como se dijo anteriormente, y hace de límite entre ellas a lo largo de unos pocos kilómetros. No obstante, recoge la mayor parte de las aguas de las marismas (Parque Nacional de Doñana), a través del arroyo de la Rocina y, en la parte del norte oriental, por medio del río Rivera de Huelva.

El río Rivera de Huelva de 61 kilómetros de longitud, nace en la provincia de Badajoz y recorre las ciudades de Huelva y Sevilla. Desemboca en el río Guadalquivir en el término de la población de la Algaba, muy cerca de la ciudad de Sevilla.

Hay otro afluente llamado Guadiamar que atraviesa la provincia de Sevilla de norte a sur hasta llegar al río Guadalquivir. Este afluente, durante algunos kilómetros, hace de límite entre las provincias de Huelva y Sevilla.

El río Corbonés pasa por la provincia de Cádiz. Este río nace en la Sierra de Ronda (Málaga), después atraviesa la provincia de Cádiz para llegar a Sevilla donde pasa por algunos pueblos como Pruna, Algamitas, Marchena o Carmona. Desemboca en el Guadalquivir al llegar a Alcolea del Río.

En cuanto a presas se refiere, en la provincia de Huelva se encuentra el embalse de Aracena, ubicado dentro de los términos municipales de Corteconcepción, Puerto Moral y Zufre, en el Parque

Natural Sierra de Aracena y Picos de Aroche. Tras siete años de construcción, este embalse fue inaugurado en el año 1970. Tiene una capacidad de embalsado de 128 hm³, un perímetro de 135 km y una superficie de 954 has. En este embalse, el volumen invertido en abastecimiento es de 38 hm³/año aproximadamente y la producción de electricidad es de 5000 kva. Otro embalse importante de la provincia de Huelva es el embalse de Zufre. Como su nombre indica, está situado en el término municipal del pueblo de Zufre. Este embalse, situado sobre la Rivera de Huelva tiene una capacidad de 175 hm³, un perímetro de 100 km y una superficie de 968 has. Se tardó cuatro años para su construcción y en el año 1987 fue inaugurado. En este embalse, el volumen invertido en abastecimiento es de 45 hm³/año aproximadamente. Al igual que en el embalse de Aracena, otro uso del agua desembalsada en esta presa es la producción de 5000 kva de electricidad. El agua de estos embalses está destinada al abastecimiento de Sevilla a pesar de que estén ubicados en la provincia de Huelva.

Cabe destacar también tres embalses de la provincia de Córdoba que se estudiarán en este trabajo. Estos embalses son el de San Rafael de Navallana, la presa de Bembezar en Hornachuelos y el de la breña II en Almodóvar del río.

En cuanto a acuíferos se puede destacar la unidad Sevilla-Carmona que se extiende sobre unos 1.150 km² en el margen derecho del Guadalquivir, entre las ciudades de Lora del Río, Cantillana, Carmona, Dos Hermanas y Sevilla. La alimentación se realiza por infiltración directa del agua de lluvia y por influencia del río Guadalquivir en las crecidas. Los recursos propios, calculados a partir de la lluvia útil, son de 174 hm³/año, y las extracciones para regadío y abastecimiento del orden de 40 hm³/año.

Otras masas de agua subterráneas o acuíferos que cabe subrayar son los de Almonte-Marismas, Aljarafe Sevillano y el de Niebla-Genera situados en las cuencas bajas del río Guadalquivir entre las provincias de Sevilla y Huelva con una extensión de más de 3000 km². En estos acuíferos, la alimentación también se realiza en su mayoría por infiltración directa del agua de lluvia o bien como consecuencia de las escorrentías que atraviesan los afloramientos. En el caso del acuífero de Niebla-Genera, las aguas subterráneas circulan en dirección N-SE en las proximidades de aznalcollar y en dirección N-SO en el entorno de La Palma del Condado. En los acuíferos de Almonte-Marismas y del aljarafe sevillano, la circulación de las aguas subterráneas se dirige sensiblemente hacia el S-SE, salvo en la zona costera en la que en parte se dirige hacia el arroyo de la rocina y en parte hacia el mar. Las descargas se producen por drenaje de ríos, arroyos y mar, flujo ascendente en la zona de marismas y, principalmente, por bombeos. Las entradas calculadas a partir de la lluvia útil son de 213 hm³/año en el acuífero de Almonte-Genera, de 28,5 hm³/año en el Aljarafe sevillano y de 8 hm³/año en el de Niebla-Genera.

5.1.2. Prioridades y reglas de gestión

En este apartado se describen las reglas de gestión establecidas para el Sistema de recursos hídricos en el caso del río Guadalquivir:

- En primer lugar, no se vulnerarán en la medida que sea posible los valores mínimos de embalses establecidos por motivos medioambientales
- Se intentan mantener en lo posible los caudales mínimos ecológicos
- Se procede al suministro de las demandas en el siguiente orden de prioridad: en primer lugar, se asegura el abastecimiento urbano para Sevilla, Dos Hermanas, Utrera, Lebrija, Córdoba, Huelva, Cádiz y Jerez de la Frontera; en segundo lugar, se abastecen los riegos tradicionales de las zonas agrícolas.
- Una vez abastecidas todas las demandas del sistema y satisfecho los caudales ambientales, el agua sobrante se conserva en los embalses.

5.1.3. Demandas del Sistema

Se diferencian dos tipos de demandas en el caso del sistema hídrico del río Guadalquivir:

Demandas urbanas: en las cuales solo se tienen en cuenta la cantidad de agua suministrada para el uso doméstico.

- Abastecimiento de la ciudad de Sevilla
- Abastecimiento del municipio de Dos Hermanas
- Abastecimiento de la ciudad de Córdoba
- Abastecimiento de la ciudad de Huelva

Demandas agrícolas:

- Abastecimiento de Utrera
- Abastecimiento del área de Lebrija
- Abastecimiento de Aracena
- Abastecimiento de Almodóvar del Río

Demandas agrícolas:

- Riego de los Campos de Girasol
- Riego de Los Palacios y Villafranca
- Riego de Coría del Río
- Abastecimiento de la Sierra Norte Córdoba y Sevilla
- Riego de la Campiña sur de Córdoba

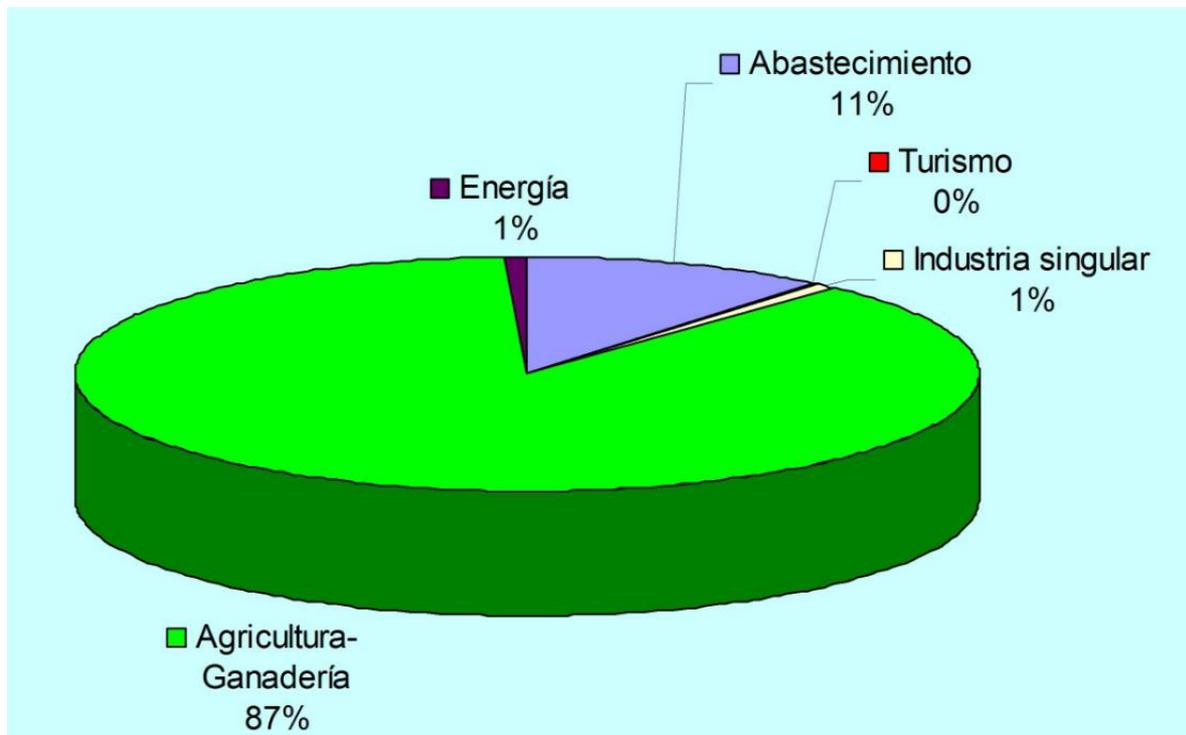
En la siguiente tabla se observan los valores medios anuales y mensuales de las demandas consideradas en el modelo.

Tabla 5.1. Demandas por municipios del río Guadalquivir

Municipio	Demanda (hm^3 / año)	Tipo	Prioridad
Sevilla	76,53	Urbana	1
Dos Hermanas	9,73	Urbana	1
Córdoba	35,7	Urbana	1
Huelva	15,9	Urbana	1
Utrera	3,49	Semiurbana	2
Lebrija	2,81	Semiurbana	2
Aracena	2,12	Semiurbana	2
Almodóvar del Río	2,89	Semiurbana	2
Los palacios y Villafranca	2,55	Agrícola	3
Coría del Río	2,09	Agrícola	3
Campos de Girasol	27,72	Agrícola	3

Sierra Norte Córdoba y Sevilla	53,13	Agrícola	3
Campaña sur de Córdoba	23,7	Agrícola	3
Total	258,36		

Figura 5.1. Consumo del agua del río Guadalquivir



5.1.4. Tomas fuera de comisión de desembalse

Los usuarios citados en el apartado anterior forman parte de la Comisión de Desembalse y en cada actividad hidrica estan sujetos a sus disposiciones sobre el régimen de llenado y vaciado en función de los distintos usos demandados. Sin embargo existen otros usuarios minoritarios en la Cuenca que no están presentes en la comisión pero tienen derecho a la toma de cierto caudal circulante por el río. Estos usuarios no participan en la gestión y financiación de los embalses pero pueden beneficiarse indirectamente al derivar parte de los caudales desembalsados para otros usuarios.

