



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA

## **TESIS DOCTORAL**

**Priorización de actuaciones medioambientales de ríos  
con entornos urbanos.**

Presentada por:

**Jesús Martínez León**

Dirigida por:

**Dr. Jorge Curiel Esparza**

**Dr. Julián Cantó Perelló**

**Dr. Manuel Guzmán Martín Utrillas**

**Valencia, Septiembre de 2015.**



**A Elena, Teresa, Inés y Jesús.**

**A mi madre y a mi padre (†2011).**



## Resumen

La técnica de mejora medioambiental de ríos es una tarea compleja y multidisciplinar, en especial en entornos urbanos. A día de hoy, la ingeniería de ríos y las ciencias medioambientales implicadas en dicho objetivo han tenido un gran desarrollo. El procedimiento general para desarrollar este tipo de proyecto sigue siendo no sistemático; se desarrolla de forma unipersonal, discursiva, lineal y secuencial, con el asesoramiento puntual de algún experto, en su caso. Este método da resultados satisfactorios en actuaciones concretas que consideran conceptos tangibles y disponen de datos suficientes. No es el caso en proyectos de rehabilitación de ríos urbanos, por lo que es necesario aplicar metodologías de apoyo a la decisión que garanticen la selección óptima de la solución.

Se plantea una metodología para la priorización de las actuaciones de mejora medioambiental de ríos en entornos urbanos mediante una técnica de apoyo a la decisión de carácter híbrido que combina la técnica Delphi para la obtención de datos, el análisis mediante el proceso de análisis jerárquico denominado AHP, y el método VIKOR para la priorización de las soluciones obtenidas en dicho análisis. Este modelo híbrido se aplica a la histórica ciudad amurallada de Cuenca y el río Huécar. Deben considerarse criterios tangibles e intangibles teniendo en cuenta: el patrimonio cultural, el patrimonio natural, el flujo de agua, la naturalización del río, la interacción de la corriente de agua, los costos de construcción y los costos de operación y mantenimiento. En este método los criterios más valorados por los panelistas son el patrimonio cultural y la naturalización del río, con 28% y 25%, respectivamente. La sección transversal trapezoidal logra una ventaja y una estabilidad aceptable sobre la sección transversal triangular modificada, valorada como segunda. Por lo tanto, el desarrollo del proyecto de rehabilitación seleccionado facilita la integración óptima del río en el paisaje urbano.

## Abstract

The technique of environmental improvement of rivers has a complex character and is a multidisciplinary task, especially in urban environments. Today, river engineering and environmental science involved in this objective have made great progress. The general procedure for developing this type of project is still not systematic; It is developed by a technician discursive and sequentially, with the timely advice of a specialist if it is necessary. This method gives satisfactory results into particular actions with tangible concepts and sufficient data. It is not the case in the rehabilitation of urban rivers so it is necessary to apply methods of decision support to ensure the optimal selection of the solution.

Selecting a river rehabilitation project is a complex engineering decision including construction and environmental criteria. The rehabilitation project gets complicated even more if the city qualifies for inscription on the UNESCO World Heritage List. Tangible and intangible factors must be assessed to take into account cultural heritage, natural heritage, water flow, river naturalization, interaction of water stream, construction costs and operational and maintenance costs. The proposed method is a hybrid model combining Delphi, Analytical Hierarchy Process and VIKOR technique. The hybrid model is applied to the historic walled town of Cuenca and the Huécar river. The criteria most valued by panelists are cultural heritage and river naturalization with 28% and 25% respectively. The trapezoidal cross section achieves an acceptable advantage and stability over the modified triangular cross section, valued as second. Therefore, the development of the selected rehabilitation project facilitates the optimal integration of the river in the townscape.

## Resum

La tècnica de millora mediambiental de rius als entorns urbans té caràcter multidisciplinari i és una tasca complexa. L'enginyeria de rius i les ciències mediambientals implicades en aquest objectiu han tingut un gran desenvolupament. En canvi, la metodologia general per a desenrotllar aquest tipus de projectes segueix sent no sistemàtica; es desenvolupa de forma unipersonal, discursiva, lineal i seqüencial, amb l'assessorament puntual d'algun expert si escau. Aquest mètode dona resultats satisfactoris en actuacions concretes on es consideren conceptes tangibles i amb dades suficients. No és aquest el cas en projectes de rehabilitació de rius urbans, per la qual cosa és necessari aplicar metodologies de suport a la decisió que garantisquen la selecció òptima de la solució.

Es planteja una metodologia per a la prioritització de les actuacions de millora mediambiental de rius en entorns urbans mitjançant una tècnica de suport a la decisió de caràcter híbrid que combina la tècnica Delphi per a l'obtenció de dades, l'anàlisi mitjançant el procés d'anàlisi jeràrquica anomenada AHP, i el mètode VIKOR per a la prioritització de les solucions obtingudes en aquesta anàlisi. Aquest model híbrid s'aplica a la històrica ciutat emmurallada de Cuenca i el riu Huécar. Calen avaluar-se factors tangibles i intangibles tenint en compte: el patrimoni cultural, el patrimoni natural, el flux d'aigua, naturalització del riu, la interacció del corrent d'aigua, els costos de construcció i els costos d'operació i manteniment. En aquest mètode els criteris més valorats pels panelistes són el patrimoni cultural i la naturalització del riu, amb un 28% i un 25%, respectivament. La secció transversal trapezoïdal aconseguix un avantatge i una estabilitat acceptable sobre la secció transversal triangular modificada, valorada com a segona. Per tant, el desenvolupament del projecte de rehabilitació seleccionat facilita la integració òptima del riu en el paisatge urbà.



---

## ÍNDICE

Resumen .....	5
1.- INTRODUCCIÓN .....	19
2.- PROYECTOS DE MEJORA DE RÍOS. ....	27
2.1.- Funcionamiento del ecosistema fluvial.....	31
2.2.- Los cauces de nuestros ríos. Un entorno degradado. ....	44
2.3.- Técnicas de Ingeniería Fluvial en entornos urbanos.....	74
2.4.- Metodología general en el desarrollo de actuaciones sobre ríos. ....	84
2.5.- Mejora de ríos en entornos urbanos: la cuenca mediterránea occidental. ....	92
3.- METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE SOLUCIONES EN ACTUACIONES SOBRE RÍOS. ....	141
3.1.- EL Método Delphi. ....	146
3.2.- Método del Procedimiento de Análisis Jerárquico (AHP). ..	152
3.3.- La técnica VIKOR.....	168
4.- APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA EN ACTUACIONES SOBRE RÍOS. ....	175
4.1.- Selección de Proyecto de Rehabilitación del río Huécar. ..	175
4.2.- Protocolo de toma de decisiones y selección de criterios y secciones transversales tipo del río. ....	180
4.3.- AHP para la obtención de la sección transversal óptima del río. ....	193
4.4.- Obtención de la Sección Transversal de consenso por el Método VIKOR. ....	214
4.5.- Descripción de la actuación llevada a cabo. ....	220
5.- CONCLUSIONES.....	231
6.- REFERENCIAS.....	239



---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modificación de las variables en un río a lo largo de su cauce ....	33
Tabla 2. Características en el tramo superior de un río .....	35
Tabla 3. Tipos de flujo existentes en un río.....	40
Tabla 4. Presiones e impactos sobre un río.....	47
Tabla 5. Evolución superficie regada según tipo de riego en España.....	54
Tabla 6. Evolución superficie regada según tipo de riego en la R. Valenciana .....	54
Tabla 7. Problemáticas principales en los tramos urbanos de ríos .....	71
Tabla 8. Relación entre las presiones con las consecuencias que generan en los ríos.....	72
Tabla 9. Bases a analizar en el desarrollo de los nuevos sectores en relación a los cauces fluviales en relación a la ordenación hidráulica .....	78
Tabla 10. Zonificación y particularidades del tramo final del cauce del río Palancia. ....	98
Tabla 11. Escala de valoración en método AHP según Saaty .....	158
Tabla 12. Valores del RI según tamaño de matriz.....	167
Tabla 13. Escala de 9 puntos con términos lingüísticos para las comparaciones por pares en AHP. ....	189
Tabla 14-a. Cuestionario para evaluar los criterios principales para la selección de un proyecto de rehabilitación del río Huécar. ....	190
Tabla 14-b. Cuestionario para evaluar los criterios principales para la selección del proyecto de rehabilitación. ....	191
Tabla 15. Puntuación de ponderación de los Criterios por el panelista experto nº 1.....	194
Tabla 16. Vector de prioridad y el análisis de la consistencia de la matriz de comparación por pares de los criterios en la selección de una sección transversal del río.....	195
Tabla 17. Vector de prioridad y el análisis de la consistencia de la matriz de comparación por pares de los criterios en la selección de una sección transversal del río.....	197
Tabla 18.1. Puntuación de ponderación de las secciones transversales para el Criterio CUH por el experto nº 1 .....	199
Tabla 18.2. Puntuación de ponderación de las secciones transversales para el Criterio NAH por el experto nº 1. ....	200
Tabla 18.3. Puntuación de ponderación de las secciones transversales para el Criterio WAF por el experto nº 1 .....	201
Tabla 18.4. Puntuación de ponderación de las secciones transversales para el Criterio RIN por el experto nº 1.....	202
Tabla 18.5. Puntuación de ponderación de las secciones transversales para el Criterio IWS por el experto nº 1. ....	203

Tabla 18.6. Puntuación de ponderación de las secciones transversales para el Criterio COC por el experto nº 1. ....	204
Tabla 18.7. Puntuación de ponderación de las secciones transversales para el Criterio OMC por el experto nº 1.....	205
Tabla 19.1. Matriz de comparación de las alternativas en relación al criterio CUH .....	206
Tabla 19.2. Matriz de comparación de las alternativas en relación al criterio NAH.....	206
Tabla 19.3. Matriz de comparación de las alternativas en relación al criterio WAF .....	207
Tabla 19.4. Matriz de comparación de las alternativas en relación al criterio RIN.....	207
Tabla 19.5. Matriz de comparación de las alternativas en relación al criterio IWS .....	207
Tabla 19.6. Matriz de comparación de las alternativas en relación al criterio COC .....	208
Tabla 19.7. Matriz de comparación de las alternativas en relación al criterio OMC.....	208
Tabla 20.1. Obtención de autovector y autovalor máx. de las alternativas respecto al criterio CUH.....	209
Tabla 20.2. Obtención de autovector y autovalor máx. de las alternativas respecto al criterio NAH .....	209
Tabla 20.3. Obtención de autovector y autovalor máx. de las alternativas respecto al criterio WAF .....	210
Tabla 20.4. Obtención de autovector y autovalor máx. de las alternativas respecto al criterio RIN.....	210
Tabla 20.5. Obtención de autovector y autovalor máx. de las alternativas respecto al criterio IWS .....	211
Tabla 20.6. Obtención de autovector y autovalor máx. de las alternativas respecto al criterio COC .....	211
Tabla 20.7. Obtención de autovector y autovalor máx. de las alternativas respecto al criterio OMC .....	212
Tabla 21. Peso de las alternativas para cada uno de los criterios.....	214
Tabla 22. Peso de las alternativas para cada uno de los criterios. Matriz de partida para el método VIKOR.....	215
Tabla 23. Matriz transpuesta y obtención de las variables $f_j^*$ y $f_j^-$ .....	216
Tabla 24. Matriz auxiliar para cálculo de la lista de valores S y R.....	217
Tabla 25. Matriz para el cálculo de los valores $S_i$ y $R_i$ .....	217
Tabla 26. Matriz para el cálculo de los valores $Q_i$ .....	218
Tabla 27. Resumen de las actuaciones adoptadas y los efectos conseguidos .....	228

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.- -Diferentes tipo de actuación en función de la reposición de la funcionalidad hídrica y del ecosistema. ....	23
Fig. 2. Evolución de las variables en un río a lo largo de su recorrido .....	34
Fig. 3.- Esquema de flujo vertical en zonas con humedad reducida en riberas. Río perdedor. Flujo del río al acuífero. Situación 1 .....	41
Fig. 4.- Esquema de flujo vertical en zonas con humedad elevada en riberas. Río ganador. Flujo de acuífero al río. Situación 2 .....	41
Fig. 5.- Esquema de flujo vertical en zonas con humedad elevada en riberas en período de avenida. Río perdedor. Flujo de río a acuífero. Situación 3.....	42
Fig. 6.-. Esquema de flujo vertical en zonas con desconexión río-acuífero. Flujo del río al acuífero. Situación 1 con desaparición de vegetación de ribera .....	43
Fig. 7.- Esquema de la analogía de la balanza.....	50
Fig. 8. Evolución de la superficie regada en España.....	51
Fig. 9.- Evolución de la construcción de presas en España .....	52
Fig. 10. Evolución de la capacidad y volumen de los embalses en España. ....	53
Fig. 11. Distribución de acuíferos sobreexplotados en España .....	57
Fig. 12. Vista del río Palancia en Sagunto (Valencia) con vehículos aparcados en el propio cauce. ....	64
Fig. 13. Trabajos de dragado en un río. ....	66
Fig. 14. Trabajos de extracción de áridos en el cauce de un río. ....	68
Fig. 15. Infraestructura existente paralela a un río, reduciendo anchura del cauce.....	69
Fig. 16. Evolución de la producción eléctrica en España. ....	70
Fig. 17. El tramo final del cauce del río Palancia y su desembocadura al mar. Planta y fotografía aérea. ....	99
Fig. 18. Río Palancia. Infraviviendas existentes en la zona del delta del río Palancia y su frente marítimo. ....	99
Fig. 19. Río Palancia. Brazo sur de la desembocadura aterrado por escombros y basura.....	100
Fig. 20. Estrechamiento del cauce y márgenes del río Valdemembra a su paso por Villanueva de la Jara (Cuenca) debido a los cerramientos de las naves industriales. ....	104
Fig. 21. Estrechamiento del cauce del río Valdemembra debido a los predios agrícolas.....	105
Fig. 22. Río Valdemembra. Estado degradado del cauce y su ribera. ....	105

Fig. 23. Río Valdemembra. Gran montículo de escombros sobre tradicional zona húmeda.....	105
Fig. 24. Río Valdemembra. Creación de sendas.....	108
Fig. 25. Río Valdemembra. Sendas, talanqueras, plantaciones, riego por goteo y pasarelas de madera. ....	108
Fig. 26. Río Valdemembra. Pasarelas de madera.....	108
Fig. 27. Río Valdemembra. Rehabilitación de antigua zona húmeda (antes escombrera).....	109
Fig. 28. Río Valdemembra. Restauración lavadero. ....	109
Fig. 29. Río Valdemembra. Estabilización de taludes. ....	109
Fig. 30. Arroyo de la Cañada. Planta de Localización zona de Actuación. ....	110
Fig. 31. Arroyo de la Cañada. Vistas nocturnas de la actuación. Red de Alumbrado. ....	113
Fig. 32. Arroyo de la Cañada. Comparativa estado inicial – estado final. ....	118
Fig. 33. Rambla de los Chabarcos. Comparativa estado inicial – estado final .....	122
Fig. 34-Río Júcar. Creación de sendas.....	126
Fig. 35. Arroyo de Bonilla.....	126
Fig. 36. Río Júcar. Escala de peces. ....	127
Fig. 37. Tramo entarimado de la pasarela volada sobre el río Júcar con barandilla de fundición e iluminación. ....	128
Fig. 38. Río Júcar. Diversas actuaciones en el cauce. ....	129
Fig. 39. Río Júcar. Panorámica zona de actuación Fase I. ....	133
Fig. 40. Río Júcar. Restitución vegetación climatófila.....	134
Fig. 41. Río Júcar. Restitución bosque de ribera. ....	134
Fig. 42. Río Júcar. Entramado de sendas y caminos.....	136
Fig. 43. Río Júcar. Zonas de esparcimiento. ....	136
Fig. 44. Río Júcar. Jardín botánico. ....	136
Fig. 45. Clasificación de los métodos multicriterio .....	142
Fig. 46. Esquema de procedimiento del método Delphi .....	151
Fig. 47. Jerarquización del problema según el método AHP.....	156
Fig. 48. Río Huécar (cauce inferior) en su confluencia con el río Júcar (cauce superior) y el casco urbano antiguo de Cuenca (entre ambos cauces).....	176
Fig. 49. Vista esquemática del cono de deyección del río Huécar (susceptible de inundación) antes de la desembocadura en el Júcar.....	177
Fig. 50. Algunos períodos de inundaciones en el casco urbano de Cuenca durante el pasado siglo. ....	178
Fig. 51. Río Huécar antes de la actuación. Canalización dura y con escasez o ausencia de lámina de agua. ....	179

---

Fig. 52. Vista del río Huécar antes de la actuación por la calle de Los Tintes. Su aspecto es el de un canal más que de un río. ....	179
Fig. 53. Propuesta de secciones transversales tipo para la rehabilitación del río Huécar.....	187
Fig. 54. Estructura jerárquica para la selección de un proyecto de rehabilitación para el río Huécar. ....	188
Fig. 55. Variación de los pesos de cada alternativa en relación a los criterios.....	212
Fig. 56. Pesos de cada alternativa para cada uno de los criterios.....	213
Fig. 57. Esquema del tramo del cauce del río Huécar sobre el que se actúa y características del mismo. ....	223
Fig. 58.- Esquema de funcionamiento del telemando del río Huécar. ....	225
Fig. 59. Río Huécar. Vista del cauce antes de la actuación. ....	226
Fig. 60. Río Huécar. Vista del cauce tras la actuación. ....	226
Fig. 62. Vista del estado anterior a la actuación y tras la misma en otro punto del cauce del río. De nuevo se aprecia la creación de saltos de agua, así como una zona de vegetación en los márgenes del cauce. ....	227
Fig. 63. Vista del estado anterior a la actuación y tras la misma en la calle de Los Tintes cerca del Parque del Huécar. Los saltos de hormigón se naturalizan, se mantiene una lámina de agua constante y se genera una franja de vegetación en los márgenes del cauce. ....	228
Fig. 64.-Porcentajes de ponderación obtenidos para los diferentes criterios adoptados .....	233
Fig. 65.-Porcentajes de ponderación obtenidos por las alternativas para cada uno de los criterios. ....	234
Fig. 66.-Plasmación gráfica de las variables obtenidas por el método VIKOR para cada una de las alternativas.....	235



## **CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN**

---



## 1.- INTRODUCCIÓN

El agua ha sido siempre fuente de vida. Todas las formas de vida conocidas necesitan el agua para vivir. En particular el hombre, cuyo cuerpo está formado por entre el 65 y el 75% de agua. Pero no solo como ser vivo. En el desarrollo de su actividad, y en su proceso evolutivo, el ser humano se ha ido haciendo más dependiente del agua para mantener todos los procesos que ha desarrollado a lo largo de la evolución. Los hombres, individuos sociales que viven en comunidad, han necesitado del agua no solo para su ingestión sino para su aseo personal y limpieza de los elementos que han utilizado para obtener mayor bienestar. El agua es también base natural de la producción agrícola y ganadera, materia imprescindible para la industria y transmisor de energía (Gistau, 2000).

Los ríos, como elemento geológico existente en la Tierra siempre han sido utilizados por el ser humano para satisfacer gran número de sus necesidades. No parece necesaria explicación alguna para tratar de aclarar el concepto que define la palabra río; además y sin ninguna duda, el río y el hombre, el río y la vida; el río y la civilización o el río y los recursos naturales constituyen asociaciones ancestrales cuyos orígenes se pierden en los primeros pasos de nuestra especie Homo Sapiens (Hernández, 2000).

Desde los tiempos remotos el hombre ha tendido a asentarse en las riberas de los ríos, de forma que las primeras grandes civilizaciones se han desarrollado en los valles adyacentes a los cauces fluviales importantes. Esta realidad histórica es fruto de la fertilidad de las llanuras aluviales y de su fácil acceso, haciéndolas susceptibles de ser cultivadas y explotadas eficientemente; además los ríos eran fuente de alimento y agua a la vez que servían como eficaz medio de comunicación (Herrera y Marín, 2000).

La progresiva ocupación de estos valles y el incremento de los asentamientos afectaron a los ecosistemas naturales de los ríos por una parte, y expusieron a las comunidades a los efectos de avenidas

e inundaciones (Herrera y Marín, 2000). Desde ese momento comenzó una lucha tenaz, que aun continua, para evitar que las aguas vuelvan a ocupar, ciertamente de forma esporádica, uno de sus espacios naturales: la llanura de inundación (Redondo y Vara, 1999). Las consecuencias de las avenidas e inundaciones se detectaron en toda su magnitud desde los primeros tiempos, lo que obligó a poner en práctica medios para combatirlas. Sin embargo, las secuelas sobre el ecosistema fluvial se producen, generalmente, de forma paulatina y se agrava lentamente por lo que no se perciben mientras no se alcanzan unos niveles muy altos de afección (Herrera y Marín, 2000). Este proceso de degeneración, que se ha producido en las últimas décadas debido al aumento de las presiones y las afecciones sobre los ríos tanto en cantidad como en intensidad, ha venido de la mano, no sabemos muy bien si como efecto o por cambio de la visión de la sociedad, de una toma de conciencia social en relación con la conservación medioambiental, que ha ocasionado importantes cambios en las concepciones de los ecosistemas fluviales (Redondo y Vara, 1999; Tanago y Garcia-Jalon, 2007).

El aspecto fundamental es que se ha empezado a comprender que el río no es solo una corriente de agua (Hernández, 2000). El río es mucho más. Al río hay que entenderlo como un ecosistema fluvial en el que aparece el biotopo, con tres elementos fundamentales: el cauce, la ribera y la llanura de inundación, y junto al biotopo la biota, acuática y terrestre (Fernández, 2003). Son ecosistemas complejos y singulares que merecen una protección y conservación (Martín-Vide, 2002).

La Directiva 2000/60/CE, conocida como Directiva Marco del Agua, (DMA) ha sido un documento muy importante desde el punto de vista de la protección medioambiental de las aguas. Supone un desafío de gran calado para los poderes políticos, al considerar conjuntamente tanto las aguas continentales superficiales y subterráneas, junto con las de transición y costeras, así como en los objetivos que marca, que se basan en la consecución de un buen estado del agua protegiendo los ecosistemas que dependen de ella

(Cabezas et al, 2009). Sin embargo, no parece razonable que el fin intrínseco de la política de aguas sea mejorar el medio acuático. Parece más razonable pensar que todo ello son instrumentos para alcanzar el bienestar social y la mejora de las condiciones de vida de las personas. Es obvio que la mejora del medio hídrico juega un papel central, imprescindible, para el objetivo del bienestar social, pero no debe confundirse con este.