La medida de las demandas de las tomas de fuera de comisión (TFC) son muy complejas, ya que no están sometidas a volúmenes y no está controlada. Pero los balances hidrológicos sugieren la

valoración del orden de 10 hm³ anuales. En el modelo se han simulado las TFC como una unidad de demanda de 10 hm³ anuales situada aguas abajo de los embalses principales de la cuenca, cuya distribución mensual coincide con los riegos tradicionales.

5.1.5. Infraestructuras presentes en el Sistema

Las obras hidráulicas presentes en el sistema y consideradas en el análisis son las siguientes:

- 7 embalses (Melonares, Huesna, Aracena, Zufre, Bembezar, San Rafael de Navallana y el de la Breña II).
- Los retornos de las aguas depuradas de la provincia de Sevilla
- Los sistemas de pozos
- Una red capilar de distribución en baja para los sistemas de regadío

5.2. Caracterización económica de la cuenca

En este apartado se recogen la información económica del sistema que es requerida para realizar la asignación de costes de manera eficiente. La representación del sistema permite una cierta flexibilidad a la hora de definir la información económica, puesto que el fin del proyecto no es reflejar fielmente la realidad económica sino realizar una representación lo más objetiva posible. Por lo tanto, no se tendrán en cuenta todas las infraestructuras del sistema hídrico real. Se seleccionarán las infraestructuras que se consideren más representativas y se definirán una función de coste según los criterios disponibles en la literatura científica.

El proceso de cálculo se basa en el uso de las funciones de coste de las infraestructuras, que representan una relación directa entre los costes de inversión, mantenimiento y explotación de los servicios hídricos a estudiar. La definición de una función de coste requiere que se identifiquen parámetros de diseño, que dependen de la naturaleza y finalidad de las infraestructuras.

El uso de funciones de costes constituye un avance en el proceso de planificación de los servicios del agua, en cuanto que permite efectuar previsiones a medio y largo plazo sobre los costes de las medidas y su eficiencia económica. Su aplicación se ha desarrollado en las últimas décadas en paralelo con el uso de modelos de simulación y de optimización de la gestión de los recursos hídricos, como se puede observar en los estudios realizados por el Ministerio de Medio Ambiente en el Plan Hidrológico Nacional (MIMAM, 2000) y los documentos publicados más recientemente por el CEDEX (2011).

Debido a que el trabajo correspondiente a la definición de las funciones de costes se encuentra fuera de los objetivos de este trabajo, se ha decidido utilizar la información ya existente ya que se halla una gran diversidad bibliográfica al respecto.

5.3. Cálculo de las funciones de coste

5.3.1. Embalses

- A continuación se presenta las características técnicas de los embalses que se han elegido en este proyecto, los cuales son el embalse del Huesna, el de Melonares, el de Aracena, el de Zufre, el de San Rafael de Navallana, el de Bembezar y el de la Breña II).

Además, se deberá incrementar un coste por el mantenimiento del 1,2% sobre los costes de inversión y una vida útil de 50 años (CEDEX, 2011).

Tabla 5.2. Características del embalse del Huesna

Características del embalse	
Superficie de la cuenca hidrográfica (km²):	459,000
Aportación media anual (hm³):	85,000
Precipitación media anual (mm):	107,000
Caudal punta avenida de proyecto (m³/s):	780,000
Superficie del embalse a NMN (ha):	738,000
Capacidad a NMN (hm³):	134,600
Cota del NMN (m):	275,500
Tipo de presa:	Materiales sueltos P asfáltica
Cota coronación (m):	280
Altura desde cimientos (m):	73,000
Longitud de coronación (m):	278

Cota cimentación (m):	207,000
Cota del cauce en la presa (m):	210,600
Volumen del cuerpo presa (1000 m ³):	1.100,000
Volumen útil (hm ³):	131,4
Volumen total(hm ³):	135

Figura 5.2. Planos del embalse del Huesna

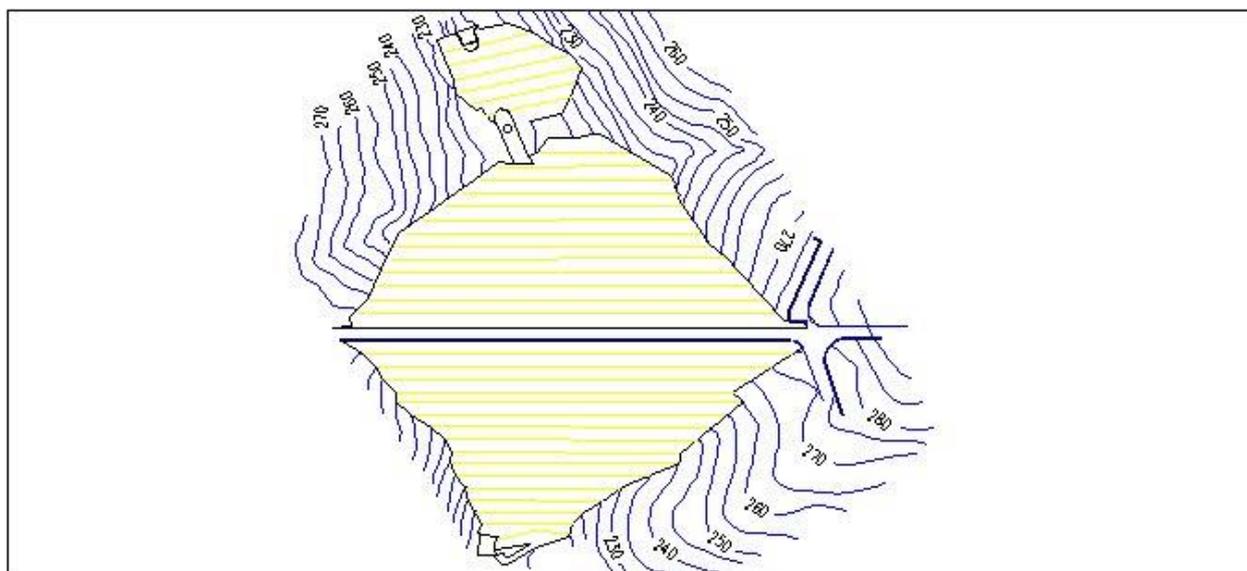


Tabla 5.3 Características del embalse de Melonares

Características del embalse	
Superficie de la cuenca hidrográfica (km ²):	558,000
Precipitación media anual (mm):	800,000

Caudal punta avenida de proyecto (m^3/s):	1.414,000
Superficie del embalse a NMN (ha):	1.460,000
Capacidad a NMN (hm^3):	180,000
Cota del NMN (m):	82,000
Tipo de presa:	Aco de Gravedad
Cota coronación (m):	87
Altura desde cimientos (m):	50,250
Longitud de coronación (m):	525
Cota cimentación (m):	37,000
Cota del cauce en la presa (m):	42,000
Volumen útil (hm^3):	162,2
Volumen total(hm^3):	185,6

Figura 5.3. Planos del embalse de Melonares

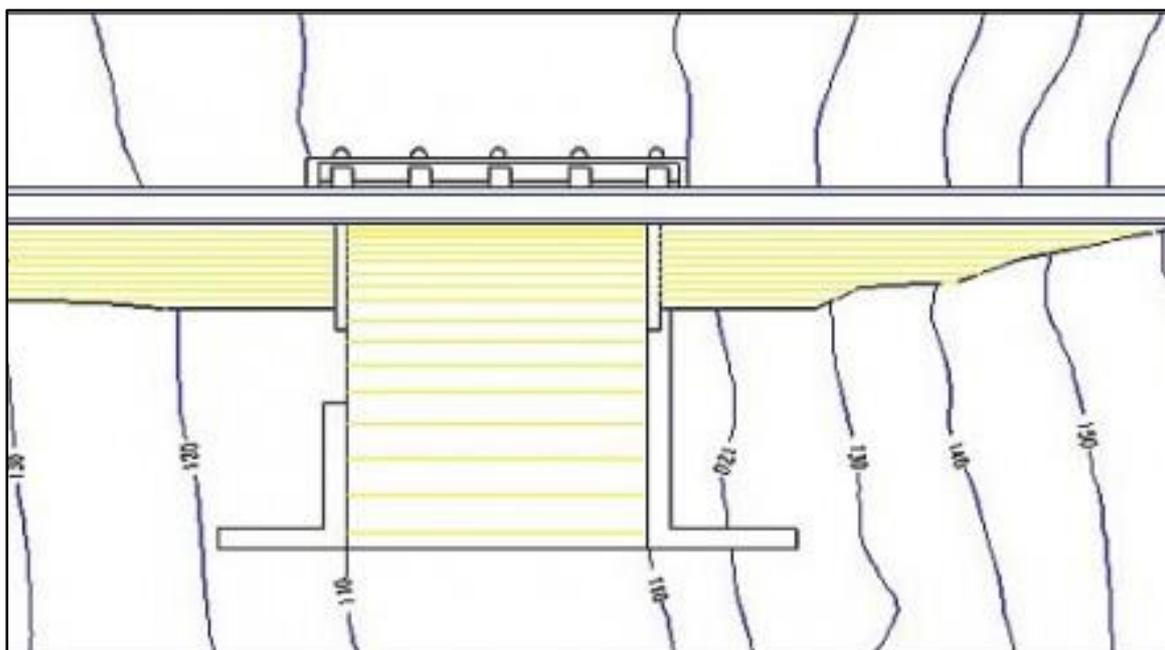


Tabla 5.4 Características del embalse de Aracena

Características del embalse	
Superficie de la cuenca hidrográfica (km²):	408,000
Aportación media anual (hm³):	84,000
Precipitación media anual (l/m²):	809,000
Caudal punta avenida de proyecto (m³/s):	1.600,000
Superficie del embalse a NMN (ha):	954,000
Capacidad a NMN (hm³):	128,000
Cota del NMN (m):	344,200
Tipo de presa:	Contrafuertes, con zona central de gravedad. Planta recta.
Cota coronación (m):	345,50
Altura desde cimientos (m):	59,500
Longitud de coronación (m):	612
Cota cimentación (m):	286,000
Cota del cauce en la presa (m):	296,000
Volumen cuerpo de la presa (1000 m³):	315,000

Figura 5.4. Planos del embalse del Aracena

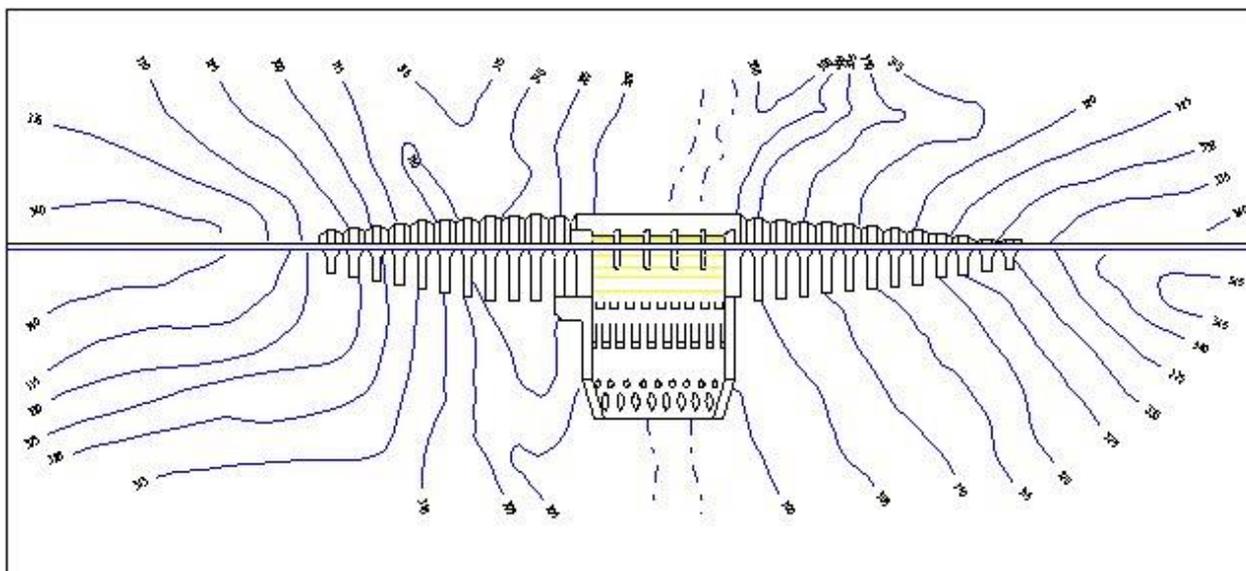


Tabla 5.5. Características del embalse de Zufre

Características del embalse	
Superficie de la cuenca hidrográfica (km²):	850,000
Aportación media anual (hm³):	130,000
Precipitación media anual (l/m²):	500,000
Caudal punta avenida de proyecto (m³/s):	1.646,000
Superficie del embalse a NMN (ha):	968,000

Capacidad a NMN (hm³):	175,000
Cota del NMN (m):	255,150
Tipo de presa:	Materiales con núcleo impermeable
Cota coronación (m):	265,450
Altura desde cimientos (m):	69,250
Longitud de coronación (m):	460,000
Cota cimentación (m):	193,200
Cota del cauce en la presa (m):	196,150
Volumen del cuerpo presa (1000 m³):	1.385,900
Volumen útil (hm³):	150,000
Volumen total (hm³):	189,000

Figura 5.5. Planos del embalse de Zufre

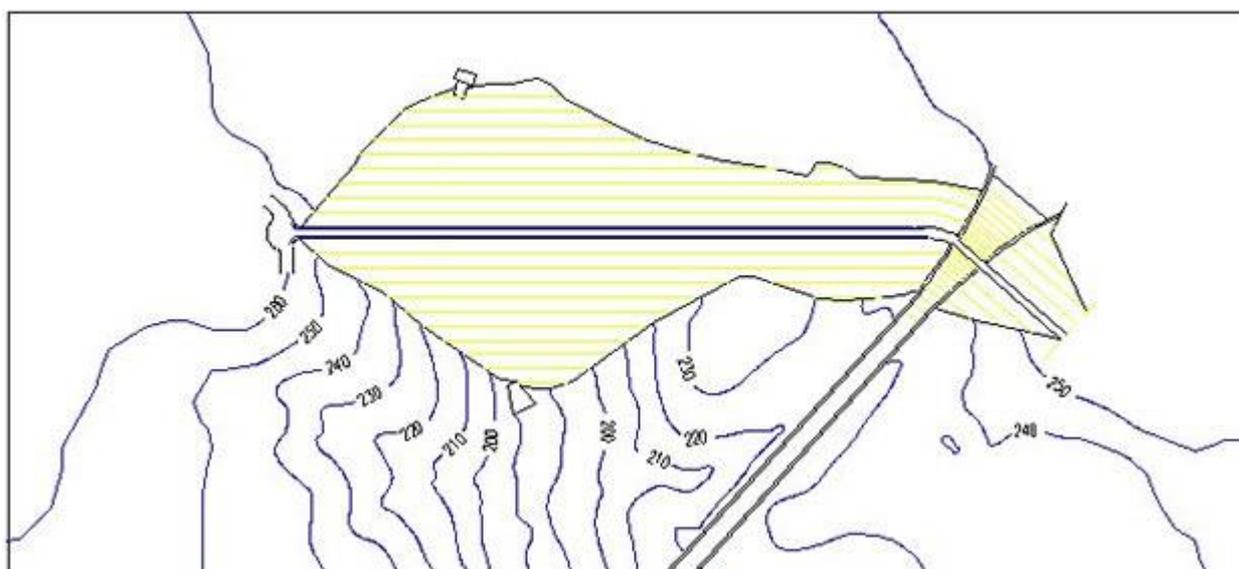


Tabla 5.6. Características del embalse de Bembezar

Características del embalse	
Superficie de la cuenca hidrográfica (km²):	1.655,000
Aportación media anual (hm³):	204,000
Precipitación media anual (mm):	729,000
Caudal punta avenida de proyecto (m³/s):	2.057,000
Superficie del embalse a NMN (ha):	1.232,000
Capacidad a NMN (hm³):	342,100
Cota del NMN (m):	182,500
Tipo de presa:	Gravedad de planta curva
Cota coronación (m):	185,000
Altura desde cimientos (m):	99,000
Longitud de coronación (m):	276,810
Cota cimentación (m):	86,000
Cota del cauce en la presa (m):	93,000
Volumen del cuerpo presa (1000 m³):	504,097

Volumen útil (hm³):	347,000
Volumen total (hm³):	352,000

Figura 5.6. Planos del embalse de Bembezar

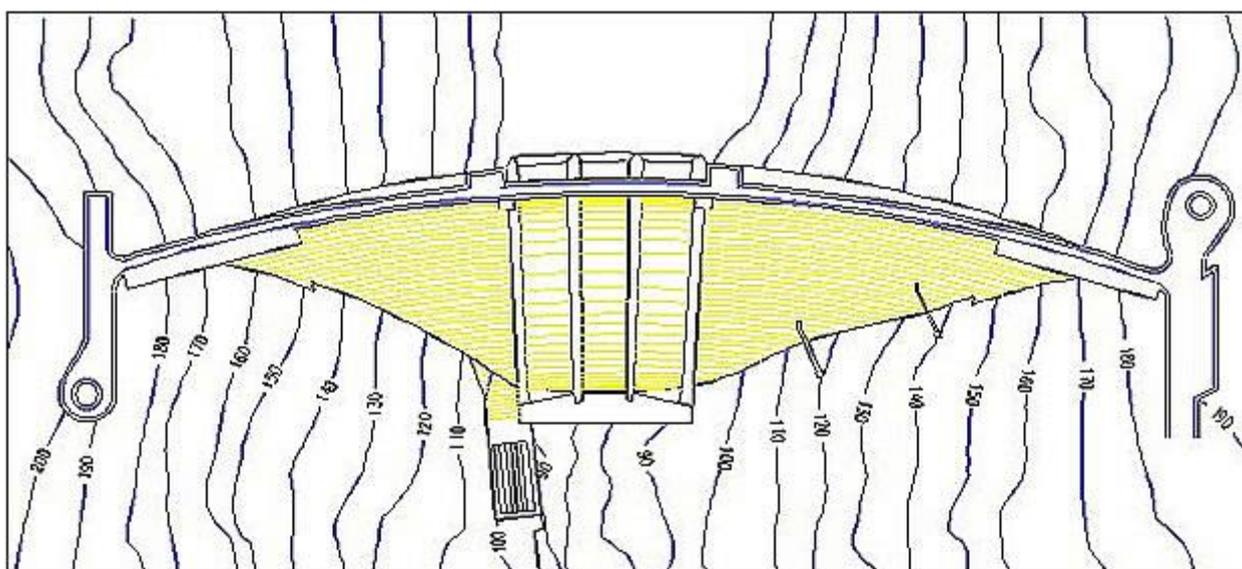


Tabla 5.7. Características del embalse de San Rafael de Navallana

Características del embalse	
Superficie de la cuenca hidrográfica (km²):	1.287,000
Aportación media anual (hm³):	167,000
Precipitación media anual (mm):	688,000
Caudal punta avenida de proyecto (m³/s):	1.791,000

Superficie del embalse a NMN (ha):	988,000
Capacidad a NMN (hm³):	157,000
Cota del NMN (m):	255,150
Tipo de presa:	Materiales sueltos con núcleo de arcilla
Cota coronación (m):	162,000
Altura desde cimientos (m):	57,000
Longitud de coronación (m):	364,000
Cota cimentación (m):	105,00
Cota del cauce en la presa (m):	109,000
Volumen del cuerpo presa (1000 m³):	1.179,910
Volumen útil (hm³):	85,000
Volumen total (hm³):	157,000