Tal planteamiento se ha recogido en la Reforma de la Ley de Aguas de 1999, al poner como objetivo primero de la planificación hidráulica conseguir el buen estado ecológico del D.P.H., pero junto con la satisfacción de las demandas y el equilibrio y armonización del desarrollo sectorial y regional (Cabezas, 2009). Por tanto, el planteamiento, como no puede ser de otra forma es aprovechar los recursos que nos aporta el río y su ecosistema pero de forma sostenible.

Las tendencias actuales de las actuaciones sobre cauces son las de poder intervenir en ellos pero teniendo en cuenta las afecciones que se producirán a una mayor escala, intentando minimizar las afecciones sobre el ecosistema. Allá donde se puede, se intenta que las actuaciones permitan una regeneración del ecosistema fluvial donde pudiera estar deteriorado. Y por último, hay actuaciones cuyo objetivo fundamental es la propia regeneración del ecosistema, tomando medidas necesarias, todo ello en función de los condicionantes externos con los que contemos.

De las posibilidades existentes para la mejora de los ríos, considerado en clave medioambiental, la más ambiciosa es la restauración ecológica. En ella se pretende recuperar el estado primitivo del río, anterior a la degradación.

Tradicionalmente se define restauración ecológica como la recreación de comunidades de organismos muy similares a los que existen naturalmente. También se considera restauración como el acto de minimizar las perturbaciones humanas sobre el desarrollo

de los patrones naturales de la biodiversidad. Desde una perspectiva medioambiental la restauración fluvial es distinta de la restauración ecológica fluvial, definiendo restauración como una forma de auxiliar, mejorar y establecer los procesos hidrológicos, geomorfológicos y ecológicos en un sistema de cuenca hidrográfica degradada, substituyendo la pérdida o el riesgo de elementos que pertenecen al sistema natural, y restauración ecológica fluvial como la recuperación de la integridad ecológica de un sistema hidrográfico a través del restablecimiento de los procesos necesarios que sustentan los ecosistemas naturales en una cuenca hidrográfica (Ferreira, 2012). Sin embargo, no siempre es posible o conveniente proceder a la citada restauración ecológica, en especial en entornos urbanos. Por ello, en algunos casos, se pueden plantear otros tipos de actuaciones, siempre positivas, y que sea posible encajar con los condicionantes externos que se tengan en cada caso.

Estas posibles y diferentes actuaciones de mejora fluvial pueden variar en el grado en que se consigue devolver al río a su estado natural, adoptando diferentes nombres, según la Guía metodológica para la elaboración de proyectos de restauración de ríos del Ministerio de Medio Ambiente (Tanago y Garcia-Jalon, 2007):

- Rehabilitación.
- Remediación.
- Mejora.
- Adecuación o acondicionamiento.
- Mitigación.

Ferreira (2012) presenta un gráfico en el que determina otra nomenclatura para las diferentes posibilidades de actuación en función de la mayor o menor posibilidad de actuación sobre la situación inicial.

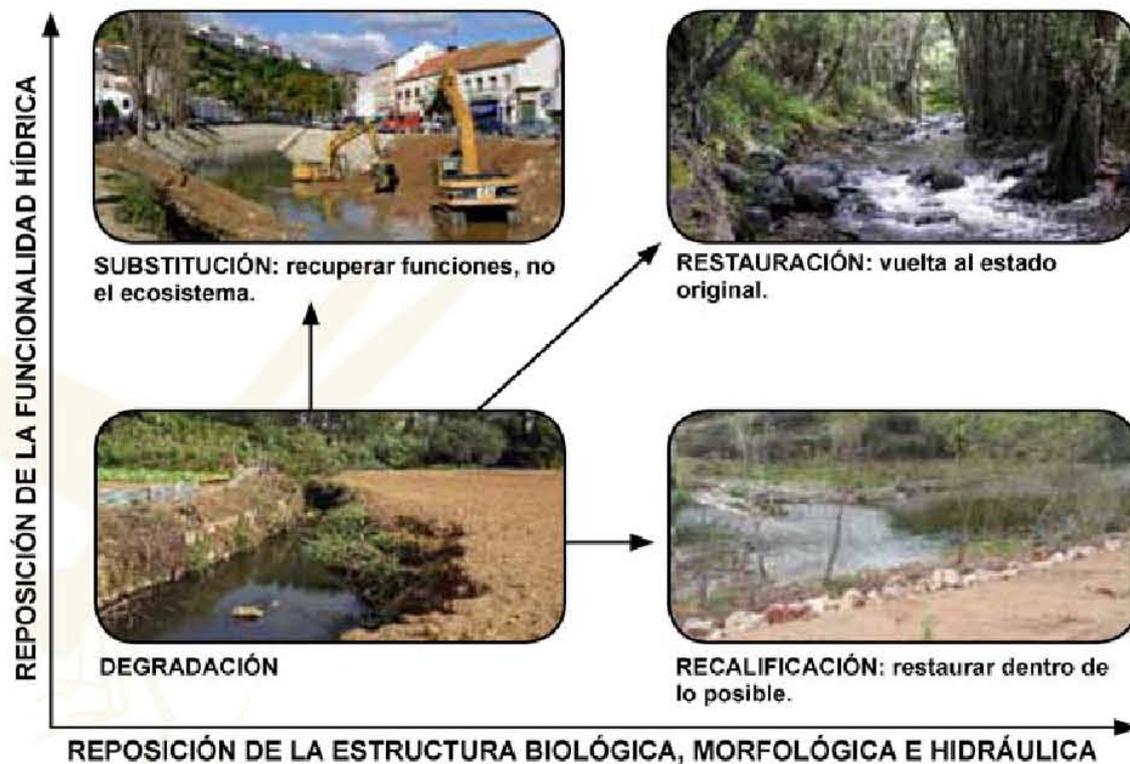


Fig. 1.- -Diferentes tipo de actuación en función de la reposición de la funcionalidad hídrica y del ecosistema.

(Fuente: Ferreira, 2012)

Independientemente de las actuaciones que se lleven a cabo, cada una según las posibilidades, se considera que son adecuadas al poner en evidencia la necesidad de mejorar ecosistemas degradados y en muchos casos olvidados, facilitar el acercamiento al río a diversos colectivos y fomentar el respeto hacia los sistemas naturales.

Se analizará la situación en las que se encuentran los ecosistemas degradados de nuestros ríos, conocer las principales agresiones que han sufrido y sus efectos. En segundo lugar se determinará los mecanismos para mejorar estos ecosistemas, dentro de lo posible. En particular nos centramos en los tramos de río urbano o periurbanos, los cuales se encuentran sometidos a unos condicionantes existentes más limitantes y que nos imposibilitan

actuar con toda la amplitud deseada. Por último, nos centraremos en un caso particular analizando las posibles alternativas de actuación, estableciendo una metodología para determinar la mejor de las posibles a partir de una metodología multicriterio. Por último, se expondrá la actuación realizada y los resultados obtenidos.

Para ello dividimos el documento en tres partes. En la primera, que se corresponde con el segundo capítulo, se describen las características de un ecosistema fluvial, así como las principales agresiones que el ser humano produce en el mismo y que los lleva a un deterioro importante. Además se describe la técnica de mejora de ríos en entornos urbanos, acompañando ejemplos recientes ejecutados por el autor. En la segunda parte, correspondiente a los capítulos tercero y cuarto, se plantea una metodología de apoyo a la decisión para la selección de proyectos de este tipo y su aplicación a un caso práctico singular. La última parte, que se corresponde con el capítulo quinto, obtiene las conclusiones respecto de la metodología expuesta y los resultados obtenidos.

El objetivo fundamental de este trabajo de investigación “Priorización de actuaciones de mejora de ríos en entornos urbanos” es desarrollar una metodología de apoyo a la decisión para la selección de proyectos fluviales de estas características. Se escoge el caso del río Huécar a su paso por la ciudad de Cuenca. Es un caso singular pues posee carácter catalogado como bien de patrimonio mundial, reconocido por la UNESCO (UNESCO, 1995); así mismo es citado en diversos foros de expertos como ejemplo sobresaliente de actuación de mejora de un río en un entorno urbano, además de tener una alta consideración social, política y económica en la ciudad de Cuenca y a escala regional.

## **CAPÍTULO 2.- PROYECTOS DE MEJORA DE RÍOS**

---



## 2.- PROYECTOS DE MEJORA DE RÍOS.

La visión que se tiene del río en los últimos años ha ido cambiando de manera importante. El río debe ser entendido como un ecosistema fluvial según la Directiva Marco del Agua, que es la normativa vigente a nivel de la Unión Europea. De hecho, en su artículo I.- Objeto, ya se fija el objeto de la Directiva, indicando lo siguiente:

*“Artículo I.*

*Objeto.*

*El objeto de la presente Directiva es establecer un marco para la protección de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas que:*

- i) Prevenga todo deterioro adicional y proteja el estado de los ecosistemas acuáticos y, con respecto a sus necesidades de agua, de los ecosistemas terrestres y humedales directamente dependientes de los ecosistemas acuáticos [...]” (European Union, Directive 2000/60/EC)*

Por tanto, en su primer objetivo no habla de mantener la calidad o el caudal de las aguas, sino de prevenir deterioros adicionales y proteger el estado de los ECOSISTEMAS ACUATICOS.

A la hora de estudiar la relación río-ciudad, hay que indicar que una de las justificaciones que han explicado los asentamientos humanos desde el Neolítico, hace más de 5000 años, es la presencia del agua, en sus diversas variantes, y fundamentalmente la de la existencia de corrientes superficiales más o menos permanentes, buscando aprovechar las ventajas que la cercanía a estas corrientes de agua les ofrecían. Muchos han sido los usos que se

buscaban en ellas. Fundamentalmente la de abastecer de agua al asentamiento y a sus habitantes, tanto para agua de boca como para sus actividades productivas. Pero también sirvió para los regadíos de las plantaciones anejas, para facilitar el intercambio de mercancías por vía fluvial, o incluso para facilitar la defensa del asentamiento. Además de ello, los ríos también sirvieron como colectores abiertos a los que verter las aguas residuales, desnaturalizando el entorno ribereño y el propio río, en detrimento de cualquier otro uso o disfrute del mismo.

Sin embargo, la cercanía del río no solo proporciona ventajas. Al tratarse de un sistema natural, difícilmente domesticable, sus características varían y fluctúan temporalmente. Fundamentalmente ello ocurre con el caudal. En efecto, con diversa frecuencia se producen crecidas que ocasionan inundaciones en su entorno, pudiendo producir daños en este asentamiento que se ha ubicado en las cercanías del cauce. Históricamente, la percepción de este riesgo se ha ido reduciendo, relacionado posiblemente con la necesidad del crecimiento económico y urbanístico, unido a las mejoras tecnológicas que el desarrollo industrial ha traído y que permitía actuar sobre el cauce. Se ha pasado de un respeto a dicho riesgo que llevaba a una distribución de usos acorde al funcionamiento histórico del río, a la consideración de que se puede eliminar este riesgo mediante actuaciones artificiales sobre el cauce. Inicialmente, los asentamientos se ubicaron en las cercanías de los ríos, pero en lugares protegidos o libres del riesgo de inundación. Normalmente se ubicaron en uno de los márgenes del río, protegiendo dicho margen con obras y muros de protección. Por el contrario, el otro margen quedaba libre de usos urbanos, aprovechándolo para actividades marginales. El posterior crecimiento urbano, fundamentalmente para usos industriales, que requiere superficies llanas, es el que ocasiona la necesidad de ocupar de forma completa los espacios cercanos al río, a ambos lados, y la reducción de la superficie disponible para la dinámica fluvial (Ureña et al, 1999).

Se ha creído en diversos ámbitos sociales que se puede llegar a domar al río, pudiendo aprovechar el espacio hasta el límite con usos que, con el tiempo, se demuestran poco adecuados; lo cual ha ocasionado que se produzcan catástrofes en muchos ámbitos:

- para empezar, de carácter ambiental, al afectar a las riberas de los ríos, degradando los ecosistemas que se desarrollan en ellas
- de carácter económico, cuando se afectan a las edificaciones, actividades productivas, etc., que se asientan en las zonas de inundación de los ríos
- de carácter social con la pérdida de viviendas o incluso de vidas humanas en los asentamientos que se sitúan en dichas zonas.

Por tanto, la dialéctica río-ciudad se ha movido históricamente según diversas visiones sectoriales: hidrológica, económica, urbanístico-ambiental. La primera de ellas, trata al río desde el punto de vista de su funcionamiento como cauce de esorrentía de caudales, con sus riesgos que ocasiona; la segunda trata el cauce como un recurso pero que debe confinarse para aprovechar el suelo en otras actividades productivas; la tercera visión trata de integrar el río en el entorno urbano como un recurso natural, singular y estructurador de la ciudad. Esta última visión normalmente solo se ha aplicado en los centros de las ciudades, considerándose el río en las afueras y periferias como una simple cloaca. El resultado de esta dialéctica entre las visiones que se han ido produciendo durante la historia ha ido marcando, para cada caso particular, el resultado de la interacción río-ciudad. Algunas variables genéricas que normalmente han influido se podrían indicar para explicar la evolución en la mayor parte de los casos:

- Características de los regímenes hidráulicos (caudal, dimensión de los cauces, tipo de río, navegable o no, estuario...)
- Centralidad cambiante del río y presencia urbana de mismo

- Concepciones, estrategias y actuaciones: objetivos productivos, estética urbana, mejora de los espacios para el ocio, etc. (Monclús, 2000).

Lo cierto es que, en la actualidad, la mayor parte de nuestros ríos discurren por espacios muy confinados por los distintos usos productivos (cultivos agrícolas intensivos, zonas industriales, asentamientos urbanos...). Si bien estos usos han producido una aparente mejora en nuestra calidad de vida, no es menos cierto que estamos teniendo que pagar un coste elevado, especialmente a nivel ambiental. Se ha perdido la riqueza del paisaje del entorno de los ríos, los cuales han perdido su movilidad, así como la dinámica de sedimentos que producían sus formas peculiares, debido a las regulaciones de los caudales mediante azudes y presas. Estos paisajes naturales han quedado reducidos a zonas retiradas de las zonas urbanizadas, zonas montañosas y zonas con suelos poco productivos, donde la población es poco numerosa (Tanago y Garcia-Jalon, 2007).

Afortunadamente, la mentalización ambiental de la sociedad ha cambiado mucho en los últimos años, demandando una mejor gestión de los recursos medioambientales que representan los ríos, añadiendo además su riqueza ambiental, cultural, histórica, de ocio...

Dicho todo lo anterior, se debe partir de la necesidad de mantener una relación óptima río-ciudad, en la que ambos factores se respeten y potencien mutuamente. Se deben establecer las condiciones para que esta convivencia entre ambos sea positiva, y poder disfrutar del río entendiéndolo como ese ecosistema a mantener. Sin embargo, no se puede obviar los condicionantes que se dan en aquellos tramos de río que discurren por las zonas urbanas o anejas a ellas, que ya hemos apuntado anteriormente, y que históricamente ha establecido una presión urbanística sobre el río que lo ha confinado a un espacio con el que se cuenta en estos

momentos. Es decir, se deben articular procedimientos y prácticas adecuadas para una integración de las áreas fluviales en las ciudades con criterios que permitan una convivencia sostenible de los procesos que se desarrollan en el ecosistema fluvial con la realidad vital de la ciudad.

Este tipo de procedimientos es el utilizado habitualmente para seleccionar actuaciones en ríos. Pasemos a describirlo por su utilidad como base para plantear metodologías mediante sistemas expertos y de apoyo a la decisión para la selección de proyectos de carácter fluvial que se desarrollarán y evaluarán en la última parte de este trabajo.

### **2.1.- Funcionamiento del ecosistema fluvial.**

Desde un punto de vista hidrológico, los ríos constituyen los ejes naturales por donde circulan las escorrentías procedentes de la cuenca vertiente. Dichas escorrentías, variables en el tiempo y en el espacio, configuran el régimen de caudales líquidos y sólidos, que llegan a cada tramo de la red fluvial, y determinan con la morfología del valle, la forma y dinámica de los cauces y su llanura de inundación. En el cauce se dan procesos de erosión, transporte y sedimentación y que son debidos al equilibrio que se establecen entre las fuerzas hidráulicas que actúan sobre el lecho y los márgenes y que son función de numerosos parámetros hidráulicos.

Además el sistema formado por la cuenca hidrológica es muy complejo y altamente no lineal, contando con muchos componentes (hidrológicos, hidráulicos, geológicos, climáticos, biológicos, del suelo, antrópicos) que son constantemente modificados y que interactúan entre sí. Hay que comprender que cualquier actuación puntual sobre el ecosistema de un río influye más allá de la zona de actuación, afectando a una zona mucho mayor, tanto aguas arriba como aguas abajo.

Los ríos mantienen una interacción con el medio que atraviesan en muchas dimensiones, lo que determina la diversidad que se observa en el ecosistema fluvial a lo largo de todo su recorrido. En la publicación Restauración de Ríos del Ministerio de Medio Ambiente (Tanago y Garcia-Jalon, 2007), se refleja claramente estas dimensiones de interacción.

Los ríos, como ejes naturales que se ha indicado anteriormente, presentan una dimensión evidentemente longitudinal que se manifiesta a través de la longitud del canal principal, las variaciones a lo largo del mismo de los factores hidrológicos y geomorfológicos y la zonificación que se puede establecer a lo largo del río de las comunidades bióticas que aparecen. Sin embargo, además de esta dimensión longitudinal, también presenta otras dos dimensiones que se deben tener en cuenta, la transversal y la vertical. La transversal se concreta en la anchura del cauce y su llanura de inundación a través de la cual aparecen diferentes gradientes de humedad, granulometría del sustrato, zonificación de la vegetación, etc. Por último, la vertical se realiza entre el cauce fluvial y el sustrato, conectando este cauce con los acuíferos locales o regionales. La unión y combinación de los gradientes en estas tres dimensiones determinan la biodiversidad de los ríos que aparece en los diferentes hábitats del cauce y sus riberas. Vamos a concretar estas dimensiones y su interconexión.

### **2.1.1.-Dimensión longitudinal.**

A través de la dimensión longitudinal se establecen los flujos de transporte de materia, como agua, sedimentos, materia orgánica o sedimentos, y de energía, desde la parte superior a la más baja.

Existen muchas variables morfológicas e hidráulicas de los ríos donde se producen gradientes a lo largo del perfil longitudinal del río. En la Tabla 1 se definen estas variables y la variación que se observan.

VARIABLE	VARIACION HACIA ABAJO	VARIABLES CON LAS QUE SE RELACIONA
Pendiente longitudinal	Disminuye	Orografía
Tamaño medio de sedimentos	Disminuye	Pendiente
Velocidad del agua	Disminuye	Pendiente
Caudal del agua	Aumenta	Superficie vertiente
Anchura del cauce	Aumenta	Caudal
Profundidad del cauce	Aumenta	Caudal

*Tabla 1. Modificación de las variables en un río a lo largo de su cauce.*

La variación de estas variables a lo largo del cauce se representan de forma gráfica en la Figura 2 (Tanago y Garcia-Jalon, 2007).

En función de los valores de estas variables, se han establecido tradicionalmente zonas típicas a lo largo de un río, hablando de una zona alta, donde predominan los procesos de erosión, un tramo medio con procesos predominantes de transporte y la zona baja donde se produce, fundamentalmente, sedimentación.

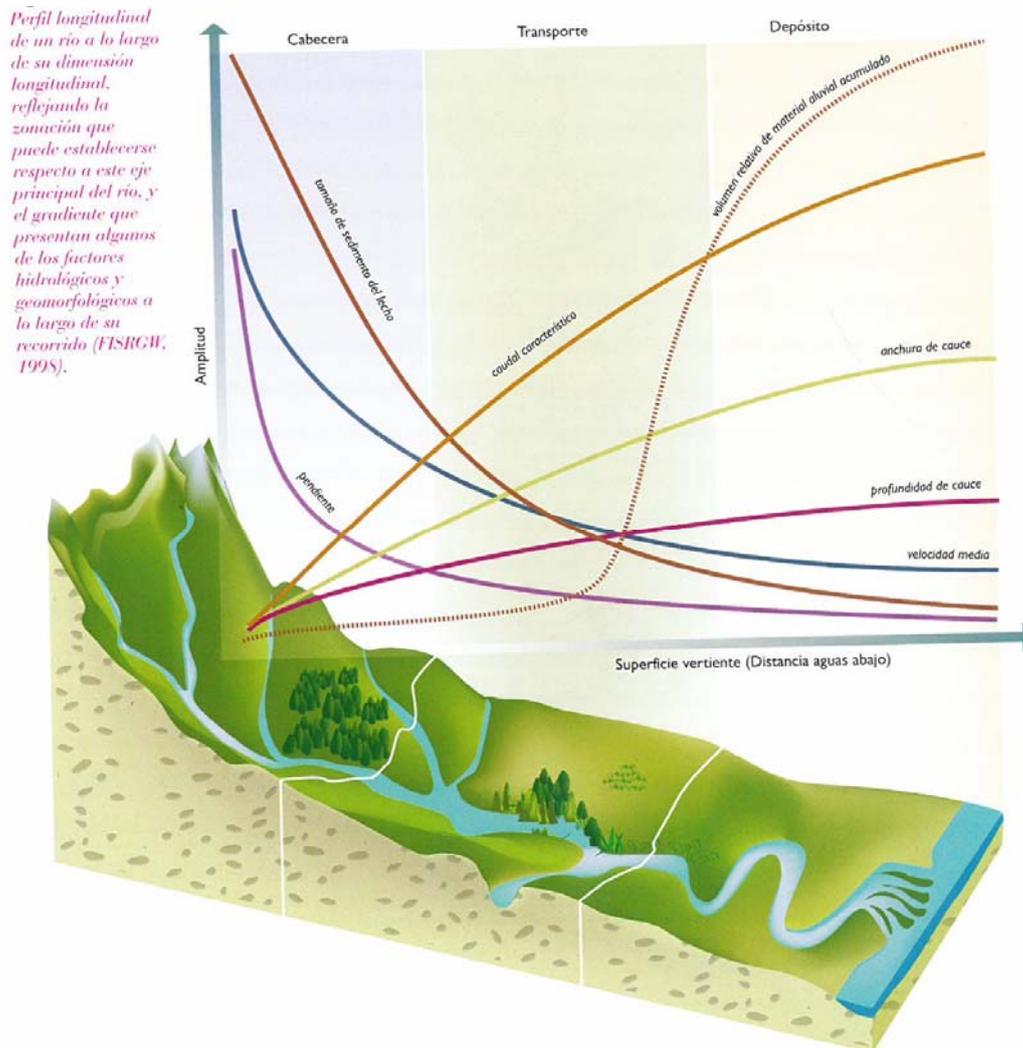


Fig. 2. Evolución de las variables en un río a lo largo de su recorrido (Fuente: Tanago y Garcia-Jalon, 2007)

Así, en las zonas superiores, las características que aparecen son las que se indican en la Tabla 2.

CARACTERISTICA	DESCRIPCION
Forma del valle	Estrecho
Anchura del cauce	Pequeña
Pendiente longitudinal	Elevada
Granulometría dominante	Tamaño grande
Caudales relativos	Pequeños
Estabilidad de las orillas	Elevadas
Trazado	Poco sinuoso

*Tabla 2. Características en el tramo superior de un río.*

Según se va llegando a los tramos intermedios y bajos, los valles se van ensanchando, así como la anchura del cauce, que cuenta con un espacio mayor y con menor pendiente. A la vez que disminuye la pendiente del cauce, disminuye el tamaño medio de los sedimentos. Como hemos dicho, la anchura del cauce se amplía considerablemente, así como la ribera y la llanura de inundación. La disminución de la pendiente provoca el aumento de la sinuosidad y heterogeneidad del sistema fluvial, apareciendo cauces con meandros o brazos tramificados.

Otro aspecto importante, no citado anteriormente consiste en las diversas formas del lecho que permiten la disipación de energía, mucho mayor en el cauce alto (energía potencial) y que va eliminándose a lo largo del cauce. Estos elementos naturales que aparecen en el lecho tienen mucha importancia a la hora de mantener la estabilidad geomorfológica del río, permitiendo aumentar la rugosidad e ir eliminando la energía hidráulica relacionada con la pendiente del cauce.

Así, en las zonas altas aparecen lechos con mayor tamaño en la granulometría del sustrato, donde se forman cascadas, rápidos, pozas, etc., mientras que en las partes inferiores, con menor pendiente, aparecen estructuras del lecho de mucha menor altura en comparación con el calado.

En resumen, el proceso consiste en que el río va transformando la energía potencial de la que dispone por la altura en energía cinética que determina la velocidad de las aguas. Sin embargo, esta velocidad se ve frenada por el tamaño del material del lecho, las diferentes formas del mismo, así como la presencia de vegetación.

En los ríos que se encuentran en buen estado ecológico se produce una continuidad en el gradiente de todas las variables que hemos indicado anteriormente, así como la presencia de una continuidad en el flujo de materia y energía. Con frecuencia, se producen alteraciones que cortan esta continuidad, los cuales analizaremos en un punto posterior, viendo sus consecuencias y las posibles vías de actuación.

### **2.1.2.-Dimensión transversal.**

En determinados tramos de cauce, el valle se ensancha, pudiendo producirse episodios puntuales de desbordamiento, ocupando las aguas más anchura que la del estricto canal del río. Se produce un flujo de materia y energía en sentido transversal, similar a lo visto para la dimensión longitudinal del río. Así podemos diferenciar tres zonas, como son el propio cauce, las riberas y la llanura de inundación.

El cauce es la zona ocupada por el flujo de agua y sólidos y del que, de alguna manera ya hemos hablado en el apartado anterior donde hemos analizado la dimensión longitudinal del río (formas del lecho, dimensiones del sustrato, pendiente, caudal, etc.). Este cauce alberga una flora y fauna típicamente acuática. La mayor o menor diversidad biológica de este ecosistema dependerá principalmente de la diversidad física. Se producen hábitats con diversas características (mayor o menor insolación, fondo de gravas o de barro, zonas de mayor o menor velocidad, etc.).

El aspecto más visible de las riberas es su vegetación, que caracteriza el ecosistema fluvial. En ella se unen la flora y fauna acuática o subacuática con la terrestre. Se caracteriza por un nivel freático alto, gran flexibilidad para soportar los empujes de los flujos de agua y con unas características de desarrollo compatibles con los periodos de avenidas. Las principales funciones de la vegetación de ribera son las siguientes:

- Filtro de la escorrentía lateral, disminuyendo la velocidad de llegada al cauce y reduciendo su aporte de sólidos y nutrientes
- Refuerzo de la estabilidad de las riberas y los cauces tanto por la función de fijación de las raíces como los efectos de reducción de la velocidad de circulación de agua en las orillas y facilita el depósito de los sólidos en las mismas.
- Sirve de alimento a la fauna terrestre y acuática
- Sirve de refugio para la fauna acuática al crear zonas con menor velocidad de circulación del agua y mantener condiciones más estables para la existencia de esta fauna.
- Igualmente, en algunas zonas sirve de hábitat para la fauna terrestre que se relaciona con el ecosistema acuático (Ureña et al, 1999)

Por último, las llanuras de inundación ya las hemos catalogado anteriormente, pero reiteraremos que son zonas en que se disipa la energía del caudal en los episodios de desbordamiento. Por el flujo de sedimentos y nutrientes desde el cauce hasta estas llanuras, las podemos catalogar como zonas muy fértiles. El valor ecológico de estas zonas depende de la frecuencia de la inundación y su duración, del nivel freático y de la diversidad física de la llanura caracterizándose por medio de depresiones, meandros abandonados, crestas, suelos de distinto tipo, etc. (Martín-Vide, 2002).

En estos episodios de desbordamiento se produce un flujo de sedimentos, materia orgánica y organismos del cauce a la llanura de inundación. Sin embargo, también se produce un efecto en el

otro sentido, ya que se produce un proceso de lavado de nutrientes existentes en esta llanura que llegan al cauce del río, siendo aprovechados por la fauna y flora del propio cauce.

En segundo lugar, en los procesos de desbordamiento, se produce una disipación de energía cinética, produciéndose labores de remodelación de la orografía, sedimentos y vegetación de la zona inundada. Se producen erosiones en unas zonas, sedimentación en otras, realizándose una regeneración natural de los hábitats existentes en las zonas anejas al río.

El caudal que llena a rebosar el cauce es importante porque es el responsable principal de la forma y dimensiones del cauce. En efecto, mientras el agua permanece en el cauce circula con la velocidad correspondiente produciendo los efectos subsiguientes de erosión, transporte de masa, sedimentación, etc., en el propio cauce. En cambio, cuando se desborda levemente, este incremento de caudal anega las llanuras de inundación adyacentes y deposita sedimentos en ella, pero no cambia sustancialmente el flujo en el cauce principal.

Este caudal máximo que circula por el cauce, que se suele denominar caudal dominante (Martín-Vide, 2002), y a partir del cual se produce el desbordamiento se fija con un período de retorno de entre 1,5 y 2 años (Tanago y Garcia-Jalon, 2007). Sin embargo, y particularizando para nuestro país, con una hidrología más irregular, se han encontrado correspondencias de los caudales de desbordamiento con periodos de retorno entre 1,5 y 7 años, acercándose a la cifra más alta cuanto mayor sea la irregularidad hidrológica, como es en el área mediterránea (Martín-Vide, 2002).

Como ocurre en el caso de la dimensión longitudinal, en los ríos que no han sufrido modificaciones en su estado ecológico, se mantiene la posibilidad natural de los desbordamientos en determinadas zonas, existiendo una zona natural donde se produzcan las conexiones con el cauce natural realizando intercambio de caudal de agua, sedimentos, nutrientes, etc., así como disipación de

energía, y donde se genera una vegetación característica y sirve de hábitat a un determinado tipo de fauna.

Sin embargo, en determinados casos, donde se pretende evitar estos casos de desbordamientos con objeto de no dañar las actividades que ocupan las zonas anejas al río, se han efectuado actuaciones de protección que afectan a esta dimensión transversal, importante como hemos visto para el funcionamiento del ecosistema fluvial. Posteriormente analizaremos estas actuaciones y sus efectos.

### **2.1.3.-Dimensión vertical.**

La dimensión vertical describe los flujos que se producen entre el cauce y los sustratos subsuperficiales y subterráneos existentes bajo el mismo. Estos flujos son tanto de agua, como de nutrientes u organismos y representan una importancia grande en el funcionamiento ecológico de los cauces como de las riberas.

El espesor del sustrato del cauce y de las riberas, así como sus características varía a lo largo del río según hemos visto en el apartado donde hemos descrito la dimensión longitudinal del mismo. La capacidad de transporte de un río depende de la pendiente, del caudal de agua y de la forma del cauce fundamentalmente. Por tanto, en función de esta capacidad de transporte y de las características del cauce que permita la acumulación de estos materiales en algún punto, tendremos mayor o menor espesor de sustrato.

Las características geológicas del sustrato dependen de la cuenca y su granulometría es muy variable según el tramo. Lo cierto es que aquel material más fino, que puede ir en suspensión suele acumularse en las zonas más bajas del río (cauce final, desembocaduras, etc.). Este material más fino procede fundamentalmente de lo que llamamos lavado de la cuenca (Martín-

Vide, 2002) y puede representar aproximadamente el 90% del material transportado. Sin embargo, el otro 10%, que es el material transportado por el fondo, está compuesto por material granular mayor y es el responsable de la morfología del cauce.

Como hemos visto, la granulometría es una variable que va disminuyendo hacia aguas abajo, y también varía dentro de una misma sección transversal, ya que la velocidad del flujo se reduce hacia los márgenes. A través de estos materiales granulares se producen diversos flujos que generan diferentes gradientes de humedad entre el cauce y la zona húmeda perimetral, que está conectada además con los acuíferos existentes.

Se pueden producir diversos flujos en función de las características del río, su régimen de caudal y la situación de lluvias. En la Tabla 3 se muestran las diversas situaciones que pueden darse respecto al flujo en un cauce fluvial, mostrándose gráficamente en las Figuras 3, 4 y 5.

SITUACION	Régimen de caudal	Situación	Flujos
1	Irregular	Avenidas. Suelen ser cortas y de gran magnitud	Del cauce hacia acuíferos. Recarga de los mismos.
2	Regular	Normal	Desde el subsuelo (muy húmedo) y con nivel freático alto hacia el cauce.
3	Regular	Avenidas	Del cauce (con nivel elevado respecto a situación normal) hacia las riberas.

*Tabla 3. Tipos de flujo existentes en un río.*

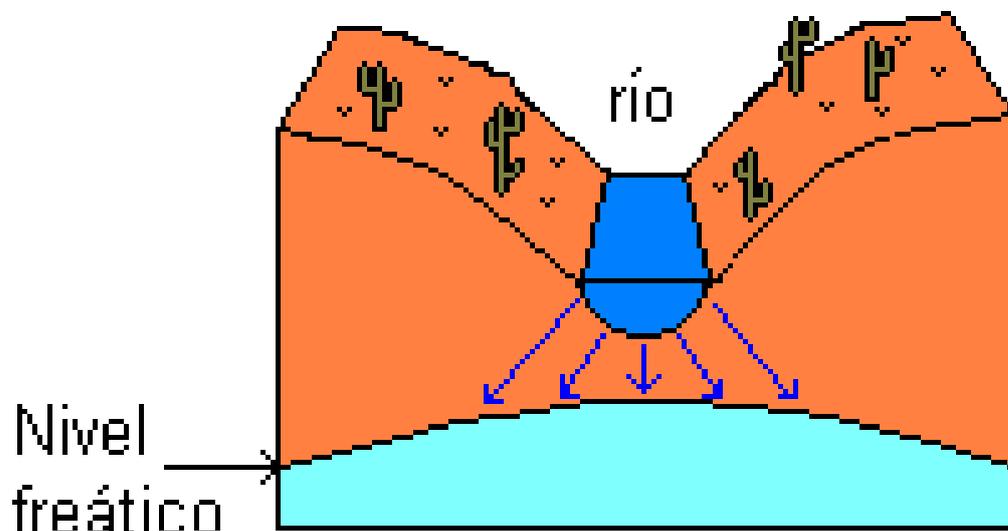


Fig. 3.- Esquema de flujo vertical en zonas con humedad reducida en riberas. Río perdedor. Flujo del río al acuífero. Situación 1  
(Fuente: Arumi et al., 2012)

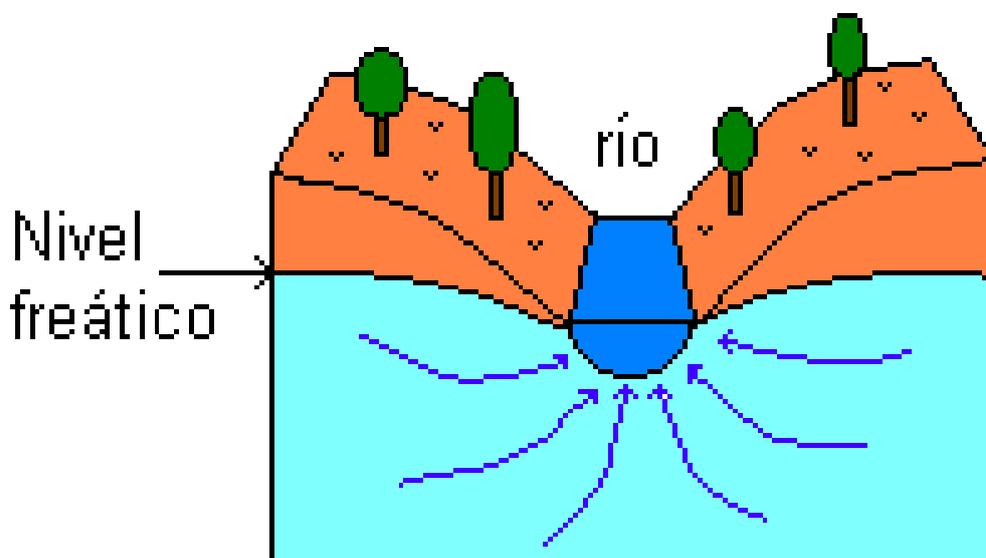
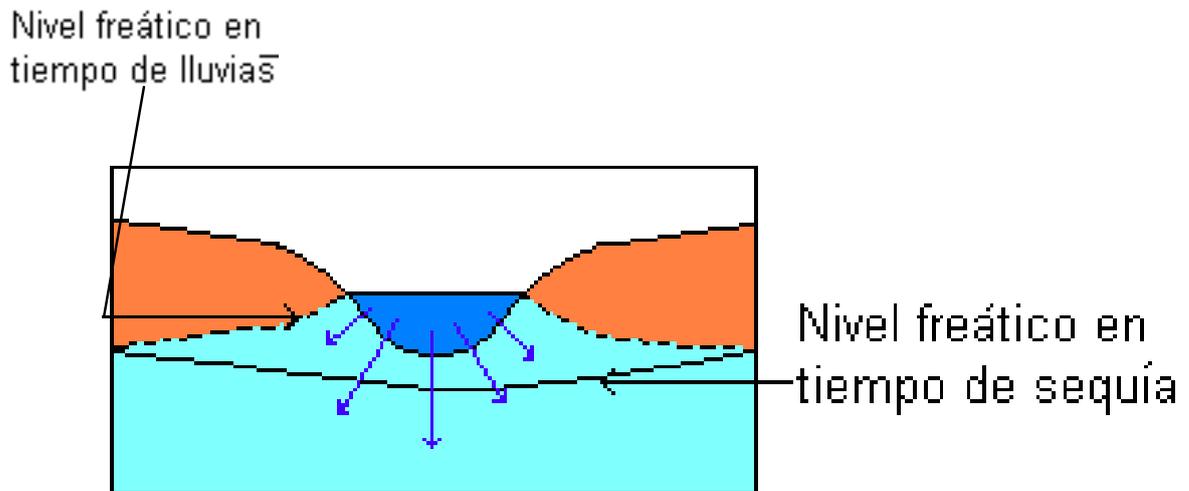


Fig. 4.- Esquema de flujo vertical en zonas con humedad elevada en riberas. Río ganador. Flujo de acuífero al río. Situación 2  
(Fuente: Arumi et al., 2012)



*Fig. 5.- Esquema de flujo vertical en zonas con humedad elevada en riberas en período de avenida. Río perdedor. Flujo de río a acuífero. Situación 3 (Fuente: Arumi et al., 2012)*

Estos flujos permiten el flujo vertical de nutrientes, así como de pequeña fauna: invertebrados y peces en primeros estadios de desarrollo. Además, este medio granular permite el mantenimiento del ecosistema en períodos de estiaje o crecidas al servir como refugio, haciendo más estable el ecosistema ante estas variaciones de caudal.

Por último, estos flujos son indispensables para mantener la vegetación de ribera durante todo el año. Son más importantes, si cabe, en las zonas secas, donde el nivel freático es muy bajo. En ellas, la vegetación de ribera ocupa una franja muy estrecha y depende fundamentalmente de los flujos de agua procedentes del cauce del río. Puede ocurrir, incluso que en el caso de ríos desconectados del acuífero, por gran explotación del mismo o en cauces de régimen esporádico o torrencial: ramblas o torrentes, llegue a desaparecer esta vegetación de ribera.

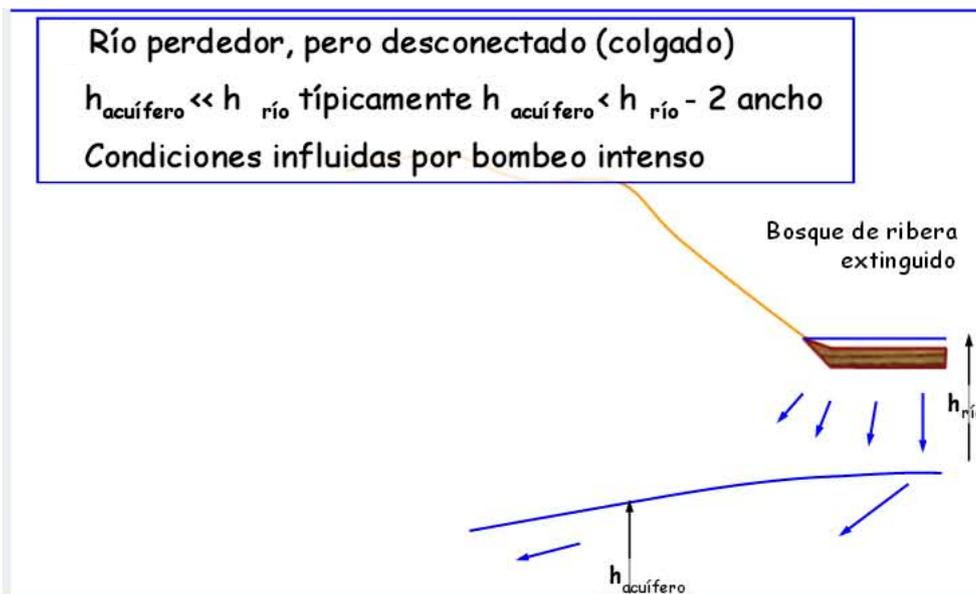


Fig. 6.-. Esquema de flujo vertical en zonas con desconexión río-acuífero. Flujo del río al acuífero. Situación 1 con desaparición de vegetación de ribera (Fuente: Medina et al., 2001)

Un río en buenas condiciones ecológicas en esta dimensión vertical es aquel en que se mantengan estos flujos subsuperficiales entre el cauce, las riberas y el medio subyacente, lo cual solo se consigue manteniendo las condiciones naturales del material componente del cauce. Numerosas actuaciones antrópicas, afectan a este flujo al modificar las condiciones del cauce. En un apartado posterior las analizaremos, describiendo sus efectos y las posibles actuaciones de mejora.

Como resumen de lo descrito en las tres dimensiones analizadas de los ríos, podemos decir que la biodiversidad de los ríos, basada en la heterogeneidad de los hábitats de los cauces y de sus riberas, depende de los gradientes que aparecen de las diferentes variables, en las interacciones y los flujos tanto en la dimensión longitudinal como en la transversal y vertical.

Dentro de las líneas de actuación de los últimos años en la Península Ibérica, y en particular en el ámbito de la Administración Hidráulica de la cuenca del río Júcar, se encuentra la de mejora y

adecuación ambiental del entorno de nuestros cauces, después de la progresiva degradación que se ha sufrido en los mismos desde la segunda mitad del siglo pasado hasta la actualidad. Las actuaciones se han encaminado a una nueva integración del cauce con su entorno, y cuando ha sido posible un intercambio de usos y actividades entre el río y dicho entorno.

Se va a analizar seguidamente la problemática que se da actualmente en los cauces en sus tramos urbanos, concretamente en la cuenca mediterránea; los condicionantes y las posibles soluciones que se pueden adoptar, basándonos principalmente en diversas actuaciones de carácter público llevadas a cabo en varios cauces pertenecientes a la Administración Hidráulica de la cuenca del Júcar.

## **2.2.- Los cauces de nuestros ríos. Un entorno degradado.**

Tal y como se indicaba en el primer apartado introductorio, la presencia del ser humano y su interrelación con el medio que le rodea produce modificaciones sobre el ecosistema fluvial que se ha descrito anteriormente, como lo hace con el resto del entorno natural. Esta capacidad de actuar sobre el medio y modificarlo a su conveniencia no es exclusivo del ser humano y es una constante en todas las especies intentar adecuar el ecosistema en su beneficio particular y como consecuencia, en los ejemplares de su misma especie. Por tanto, cualquier actuación del ser humano sobre el medio, como parte componente del ecosistema podría catalogarse como un factor más del proceso natural.

Sin embargo, lo que diferencia a la especie humana del resto de especies es la capacidad de actuación que tiene, infinitamente superior al del resto de las especies, y la trascendencia que estas actuaciones ocasionan sobre el ecosistema, incapaz en la mayoría de los casos de autorregularse y teniendo en muchas ocasiones

efectos muy perjudiciales, llegando a degradarlo de manera importante.