Figura 5.7. Planos del embalse de San Rafael de Navallana

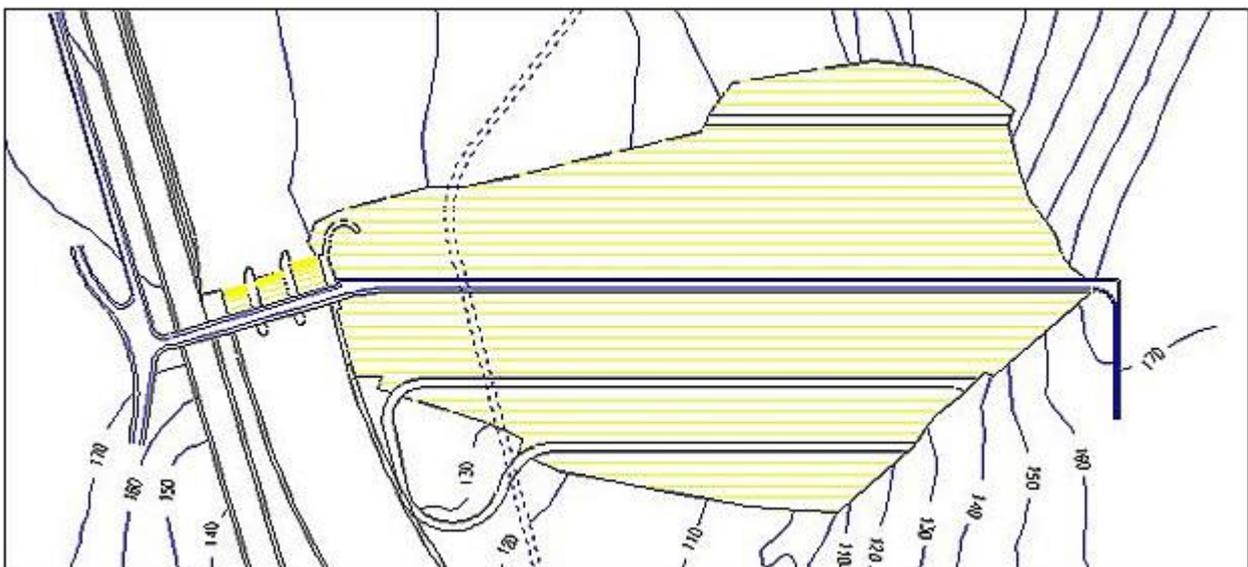
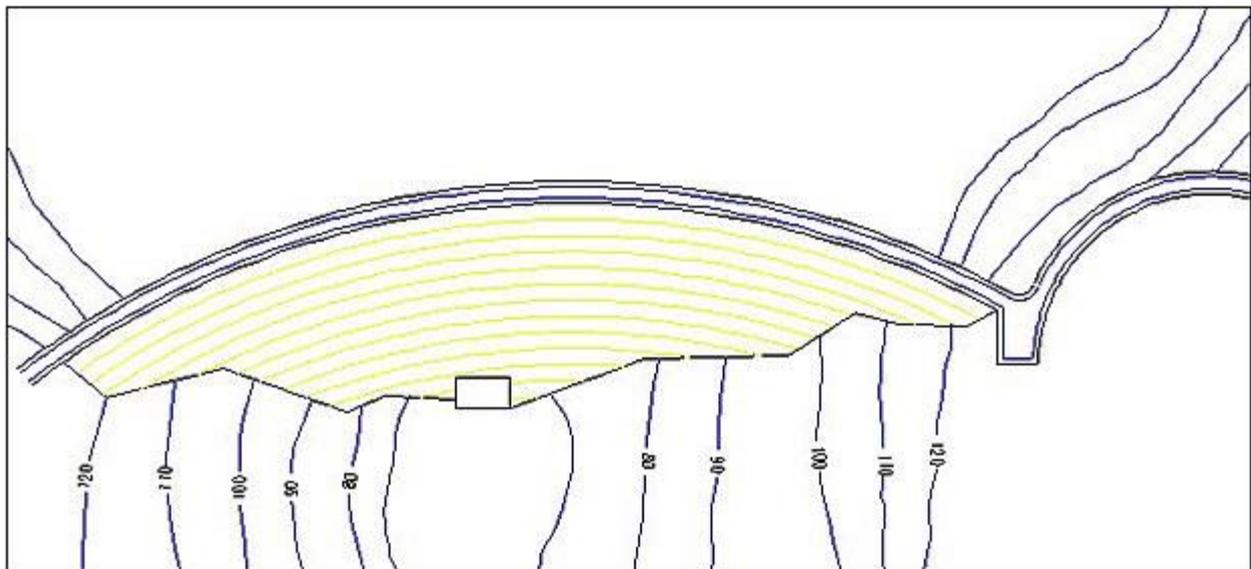


Tabla 5.8. Características del embalse de La Breña II

Características del embalse	
Superficie de la cuenca hidrográfica (km²):	1.490,000
Aportación media anual (hm³):	225,000
Precipitación media anual (mm):	650,000
Caudal punta avenida de proyecto (m³/s):	2.262,000
Superficie del embalse a NMN (ha):	587,480
Capacidad a NMN (hm³):	100,131
Cota del NMN (m):	121,000
Tipo de presa:	Gravedad de planta curva (Radios 200 y 195,80 m)
Cota coronación (m):	125,000
Altura desde cimientos (m):	53,000
Longitud de coronación (m):	281,700
Cota cimentación (m):	72,000
Cota del cauce en la presa (m):	75,000

Volumen útil (hm³):	115,000
Volumen total (hm³):	128,000

Figura 5.8. Planos del embalse de la Breña II



5.3.2. Canales

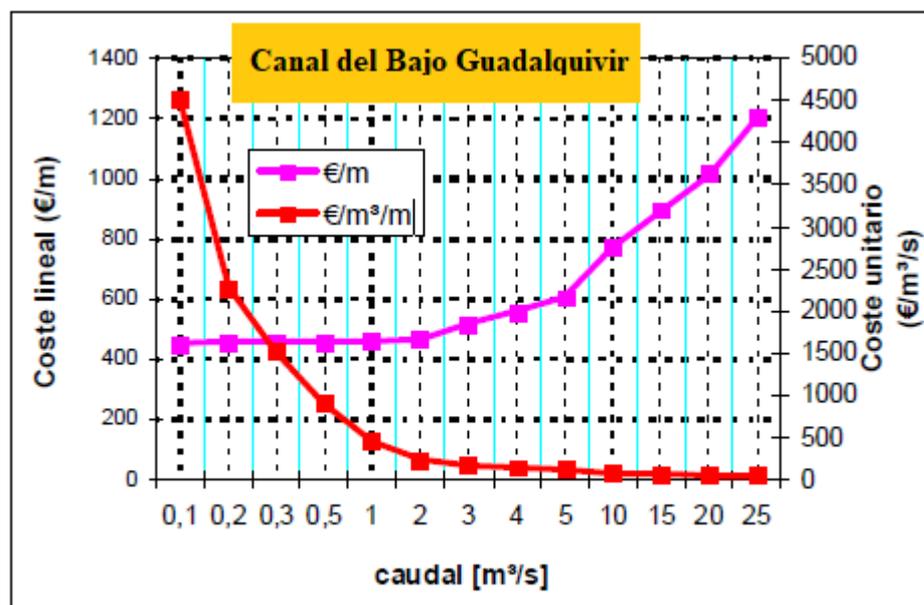
El coste asociado a los canales depende en gran medida de las características del entorno, siendo fundamental la geología del terreno. Existe una relación directa entre los caudales de diseño y el coste de la obra, debido al encarecimiento de los trabajos de excavación e impermeabilización como consecuencia del aumento de la sección del paso de agua.

Se han considerado las funciones de costes definidas en (MIMAM, 2000) para un diseño tipo, distinguiéndose si el canal discurre por el suelo o por roca y si la pendiente del terreno supera o no el 50%, estos son los aspectos más importantes en el cálculo de los costes.

Los costes de explotación y mantenimiento se estiman en una cuantía fija anual del 1,2% sobre el coste de inversión (CEDEX 2011) y una vida útil de las obras civiles de 50 años.

Se ha tenido en cuenta el Canal del Bajo Guadalquivir, conocido como el Canal de los Presos, el cual su objetivo fundamental es el abastecimiento para el regadío. Actualmente riega una superficie de 80.000 hectáreas. El caudal circulante por este canal es muy variante dependiendo de la época del año. Recorre 158 km, pero en el caso estudiado el canal recorre alrededor de 60 km hasta Coría del Río.

Figura 5.9. Función de coste, Canal del Bajo Guadalquivir

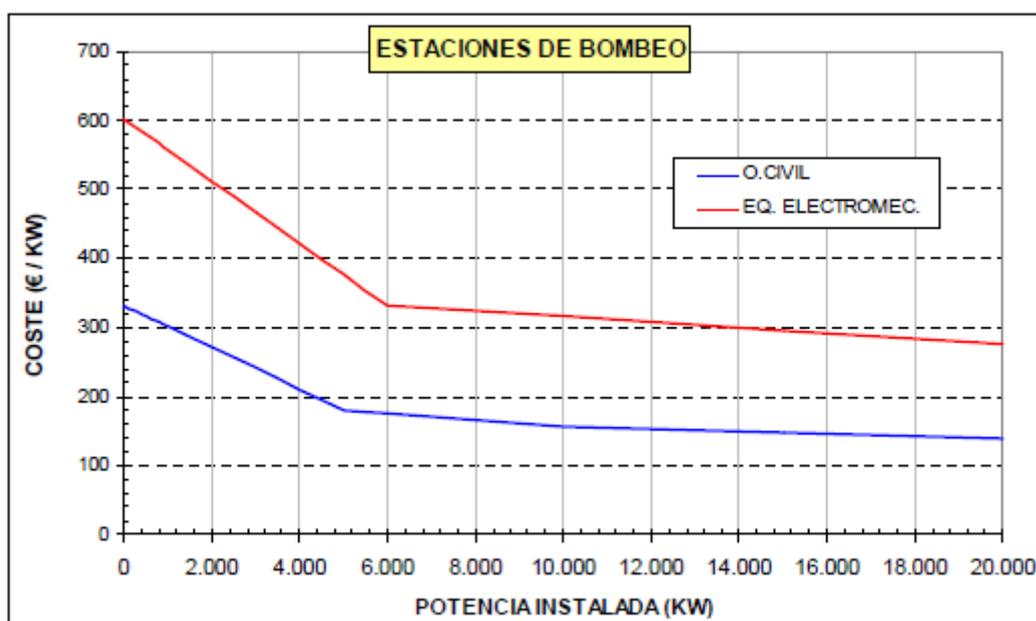


5.3.3. Bombeos

Las estaciones de bombeo son instalaciones electromecánicas, destinadas a elevar o transportar el agua desde el nivel de llegada en la estación de bombeo, a alturas superiores a la salida de ésta. Son necesarias para elevar el flujo de agua cuando dicho transporte no puede realizarse por gravedad, con su consiguiente consumo de energía eléctrica.

En la siguiente gráfica (MIMAM, 2002) se refleja una parametrización de los costes de obras civiles y de los equipos electromecánicos en función de la potencia instalada.

Figura 5.10. Parametrización de costes (MIMAM, 2002)



Como en casos anteriores, los costes de mantenimiento se consideran un 1,2% respecto a los costes de inversión. Mientras que los costes de explotación están asociados en gran parte a la potencia consumida. Una estimación razonable puede encontrarse entre 0,08 y 0,1 €/kwh (CEDEX, 2011). La vida útil de la instalación se suele estimar en 50 años para las obras civiles y 25 años para los equipos electromecánicos. Sin embargo, teniendo en cuenta que estos últimos son los elementos caracterizantes de la instalación, se puede optar por asignar una vida útil de 25 años al conjunto de la inversión.