En el libro *Recuperación de espacios degradados* (Gómez-Orea, 2004), su autor incide en este concepto, indicando que el concepto de degradación es relativo. El concepto de degradación se relaciona con una situación que se considera total o parcialmente indeseable con respecto a aquella que se considera más satisfactoria, todo ello dentro de las condiciones económicas, sociales y ambientales en las que se enmarca. En la propia naturaleza existen espacios y ecosistemas que se pueden considerar degradados respecto a otros, pero que son necesarios a partir del desarrollo actual de la sociedad. El concepto de degradación se asocia a puntos de vista del valor ecológico, paisajístico, científico, cultural, productivo o funcional y puede ser por tanto, integral o sectorial. Además admite grados de intensidad en la degradación, pudiendo tener carácter intenso o extenso y ser objeto de mejoras relativas, sectoriales o integrales. Además, la degradación se puede referir a la totalidad o a parte del espacio analizado.

Por tanto, se puede relacionar el concepto degradación relativo a un espacio determinado con dos importantes conceptos: el valor de conservación del espacio como sistema, es decir del conjunto de las dimensiones que conforman su valor: ecológica, paisajística, científica, cultural, funcional y productiva, y la función que cumple para la sociedad (Gómez-Orea, 2004).

La interrelación entre el hombre y los ríos que estamos tratando no ha aparecido recientemente, sino que ha existido siempre, ya que los ríos han sido un recurso utilizado por el ser humano para satisfacer sus necesidades, como se ha comentado en el apartado 2.1 anterior.

Sin embargo, es indudable que, principalmente en el caso de España, la mayor presión y afectación de los ecosistemas fluviales por el ser humano, se ha visto acrecentada de manera exponencial a partir de la década de los 60, con la construcción de presas,

concentraciones parcelarias y búsqueda de mayor rentabilidad en la actividad agrícola y desarrollo industrial, construcción de una importante red de infraestructuras y crecimiento urbanístico posteriores.

Contando con todo lo dicho, también es cierto que en estos momentos y desde épocas recientes, se cuenta con una sensibilidad mayor en el aspecto medioambiental, que nos hace adoptar medidas que permitan compaginar el desarrollo social con la conservación de la riqueza natural de nuestro planeta. Como unos ecosistemas más, y siendo unos en los que más interacción con el ser humano se produce, se encuentran los ecosistemas fluviales.

Son numerosos las presiones y los impactos a que se ven sometidos los ríos en general, y los españoles en particular. Estos impactos o presiones, variables en su intensidad según la zona, ocasionan en algunos casos una degradación importante del ecosistema fluvial que recomienda y a veces exige actuaciones para poder revertir el proceso y mejorarlo en la medida de lo posible.

Iremos viendo cada uno de ellos, analizando las consecuencias que introducen en el ecosistema fluvial, para así poder determinar las posibles medidas adecuadas para mejorar la situación actual. En la Tabla 4 se presenta un sumario de los impactos principales, los cuales se analizarán pormenorizadamente a continuación.

## **PRESIONES E IMPACTOS PRINCIPALES SOBRE LOS RÍOS**

### **1.- Agricultura:**

1.1.- Consumo de agua. Regulación de los caudales y sobreexplotación de acuíferos

1.2.- Ocupación de las llanuras de inundación. Eliminación de la vegetación riparia y alteración morfológica de los cauces

1.3.- Emisión de nutrientes y otros compuestos agrícolas en las aguas de ríos y arroyos.

### **2.- Urbanización:**

2.1.- Aumento de la demanda de agua

2.2.- Aumento de la necesidad de regulación de caudales

2.3.- Alteración de los balances de agua y sedimentos y desestabilización de los cauces

2.4.- Fomento de las canalizaciones y dragados y aumento del riesgo hidrológico

2.5.- Contaminación de las aguas por vertidos de procedencia urbana e industrial

### **3.- Otras presiones:**

3.1.- Extracciones de áridos para construcción

3.2.- Trazados de infraestructuras

3.3.- Producción de energía eléctrica

*Tabla 4. Presiones e impactos sobre un río.  
(Fuente: Tanago y Garcia-Jalon, 2007)*

Previamente al análisis de las diferentes presiones sobre los ecosistemas fluviales vamos a introducir algunos conceptos de hidráulica fluvial que nos permitirá comprender posteriormente de forma clara los efectos que tienen sobre el cauce las diversas actuaciones de origen antrópico.

En primer lugar debemos dejar claro que un río no es un canal. Sus similitudes se basan en que ambos transportan agua en lámina libre. Pero hay muchas diferencias entre ellos (Martin-Vide, 2004):

- El caudal de un canal suele ser constante. En los ríos siempre es variable, según el régimen hidrológico de la cuenca
- El trazado en planta de un canal es fijo y trazado por el hombre. Sin embargo en un río el cauce puede variar, sobre todo en episodios extraordinarios de avenidas de forma rápida, o de forma lenta a lo largo del tiempo.
- No se produce intercambio de flujos entre el canal y el entorno, si está revestido y no tiene fugas. Sin embargo, ya vimos las interrelaciones en un río entre el canal principal y el terreno que lo rodea.
- El canal transporta en gran medida agua sin sedimentos. Sin embargo el flujo de un río tiene un caudal líquido y otro caudal sólido muy importante que es el causante de las erosiones y sedimentaciones que se producen en los diversos puntos del cauce según las características del terreno y las condiciones del caudal líquido.

Aunque hay más diferencias, vamos a centrarnos en esta última. El río es un elemento dinámico que está en continuo proceso de cambio. Sin embargo, es frecuente que, en ausencia de intervenciones externas, llegue a una situación estacionaria en su cauce. Esta situación se verá alterada en episodios de aumento o disminución de caudal, volviendo el propio río a adecuarse a la nueva situación de forma progresiva. Podríamos decir que el río, en su dinámica se va adecuando a las nuevas situaciones según van cambiando.

Lo mismo ocurre cuando, desde el exterior, se introducen cambios en la estructura del río. Hablando del cauce, podríamos decir que este se encuentra en equilibrio cuando este no sufre modificaciones ni en la cota del fondo, ni en la anchura del cauce ni en los propios paramentos laterales.

En este equilibrio intervienen numerosos factores y es el resultado del equilibrio de numerosas acciones. Para simplificar el funcionamiento del equilibrio, y con un carácter simplemente cualitativo, Lane (1955) estableció una ecuación para determinar el equilibrio que se producía en el cauce de un río, teniendo en cuenta cuatro variables: el caudal líquido ( $q$ , caudal unitario), el caudal sólido de fondo ( $q_s$ , caudal sólido unitario), la pendiente ( $I$ ) y el tamaño del sedimento ( $D$ ), indicando que debía establecerse un equilibrio entre la cantidad de caudal sólido y su tamaño con el caudal líquido y la pendiente del cauce:

$$q_s D \propto q I \quad (1)$$

y para explicar su interrelación la dispuso en la analogía de la balanza (Martín-Vide, 2002), representada en la Figura 7.

El desplazamiento del fiel de la balanza por peso en exceso (los caudales) o por brazo en exceso (la pendiente o el tamaño de los sólidos) da lugar a erosión o sedimentación según sea en uno u otro sentido. Esta analogía es una herramienta muy útil para analizar los desequilibrios que se producen en un río preferentemente por causas de intervención humana.

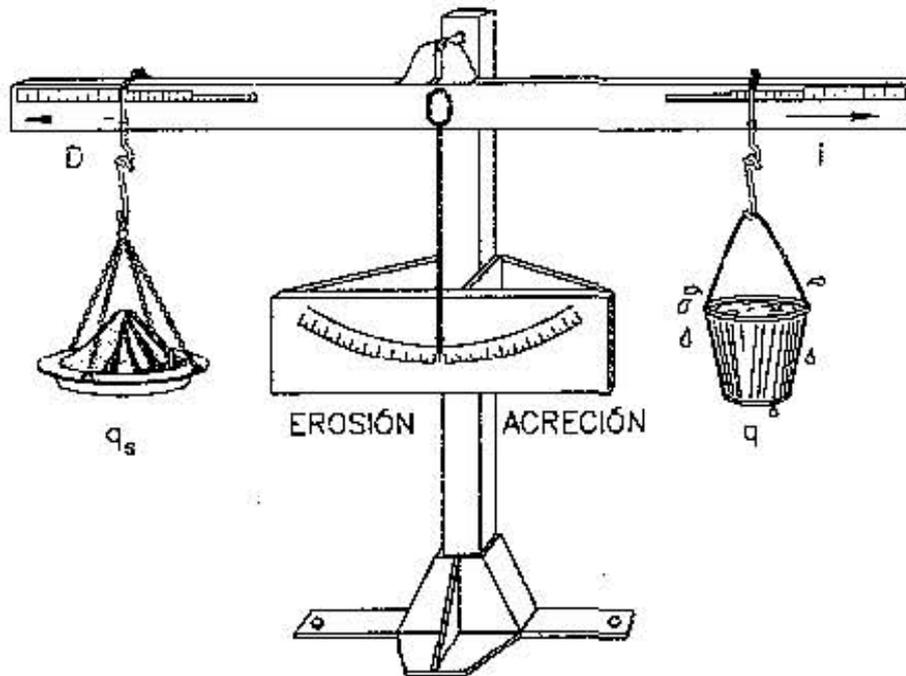


Fig. 7.- Esquema de la analogía de la balanza  
(Fuente: Martin-Vide, 2002)

Para comprender la analogía podríamos poner algunos ejemplos. En un flujo con exceso de caudal líquido respecto al sólido se producirán erosiones en el cauce. Lo contrario ocurrirá si el desequilibrio es en el sentido contrario; flujo con sobrealimentación de sólidos. En esta última situación, el equilibrio se conseguiría aumentando la pendiente. Por último, en el caso de la influencia del tamaño del material, para que un caudal sólido con partículas menores para un mismo caudal líquido se equilibre, deberá producirse una reducción de la pendiente.

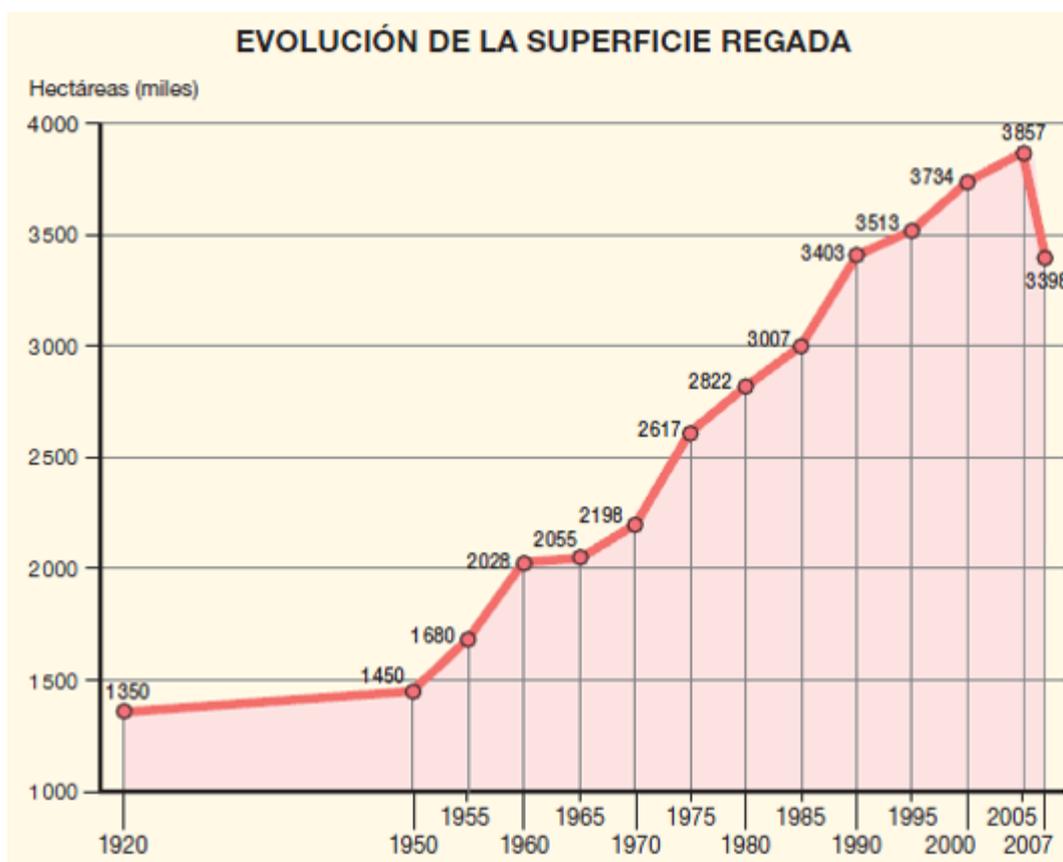
Vistas esta analogía, iremos volviendo a ella de forma reiterada en las próximas líneas cuando la necesitemos para explicar los efectos que las diversas presiones y actuaciones ocasionan en el ecosistema fluvial. Pasemos seguidamente a ir describiendo las diversas presiones que se producen sobre el ecosistema fluvial en diferentes ámbitos y las consecuencias que ellas tienen.

### 2.2.1.-Presiones debidas a la agricultura

- **Aumento del consumo de agua.**

*Construcción de obras hidráulicas para regulación de caudales*

A partir de los años 50, se ha producido una elevación sustancial de la superficie dedicada al cultivo de regadío en España. En la Figura 8, se evidencia que en 60 años, se ha multiplicado por más de dos la superficie dedicada a la agricultura de regadío.



*Fig. 8. Evolución de la superficie regada en España  
(Fuente: Tamames y Rueda. 2008)*

La introducción de los regadíos ha proporcionado evidentes mejoras en la productividad agrícola, permitiendo la obtención de valores añadidos a esta actividad que ha repercutido en un desarrollo

económico y una mejora en las condiciones sociales del medio rural. Sin embargo, desde el punto de vista fluvial ha proporcionado efectos perniciosos ya que el aumento de la superficie regada ha ocasionado la necesidad de construir infraestructuras hidráulicas para atender este incremento de demanda. En la Figura 9 se presentan datos del número de presas en España desde mediados del siglo XX, 1940 hasta 2000, apreciándose que desde 1950 hasta 2000 se construyeron un número muy estable de presas, representando entre 150 y 200 por década.



Fig. 9.- Evolución de la construcción de presas en España  
(Fuente :<http://ingenieriaenlared.files.wordpress.com/2014/02>)

Esto se corresponde relativamente con la evolución del volumen embalsable. En la figura nº 10 se muestra la evolución de este indicador. Si en 1940, el volumen embalsable era de 3620 Hm<sup>3</sup>, en 1980, este valor se había elevado en un 1.200%, hasta llegar a 42.200 Hm<sup>3</sup>. Entre 1980 y 2000, el incremento es de un 25%. Por lo tanto, se comprueba que entre 1940 y 1980 se construyen las

grandes presas, mientras que a partir de 1980, aunque se mantiene el número, su volumen es mucho menor.

CAPACIDAD Y VOLUMEN DE LOS EMBALSES ESPAÑOLES (HM <sup>3</sup> )								
Cuenca	1940		1980		2000		2001	
	Capac.	Vol. a fin de año						
Norte	35	-	4201	2260	4355	3646	4355	1508
Duero	1371	-	6491	2252	7459	5697	7459	3301
Tajo	341	-	10509	4933	10975	6344	10975	5083
Guadiana	52	-	4123	1678	8821	4587	8821	5852
Guadalquivir	633	-	5061	2633	8758	3295	8781	5927
Sur	41	-	613	328	1113	420	1113	480
Segura	365	-	1178	340	1084	171	1084	211
Júcar	47	-	2833	803	3346	555	3346	705
Ebro	729	-	6581	4228	6504	4728	6504	3801
Pirineo oriental	6	-	551	285	753	301	753	234
Baleares	-	-	12	11	-	-	-	-
Canarios	-	-	48	-	-	-	-	-
TOTAL	3620	s. d.	42201	19740	53168	29744	53191	27102

Fig. 10. Evolución de la capacidad y volumen de los embalses en España.  
(Fuente: Instituto Nacional de Estadística)

Con respecto al tipo de riego, se ha observado una evolución favorable en los últimos años, aumentándose los riegos localizados en detrimento de los riegos tradicionales por gravedad y los correspondientes por aspersión o automotriz. Este hecho va en consonancia con una reducción en el volumen consumido por el riego. En las Tablas 5 y 6 se aprecia esta evolución, tanto en España como en la Región Valenciana.

Tipos de Regadío	Superficie (ha)										Variaciones (%)	
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2013/12	2013/Prom. 04-12
Gravedad	1.230.073	1.192.717	1.132.090	1.115.271	1.082.604	1.064.248	1.043.704	1.031.669	1.020.406	1.004.782	-1,53%	-8,77%
Aspersión	536.654	535.503	490.421	464.619	469.868	479.697	470.758	497.794	541.150	529.215	-2,21%	6,16%
Automotriz	259.434	256.573	248.753	250.483	257.654	265.897	262.161	284.714	297.149	298.169	0,34%	12,62%
Localizado	1.197.465	1.302.810	1.381.835	1.502.327	1.548.043	1.591.616	1.628.706	1.658.317	1.662.847	1.707.576	2,69%	14,06%
Otros Sistemas y sin información	54.433	38.131	25.808	28.082	16.463	19.847	2.625	979	1.064	816	-23,28%	-96,08%
<b>TOTAL</b>	<b>3.278.058</b>	<b>3.325.734</b>	<b>3.214.238</b>	<b>3.360.782</b>	<b>3.374.632</b>	<b>3.421.304</b>	<b>3.407.953</b>	<b>3.473.474</b>	<b>3.522.616</b>	<b>3.540.560</b>	<b>0,51%</b>	<b>4,89%</b>

Tabla 5. Evolución superficie regada según tipo de riego en España (Fuente: [www.iagua.es](http://www.iagua.es))

Tipos de Regadío	Superficie (ha)										Variaciones (%)	
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2013/12	2013/Prom. 04-12
Gravedad	146.227	128.426	128.325	121.528	145.597	139.232	122.967	106.143	99.200	95.045	-4,19%	-24,81%
Aspersión+Automotriz	27.825	4.483	2.937	2.634	2.327	2.631	2.239	1.772	1.621	1.363	-15,87%	-74,69%
Localizado	108.867	148.086	162.781	175.184	181.042	181.893	178.691	183.183	182.461	184.168	0,94%	10,34%

Tabla 6. Evolución superficie regada según tipo de riego en la R. Valenciana (Fuente: [www.iagua.es](http://www.iagua.es))

Se aprecia como hoy en día, a nivel de España, aproximadamente el 50% de la superficie de regadío dispone de un sistema localizado, lo cual es más acentuado en la Región Valenciana, donde 2 de cada 3 Ha de regadío disponen de este sistema. Esto redundará en una mejor eficiencia del consumo de agua y, por tanto, en una reducción del citado consumo.

Las presas construidas sobre los ecosistemas fluviales afectan y deterioran de forma importante los ecosistemas fluviales, tanto a la vegetación como a la fauna, favoreciendo el desarrollo de especies alóctonas. De hecho, la regulación de ríos es considerada como uno de los factores más negativos que afectan a los ecosistemas fluviales en España, donde muchos de las especies invasoras se adaptan bien a estos hábitats alterados.

Los principales efectos que explican estas afecciones son los siguientes:

- Se regulan los caudales aumentándose en los meses de mayor calor y reduciéndose en los de mayor precipitación, donde se acumulan en los embalses.
- Se eliminan las avenidas ordinarias, afectando a la dimensión transversal, eliminando el intercambio de agua y nutrientes con la zona riparia y la renovación de su vegetación.
- En determinados tramos, aguas abajo de las tomas para el riego, se disminuye drásticamente el caudal circulante en cualquier época del año.
- Se modifican las características de velocidades, calados, que pueden no ser adecuados para las especies nativas (disminución de calados en invierno o aumento de velocidades en verano).

### *Sobreexplotación de acuíferos*

Además del uso de los recursos superficiales, se han utilizado recursos subterráneos para poder realizar riegos de las nuevas superficies de regadío. El bombeo de caudales en algunas zonas ha sido tal que ha producido sobreexplotación de estos acuíferos. Se produce sobreexplotación cuando el volumen bombeado supera el volumen de aporte al acuífero. Este proceso ocasiona numerosos problemas ambientales, económicos, etc. Sin embargo, en el marco del presente documento, vamos a centrarnos en los efectos ocasionados en relación a los ríos y sus ecosistemas.

Algunos de ellos, son los siguientes:

- Modificaciones inducidas en el régimen de los ríos. La explotación de un acuífero conectado con un río puede afectar al régimen de este último. Cuando el bombeo alcanza volúmenes elevados el río puede

- llegar a secarse durante algunos períodos con el consiguiente impacto ecológico (Bosch, 2001)
- Afección o secado de zonas húmedas Al igual que sucede con los ríos asociados con acuíferos, las zonas húmedas alimentadas por acuíferos pueden sufrir las consecuencias de la explotación de las aguas subterráneas. Estas zonas húmedas pueden estar situadas en el entorno de los manantiales mismos o localizarse en los sectores en los que el nivel piezométrico se sitúa sobre la superficie del terreno. (Bosch, 2001)
  - Afecciones a la vegetación riparia. El descenso de los niveles freáticos de los terrenos anejos al río dejará a este colgado (ver descripción de la dimensión vertical en el apartado 2.1), con lo que se afectará a la vegetación de la ribera y zonas de inundación, produciendo la desaparición de la misma.

En la Figura 11 se muestra la distribución de acuíferos sobreexplotados en España, obtenido de la página web del Instituto Geográfico Nacional.

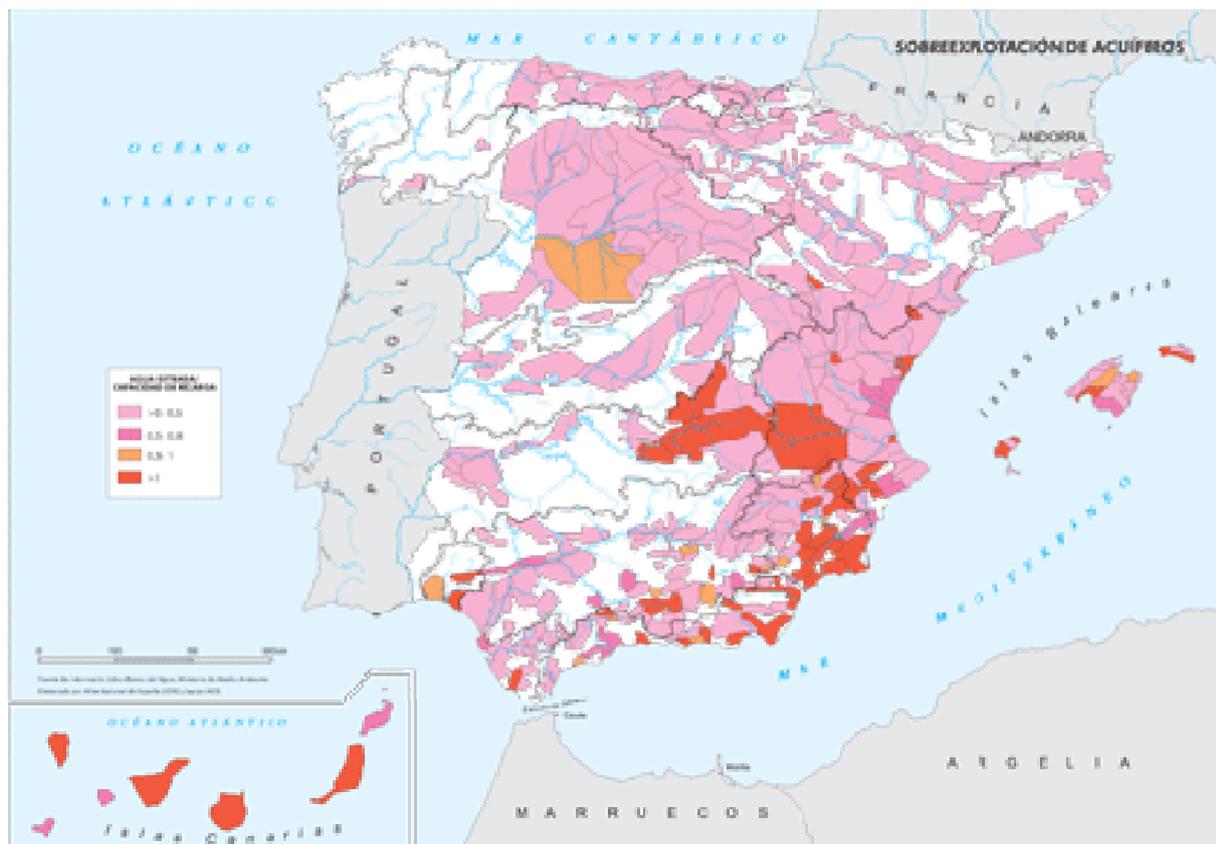


Fig. 11. Distribución de acuíferos sobreexplotados en España  
(Fuente: [www.ign.es](http://www.ign.es))

Los archivos sobreexplotados son aquellos en que el indicador es superior a 1. Se aprecia que la mayor parte de los acuíferos sobreexplotados se encuentran en la zona este y sudeste de España.

- **Ocupación de las llanuras de inundación.**

*Perdida de la vegetación riparia*

Se ha ido ocupando las zonas junto a los ríos mediante aprovechamientos agrícolas, beneficiados por las propiedades

beneficiosas del suelo. Este hecho no ha tenido freno legislativo, ya que la ley de aguas permite este uso hasta la línea del Dominio Público Hidráulico. Por ello, la franja de la vegetación de ribera ha quedado restringida a una zona muy estrecha lindante con el propio cauce, perdiendo el carácter de ecosistema como tal y no siendo capaz de desarrollar las funciones ambientales que describimos anteriormente.

### *Canalización de ríos y desestabilización geomorfológica*

La ocupación de las riberas y llanuras de inundación fue posterior a la previa actuación sobre los márgenes de los ríos. Inicialmente se produjeron dragado de los cauces, junto con elevación de los márgenes, para aumentar la capacidad hidráulica, a lo cual siguió el relleno de las orillas y las llanuras para posibilitar el cultivo. Junto con el relleno y elevación de cota citada, en algunos puntos se realizaron drenados de estas zonas, eliminando las zonas húmedas con las consecuencias sobre la vegetación de ribera que se describieron en el apartado de sobreexplotación de acuíferos.

En segundo lugar, el dragado de los cauces, así como la canalización de los cauces, ha producido habitualmente procesos de erosión remontante, incisión y encajonamiento tanto de los márgenes como del fondo, llegando a una mayor inestabilidad de los taludes laterales. Según la analogía de la balanza de Lane, al aumentar el caudal que puede circular por la sección del río, se producen procesos de erosión, los cuales se observan. Ello obliga a reforzar los márgenes con revestimientos de escolleras.

- **Emisión de nutrientes y otros compuestos agrícolas.**

*Eutrofización de las aguas*

El desarrollo de la actividad agrícola en las llanuras de inundación favorece que los fertilizantes utilizados en ella puedan llegar por escorrentía superficial o a través de escorrentía difusa hasta el propio cauce. Se trata fundamentalmente de nitrógeno y fósforo. En general, las principales fuentes de vertido de estos nutrientes a las corrientes de agua superficial son el vertido de aguas residuales urbanas e industriales y los fertilizantes utilizados en la agricultura (Allan, 2007). En general, los vertidos de aguas residuales son del tipo puntual, al llegar a través de una canalización, los vertidos de nutrientes de la actividad agrícola se realiza con una gran amplitud superficial. Dado que en los últimos años se han reducido los vertidos de aguas residuales por el tratamiento de las aguas residuales por medio de las diferentes plantas depuradoras construidas, hoy en día, la mayoría de los nutrientes que llegan a los ríos provienen de la actividad agrícola.

A todo esto hay que añadir que la presión agrícola ha reducido la anchura de la vegetación de ribera, como se ha indicado anteriormente, por lo que se elimina la barrera que esta franja de vegetación representaba para evitar la llegada de nutrientes al río, como comentamos en la descripción de la dimensión transversal del río en el apartado 2.1 anterior.

Las consecuencias del incremento de estos nutrientes en las aguas fluviales producen el siguiente proceso:

- Aumento de la biomasa vegetal en el cauce al utilizar los nutrientes para sintetizar más clorofila.
- Aumento de la turbiedad por el incremento del plancton.
- Disminución del oxígeno en las horas sin luz.

- Aparición de situaciones anóxicas por la descomposición del exceso de materia vegetal
- Afectación a las especies animales por la falta de oxígeno
- Reducción de velocidad del agua por aumento de la vegetación lo que modifica las condiciones del ecosistema (pH, temperatura, contenido en O<sub>2</sub>...)

### *Uso de pesticidas y contaminación de las aguas*

Aparte de las consecuencias de los nutrientes descritos anteriormente, otros productos especialmente dañinos para el ecosistema fluvial son los pesticidas o herbicidas. Se trata de sustancias tóxicas que tienen la característica de ser muy estables y permanecer largos periodos de tiempo acumulados en el agua. Ello afecta de forma muy negativa tanto al uso de estas aguas como consumo humano, como a las comunidades biológicas fluviales.

### **2.2.2.-Presiones debidas al urbanismo**

Las actuaciones urbanísticas y su desarrollo implica evidentes presiones sobre los cauces públicos: ocupación de zonas cercanas a los ríos, aumentos de demanda de caudal, vertidos de residuos, etc. Estos efectos que siempre se han producido, se ha visto especialmente incrementado en los últimos 70 años, con el desarrollo de zonas industriales nuevas, creación de grandes bolsas de suelo residencial, sobre todo de segunda residencia asociados a uso de ocio, y el propio desarrollo de los cascos urbanos, en menor medida.

Algunos autores han estudiado estos efectos. Anne Chin (2006) describió los efectos que sufre un río debido a los procesos de

urbanización. En un apartado posterior, lo describimos con mayor concreción y amplitud. Diversos son los efectos que aparecen. Además de la impermeabilización de las zonas urbanizadas que aumentan el caudal que se vierte al río, se habla de construcción de redes de drenaje que modifican el vertido al río desde una forma difusa a una forma puntual (Gurnell, 2007). Por último, el desarrollo urbano obliga a la modificación de la red de cauce del río con hipotéticos cambios de trazado o modificaciones en su sección (Gurnell, 2007). Vamos a estudiar seguidamente las diversas presiones que aparecen.

- **Aumento del consumo de agua y regulación de caudales.**

En los últimos años se ha producido incrementos de superficies urbanizadas que implican aumentos de caudal. Los mayores incrementos se han producido en zonas con un clima benigno donde hay déficit hídrico, con precipitaciones escasas. Para satisfacer las necesidades se realizan diversas actuaciones:

- Construcción de nuevas presas de regulación
- Planteamiento de nuevos trasvases o mantenimiento y aumento del caudal trasvasado en los existentes
- Aumento de la explotación de los acuíferos que llegan a la sobreexplotación.

Los efectos de estas actuaciones sobre el ecosistema fluvial ya lo hemos descrito anteriormente al analizar las presiones debidas a la agricultura. En este caso basta decir que ante la necesidad de realizar estas tomas para los consumos humanos, los caudales circulantes por los cauces son prácticamente nulos. Y además, se sustituyen por los vertidos desde las estaciones de aguas residuales que aportan un caudal prácticamente uniforme a lo largo de todo el año, perdiendo la fluctuación periódica de estos caudales que ocasionan todas las interacciones dentro del ecosistema que vimos anteriormente.

- **Alteración de los balances de agua y sedimentos y desestabilización de los cauces.**

La urbanización de las diversas zonas urbanísticas produce unos efectos que son bien conocidos.

1º.- Construcción de redes de evacuación de aguas pluviales que eliminan las aguas recogidas a través de canalizaciones y de forma lo más rápida posible

2º.- La impermeabilización de las superficies provoca que la práctica totalidad de las aguas pluviales se canalice hacia el río, no habiendo infiltración en el suelo.

Las consecuencias de estas dos condiciones son:

- a.- Se introduce en el río un caudal elevado en muy poco tiempo y de forma puntual
- b.- El flujo de agua no transportan caudal sólido al generarse en zonas pavimentadas.

Volvemos a la analogía de la balanza de Lane descrita anteriormente. En este caso se produce un aumento considerable de caudal líquido con un casi nulo caudal sólido. Ello ocasiona que estas aguas tengan un elevado potencial de erosión, produciendo en los cauces incisiones importantes en el fondo, desmoronamiento de las orillas y ensanchamiento del cauce.

Como dijimos anteriormente, Chin (2006) describe de forma muy clara los efectos que sufre un río durante los procesos de urbanización de grandes zonas. Estos procesos inducen una fase inicial de eliminación de la capa de vegetación existente, nivelación de superficies, terraplenados, dejando el suelo desnudo durante un

tiempo prolongado. En periodos de lluvia es elevado el volumen de sedimentos que son lavados por las aguas de escorrentía. Con ello, se eleva de forma exponencial el volumen de sedimentos que se arrastran con las aguas de lluvia y que llegan hasta los cauces, produciendo un aterramiento de los mismos. Chin estima que esta producción de sedimentos es del orden de 2 - 10 veces mayor. Una vez ejecutada la urbanización, lo que ocurre es una reducción drástica de estos sedimentos que va de la mano de un aumento de escorrentías por la impermeabilización de las superficies de la urbanización. Ello provoca la llegada de caudales importantes de agua, sin material sólido a los cauces, lo que provoca fenómenos de erosión y ensanchamiento, como hemos explicado anteriormente con la analogía de la balanza.

- **Fomento de canalizaciones y dragado y aumento del riesgo hidrológico.**

Con el ánimo de proteger frente a las inundaciones las zonas urbanizadas, además de poder llevar esta urbanización lo más cerca del límite del río posible se realizan canalizaciones de los ríos en los tramos urbanos mediante la ejecución de muros de defensa en ambos lados del río. En los casos más extremos se produce un revestimiento completo del cauce, sustituyendo el entorno natural por una sección de hormigón completamente desnaturalizado, eliminando por completo cualquier forma de vida dentro del entrono fluvial. Incluso se llega a aprovechar el propio cauce para diversos usos, como aparcamiento, colocación de mercados temporales, ferias, etc.



*Fig. 12. Vista del río Palancia en Sagunto (Valencia) con vehículos aparcados en el propio cauce.*

Aunque la ejecución de las canalizaciones hace que la sensación de riesgo frente a inundaciones se reduzca (Fernández, 2012), lo cierto es que se siguen manteniendo muchas incertidumbres en la respuesta del cauce que hace que esta respuesta frente a avenidas no sea la esperada por diversas razones:

- a.- En los modelos hidráulicos se toman unas condiciones de cauce que son muy difíciles de mantener con el paso del tiempo (aumento de rugosidad, posibles obstáculos, etc).
- b.- En los tramos urbanos suele haber frecuentemente obras de cruce del cauce, como puentes u otras estructuras que

representan un obstáculo para el paso de los arrastres que lleva el río en episodios de crecida.

c.- Los desarrollos urbanísticos en núcleos de población situados aguas arriba provocarán incrementos de escorrentía y aumentos de los caudales que pueden llegar al cauce, por lo que se modifican los datos de partida.

Evidentemente, estas razones unidas al hecho de que la presión urbanística hace que los usos ocupen lo que serían las llanuras de inundación del cauce hacen que el riesgo frente a episodios de inundación y la aparición de daños materiales y humanos crezca exponencialmente. Podríamos decir que si bien las canalizaciones reducen los riesgos frente a inundaciones ordinarias, no lo hacen en los episodios de grandes avenidas que son las que realmente producen los mayores daños y que con estas canalizaciones no se reducen los futuros daños en las zonas urbanizadas sino que se acrecientan por la falsa sensación de reducción de riesgo que hace que se ocupen zonas que orográficamente pertenecen a las llanuras de inundación del río.

Un segundo aspecto a tratar son los dragados de los cauces como actividad alternativa o concomitante a la canalización. Con ello se rebaja el nivel del cauce y se aumenta la superficie de la sección. Sin embargo, las consecuencias de esta actuación son las siguientes:

a.- Desde el punto de vista medioambiental se destruyen las formas del lecho, se destruye el microhábitat relacionado con las mismas y dañan tanto a la fauna como a la flora del cauce.

b.- Ocasiona una inestabilidad geomorfológica. El dragado de un tramo del río ocasiona un aumento de pendiente en la zona de aguas arriba para adecuar el fondo a la nueva cota más baja. Volviendo a la analogía de la balanza esto produce fenómenos de erosión que irá remontando aguas arriba. Ocasionará fenómenos de

incisión del lecho e inestabilidad de los márgenes, afectando a un ámbito mucho mayor que el tramo dragado. Incluso puede producir descalces en cimentaciones de puentes, poniendo en riesgo su estabilidad.

c.- Y por último, a través de un proceso lento de redistribución, hay que tener en cuenta que en la zona de aguas abajo se reduce la pendiente, lo que ocasiona procesos de sedimentación, las zonas dragadas vuelven a ir rellenándose de material aportado por el río, sobre todo en período de avenidas, con lo que el proceso deberá repetirse de forma continua para conseguir los fines buscados.



*Fig. 13. Trabajos de dragado en un río.*

- **Contaminación de las aguas por vertidos de procedencia urbana e industrial.**

El último efecto de la urbanización sobre el entorno fluvial son los vertidos de aguas residuales. Bien es cierto que hoy en día la mayor parte de núcleos urbanos e industriales tienen sus estaciones depuradoras que permiten que los vertidos al río no sean de agua residual cruda sino con un tratamiento suficiente. A pesar de ello, aun existen ciertos puntos donde por falta de estaciones depuradoras o mal funcionamiento de las mismas se producen vertidos indeseables al caudal del río. Bien es cierto que el propio río tiene capacidad de autodepuración debido a la aireación que tienen sus aguas por la agitación que experimentan durante el flujo de las mismas. Sin embargo, el incremento de los caudales vertidos por el aumento de los núcleos de población y el tamaño de los mismos, hace que esta capacidad de autodepuración sea insuficiente en la mayor parte de los casos. Los efectos posibles de estos vertidos son:

- Los vertidos con elevada materia orgánica o sólidos en suspensión, puede provocar una reducción de oxígeno en el agua que afecta inmediatamente a las especies del cauce y a más largo plazo se producen decantaciones de fangos de la depuración que tapan el fondo afectando a la vegetación autóctona.
- Los vertidos procedentes de zonas industriales pueden llevar metales pesados y otras sustancias catalogadas como tóxicas y muy peligrosas. Los efectos de las mismas son la mortandad de las diversas especies existentes.
- La presencia de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo en cualquier vertido de aguas residual es muy elevado, lo cual provoca efectos de eutrofización de las aguas, ya analizado en el apartado relacionado con las presiones de la agricultura.

### 2.2.3.-Otros impactos o presiones

- **Extracción de áridos.**

El proceso de extracción de áridos, relacionado con la actividad urbanística, razón por la cual se realiza, tiene unas consecuencias similares al dragado de cauces que ya comentamos anteriormente. Es decir, produce aumento de la turbidez del agua, modificaciones en la pendiente del cauce, lo cual ocasiona fenómenos de erosión ascendente e inestabilidad de laderas y cimentaciones de estructuras. Además de ello, los elementos de mayor tamaño, no aprovechables, se suelen acopiar en las márgenes. Dado que no resulta un sustrato adecuado para la germinación de vegetación, produce un empobrecimiento de la vegetación de ribera.



*Fig. 14. Trabajos de extracción de áridos en el cauce del río Palancia.*

- **Trazado de vías de infraestructuras.**

En muchos casos, principalmente en zonas de orografía montañosa, se aprovechan los valles fluviales para trazar infraestructuras de comunicación. Ello hace que se deba compaginar la existencia del río con la nueva infraestructura. Por tanto se deben construir obras de canalización que hagan compatibles ambos elementos. Estas actuaciones provocan aumentos de pendiente hidráulica de la sección, lo que ocasiona erosiones aguas abajo y riesgos de descalces en cimentaciones de puentes, además de aparecer saltos en la unión con los afluentes, que también afectará en estos con erosiones e incisiones en sus lechos de carácter ascendente hacia aguas arriba.



*Fig. 15. Infraestructura existente paralela al río Ésera (Huesca), reduciendo anchura del cauce.*

- **Producción hidroeléctrica.**

La generación de energía eléctrica aprovechando las centrales hidroeléctricas tuvo un desarrollo importante en España a partir de la década de los 50 con crecimiento hasta los años 80, donde se estabilizó relativamente. Se puede apreciar esta evolución en la figura 16, donde se muestra la evolución de la producción eléctrica en la segunda mitad del siglo XX. En este período se construyeron numerosas presas, como vimos en el apartado relacionado con las presiones de la agricultura, las cuales modificaron de forma drástica el régimen natural de los ríos.

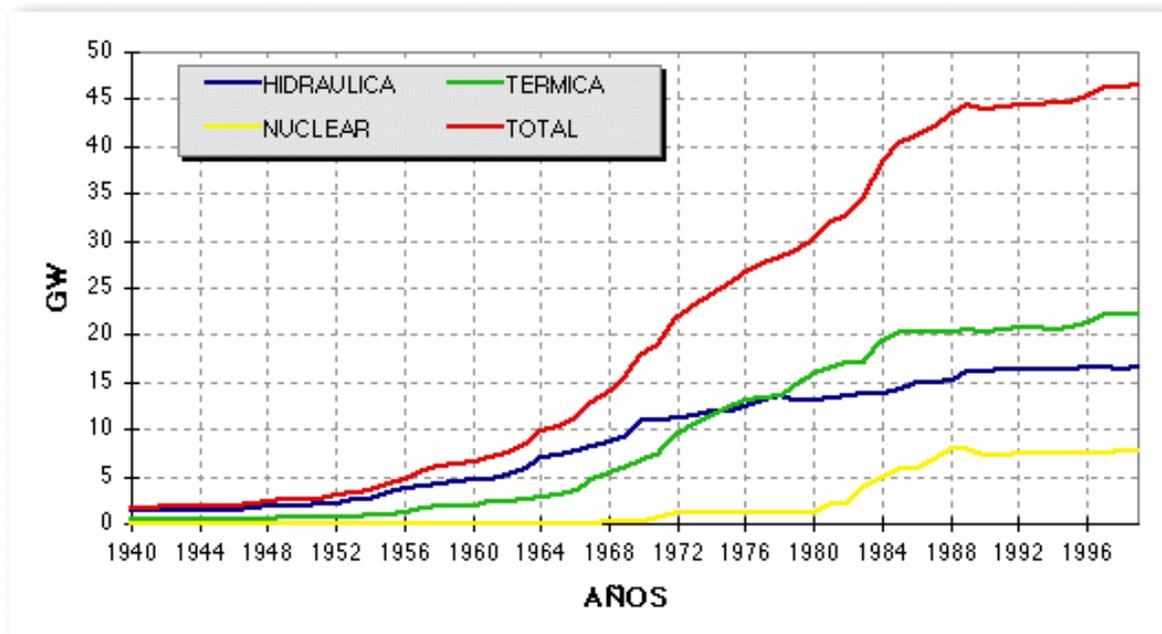


Fig. 16. Evolución de la producción eléctrica en España.

(Fuente: Instituto Nacional de Estadística)

El funcionamiento de las presas y el vertido de agua dependen de la demanda de energía. Por tanto es muy elevada de lunes a viernes y se reduce mucho durante el fin de semana. Se producen, pues, fluctuaciones muy grandes de caudal en muy poco tiempo, con lo cual se pueden llegar a producir arrastres de organismos en momentos de aguas altas y dejar casi seco el cauce y los refugios

existentes en los periodos de poco consumo. La consecuencia evidente es un empobrecimiento de la calidad del ecosistema al desaparecer aquellas especies que no puedan adaptarse a estas condiciones tan cambiantes de caudal tan rápido.

#### **2.2.4.-Relación entre impactos y problemas en los tramos urbanos**

Como resumen de todo lo anterior, podríamos resumir en seis grandes grupos las problemáticas que aparecen en los tramos urbanos de los ríos debido a las presiones anteriormente analizadas. Se presentan en la Tabla 7.

#### **PROBLEMÁTICA PRINCIPAL EN LOS TRAMOS URBANOS**

- 1.- Modificaciones en la morfología del cauce.**
- 2.- Pérdida de la calidad del agua**
- 3.- Pérdida de biodiversidad y empobrecimiento del paisaje**
- 4.- Insalubridad**
- 5.- Riesgo hidrológico de avenidas e inundaciones**
- 6.- Elevado número de población afectada**

*Tabla 7. Problemáticas principales en los tramos urbanos de ríos  
(Fuente: Tanago y Garcia-Jalon, 2007)*

Las diversas consecuencias de las diversas presiones analizadas se pueden incluir en alguno de estos grupos. A modo de resumen se

presenta la Tabla 8 donde se relacionan las diversas presiones sobre el sistema fluvial con las consecuencias que ocasionan.