En la siguiente tabla se han reflejados los datos de los costes fijos y variables correspondientes a unas instalaciones tipo localizadas en la provincia de Sevilla, en particular los datos de las bombas situadas en el embalse de Melonares.

Tabla 5.9. Costes bombeos en Sevilla

Bombeos en la provincia de Sevilla	
Datos de la estación	
Profundidad de bombeo (m)	75
Caudal instalado(m^3/s)	0.1
Horas diarias de funcionamiento	8
Costes	
Obra Civil (€)	50000
Coste sondeo (€)	4000
Coste inversión unitario ($\text{€}/\text{m}^3/\text{s}$)	180000
Explotación ($\text{€}/\text{m}^3$)	0.07

5.3.4. Reutilización de las aguas residuales del área urbana

En cuanto al análisis económico, un coste de explotación de $0,12 \text{ €/m}^3$ producido y un coste debido a la inversión de $0,5 \text{ €/m}^3$, en el cual está incluido los costes de mantenimiento y personal. Cabe destacar que se ha decidido tratar el máximo nivel de tratamiento del agua, es decir, el tratamiento de tipo 4, con la finalidad de simplificar el cálculo de los costes.

Además, el suministro de agua regenerada está vinculada con la capacidad de la red de distribución existente, a la cual se deben de realizar nuevas infraestructuras que suponen un coste adicional que se estima en $0,05 \text{ €/m}^3$.

Por lo tanto se ha concluido con que el gasto de reutilización de agua en la provincia de Sevilla es de alrededor de $0,67 \text{ €/m}^3$ (670.000 €/hm^3).

5.3.5. Desalinización

Los costes en este aspecto se han determinado en la provincia de Sevilla en $0,50 \text{ €/m}^3$ (500.000 €/hm^3). Los costes se han determinado por la suma de la gran cantidad de diversos costes que corresponden a la desalinización del agua entre los que se puede destacar: costes de inversión,

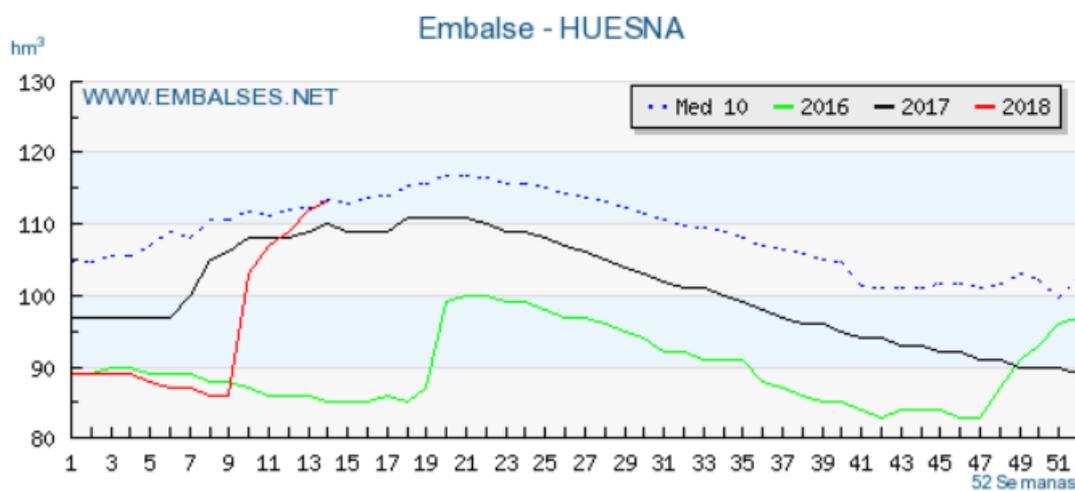
energía eléctrica, tratamientos, mantenimiento y personal.

5.3.6. Laminación de avenidas

Los servicios de laminación de avenidas son restricciones en la gestión del sistema que delimitan el volumen máximo de los embalses con el fin de asegurar un volumen suficiente para hacer frente a una avenida de un determinado período de retorno.

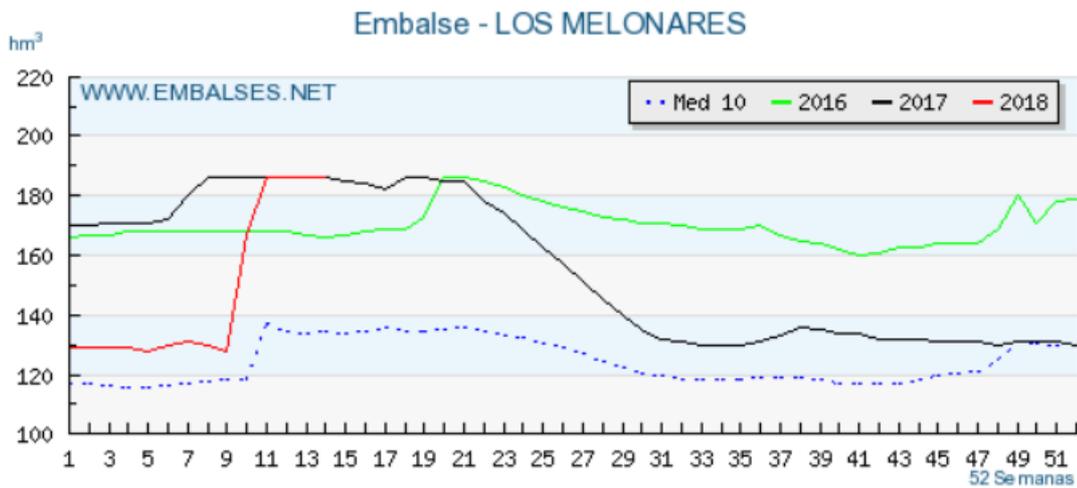
En las siguientes tablas se muestran los volúmenes de los embalses Huesna y Melonares respectivamente a lo largo de los últimos 10 años, y específicamente los de los últimos tres años.

Figura 5.11. Volumen anual del embalse Huesna



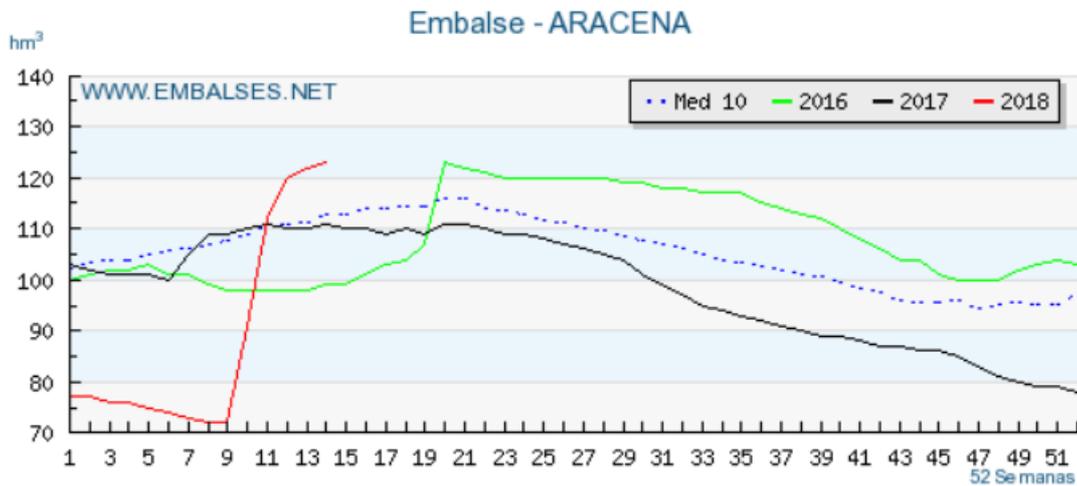
En cuanto al embalse de Huesna determinamos un volumen mínimo autorizado de 10 hm^3 mientras que como volumen máximo se tiene de 130 hm^3 .

Figura 5.12. Volumen anual del embalse de Melonares



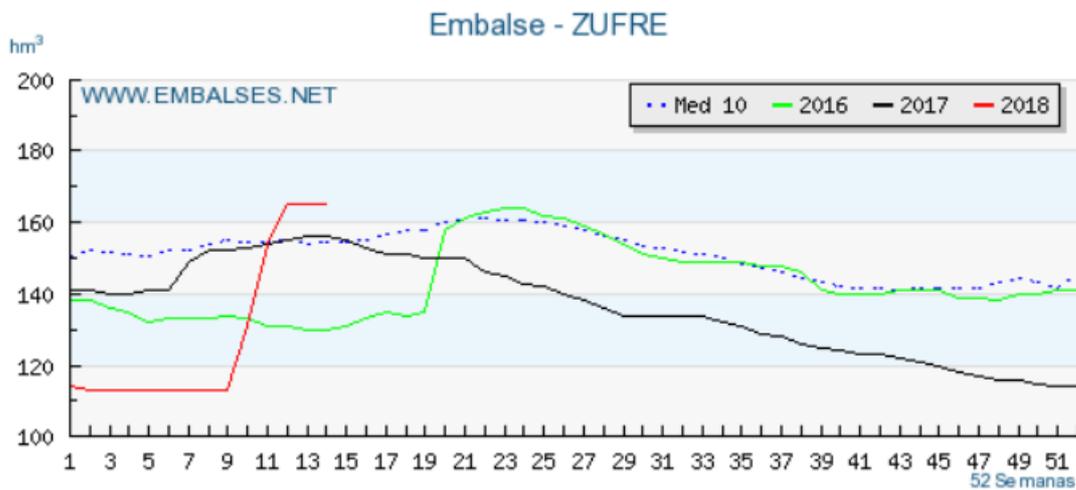
Por otro lado en el embalse de Melonares se tiene un volumen autorizado del mínimo de 30 hm^3 y un volume máximo de 220 hm^3 .

Figura 5.13. Volumen anual del embalse de Aracena



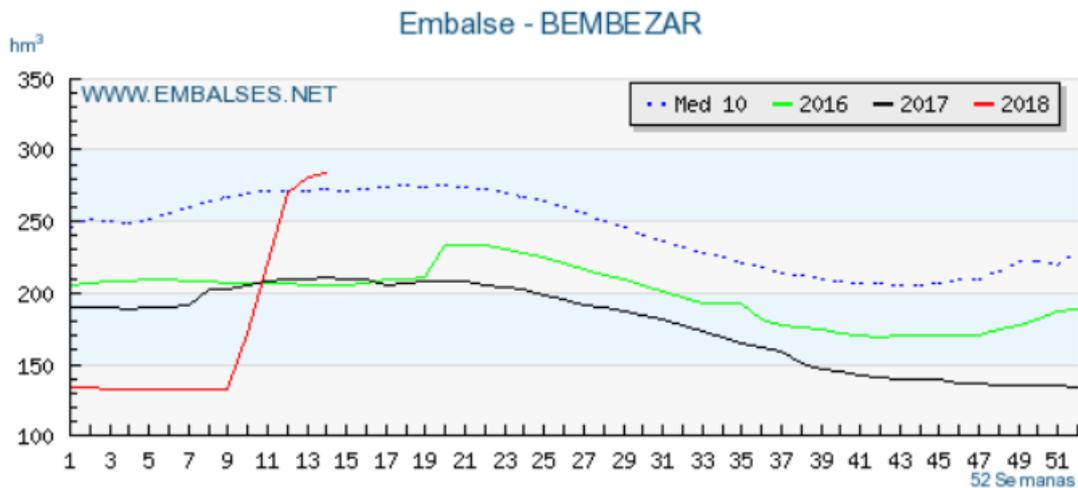
En el embalse de Aracena se tiene un volumen autorizado del mínimo de 20 hm^3 y un volumen máximo de 140 hm^3 .

Figura 5.14. Volumen anual del embalse de Zufre



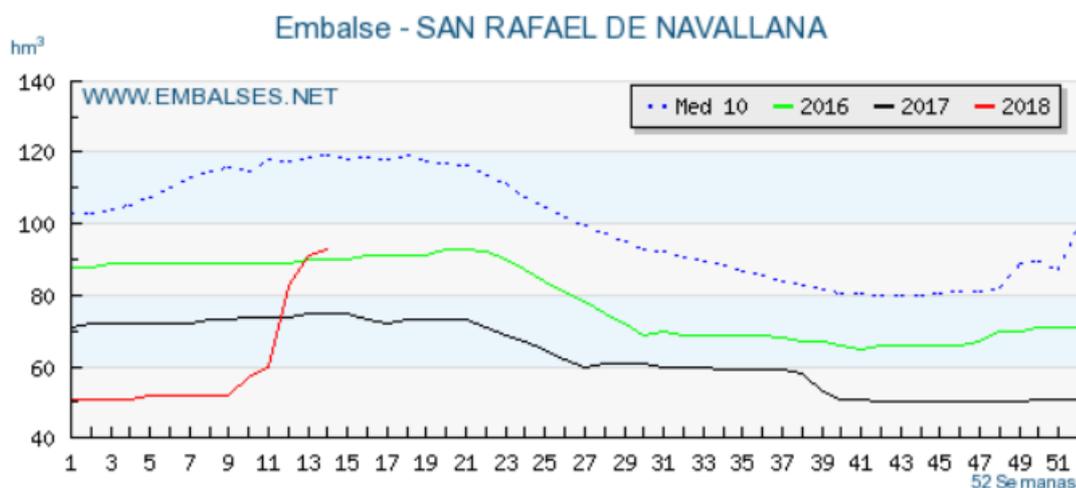
En el embalse de Zufre se tiene un volumen autorizado del mínimo de 35 hm³ y un volumen máximo de 200 hm³.

Figura 5.15. Volumen anual del embalse de Bembézar



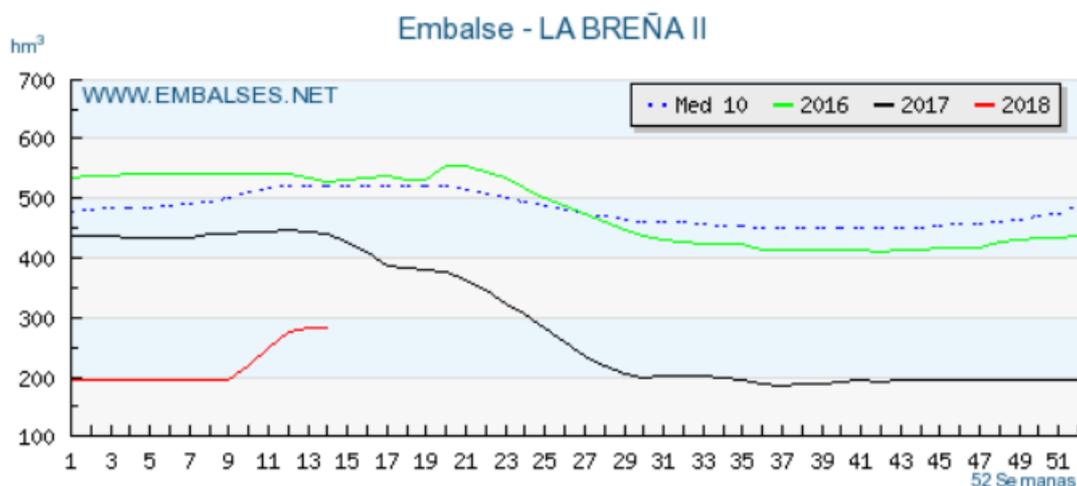
Por otro lado, en el embalse de Bembézar se tiene un volumen autorizado del mínimo de 50 hm³ y un volumen máximo de 350 hm³.

Figura 5.16. Volumen anual del embalse de San Rafael de Navallana



En el embalse de Aracena se tiene un volumen autorizado del mínimo de 25 hm³ y un volumen máximo de 140 hm³.

Figura 5.17. Volumen anual del embalse de la Breña II



En el embalse de Aracena se tiene un volumen autorizado del mínimo de 80 hm³ y un volumen máximo de 700 hm³.

5.4. Definición del juego y formación de las coaliciones

Una vez caracterizado el sistema y definidos los diferentes aspectos relacionados con el análisis económico, hidrológico y físico se procede a la definición del juego. En primer lugar se

procede a identificar a los jugadores independientes.

5.4.1. Demandas consuntivas

Se han definido 4 jugadores correspondientes a las demandas de agua para uso consuntivo, 2 de ellos de aspectos urbanos y los otros agrícolas. Se ha decidido dividirlos puesto que las características de ellos les hacían ser jugadores independientes compuestos de ésta manera:

- Usos urbanos (Jugador 1): representados por las unidades de demanda urbana de Sevilla, Dos Hermanas, Córdoba y Huelva abastecidos por las empresas Emasesa, Emacsa y Aguas de Huelva respectivamente. Se agrupan en el primer jugador por ser los puntos urbanos seleccionados con más agua requerida para satisfacer el abastecimiento de la población.
- Usos semiurbanos (Jugador 2): representados por los usuarios de demanda de agua urbana de Utrera, Lebrija, Aracena y Almodóbar del Río los cuales son abastecidos por la empresa Aguas de Huesna, el embalse de Aracena y el pantano de La breña II respectivamente. Situadas en las provincias de Sevilla, Huelva y Córdoba.
- Usos agrícolas (Jugador 3): representados por los Campos de cultivo de Girasol, situados al norte de la localidad de Sevilla, por otro lado Los Palacios y Villafranca, situado al sur, La Sierra Norte (Hornachuelos) de Sevilla y Córdoba y la Campiña Sur Cordobesa (Comarca de pueblos cordobeses). Los dos primeros abastecidos por el embalse de Huesna, aunque los Campos de Girasol también son abastecidos por el embalse de Melonares por ser un área mucho más extensa. Por otro lado la Sierra Norte será abastecida por el embalse de Bembézar y la Campiña Sur por el pantano de La breña II, ambos situados en Córdoba.
- Usos agrícolas (Jugador 4): formado por el municipio de Coría del Río, el cual se abastece del embalse de Melonares. Éste tiene la particularidad de que para llegar el agua hasta este punto se utiliza el canal, aspecto que tendrá una gran influencia en los aspectos económicos.

Los cuatro jugadores comparten que son los mayores consumidores de agua de la Cuenca en la parte Occidental de Andalucía.

5.5. Aplicación del modelo de optimización

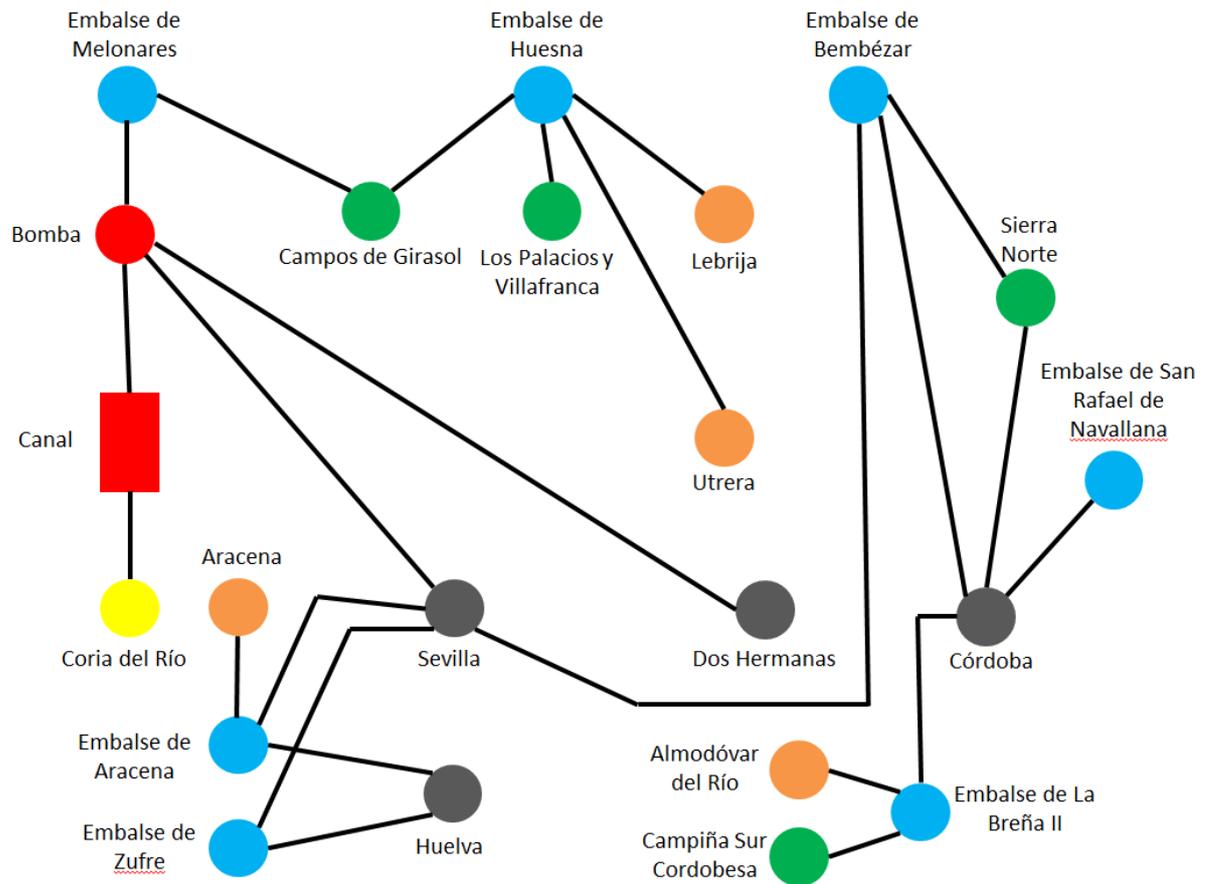
5.5.1. Aclaraciones del modelo

Se aclaran varios aspectos relevantes en la optimización. En cuanto a los costes de cada jugador, se han tenido en cuenta los costes que se pueden dividir entre los usuarios que conforman los jugadores, es decir, el coste del uso de consumo del agua no se ha tenido en cuenta puesto que son indivisibles y corresponden a cada jugador.