PRESION	Modificación de morfología del cauce	Pérdida de calidad del agua	Pérdida de biodiversidad y empobrec. del paisaje	Insalubridad	Riesgo hidrológico de avenida e inundaciones	Elevado número de población afectad
<b>PRESIONES DEBIDAS A LA AGRICULTURA</b>						
<i>Construcción de obras hidráulicas para regulación de caudales</i>			X			
<i>Sobreexplotación de acuíferos</i>			X			
<i>Ocupación de las llanuras de inundación.</i>	X		X			
<i>Emisión de nutrientes y otros compuestos agrícolas.</i>		X	X			
<b>PRESIONES DEBIDAS AL URBANISMO</b>						
<i>Aumento del consumo de agua y regulación de caudales.</i>			X			
<i>Alteración de los balances de agua y sedimentos y desestabilización de los cauces.</i>	X		X		X	X
<i>Fomento de canalizaciones y aumento del riesgo hidrológico.</i>	X		X		X	X
<i>Dragado y aumento del riesgo hidrológico.</i>	X	X	X		X	X
<i>Contaminación de las aguas por vertidos de procedencia urbana e industrial.</i>		X	X	X		
<b>OTRAS PRESIONES</b>						
<i>Extracción de áridos.</i>	X	X	X			
<i>Trazado de vías de infraestructuras.</i>	X					
<i>Producción hidroeléctrica.</i>			X			

Tabla 8. Relación entre las presiones con las consecuencias que generan en los ríos.

### 2.2.5.-Situación de los espacios fluviales en los entornos urbanos

Ya hemos comentado que los espacios existentes en un área fluvial son: el cauce mayor (ocupado por el flujo del agua y sólidos), el corredor ripario (que es la franja en que se mueve el río y es la zona de interfase entre el río y el ecosistema terrestre y que incluye la vegetación de ribera) y la llanura de inundación (espacio susceptible de inundación en episodios de avenidas).

En los tramos urbanos se producen modificaciones de estos espacios para hacerlos compatibles con los usos que se ubican junto al cauce.

Así, el cauce es vital para la diversidad biológica donde aparecen diferentes características en la traza (rápidos, meandros, trezados) diferentes sustratos (granular, limoso, etc.) u otros grados de libertad que favorecen la diversidad de la flora y la fauna. Sin embargo, en los tramos urbanos, se producen modificaciones de estos grados de libertad que afectan a la diversidad ecológica. Algunas de estas modificaciones son las obras de encauzamiento, los revestimientos de los cauces, las reducciones o modificaciones de los regímenes de caudal en estos tramos...

Respecto a la zona riparia, debida a la expansión de los usos urbanos hasta el borde ocasiona una total o parcial desaparición de la vegetación de ribera y los espacios en que se ubica.

Por último, las llanuras de inundación desaparecen totalmente, ocupándose por usos productivos como agrícolas intensivos, actividades industriales o zonas urbanas de expansión.

Con todo ello, nos encontramos con una situación consolidada, con el ecosistema fluvial con diferentes grados de degradación según el caso, y que nos debe servir de base para revertir la situación a una

mejora riqueza ecológica con las limitaciones existentes y utilizando las herramientas a nuestro alcance.

### **2.3.- Técnicas de Ingeniería Fluvial en entornos urbanos.**

Como contraposición a la situación descrita en los apartados anteriores, hoy en día ya existe una mayor concienciación social para respetar y regenerar los espacios naturales que representan los ecosistemas fluviales. Por otro lado, contamos con herramientas para poder conseguirlo.

Además, “un principio siempre interesante en la ingeniería fluvial es la reversibilidad de lo ejecutado si el sistema fluvial reacciona en contra de lo esperado” (Martín-Vide, 2002). Por eso, siempre es posible volver sobre nuestros pasos e intentar mejorar la situación existente en nuestros ríos, llegando a soluciones adecuadas para la población y respetuosas con el ecosistema fluvial.

Debemos insistir de nuevo aquí en que el estudio del río no se puede restringir al tramo sobre el que actuemos, sino que es un marco espacial muy amplio donde se producen interacciones dinámicas entre elementos abióticos y bióticos. Es necesario asumir que los problemas locales no existen, el río es un sistema continuo; cualquier actuación tendrá efectos en lugares alejados de los puntos concretos donde se actúe (Fernández, 2012).

Dentro del presente campo, e incidiendo sobre la intensidad posible de las actuaciones, se presentan diferentes grados de intervención sobre los ecosistemas fluviales. A la hora de intervenir sobre el río, la noción más importante es que el conjunto o sistema fluvial se caracteriza por establecer conexiones: de agua, sólidos y nutrientes, entre el ecosistema acuático, el ribereño, su acuífero subyacente y otros ecosistemas en los laterales, como hemos descrito suficientemente en los apartados anteriores.

### 2.3.1.-Posibilidades de mejora ambiental de los ríos

De las posibilidades existentes para la mejora ambiental de los ríos, evidentemente la más ambiciosa es la restauración ecológica, en la cual se pretende recuperar el estado primitivo del río, anterior a la degradación. Sin embargo, por diferentes motivos, no siempre es posible o conveniente proceder a la citada restauración ecológica y menos en el caso de tramos urbanos con las limitaciones que hemos visto.

Por ello, en algunos casos, se pueden plantear otros tipos de actuaciones, siempre positivas, y que sea posible encajar en los condicionantes externos que se tengan en cada caso. Estas posibles actuaciones diferentes pueden ser (Tanago y Garcia-Jalon, 2007):

**Rehabilitación:** Implica la recuperación de un funcionamiento más natural, con una tendencia a conseguir que el río rehabilitado se vaya haciendo cada vez más similar al río anterior a la degradación.

**Remediación:** Esta actuación trae consigo la rectificación, aplicación de un remedio para la mejora de la condición actual.

**Mejora:** Significa un aumento del valor del río pero no necesariamente de acuerdo a la recuperación de su funcionamiento ecológico, sino más bien a la mejora de su aspecto estético, o diversidad física sin que ello sea consecuencia del funcionamiento del propio río.

**Adecuación o acondicionamiento:** Implican un enfoque encaminado a potenciar un determinado uso del río, siendo frecuente la adecuación recreativa de las riberas o el acondicionamiento del cauce para mejorar los accesos a los diferentes usos (baño, pesca...)

**Mitigación:** Representa la moderación o disminución de la intensidad de los efectos que se consideran nocivos para los ecosistemas y que son causados por distintas actuaciones urbanas.

Independientemente de las actuaciones que se lleven a cabo, cada una según las posibilidades, se consideran que todas ellas son adecuadas fundamentalmente en la línea de poner en evidencia la necesidad de mejorar ecosistemas degradados y en muchos casos olvidados, facilitar el acercamiento al río de diversos colectivos y fomentar un respeto hacia los sistemas naturales.

En cualquier caso, un criterio a tener en cuenta siempre en la restauración de un río es el de la secuencialidad. Hay una secuencia de actuaciones que debe respetarse (Fernández, 2012):

- Garantizar un régimen de caudales, líquidos y sólidos.
- Garantizar la calidad de las aguas.
- Garantizar una correcta morfología fluvial. Estabilización de taludes.
- Garantizar la vegetación riparia
- Garantizar la fauna acuática y de ribera.

El marco normativo en que se inscriben las actuaciones sobre los cauces fluviales viene fijado por la siguiente legislación:

- Directiva 2000/60/CE, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Conocida como Directiva Marco del Agua.
- Texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.
- Artículo 129 de la Ley 62/2003, de 30 de diciembre, de medidas fiscales, administrativas y del orden social. Modificación del texto refundido de la Ley de aguas aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por la que se incorpora al derecho español, la Directiva 2000/60/CE, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

- Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional.

La Directiva Marco del Agua no es una ley de aguas comunitaria que suponga una sustitución o modificación sustancial de nuestro ordenamiento, sino de una norma que requiere en su transposición la modificación o el desarrollo *ex novo* de algunos aspectos parciales de las normas españolas.

A su vez hay que indicar que sobre el fundamento del artículo 174 del Tratado Constitutivo de la Comunidad Europea: no puede por este mecanismo regularse desde Bruselas nada que afecte directamente a los aspectos cuantitativos de agua porque se carece de habilitación jurídica para ello.

Por tanto, “la Directiva Marco del Agua tiene como preocupación única la calidad ecológica del agua. No es una directiva económica, tributaria o hacendística” (Cabezas et al, 2009).

Por todo ello, “se debe tener en cuenta la directiva Marco del Agua en su justa medida pero también se debe tener en cuenta el resto de legislación del agua española, que dispone de un verdadero marco general, de alcance mucho más extenso, donde los aspectos de la Directiva Marco, centrados en la calidad ecológica del agua y sus instrumentos y mecanismos de apoyo, pueden encajarse de manera natural, sin forzamiento intelectual alguno” (Cabezas, 2009).

### **2.3.2.-Directrices de ordenación fluvial-urbana en nuevos sectores de desarrollo**

En estos momentos, ya hay abundante bibliografía donde se establecen estrategias y metodologías de actuación para conseguir una adecuada ordenación fluvial-urbana. En esta documentación se establecen las directrices a seguir para lograr compaginar el desarrollo urbano con un mantenimiento del ecosistema fluvial lo más naturalizado posible.

Ureña Francés, en su artículo “Ordenación de las áreas fluviales en las ciudades: un enfoque metodológico” (Ureña et al, 1999), establece unas bases para la ordenación en el caso de desarrollo de nuevos sectores urbanos y el paso de suelo rústico a urbano.

- En relación a la ordenación hidráulica.

En relación con este aspecto, las bases se presentan en la Tabla 9.

NIVEL DE ANÁLISIS	PARTICULARIDADES A CONSIDERAR
Evacuación de caudales	Posibles alternativas: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Diseño de cauce artificial con gran capacidad hidráulica</li> <li>2. Permitir desbordamientos estableciendo usos en llanura de inundación compatibles (jardines, espacios deportivos...)</li> </ol>
Cambios en las escorrentías. Aumento de caudales	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se aumentan los caudales al reducir la infiltración</li> <li>2. El agua llega más rápido al cauce. Se reducen los tiempos de concentración</li> <li>3. Los flujos de agua carecen de caudal sólidos pero van contaminados con aceites, polvo, etc., de las calles.</li> </ol>

*Tabla 9. Bases a analizar en el desarrollo de los nuevos sectores en relación a los cauces fluviales en relación a la ordenación hidráulica.*

A partir de lo anterior, desde el punto de vista hidráulico, Ureña recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos en el diseño de una nueva área urbana (Ureña, 1997):

- Adoptar una ordenación que se base en la forma natural del territorio y de recogida de aguas residuales
- Estudiar las transformaciones que se inducen sobre dichos sistemas naturales al aumentar la escorrentía y el caudal punta de las avenidas por la transformación del

suelo y, aportar el necesario espacio complementario para el río.

- Mantener todo el espacio del sistema fluvial con usos del suelo compatibles con el movimiento del río e incluir el cauce mayor dentro de una zona verde.
- Si es necesario desviar algún cauce, que el nuevo mantenga similares longitudes, pendientes, morfología, riberas, etc.
- No transferir el aumento de escorrentía aguas abajo sino solucionarlo en el interior del mismo tramo, embalsando agua para que el sistema fluvial pueda seguir funcionando igual, fomentando los bosques de ribera, que pueden retardar la llegada de agua al cauce, favoreciendo la infiltración mediante pavimentos porosos a áreas especiales o construyendo pequeños embalses integrados en zonas verdes.

- En relación a la ordenación ambiental

Se establecen los siguientes objetivos para mejorar la naturalidad de las áreas fluviales (Ureña, 1997):

- Mantener la diversidad morfológica natural del cauce y de sus riberas, como alternativa a los ríos encauzados y poco diversos.
- Tratar los márgenes con técnicas y materiales blandos, lo que requiere más espacio y permite un uso ciudadano menos intenso, como alternativa a actuaciones duras en las márgenes, que requieren menos espacio y permiten un uso ciudadano hasta el borde del cauce.
- Mantener la vegetación dentro del cauce, lo que requiere más espacio para el desagüe hidráulico, como alternativa a cauces sin vegetación de ribera.
- Tratar los espacios colindantes a las riberas como espacios de transición entre los usos urbanos y un

espacio natural, como alternativa a la consolidación de las riberas mediante calles o paseos urbanizados.

- En relación a la ordenación formal
  - Se deberá evitar la construcción de infraestructuras en las márgenes de los ríos que implican un efecto barrera y una rigidización del mismo.
  - Se debe conservar la irregularidad morfológica y topográfica del área fluvial, generando espacios urbanos irregulares que permitan conectar esta área fluvial irregular con la trama urbana, más regular.
  - Las obras de ingeniería fluvial antiguos (molinos, azudes, presas, puentes, etc.) son elementos del patrimonio cultural. Aunque representan en algunos casos obstáculos para el desagüe de caudales, se deben considerar como una riqueza patrimonial singular, debiendo servir de equipamiento cultural o de ocio.

### **2.3.3.-Posibilidades de actuación en tramos urbanos constreñidos**

Con las dificultades que entraña compaginar los espacios fluviales con los nuevos sectores urbanos, en esos casos se cuenta con cierta libertad a la hora de ordenar y diseñar las actuaciones.

Sin embargo, cuando nos encontramos ante la situación de actuar sobre tramos de río ubicados en entornos urbanos totalmente consolidados y por tanto, con un espacio más o menos constreñido, las posibilidades de actuación se reducen y el planteamiento, lamentablemente, no puede ser tan ambicioso como el descrito en el apartado anterior.

A la hora de buscar soluciones en estos casos el planteamiento es el siguiente (Redondo y Vara, 1999):

¿Qué es lo que tenemos?

- Tenemos un ecosistema longitudinal –el río- formado por un cauce y una zona riparia. También tenemos una llanura de inundación que es ocupada de forma esporádica por las aguas y, en el caso de ríos desarrollados en llanuras aluviales, unos movimientos transversales de este, que ocupa con su cauce posiciones cambiantes dentro de la llanura. Este es el elemento natural.
- Tenemos asentamientos urbanos, complejos industriales y obras de infraestructuras de transporte que ocupan no solo las llanuras de inundación sino la zona riparia, rompiendo la continuidad del ecosistema, fragmentándolo y dañándolo. Este es el elemento artificial.

Evidentemente, lo ideal hubiera sido que las ciudades se construyesen conservando las franjas ambientales en los márgenes y mantuviesen la continuidad de la zona riparia. Sin embargo, en las ciudades ya construidas, la restauración de estas zonas se plantea como extraordinariamente costosa. A esto se añade el hecho, muy frecuente, de la existencia de infraestructuras instaladas que deberían desviarse, o incluso de la existencia de elementos singulares con valores históricos o arquitectónicos. Todo ello hace imposible plantearse la restauración de las zonas naturales del ecosistema fluvial.

Cuando los asentamientos se sitúan en las llanuras de inundación fuera de la zona riparia, el problema supone una agresión menor desde el punto de vista del ecosistema fluvial. El problema mayor aparece en la presión urbanística máxima que fijan el cauce y canalizan el río para impedir inundaciones, llegando con los usos humanos, hasta el propio borde del cauce.

Algo parecido plantea Ureña (Ureña et al, 1999), el cual indica que en el caso de los tramos de ríos muy deteriorados y constreñidos, la mayoría por no decir la totalidad de las actuaciones importantes de mejora o restauración de los ríos (nótese que no solo habla de restauración sino que introduce la opción de una simple mejora), van a requerir la necesidad de rescatar de sus usos algunos espacios colindantes a los ríos. Otros autores hablan de la importancia de recuperar usos como espacio para recuperar el espacio fluvial, aunque se reconoce que es difícil (Fernández, 2012). Por ello, Ureña plantea que hay que preguntarse qué se puede hacer con estos ríos o arroyos que ya han sido constreñidos y deteriorados. En el mismo artículo, Ureña presenta varias líneas de actuación, graduándolas por orden de preferencia, en función de las posibilidades que existan (Ureña et al, 1999).

Las líneas de actuación coinciden sensiblemente con las indicadas por Fernández Yuste en su artículo "La recuperación de ríos en entornos urbanos; el caso del Río Zadorra en Vitoria-Gasteiz" (Fernández, 2012). Estas son las siguientes:

- Descontaminación de las aguas. Normalmente este objetivo es conseguible perfectamente sin necesidad de disponer de mucho espacio y sin desafectar grandes zonas de su uso actual. Ureña hace la única salvedad de que hay que llevar especial cuidado de que las obras de saneamiento no supongan un deterioro de otros elementos o aspectos del río.
- Mejora de la vegetación de ribera y restablecimiento del contacto entre el ecosistema fluvial y el terrestre. En relación con esto se debería restaurar la morfología del cauce y la continuidad del mismo.
- En el caso de que exista algo de espacio, regenerar unas riberas más naturales dentro de un espacio de parque; en el caso de que haya menos espacio regenerar una ribera más natural y otra más artificial. En algunos casos hay que conformarse con un alto grado de artificialidad e estas riberas (Fernández, 2012).

- En el caso de que no se pueda conseguir más espacio, intentar mantener por el cauce del río un cauce natural para aguas bajas y hacer un nuevo cauce de desagüe ocasional para episodios extremos con un trazado distinto donde exista más espacio. Es una solución costosa pero válida. Otra opción es realizar un río natural totalmente nuevo por unos espacios urbanos donde exista más espacio.
- En aquellos casos en que no sea posible recrear un espacio natural, las actuaciones deberán consistir en tratamientos paisajísticos del cauce (mantener artificialmente una lámina de agua) o de las riberas (realizar paseos urbanos) creando un espacio de calidad urbana y paisajística, aunque de escasa naturalidad desde el punto de vista de la dinámica fluvial.

#### **2.3.4.- Posibilidades de actuación en tramos periurbanos**

En estas zonas, la problemática no suele ser tan intensa. La situación habitual se caracteriza por la ocupación discontinua del espacio fluvial por usos y formas urbanas, infraestructuras y por usos marginales, además de estar sometido a presiones urbanizadoras.

En este caso nos encontramos en una situación intermedia entre los tramos constreñidos en suelo urbano y tramos junto a zonas urbanas por desarrollar.

Los objetivos fundamentales serían la prevención y la restauración, intentando evitar que se aumenten las afecciones sobre el ecosistema fluvial además de intentar corregir la situación actual hacia una mayor naturalización.

Entre las actuaciones encaminadas a la prevención se encontrarían las siguientes:

- Planificación como herramienta fundamental para determinar los espacios fluviales con sus protecciones adecuadas.
- Delimitación el espacio fluvial, aunque la delimitación del Dominio Público Hidráulico ha resultado poco eficiente por las ocupaciones a las que se ha sometido.
- Propiciar convenios urbanísticos para disponer de suelo de titularidad pública.
- Implicar a los propietarios mediante ayudas económicas para crear y mantener zonas de protección de riberas (abandono de cultivos y plantación de vegetación de ribera).

Por su parte, las actuaciones dirigidas a la restauración pueden ser:

- Auto-recuperación: Eliminación de la causa de la alteración, con lo que el sistema puede recuperarse
- Restauración asistida: Dada la lentitud de la auto-recuperación, se realizan acciones para acelerarla.
- Restauración dirigida: Cuando el río ha perdido totalmente su capacidad de auto-recuperación.

## **2.4.- Metodología general en el desarrollo de actuaciones sobre ríos.**

La metodología general o tradicional para el desarrollo de los proyectos, también para las actuaciones para la mejora medioambiental de los ríos con entornos urbanos, suele seguir esquemáticamente el siguiente proceso:

1.- Desde instancias sociopolíticas se detecta un problema o una demanda social que se considera se ha de solventar o satisfacer. A nivel político se discute y se consensua una actuación para solucionarlo y se la dota presupuestariamente.

2.- Se encarga a un técnico competente perteneciente a dicho ente gubernamental la ejecución del proyecto o solución del problema.

3.- El técnico o director del proyecto se plantea una imagen objetivo del río que satisface las demandas sociopolíticas y es plausible técnica y legalmente, y plantea técnica y administrativamente los pasos a seguir para llegar a dicha solución.

4.- Si no tiene los medios o la capacidad suficiente, sorprendentemente es el caso general, plantea la contratación a un experto externo o autor del proyecto para que estudie y desarrolle dicho proyecto.

5.- El autor del proyecto suele ser un experto en la materia o problema que se considera más importante.

6.- A su vez el director y el autor del proyecto se apoyan en asesores para desarrollar estudios parciales de otros aspectos que ellos consideran también de relevancia en el problema.

Este proceso da resultados satisfactorios en actuaciones concretas que consideran conceptos tangibles y disponen de datos suficientes. No es el caso en proyectos de rehabilitación de ríos urbanos, por lo que es necesario aplicar metodologías de apoyo a la decisión que garanticen la selección óptima de la solución (Casini et al, 2015 ; Delgado-Galvan et al, 2014).

Una vez vista todos los pasos desde el punto de vista administrativo-técnico para el desarrollo de un proyecto de actuación sobre un río, nos centraremos seguidamente en la fase de desarrollo técnico del proyecto.

Vistas las particularidades de un sistema fluvial, particularizando la situación en tramos urbanos y periurbanos y las posibilidades de intervención sobre ellos, la labor ingenieril consiste en ser capaces de actuar sobre estos ecosistemas para poder cambiarlos en beneficio de la sociedad, dirigiéndonos hacia el objetivo que dicha sociedad nos fije y utilizando, para llegar hasta él, todos nuestros conocimientos técnicos y tecnológicos. El proceso de diseño y concreción de las actuaciones que se llevarán a cabo en un río requiere una serie de pasos previa al proceso de plasmación de estas actuaciones en un documento técnico.

Es muy importante tener en cuenta que antes de plantear un proyecto, antes de planificar, diseñar y ejecutar es necesario un estudio en profundidad del río que permita un buen diagnóstico en el que basar una correcta propuesta de actuaciones, previendo además un sistema de seguimiento y evaluación de los resultados derivados de la aplicación de tales actuaciones (Fernández, 2012).

Vamos a ir describiendo progresivamente las fases de esta metodología general:

#### **2.4.1.- Selección del tramo sobre el que actuar.**

Esta es una primera fase de los planes de actuación donde se debe compaginar las actuaciones prioritarias por la situación del río y los problemas que ocasiona con la sensibilidad y aceptación por los agentes implicados.