Por otro lado, se tienen los costes separables que se corresponden con el de las infraestructuras que son los que se han tenido en cuenta y en los que se basa nuestro método, ya que que nuestro objetivo principal es la optimización de los costes para cada jugador.

En el siguiente esquema (Figura 5.25) se puede observar las infraestructuras que influyen en cada jugador, que de esta manera se simplifica los costes asociados a cada jugador y los que se tienen en cada coalición.

Figura 5.18. Esquema de abastecimiento



En la figura se ve que hay dos ciclos pequeños, el que une a Sevilla y Huelva y el que une a Córdoba con su Sierra norte. Esta diversidad, tan pequeña, no compensa a la hora de obtener un camino óptimo ya que ambos “trozos de camino” vienen a costar lo mismo a los jugadores en ambos casos.

Seguidamente se muestra una tabla simplificadora del esquema de abastecimiento.

Tabla 5.10. Abastecimiento de agua

	J 1	J 2	J 3	J 4
Embalse Melonares	Sí	No	Sí	Sí
Bombeo	Sí	No	No	Sí
Embalse Huesna	No	Sí	Sí	No
Canal	No	No	No	Sí
Embalse de Aracena	Sí	Sí	No	No
Embalse de Zufre	Sí	No	No	No
Embalse de Bembézar	Sí	No	Sí	No
Embalse de San Rafael de Navallana	Sí	No	No	No
Embalse de la Breña II	Sí	Sí	Sí	No
Reutilización	No	No	Sí	Sí
Desalinización	No	No	Sí	Sí

Tabla 5.11. Precios unitarios

	Precios por 1 hm ³ (M€)
Embalse Melonares	5,16
Bombeo	4,7
Embalse Huesna	5,22
Canal	1,16
Embalse de Aracena	4,87
Embalse de Zufre	4,90

Embalse de Bembézar	5,12
Embalse de San Rafael de Navallana	5,04
Embalse de La Breña II	4,96
Reutilización	0,67
Desalinización	0,5

5.5.2. Optimización de las coaliciones

El siguiente paso consiste en la aplicación del modelo de optimización para cada una de las 15 coaliciones (2^4-1). En cada una de las optimizaciones los usuarios presentes en la coalición están vinculados al conseguimiento de los niveles de garantía y tienen a disposición todas las alternativas de suministro con sus respectivas funciones de coste. La elección del conjunto de alternativas de suministro más adecuado se realiza minimizando la función objetivo del sistema, que incluye las funciones de coste de las infraestructuras.

Los usuarios que no pertenecen a la coalición están vinculados al conseguimiento de los niveles de garantía. Siendo el coste de déficit inferior al coste de las infraestructuras del sistema, el modelo no está incentivado a disponer la realización de nuevas infraestructuras para elevar el nivel de garantía por encima del valor de base.

El intervalo temporal establecido en el análisis es de 50 años, que corresponde a la vida útil estimada para las obras civiles. Las inversiones que presentan una vida útil inferior serán reemplazadas al caducar el período de amortización suponiendo un valor residual nulo.

A continuación se ofrece un resumen de los resultados calculados para cada coalición. Se puede observar en las distintas tablas el dimensionamiento de las infraestructuras y el coste mínimo asociado a cada coalición.

Con el fin de agilizar la identificación de las coaliciones se ha propuesto la siguiente notación para los jugadores del sistema: **Jugador i: (i); i=1,2,3,4**

Tabla 5.12. Coalición 1

Coalición 1											
Infraestructuras	Melonares	Huesna	Bombeos	Canal	Aracena	Zufre	Bembézar	San Rafael de navallana	La Breña II	Reutilización	Desalinización
Diseño	1 hm ³										
Coste (M€)	1,72	0,00	2,9	0,00	2,4	4,9	2,5	2,5	1,6	0,00	0,00
Total (M€)	34.75										

Tabla 5.13. Coalición 2

Coalición 2											
Infraestructuras	Melonares	Huesna	Bombeos	Canal	Aracena	Zufre	Bembézar	San Rafael de navallana	La Breña II	Reutilización	Desalinización
Diseño	1 hm ³										
Coste (M€)	0,00	2,6	0,00	0,00	2,4	0,00	0,00	0,00	1,6	0,00	0,00
Total (M€)	6.6										

Tabla 5.14. Coalición 3

Coalición 3											
-------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Infraestructuras	Melonares	Huesna	Bombeos	Canal	Aracena	Zufre	Bembézar	San Rafael de navallana	La Breña II	Reutilización	Desalinización
Diseño	1 hm ³										
Coste (M€)	1,7	2.6	0,00	0,00	0,00	0,00	2.6	0,00	1.6	0,3	0,25
Total (M€)	9										

Tabla 5.15. Coalición 4

Coalición 4											
Infraestructuras	Melonares	Huesna	Bombeos	Canal	Aracena	Zufre	Bembézar	San Rafael de navallana	La Breña II	Reutilización	Desalinización
Diseño	1 hm ³										
Coste (M€)	1,7	0,00	2,4	1,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,3	0,25
Total (M€)	5.9										

Tabla 5.16. Coalición 12

Coalición 12											
--------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Infraestructuras	Melonares	Huesna	Bombeos	Canal	Aracena	Zufre	Bembézar	San Rafael de navallana	La Breña II	Reutilización	Desalinización
Diseño	1 hm ³										
Coste (M€)	1,7	2,6	2,4	0,00	4,9	4,9	2,6	5	2,8	0,00	0,00
Total (M€)	24,4										

Tabla 5.17. Coalición 13

Coalición 13											
Infraestructuras	Melonares	Huesna	Bombeos	Canal	Aracena	Zufre	Bembézar	San Rafael de navallana	La Breña II	Reutilización	Desalinización
Diseño	1 hm ³										
Coste (M€)	2,6	2,6	2,8	0,00	2,4	0,0	5,1	5,1	2,9	0,3	0,3
Total (M€)	14,8										

Tabla 5.18. Coalición 14

Coalición 14											
--------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Infraestructuras	Melonares	Huesna	Bombeos	Canal	Aracena	Zufre	Bembézar	San Rafael de navallana	La Breña II	Reutilización	Desalinización
Diseño	1 hm ³										
Coste (M€)	2,6	5,7	2,8	1,16	2,4	4,9	2,6	5,1	1,9	0,3	0,3
Total (M€)	19,4										

Tabla 5.19. Coalición 23

Coalición 23											
Infraestructuras	Melonares	Huesna	Bombeos	Canal	Aracena	Zufre	Bembézar	San Rafael de navallana	La Breña II	Reutilización	Desalinización
Diseño	1 hm ³										
Coste (M€)	1,7	5,2	0,00	0,00	2,6	2,9	2,6	0,00	2,9	0,3	0,3
Total (M€)	17,8										

Tabla 5.20. Coalición 24

Coalición 24											
--------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Infraestructuras	Melonares	Huesna	Bombeos	Canal	Aracena	Zufre	Bembézar	San Rafael de navallana	La Breña II	Reutilización	Desalinización
Diseño	1 hm ³										
Coste (M€)	1,7	2,6	2,8	1,16	2,4	0,00	0,00	0,00	1,9	0,3	0,3
Total (M€)	12,5										

Tabla 5.21. Coalición 34

Coalición 34											
Infraestructuras	Melonares	Huesna	Bombeos	Canal	Aracena	Zufre	Bembézar	San Rafael de navallana	La Breña II	Reutilización	Desalinización
Diseño	1 hm ³										
Coste (M€)	2,6	2,6	2,8	1,16	0,00	0,00	2,6	0,00	1,9	0,67	0,5
Total (M€)	14,0										

Tabla 5.22. Coalición 123

Coalición 123											
---------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Infraestructuras	Melonares	Huesna	Bombeos	Canal	Aracena	Zufre	Bembézar	San Rafael de navallana	La Breña II	Reutilización	Desalinización
Diseño	1 hm ³										
Coste (M€)	2,6	2,6	2,8	0,00	4,87	4,9	5,1	5,04	4,96	0,3	0,3
Total (M€)	32.5										

Tabla 5.23. Coalición 124

Coalición 124											
Infraestructuras	Melonares	Huesna	Bombeos	Canal	Aracena	Zufre	Bembézar	San Rafael de navallana	La Breña II	Reutilización	Desalinización
Diseño	1 hm ³										
Coste (M€)	2,6	2,6	5,6	1,16	4,87	4,9	2,6	5,04	2,5	0,3	0,3
Total (M€)	29.4										

Tabla 5.24. Coalición 134

Coalición 134											
---------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Infraestructuras	Melonares	Huesna	Bombeos	Canal	Aracena	Zufre	Bembézar	San Rafael de navallana	La Breña II	Reutilización	Desalinización
Diseño	1 hm ³										
Coste (M€)	5,1	2,6	5,6	1,16	2,9	4,9	5,2	5,04	4,96	0,67	0,6
Total (M€)	31,8										

Tabla 5.25. Coalición 234

Coalición 234											
Infraestructuras	Melonares	Huesna	Bombeos	Canal	Aracena	Zufre	Bembézar	San Rafael de navallana	La Breña II	Reutilización	Desalinización
Diseño	1 hm ³										
Coste (M€)	2,6	5,1	4,8	1,16	2,9	0,00	2,6	0,00	2,4	0,67	0,6
Total (M€)	10,8										

5.5.3. Función característica

A partir de los datos de coste obtenidos para cada coalición y descritos en los apartados anteriores es posible definir la función característica del juego.