En ciertos casos la selección se realiza para paliar algún problema importante que el río esté generando (inundaciones, afecciones a alguna infraestructura importante, afecciones a especies emblemáticas o protegidas, etc.). Sin embargo, en la mayor parte de las ocasiones se tiene libertad para tomar la decisión, siendo de

especial interés que exista un interés generalizado entre la población local y acuerdo entre las administraciones implicadas.

En este sentido, requiere especial mención los procesos de participación pública por los cuales se puede valorar el apoyo de la población y de los colectivos locales a la ejecución de la actuación, teniendo además un carácter generador de interés por dicha actuación sobre el río. La concienciación de estas asociaciones y colectivos tiene también un resultado dinamizador de cara a que las administraciones se decidan a llevar a cabos los proyectos que les competan.

Como criterios básicos y generales a la hora de elegir la prioridad en las actuaciones y la elección del tramo del río sobre el que actuar se pueden citar dos de ellos:

Desde el punto de vista del estado de los tramos, se requerirá una acción más inmediata conforme el estado del río sea mejor y menos alterado, encaminado todo ello a prevenir nuevas degradaciones. Los tramos más degradados, donde además es más costosa la recuperación, también requerirán una actuación, pero menos urgente ya que el tiempo no supone un factor de riesgo adicional de su degradación.

Desde el punto de vista de la repercusión social, se deberá actuar primordialmente en aquellos tramos de río que representan un riesgo para la sociedad bien de seguridad ciudadana (afección a infraestructuras como carreteras, estaciones depuradoras..., o riesgo de inundaciones) o por afecciones a bienes de gran riqueza ambiental (espacios protegidos, especies en riesgo de extinción)

A partir de estos criterios se podrá determinar el tramo de río sobre el que vamos a actuar.

### **2.4.2.- Objetivos de la actuación.**

Conocido el tramo sobre el que se actúa, se realizará una valoración general de sus características y los objetivos de actuación para ir precisando el alcance de los trabajos. Muchas veces estos objetivos son previos a esta fase y son más bien premisas que marcan la elección del tramo sobre el que actuar del río.

Como en el caso anterior, es importante llevar a cabo un proceso de participación ciudadana en esta fase de definición de objetivos para que las personas implicadas puedan expresar sus opiniones e ideas.

### **2.4.3.- Diagnóstico de la problemática.**

En esta fase se realiza una valoración general de los problemas que afectan al tramo seleccionado.

Este diagnóstico se realizará teniendo en cuenta las condiciones de referencia del tramo, para así valorar su estado, funcionamiento actual, cómo es y cómo debería ser.

### **2.4.4.- Definición de la imagen objetivo.**

Una vez conocidos todos los datos de las fases anteriores se debe definir el punto al que se quiere llegar. Muchas veces, y sobre todo en actuaciones urbanas o periurbanas, la finalidad no es llegar a las condiciones de referencia del río, sino a un punto intermedio que compagine la situación natural con los condicionantes externos existentes. Por eso no siempre el objetivo debe ser llegar a la *Restauración* y en muchos casos, sobre todo en la tipología que nos ocupa, las actuaciones que se llevan a cabo se encaminan a *Adecuaciones o Acondicionamientos*.

Se definirá qué se quiere alcanzar con el proyecto a corto, medio y largo plazo, asumiendo la variación o evolución del sistema fluvial.

Hay que indicar que la imagen objetivo a la que se quiere llegar no es un valor definido de forma unívoca. Más bien puede variar y puede ser muy distinta en cada caso, variando según la problemática particular (estado en que se encuentre el tramo del río) y sobre todo las preferencias de la población y los colectivos sociales, que marcan la sensibilidad existente con el río. A pesar de lo anterior, no toda la decisión se puede dejar en manos de la población y la labor del ingeniero es aplicar sus conocimientos a la mejor solución que compagine la problemática, debilidades y potencialidades del tramo de actuación.

Dentro del proyecto, esta imagen objetivo se debe definir con precisión y los aspectos a considerar para ello serán los siguientes:

- Régimen de caudales: En el caso de ríos regulados o en el caso de que se puedan aportar caudales externos, se debe definir el régimen de caudales que se quiera conseguir en la adecuación.
- Morfología y dinámica fluvial: Los objetivos deberían ir hacia la morfología que tuviese el río anteriormente. Sin embargo, nos encontramos con dos condicionantes: a qué momento nos referimos, ya que el río ha sufrido numerosos cambios por intervenciones humanas; y en segundo lugar, se cuenta con unos condicionantes físicos, urbanísticos, legales y económicos que limitan la posibilidad de actuación. A partir de ello, se definirá la morfología a la que llegar.
- Espacio fluvial: Se definirá el espacio del que se dispondrá para la actuación. Según los condicionantes legales de propiedad y sobre todo por las limitaciones económicas que se tengan, en el proyecto se definirá el espacio que se dispondrá. Se analizará igualmente el estado legal de los terrenos de los que se quiera disponer (existencia de deslindes, expedientes administrativos, etc.) que faciliten la adquisición.

- Tiempo de recuperación ecológica: En el proyecto se deberá proponer el periodo estimado que va a tardar el río en llegar a la situación deseada. Tras ello, en el proyecto se definirá una serie de propuestas de actuaciones posteriores y de mantenimiento, encaminada a obtener el objetivo marcado.

#### **2.4.5.- Caracterización del tramo sobre el que se actúa.**

Previamente al proceso de redacción del proyecto técnico, es necesario llevar a cabo una última fase, imprescindible para conocer los condicionantes con que nos encontraremos. Esta consiste en recopilar la información necesaria para caracterizar el tramo en cuestión. Los apartados fundamentales a analizar serían los siguientes:

- Características generales de la cuenca: Definición de la región biogeográfica, características geológicas, tamaño de cuenca, etc.
- Régimen de caudales: Se deberán precisar las características del régimen de caudales en magnitud, duración, frecuencia y predictibilidad. Para ello se analizarán las series de registros históricos disponibles. En muchos casos no se disponen de dichos datos. Por eso se quiere hacer hincapié en la necesidad y conveniencia de realizar series de aforos periódicos, que nos permitan conocer de forma adecuada el régimen de caudales del río sobre el que actuaremos.
- Calidad de las aguas: Es importante conocer la calidad de las aguas, relacionándola con el régimen de caudales, los usos del suelo en las riberas, presencia de vertidos procedentes de núcleos urbanos o industriales, plantas de tratamiento de aguas existentes, etc.
- Características geomorfológicas: Se estudiará no solo los perfiles del tramo del río en cuestión sino referido a la totalidad del río. El estudio global permite interpretar los procesos de erosión y sedimentación que se producen en la dinámica fluvial. En cuanto a las secciones transversales

nos darán información sobre las dimensiones del cauce, estabilidad de los taludes laterales y conectividad lateral entre el terreno de los márgenes y el río.

- Hábitat físico y comunidades biológicas: Por último la caracterización del tramo deberá tener en cuenta las características físicas del tramo (granulometría del sustrato, forma del lecho y estructura del sustrato, condiciones hidráulicas, temperaturas, etc.) así como las características del medio biótico (vegetación acuática, macrófitas de orilla, peces, invertebrados, etc.)
- Condicionantes a nivel antrópico. Dado que en nuestros ríos el hombre ha estado actuando desde tiempos inmemoriales, siempre hay condicionantes humanos que es necesario conocer para caracterizar el tramo. Entre ellos podríamos citar: presión de la actividad humana sobre el cauce que se traduce en una cercanía de esta actividad humana (urbanística, industrial, agrícola, etc.), o en muchos casos ocupación del mismo cauce por esta actividad (ubicación de industrias, viviendas, parques de uso terciario, aparcamientos, etc.), existencia de infraestructuras lineales que cruzan el cauce (puentes, pasarelas, líneas eléctricas y de comunicaciones).

A partir de la documentación recopilada y generada en las fases anteriores se podrá redactar el correspondiente documento técnico con todos los contenidos necesarios que definan y valoren claramente la actuación que se va a llevar a cabo.

Dentro de las actuaciones en ámbito urbano y periurbano las actuaciones se han definido, como no podría ser de otra forma, compaginando los tres aspectos que confluyen en el río: aspecto medioambiental (respeto al medio ambiente y a los hábitats que nos encontramos, incluso mejorando sus condiciones), aspecto hidráulico (se intenta mejorar la capacidad de transporte del río, teniendo en cuenta toda la ingeniería de dinámica fluvial) y aspecto

social (afecciones a los usos actuales y potenciación de nuevos usos en el entorno del río, integrándolo en el resto del urbanismo de la zona).

## 2.5.- Mejora de ríos en entornos urbanos: la cuenca mediterránea occidental.

Vista de forma genérica la metodología de actuación en los proyectos de actuación en tramos urbanos, procedente directamente de la propia experiencia en actuaciones sobre cauces de la cuenca del río Júcar, se han ido diagnosticando los diversos casos que se presentan en el presente documento obteniéndose una serie de aspectos generales que conviene citar, los cuales se repiten de forma continuada en los diversos tramos analizados, y que permiten fijar una serie de líneas de actuación-marco en este tipo de actuaciones de *Acondicionamiento fluvial*.

Cada caso será diferente y requerirá un estudio particularizado de sus condiciones como ha quedado patente en el apartado 2.4 Metodología. Sin embargo, el objeto de este apartado es dar un paso más y aportar algunas ideas que se repiten y que encuadran las actuaciones que se pueden analizar en actuaciones en ríos en zonas urbanas y periurbanas.

### **Problemáticas detectadas**

Vamos a presentar inicialmente las problemáticas que se han ido detectando. Para ello, lo estudiaremos dividiendo el apartado en tramos urbanos, periurbanos e interurbanos, pues la problemática de un tramo de río urbano puede verse influenciada por la problemática de otros tramos aguas arriba o aguas abajo y puede que no sean estrictamente urbanos.

Tramos urbanos:

- Problemática medioambiental:
  - Desaparición del paisaje fluvial con actuaciones generalmente duras sobre el cauce, como son la existencia de cajeros a base de muros de mampostería y soleras de hormigón
  - Utilización del cauce para el trazado de canalizaciones y servicios urbanos, en algunos casos en malas condiciones con fugas al cauce.
  - Cruces de líneas eléctricas y telefónicas aéreas sobre el río.
  - Frecuente utilización del cauce como vertedero incontrolado.
  - Vertidos puntuales al cauce que empeoran la calidad de las aguas, llegando a provocar malos olores y fomentando la proliferación de ratas, basuras, posibles focos de enfermedades y zonas insalubres.
  - Gran cantidad de basura retenida en la masa arbórea y arbustiva de la zona, que condicionaba el hábitat y desarrollo de la fauna autóctona.
  - Redes de drenaje no separativas, que vierten aguas fecales al propio cauce.
  - El deficiente estado fitosanitario de la masa forestal. Abundante presencia de árboles muertos, partidos, puntisecos y ramas secas.
  
- Problemática hidráulica:
  - Sección hidráulica del cauce muy reducida, causa de frecuentes desbordamientos. Estrechamientos de la sección hidráulica por la existencia de elementos antrópicos, obras de paso de escasa luz, elementos de contención de taludes inadecuados y cruces de tuberías elevadas

- Existencia de grandes obstáculos en el cauce, tales como edificaciones ilegales.
- Abundancia de vegetación en el cauce, como es el caso de cañas, que proliferan en abundancia y suponen un obstáculo para el flujo de agua.
- Problemática social:
  - Limitación de la capacidad recreativa, de ocio y esparcimiento por malos accesos y poca dotación de equipamientos urbanos.
  - Falta de aprovechamiento medioambiental y paisajístico.
  - Necesidad de mejora de las condiciones de seguridad y acceso al río para pescadores y demás usuarios del mismo.
  - Necesidad de rehabilitación de algunos elementos del patrimonio en mal estado.

Tramos periurbanos:

- Problemática medioambiental:
  - Se da misma problemática que en los tramos urbanos, sobre todo en lo referente a la existencia de vertidos, suciedad y basuras, minorándose los daños conforme nos alejamos del casco urbano.
  - Aparece una nueva problemática basada en el exceso de terrenos agrícolas en las márgenes del río, que invaden y reducen considerablemente la sección del cauce y degradan sus taludes y riberas.
  - Cercanía de entornos industriales o periféricos donde el impacto visual, y en ocasiones el acústico contribuyen a afectar y desnaturalizar el entorno.
  - Aparición de contaminación de las aguas por depuradoras que vierten agua insuficientemente tratada.

- Problemática hidráulica:
  - Aunque la problemática es la misma que en tramos urbanos, dentro de la gravedad, esta es menor cuanto más nos alejamos del núcleo urbano, pues se reduce el riesgo para personas y bienes por desbordamientos e inundaciones.
  
- Problemática social
  - Falta de conexión entre el núcleo urbano y el cauce. Falta de conexión transversal entre los dos márgenes del río para los viandantes. El río constituye una frontera natural que impide la conectividad y vertebración de algunas zonas.
  - Limitación de la capacidad recreativa, de ocio y esparcimiento por malos accesos y poca dotación de equipamientos urbanos.
  - Falta de aprovechamiento medioambiental y paisajístico.

#### Tramos interurbanos:

- Problemática medioambiental:
  - Se intensifican los terrenos agrícolas en las márgenes del río, que invaden y reducen considerablemente la sección del cauce y degradado sus taludes y riberas.
  - Proliferación en ocasiones de especies arbóreas y arbustivas invasoras.
  - Proliferación de basuras en zonas concretas de recreo o pesca.
  
- Problemática hidráulica:
  - Estrechamientos del cauce, generalmente por invasión de campos de cultivo.

- Obras de paso de vías de circulación con insuficiente capacidad de desagüe.
- Secciones transversales de cauces irregulares.
- Mala capacidad de desagüe de las parcelas colindantes.
- Aterramientos por escombros y basuras.
- Problemática social:
  - La problemática es similar a la de los cauces periurbanos, añadiéndose la despoblación de núcleos urbanos que no han aprovechado los recursos naturales que les aportaba el río, lo que ha provocado la degradación de algunos entornos.

### **Líneas directoras de las actuaciones proyectadas**

Ante la problemática planteada en cada cauce, las líneas directoras de las actuaciones proyectadas suelen ser:

- Defensa del Dominio Público Hidráulico, delimitándolo mediante cerramientos vegetales u otro tipo de hitos, que lo protejan ante invasiones y reducciones del mismo. Los accesos al cauce y su entorno deben concentrarse en puntos concretos y limitarse a elementos dañinos, tales como vehículos de motor.
- Actuar de forma urgente debido al deterioro producido en la calidad ambiental.
- Mejora y calidad del agua del río.
- Creación de gran franja de disfrute peatonal y otros usos no motorizados.
- Posible establecimiento de zonas de interés biológico y ecológico a conectar con otras zonas naturales del entorno.
- Recuperación de la capacidad hidráulica natural del río.

- Actuación sobre el lecho y taludes del cauce, regularizando la sección, limpiando los escombros y uniformizando la pendiente longitudinal, de forma que se mejore la capacidad hidráulica de desagüe.
- Repoblación y restauración vegetal de la zona de afección del proyecto.
- Protección de la fauna del río.
- Perfecta adecuación e integración con el entorno.
- Revalorización socio-económica del entorno.
- Acercamiento de la población al entorno fluvial.

### **2.5.1.-La desembocadura del río Palancia en Sagunto y Canet d'En Berenguer (Valencia).**

#### **Situación y problemática.**

El río Palancia presenta un potencial ambiental muy elevado, encontrándose no obstante, en una fase de abandono en su último tramo, donde el área del Cono Aluvial ha sufrido una intensa alteración del uso del suelo y una pérdida de valor ecológico.

Desde hace tiempo, la ocupación por parte de parcelistas dedicados a tareas agrícolas, pequeñas actividades ganaderas y otros usos particulares ha ocasionado un aumento artificial de la superficie del cono aluvial conocido como “Delta del Palancia” en detrimento del cauce propiamente dicho. Esta paulatina obstrucción del cauce ha disminuido la capacidad de desagüe de la desembocadura.

Además de lo anterior, en la zona que nos ocupa, cuenta con algunas particularidades que seguidamente referimos.

El tramo de la actuación discurre desde el Hospital de Sagunto hasta la desembocadura del río Palancia en el mar Mediterráneo, con una longitud aproximada de 2,5 km, pudiendo calificar dicho

cauce como de periurbano. En su recorrido el río linda con los términos municipales de Sagunto y Canet d'En Berenguer. En este tramos se pueden diferenciar varias zonas o subtramos cuyas características se muestran en la Tabla 10.

<b>ZONA</b>	<b>CARACTERISTICAS</b>	<b>PARTICULARIDADES</b>
Desde el puente de la carretera CV-320 hasta el antiguo puente de San José	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Morfología suave con cantos rodados procedentes de riadas</li> <li>• Vegetación herbácea espontanea en el cauce</li> <li>• Obras de protección en el margen derecha mediante gaviones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vertidos incontrolados de origen antrópico, más acentuado en margen derecha</li> <li>• Existencia de obras de drenaje de caudales de aguas pluviales</li> </ul>
Desde el antiguo puente de San José hasta el cono aluvial.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aparición de profundas cárcavas tras el paso del puente de San José</li> <li>• Aparición de cantos rodados y vegetación herbácea en el cauce al ensancharse tras el puente</li> <li>• Existencia de arboles de porte medio, sobre todo eucaliptus</li> <li>• Muro de gaviones para protección de monte de utilidad pública nº 152</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En la margen izquierda existe suelo forestal con paseos en su interior.</li> </ul>
Desde el vértice del cono aluvial hasta la costa.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hábitat natural del delta exterminado por los usos aparecidos en el: agrícola, ganadero, lúdico y por la construcción de infraviviendas.</li> <li>• Vertido incontrolado de escombros y residuos que han reducido la capacidad de desagüe del cauce</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En el brazo norte, zona forestal con infraviviendas</li> <li>• El brazo sur se encuentra prácticamente aterrado por escombros y basuras.</li> <li>• Existencia de la vía pecuaria "Cañada del Mar", que actualmente sirve de conexión entre municipios para el tráfico rodado</li> </ul>

*Tabla 10. Zonificación y particularidades del tramo final del cauce del río Palancia.*



*Fig. 17. El tramo final del cauce del río Palancia y su desembocadura al mar. Planta y fotografía aérea.*



*Fig. 18. Río Palancia. Infraviviendas existentes en la zona del delta del río Palancia y su frente marítimo.*



*Fig. 19. Río Palancia. Brazo sur de la desembocadura aterrado por escombros y basura.*

### Necesidades a cumplir y actuaciones del proyecto

Vista la situación descrita anteriormente, se decide actuar sobre el cauce mediante la ejecución de dos proyectos por parte de la Confederación Hidrográfica del Júcar, planteando una intervención que mejore la situación actual de capacidad hidráulica y permita una adecuación medioambiental del cauce, recuperando sus potenciales. “Proyecto de adecuación de la desembocadura del río Palancia (Sagunto)” y “Obras complementarias del Proyecto de adecuación de la desembocadura del río Palancia (Sagunto)”.

Con la actuación se pretende:

- ✓ Actuar de forma urgente en delta dada la alta fragilidad visual del mismo, además del deterioro absoluto que se ha producido en la calidad ambiental.
- ✓ Actuación sobre el lecho y taludes del cauce, regularizando la sección, limpiando los escombros y uniformizando la pendiente longitudinal, de forma que se mejore la capacidad hidráulica de desagüe.
- ✓ Prolongación en márgenes del cauce de plantaciones acordes con el entorno existente y uso de las mismas con un doble fin:
  - Definición de la línea del río Palancia en el paisaje.
  - Absorción de dotaciones recreativas, didácticas

existentes.

- Creación de gran franja de disfrute peatonal y otros usos no motorizados.
- ✓ Posible establecimiento de una zona de interés biológico y ecológico a conectar con otras zonas naturales del entorno.

Para cumplir con estos objetivos, las actuaciones que se realizan son las siguientes:

- ❖ Coordinación de la adecuación medioambiental con la mejora del drenaje del río Palancia (mejora la capacidad hidráulica a lo largo de todo el cauce, eliminando vertidos y aterramientos artificiales): lecho sin obstáculos al flujo y con intervención mínima, taludes estables y con pendientes naturales. Se regularizó el fondo mediante la eliminación de los escombros existentes, así como de las acumulaciones de aportes existentes, que provocaban que incluso en algunos puntos del cauce la rasante del cauce se encontrase en contrapendiente. De esta forma se consigue una pendiente más homogénea, mejorando la capacidad de desagüe. De igual modo, se actúa en los dos brazos del río, aumentando su sección, eliminando los escombros y aportes existentes y perfilando su sección hidráulica.
- ❖ Protección en zonas puntuales, tanto del lecho como de los márgenes frente a erosiones. En aquellos puntos en que se prevén erosiones sobre los márgenes y lecho se coloca puntualmente escollera. En particular en los taludes de acceso de los caminos ciclistas al cauce y especialmente aguas abajo del puente antiguo de San José, donde anteriormente existían cárcavas producidas por las avenidas del río por el régimen rápido que se crea tras el paso del puente. En toda esta zona y en la longitud donde se prevé que se produzca el resalto hidráulico, se dispuso un lecho de escollera recebada.
- ❖ Creación de rutas peatonales y/o ciclistas en área de

actuación con redes viarias o rutas integradas en el entorno. Estas rutas se disponen en los márgenes de ambas orillas. Se les da un trazado y una pendiente uniforme decreciente desde aguas arriba con objeto de conseguir desde estos caminos unas amplias visuales del cauce. Los paseos discurren entre las masas arbóreas y los márgenes del río. El porte de la vegetación plantada es progresiva, desde plantaciones arbustivas y tapizantes de bajo porte en los taludes y junto a los caminos hasta especies arbóreas entre los caminos y el límite de la actuación. Esta disposición de la vegetación tiene como objetivo no obstaculizar las vistas del cauce desde los caminos conseguidas con los trazados definidos.

- ❖ Plantaciones en los márgenes, regenerando los bosques de ribera existentes.
- ❖ Compatibilizar la regeneración paisajística del Palancia con el disfrute público del mismo: recuperar el hábitat natural del delta y del resto del cauce y conectarlo adecuadamente con el entorno urbano. El delta se proyecta como el punto central y principal de la actuación. Su adecuación paisajística estará orientada a restituir su carácter original. Los elementos constructivos a disponer en el delta serán mínimos dado el carácter inundable y dinámico del mismo.