A continuación se muestra las ecuaciones con las que se han calculado los costes de las

diferentes coaliciones. Para calcular la función característica se empieza suponiendo que el coste del embalse del Huesna es **h**, del uso de la bomba es **b**, del embalse de melonares es **m**, del embalse de Aracena **a**, del embalse de Zufre **z**, del embalse de Bembézar **be**, del embalse de San Rafael de Navallana **s**, del embalse de la Breña **br**, del canal **c**, de la reutilización es **r** y de la desalinización es **d**. Se tiene por lo tanto las siguientes ecuaciones:

$$C(1)=z+a+m+b+s+be+br$$

$$C(2)=a+br+h$$

$$C(3)=m+h+be+br+r+d$$

$$C(4)=m+b+c+r+d$$

$$C(12)=m+z+a+b+s+be+br+h$$

$$C(13)=z+a+m+b+s+be+br+h+r+d$$

$$C(14)=a+z+m+b+s+be+br+c+r+d$$

$$C(23)=a+br+h+m+be+r+d$$

$$C(24)=a+br+h+m+b+c+r+d$$

$$C(34)=m+h+be+br+b+c+r+d$$

$$C(123)=z+a+m+b+s+be+br+h+r+d$$

$$C(124)=z+a+m+b+s+be+br+h+r+d+c$$

$$C(134)=C(124)=C(n)$$

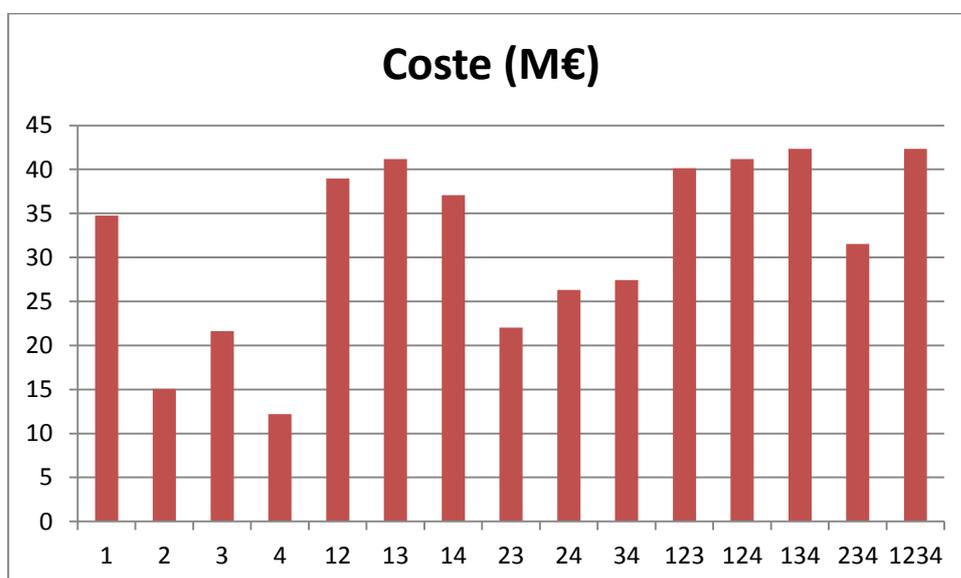
$$C(234)=a+br+h+m+r+d+b+c$$

En la Tabla 5.26 se resume el coste calculado para cada una de las coaliciones del juego y a continuación, en la Figura 5.19, se muestra el gráfico relativo a la función característica para el caso de estudio.

Tabla 5.26. Función característica

Coalición	Coste (M€)
1	34,75
2	15,06
3	21,64
4	12,19
12	38,98
13	41,19
14	37,08
23	22,01
24	26,29
34	27,42
123	40,13
124	41,18
134	42,35
234	31,53
1234	42,35

Figura 5.19. Gráfico de coaliciones y su coste



5.5.4. El juego de ahorro

El juego de ahorro se define como $v(S) = c(S) - \sum_{i \in S} c(i)$

Tabla 5.27. Juego ahorro

Coalición	Ahorro (M€)
1	0
2	0
3	0
4	0
12	9,83
13	15.24
14	9,86
23	10.18
24	0
34	6,33
123	30.29
124	19.69
134	26,27
234	21.63
1234	41,32

5.5.5. Asignación de costes

Una vez determinada la función característica del juego y comprobada la eficiencia de la gran coalición se procede a la asignación del coste de los servicios calculados mediante la aplicación del tau valor.

Juego gap

En nuestro caso, el vector superior \mathbf{b}^v es de la forma $\mathbf{b}^v=(19.69, 15.05, 24.63, 11.01)$.

El juego gap \mathbf{g}^v se muestra en la siguiente tabla

Coalición	Juego Gap
1	19,26
2	15,05
3	24,63
4	11,03
12	24,91
13	29,08
14	20,84
23	29,50
24	26,06
34	29,01
123	29,58
124	29,06
134	29,06
234	29,06
1234	30,06

Notar que el juego gap es monótono.

Por otro lado nuestro juego es de costos porque es subaditivo.

Notar que al ser el juego gap monótono el vector de concesión coincide con el vector \mathbf{b}^v y como también es positivo esto lleva a ser quasibalaceado. Esto simplifica mucho el cálculo del tau-valor ya que no hemos de calcular, para cada i , el mínimo de la función gap en cada una de las colaliciones que contienen a i .

Se estima el tau valor para la función de ahorro.

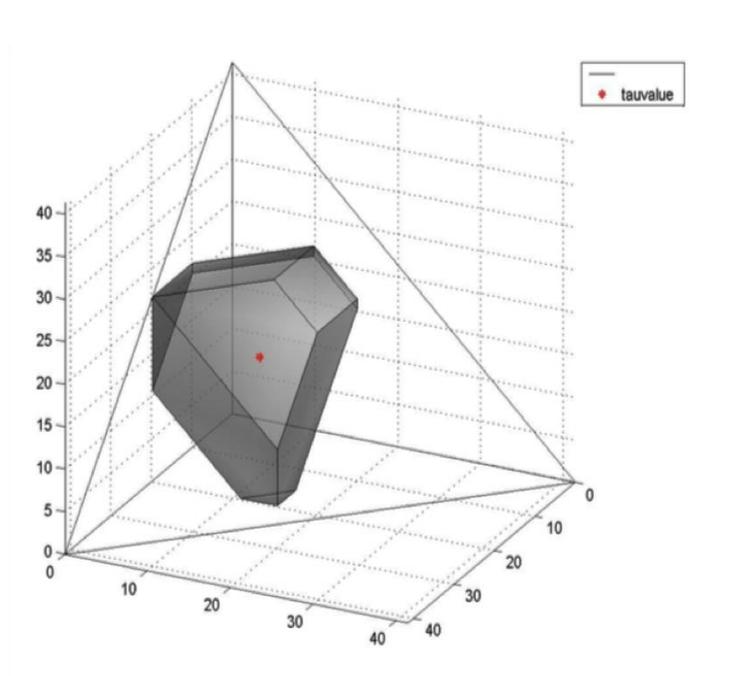
Tabla 5.28. Tau valor

Jugador	Tau valor
T(1)	12,07
T(2)	9,23
T(3)	13,26
T(4)	6,76

Tabla 5.29. Costo vía el tau-valor

$Ct(1) = 34,75 - 12,07 = 22,75$
$Ct(2) = 15,06 - 9,23 = 5,83$
$Ct(3) = 21,64 - 8,77 = 13,87$
$Ct(4) = 12,19 - 3,44 = 9,75$

Figura 5.20. Tau-valor y su pertenencia al core



Politopo sombreado, del juego saving.

6. CONCLUSIONES

Como conclusión fundamental del trabajo pensamos que el método utilizado para repartir los costos del uso de las infraestructuras por parte de los jugadores ha sido exitoso ya que los jugadores reducen considerablemente su costo individual.

En segundo lugar el cálculo de los repartos es fácil de computar, de hecho hemos utilizado un programa on-line para este objeto.

En tercer lugar este método ha sido utilizado en un área grande dentro de Andalucía, en concreto las provincias de Sevilla, Huelva y Córdoba. Podemos, para un futuro trabajo, ampliar aún más la zona y considerar toda la comunidad autónoma.

Un problema adicional es el de considerar los caminos óptimos entre dos puntos antes de poder emplear el método. En este caso no ha sido necesario, sin embargo, en territorios más amplios si que habría que realizar antes este estudio.

7. Referencias

1. José Antonio de la Orden Gómez (2006): El análisis económico en la Directiva Marco del Agua: Incidencias e implicaciones para España, Instituto Geológico y Minero de España.
2. Joaquín Pérez, José Luis Jimeno, Emilio Cerdá (2004): Teoría de juegos. Ediciones Pearson.
3. Davide Deidda (2009): Metodología para la asignación de los costes de los servicios del agua basada en la teoría de juegos cooperativos: aplicación a la cuenca del río Turia (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia.
4. Riccardo Zucca (2010): A cooperative game theory approach for cost allocation in complex water resource systems. Università degli Studi di Cagliari.
5. CEDEX (2011). Guía técnica para la caracterización de medidas. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
6. Schmeidler, D. (1969). "The Nucleolus of a Characteristic Function Game". *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 17, 1163-1170.
7. Shapley, L. S. (1953). "A Value for n-Person Games". En Kuhn, Tucker (ed.). *Contributions to the Theory of games II*, pp. 307-317. Princeton, New Jersey, Princeton University Press.
8. Owen, G. (1995). *Game Theory*. Tercera Edición. San Diego, California, Academic Press.
9. Driessen, T. (1998). *Cooperative Games, Solutions and Applications*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

Referencias electrónicas:

1. [http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/planificacion hidrologica/marcodelagua/default.aspx](http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/planificacion_hidrologica/marcodelagua/default.aspx)
2. <http://www.chguadalquivir.es>
3. <http://www.ecured.cu>
5. <http://www.embalses.net/cuenca-4-guadalquivir.html>
6. <https://www.wikipedia.es>
8. <http://www.juntadeandalucia.es>
9. <http://sig.mapama.es/snczi/visor.html?herramienta=EstadisticasPresas>
10. <http://www.asajasevilla.es>

8. GLOSARIO

DMA: Directiva Marco Europea de Aguas

CCAA: Comunidad Autónoma

UDU: Unidades Demanda Urbana

UDA: Unidades Demanda Agrícola

TJC: Teoría de Juegos Cooperativos

TFC: Tomas Fuera de Comisión

MIMAM: Ministerio de Medio Ambiente en el Plan Hidrológico Nacional

CEDEX: Centros de Estudios y Experimentación de Obras Públicas