### 2.5.2.- El río Valdemembra en Villanueva de la Jara (Cuenca)

#### Problemática

El río Valdemembra pertenece a la cuenca del río Júcar, con nacimiento en Solera de Gabaldón (Cuenca) y desembocadura en el mismo en el término municipal de Valdeganga (Albacete).

En el tramo que nos ocupa, el río Valdemembra constituye el cauce más próximo al casco urbano de Villanueva de la Jara (Cuenca),

delimitando naturalmente el casco urbano y la zona industrial. Dicho tramo comprende un total de 430 m entre el puente de la N-310 y el siguiente puente inmediatamente aguas arriba, además de parte del Barranco Chorrillos, desde su desembocadura hasta el cruce con la Avenida de Castilla.

La problemática existente se fundamentaba en que el uso intensivo de la llanura de inundación, fundamentalmente para fines agrícolas había conducido a un encajonamiento progresivo del cauce, llegando las labores propias de los cultivos hasta la misma orilla del cauce, por lo que en general, había sido eliminada toda la vegetación riparia. Los taludes del río resultaban prácticamente verticales y su base se erosionaba, dejando los troncos de los árboles al aire libre y viéndose éstos obligados a curvarse para tratar de mantenerse hasta que al final muchos de ellos acababan cayendo al cauce.

Por otro lado el crecimiento indiscriminado de vegetación intrusiva en el cauce y la poca limpieza a la que estaba sometida la ribera disminuía la capacidad hidráulica del río, además de convertirlo en un espacio poco cuidado y casi oculto, por lo que la situación actual del río Valdemembra a su paso por Villanueva de la Jara estaba bastante degradada y obligaba a realizar una mejora importante en cuanto a su uso, aspecto y funcionalidad. Estos problemas se pueden resumir en:

- ✓ Degradación ambiental del cauce y su entorno.
- ✓ Exceso de terrenos agrícolas de la margen derecha del río, los cuales han invadido y reducido considerablemente la sección del cauce y degradado sus taludes y riberas.
- ✓ Vertidos puntuales al cauce.
- ✓ Mal funcionamiento hidráulico del tramo del cauce en cuestión, con el actual peligro por inundaciones debido a la reducida sección hidráulica disponible, existencia de obturaciones del mismo y cercanía al casco urbano.
- ✓ Falta de aprovechamiento medioambiental y paisajístico.
- ✓ Falta de conexión transversal entre los dos márgenes del río

para los viandantes.

- ✓ Deficiencia de los espacios públicos para el disfrute de la población.

Mediante la actuación realizada, se ha pretendido conservar y revalorizar la citada zona, realizando un estudio de la ribera del río de modo que se cumplieran los siguientes objetivos básicos:

- ✓ Recuperación de la capacidad hidráulica natural del río.
- ✓ Análisis in situ de los aspectos ecológicos de la vegetación.
- ✓ Repoblación y restauración vegetal de la zona de afección del proyecto.
- ✓ Mejora y calidad del agua del río.
- ✓ Protección de la fauna del río.
- ✓ Perfecta adecuación e integración con el entorno.
- ✓ Revalorización socio-económica del entorno.
- ✓ Acercamiento de la población al entorno fluvial.
- ✓ Concienciación de la población para respetar el medio natural.



*Fig. 20. Estrechamiento del cauce y márgenes del río Valdemembra a su paso por Villanueva de la Jara (Cuenca) debido a los cerramientos de las naves industriales.*

*Fig. 21. Estrechamiento del cauce del río Valdemembra debido a los predios agrícolas.*



*Fig. 22. Río Valdemembra. Estado degradado del cauce y su ribera.*

*Fig. 23. Río Valdemembra. Gran montículo de escombros sobre tradicional zona húmeda.*



### Descripción de las actuaciones sobre el río

Las actuaciones realizadas se engloban dentro del “Proyecto de Restauración y Acondicionamiento Medioambiental del río Valdemembra a su paso por Villanueva de la Jara (Cuenca) Fase II” y abarcan tres partes fundamentales; por un lado dotar al cauce de mayor sección hidráulica en este tramo periurbano, en segundo lugar restituir el bosque de ribera y en tercero, la creación de espacios de atractivo turístico para el disfrute de la población.

Para ello se ha llevado a cabo las siguientes actividades:

- ✓ Limpieza y desbroce selectivo de la ribera: Se han retirado de forma selectiva las especies de ribera, respetando aquellos árboles junto a la orilla del río que no tienen peligro de caer y retirando el resto.
- ✓ Aumento de la sección del cauce con el fin de mejorar su capacidad hidráulica.
- ✓ Estabilización de las márgenes del cauce.
- ✓ Formación de Pendientes de 2% hacia el cauce del río en toda la zona de actuación, con el fin de mejorar la llegada de la escorrentía superficial al mismo.
- ✓ Restauración de la vegetación de ribera.
- ✓ Ejecución de sendas peatonales que vertebran la actuación.
- ✓ Colocación de tres pasarelas de madera de longitudes 17,30m, 8,20m y 16,50m y anchura 3,50m.
- ✓ Reconstrucción del lavadero existente.
- ✓ Ejecución de cerramientos de madera y vegetales.
- ✓ Urbanización: Creación de una red de alumbrado, red de riego y bocas de riego.
- ✓ Eliminación de un gran montículo de tierra ubicado junto al tramo final de la actuación formado mediante material

proveniente de escombros, que suponía una grave alteración del área inundable, con el consiguiente peligro para personas y bienes.

- ✓ Eliminación de estrechamientos y estrangulamientos en la zona de ribera, motivados por la existencia de edificaciones muy cercanas al cauce existente y la invasión de terrenos de cultivo.
- ✓ Creación de una serie de pantallas vegetales que eliminan las visuales de naves industriales y fábricas existentes desde dentro de la actuación. De esta forma ha incrementado la “naturalización” del entorno, de carácter antrópico e industrializado.
- ✓ Definición de una serie de motas y pantallas vegetales que protegen a los viandantes y demás usuarios de la actuación del ruido proveniente de la carretera N-310.
- ✓ La creación de una serie de pozas, isletas y ensanchamientos del cauce en la zona central de la actuación, que además de aumentar su capacidad hidráulica, promueven la proliferación y mantenimiento de especies animales en la zona, mejora la estética del entorno, rompiendo la traza lineal del cauce y favoreciendo su naturalización, y supone la creación de un sistema de depuración natural de las aguas.
- ✓ La rehabilitación de una antigua zona húmeda, mediante creación de una laguna con pozas en el terreno originario, liberado por el gran montículo de escombros, que aumenta y embellece el espacio recreativo de la zona y permite la proliferación de especies animales, tales como peces y aves, lo que dota al entorno de una mayor riqueza faunística y ecológica. La creación de un bosque de ribera en el entorno de la laguna y el desplazamiento de la línea aérea telefónica existente.
- ✓ La ejecución de accesos peatonales desde el lado sur de la población.
- ✓ Gradación del perfil longitudinal del cauce a lo largo de toda su traza mediante la creación de muretes o diques a base de roca, que elevan la lámina de agua, aumentan el calado para ayudar a la proliferación de especies animales en la zona, y

producen un efecto “cascada” que armoniza y dinamiza el cauce, configurando un entorno más agradable.



*Fig. 24. Río Valdemembra.  
Creación de sendas*

*Fig. 25. Río Valdemembra. Sendas,  
talanqueras, plantaciones, riego por  
goteo y pasarelas de madera.*



*Fig. 26. Río Valdemembra. Pasarelas  
de madera.*

*Fig. 27. Río Valdemembra.  
Rehabilitación de antigua zona húmeda  
(antes escombrera).*



*Fig. 28. Río Valdemembra.  
Restauración lavadero.*

*Fig. 29. Río Valdemembra.  
Estabilización de taludes.*



### 2.5.3.- El arroyo de la Cañada en Casasimarro (Cuenca)

#### Problemática

El arroyo de La Cañada atraviesa el casco urbano de la población de Casasimarro, de noreste a suroeste, formando parte de la identidad del municipio desde los orígenes del mismo y dividiéndolo en dos partes casi simétricas a lo largo del tramo que nos afecta, de un total de 700 m de longitud; para desembocar 7 km aguas abajo del casco urbano en el río Júcar, en el denominado paraje de Los Nuevos (Alarcón).



*Fig. 30. Arroyo de la Cañada. Planta de Localización zona de Actuación.*

El cauce presentaba inicialmente una sección hidráulica muy reducida, lo que ocasionaba desbordamientos en época de fuertes lluvias. Además, este arroyo recoge en su cauce diversos cursos de

pequeña entidad, como son la rambla de Los Chabarcos, objeto de otra actuación incluida en el presente artículo.

El paisaje vegetal ripario estaba configurado por diversas formaciones edafohidrófilas cuyas características biológicas y ecológicas revelaban una intensa influencia antrópica, dado que las formaciones naturales riparias se encontraban muy mermadas o alteradas. Esta vegetación riparia está representada por Cañaveral, Juncal-nitrófilo, Zarzal y Olmeda que tapizaban una reducida franja de anchura variable, aunque en su mayoría inferior a los 3 m. En numerosos puntos, la vegetación de las márgenes había llegado a desaparecer, bien por cultivos o por las edificaciones construidas

En resumen:

- ✓ Sección hidráulica del cauce muy reducida, causa de frecuentes desbordamientos. Estrechamientos de la sección hidráulica por la existencia de elementos antrópicos, pasos peatonales de escasa luz, elementos de contención de taludes inadecuados y cruces de tuberías elevadas.
- ✓ Obras de paso con insuficiente capacidad de desagüe
- ✓ Existencia de grandes obstáculos, como la edificación existente en la parcela nº 15, ubicada justo en la cabeza del talud de la margen izquierda, y que supone tanto un obstáculo frente a avenidas, que puede interferir en la evacuación de las aguas, como un peligro para la estabilidad del propio talud y de las propias obras proyectadas.
- ✓ Riberas en un considerable estado de abandono, sometidas a una intensa presión antrópica.
- ✓ El Arroyo de la Cañada y sus riberas tenían su capacidad recreativa, de ocio y esparcimiento limitada por la insuficiente red viaria peatonal y la exigua dotación en equipamientos urbanos de que estaba dotado este espacio.
- ✓ Degradación ambiental del cauce y su entorno.
- ✓ Gran cantidad de suciedad, escombros y basuras en el propio cauce. Aguas sucias, insalubridad y malos olores
- ✓ Vertidos puntuales al cauce.

- ✓ Falta de aprovechamiento medioambiental y paisajístico.
- ✓ Mal funcionamiento hidráulico de la zona urbana sobre el puente de la denominada Plaza de la Paz de Casasimarro. El correcto drenaje en la Plaza de la Paz es una cuestión prioritaria pues dicha zona constituye un punto bajo de recogida de las aguas de lluvia de todo el municipio, pudiendo suponer riesgos para personas y bienes.

### Descripción de las actuaciones.

Las actuaciones llevadas a cabo en el tramo del arroyo de la Cañada a su paso por Casasimarro se plantearon según la ejecución de 2 proyectos, por parte de la Confederación Hidrográfica del Júcar, con títulos: “Proyecto de acondicionamiento del Arroyo de la Cañada en Casasimarro (Cuenca)” y “Proyecto de obras accesorias del acondicionamiento del Arroyo de la Cañada en Casasimarro (Cuenca)”.

Los trabajos desarrollados fueron fundamentalmente de carácter medio ambiental, también se mejoró la capacidad hidráulica del cauce, se recuperó el bosque de ribera y se crearon sendas peatonales y espacios de descanso, acercamiento y esparcimiento en las márgenes del cauce. El tramo afectado por la obra comprende un total de 670 m.

Para ello se ha llevado a cabo las siguientes actuaciones:

- ✓ Modificación de la sección transversal apta para mejorar la capacidad hidráulica del cauce mediante un despeje y desbroce de las márgenes y posterior excavación para encajar los nuevos taludes.
- ✓ Dotación al cauce de una mayor sección hidráulica y reperfilado de su sección longitudinal.
- ✓ Construcción de transiciones entre la nueva sección y los puentes existentes.
- ✓ Acondicionamiento de los paseos paralelos al cauce.

- ✓ Formación de Pendientes de 2% hacia el cauce del río en toda la zona de actuación, con el fin de mejorar la llegada de la escorrentía superficial al mismo.
- ✓ Actuación de diversificación, refuerzo y estabilización de los taludes para su mejor integración ambiental y protección frente a avenidas.
- ✓ Revegetación del cauce y su ribera.
- ✓ Implantación de transición entre el medio urbano y el ripario.
- ✓ Colocación de talanquera de madera y muretes de mampostería en cabeza de talud.
- ✓ Construcción de redes de riego necesarias para el mantenimiento de las plantaciones vegetales.
- ✓ Ejecución de red de alumbrado.



*Fig. 31. Arroyo de la Cañada. Vistas nocturnas de la actuación. Red de Alumbrado.*

- ✓ Adecuación al uso social mediante itinerarios ambientales y comunicación con vía peatonal.
- ✓ Colocación de 4 pasarelas peatonales que vertebran la actuación.
- ✓ Implantación de un colector de saneamiento que recogerá las diversas conducciones que vierten en la actualidad al cauce.
- ✓ Eliminación de grandes obstáculos, como la edificación de la parcela nº 15 (Discoteca Peypi).
- ✓ Inclusión de tubos transversales con la finalidad de permitir la evacuación de las aguas de lluvia de las parcelas colindantes hacia el propio arroyo.
- ✓ Aumento la seguridad en las secciones aguas abajo de las

pasarelas proyectadas, así como para los usuarios de las mismas, adaptándolas a las normativas de seguridad vigentes.

- ✓ Aumento la seguridad en la zona del lavadero.
- ✓ Ampliación de la red de colectores, justificada por la futura planificación del municipio de Casasimarro evitando la proliferación de vertidos.
- ✓ Acondicionamiento del fondo del cauce y ejecución de rastreles, con la finalidad de disipar la energía en el flujo, la elevación de la lámina de agua, y hacer más agradable el uso recreativo de la actuación.
- ✓ Colocación de jardineras: Aguas arriba del puente de la Plaza de la Paz, donde se han plantado diversas especies acuáticas y subacuáticas. Su localización es dispersa y alterna a ambos márgenes del arroyo de la Cañada, sin provocar una disminución de la capacidad de desagüe inicial.
- ✓ Ejecución de pozo de bombeo y tubería de distribución, con el objeto de proporcionar y mantener un flujo de agua continuo. Para ello se ha ejecutado un pozo que extrae agua desde el subsuelo a una profundidad de 200 m. Se ha proporcionado suministro eléctrico en baja tensión a dicho pozo, la correspondiente conducción de fundición dúctil de 150 mm de diámetro para su transporte hasta el punto de desagüe al cauce, y la ejecución en dicho punto, aguas arriba del arroyo, de una cascada artificial.
- ✓ Drenaje de las parcelas adyacentes: Mediante la colocación sistemática, y en especial en todos los puntos bajos, de tubos de drenaje de 300 mm de diámetro que desaguan al cauce.
- ✓ Mobiliario urbano: Se colocarán elementos complementarios que garanticen el uso y disfrute del arroyo consistentes en la instalación de elementos de mobiliario urbano tales como bancos.

**ESTADO INICIAL**  
Problemática existente



**ACTUACIÓN**  
Trabajos Realizados



**ESTADO FINAL**  
Solución ejecutada.



Gran cantidad de suciedad, escombros y basuras en el propio cauce. Aguas sucias, insalubridad y malos olores

Aumento de la sección hidráulica del cauce. Colocación de geotextil. Escollera en taludes. Acondicionamiento de riberas y creación de sendas.

Aumento de la sección hidráulica del cauce. Impermeabilización del lecho. Dotación de lámina de agua. Estabilización de taludes. Creación de sendas. Alumbrado. Plantaciones de ribera. Jardineras en cauce. Gradación del perfil longitudinal. Rastres.

**ESTADO INICIAL**  
**Problemática existente**



Riberas en un considerable estado de abandono, sometidas a una intensa presión antrópica

**ACTUACIÓN**  
**Trabajos Realizados**



Creación de sendas en la ribera del arroyo. Relleno de tierras. Excavación para dotación de servicios y saneamiento.

**ESTADO FINAL**  
**Solución ejecutada.**



Ampliación de la red de colectores, evitando la proliferación de vertidos. Construcción de redes de riego. Ejecución de red de alumbrado. Plantaciones de ribera.



Sección hidráulica del cauce muy reducida. Estrechamiento del cauce. Existencia de grandes obstáculos.



Ejecución de lavadero. Aumento sección hidráulica.



Ejecución de lavadero. Aumento sección hidráulica. Estabilización de taludes. Eliminación de estrechamientos.

**ESTADO INICIAL**  
**Problemática existente**



Desembocadura de la rambla de Chabarcos. Sección hidráulica insuficiente. Invertebración peatonal.

**ACTUACIÓN**  
**Trabajos Realizados**



Aumento de sección hidráulica. Estabilización de taludes. Colocación de pasarela peatonal.

**ESTADO FINAL**  
**Solución ejecutada.**



Acondicionamiento de la desembocadura. Vertebración peatonal.



Existencia de estrechamientos y grandes obstáculos. Limitación del uso recreativo.



Demolición de la edificación existente. Ampliación de la sección del cauce.



Creación de rosalda en zona ocupada antes por edificación. Creación de sendas.

**ESTADO INICIAL**  
**Problemática existente**



**ACTUACIÓN**  
**Trabajos Realizados**



**ESTADO FINAL**  
**Solución ejecutada.**



Margen izquierda. Inicio de la actuación.

Creación de cascada.

Dotación de lámina continua de agua. Recirculación del agua aportada.

*Fig. 32. Arroyo de la Cañada. Comparativa estado inicial – estado final*

### 2.5.4.- Rambla de los Chabarcos en Casasimarro (Cuenca)

#### Problemática

Esta Rambla Fue Objeto de actuación dentro del proyecto de “Obras Complementarias del proyecto de Acondicionamiento del arroyo de la Cañada en Casasimarro (Cuenca)”, abarcando un tramo de 260 m de longitud.

La rambla de los Chabarcos acomete al Arroyo de la Cañada por su margen derecho, constituyendo antiguamente un obstáculo natural en el tramo que va desde la carretera CM-3114 hasta su desembocadura, debido a la insuficiente anchura de su cauce y a las malas condiciones de la zona para la evacuación de las aguas de lluvia hacia el mismo, por lo que constituía un evidente problema para la población de Casasimarro, aumentando el riesgo de inundaciones en las márgenes próximas a la Rambla cuando se producen lluvias de no excesiva magnitud. Para evitar estas inundaciones indeseables se consideró necesario mejorar la sección

hidráulica de la rambla planteando una sección trapezoidal de características similares a la del arroyo de la Cañada y un paso en badén entubado bajo la correspondiente calle del pueblo.

Este riesgo, se veía acentuado por el paso de la rambla bajo el vial denominado Paseo Castilla, donde la obra de paso existente se reducía a un único tubo de unos 600 mm de diámetro, lo que constituía un grave estrangulamiento de la sección del cauce. Esto producía, que ante la venida de lluvias no necesariamente extraordinarias, el tubo no resultase suficiente para el paso de las aguas y estas salten por encima del mismo e inundasen el Paseo de Castilla, que distribuía las aguas hacia el resto de viales y casas de la población, con el consiguiente peligro para personas y bienes.

Para minorar el riesgo de inundaciones, se planteó una solución conceptualmente similar a la del Arroyo de la Cañada, canalizando el trazado de la Rambla de los Chabarcos desde la carretera CM-3114 hasta el Arroyo, de manera que el ancho en la base sea de 6m con taludes a 45° en ambas márgenes y una altura de cajeros de 1,5m lo que da una ocupación en planta de 9 m similar a la original del Arroyo de la Cañada. La anterior solución permite desaguar en condiciones normales hasta 26,5 m<sup>3</sup>/s. Esto implica una minoración del riesgo de inundaciones, pero no la eliminación del mismo, pues el proyecto es de carácter Medioambiental y no Hidráulico.

Esta solución de drenaje de la Rambla de los Chabarcos bajo el Paseo Castilla en marco de hormigón armado resultaba incompatible con la red de saneamiento mixta del municipio, pues se cruzaban. Por dicho motivo se ejecutó una red de colectores paralela a la Rambla de los Chabarcos, que discurre enterrada por la margen izquierda hasta el paseo ubicado en la margen derecha del Arroyo de la Cañada, anulando parte de la red existente en la actualidad.

Además, resultó necesario ejecutar el picado del firme del paseo y elevar 30 cm la rasante del mismo en la zona del marco.

En resumen, la problemática se basaba en:

- ✓ Sección hidráulica del cauce muy reducida.
- ✓ Obras de paso con insuficiente capacidad de desagüe
- ✓ Riberas en un considerable estado de abandono, sometidas a una intensa presión antrópica.
- ✓ Falta de aprovechamiento medioambiental y paisajístico
- ✓ Gran cantidad de suciedad, escombros y basuras en el propio cauce
- ✓ Degradación ambiental del cauce y su entorno.

### Descripción de las actuaciones

Las actuaciones realizadas se engloban en tres partes fundamentales: Por un lado dotar al cauce de mayor sección hidráulica en este tramo periurbano, en segundo lugar restituir el bosque de ribera y en tercero, la creación de espacios de atractivo turístico para el disfrute de la población.

Para ello se ha llevado a cabo las siguientes actividades:

- ✓ Limpieza y desbroce selectivo de la ribera: Se retiraron de forma selectiva las especies de ribera, respetando aquellos árboles junto a la orilla del río que no tienen peligro de caer y retirando el resto.
- ✓ Aumento de la Sección del Cauce con el fin de mejorar su capacidad hidráulica.
- ✓ Protección de taludes mediante la colocación de escollera en puntos determinados de la traza.
- ✓ Eliminación de estrechamientos y estrangulamientos en el cauce y su zona de ribera.
- ✓ Ejecución de un paso bajo la Avenida de Castilla, consistente en de un marco de hormigón armado HA/30/P/20/I ejecutado bajo el Paseo y compuesto por tres cajones de 2 m de ancho por 1 metro de alto cada uno.
- ✓ Formación de Pendientes de 2% hacia el cauce del río en toda la zona de actuación, con el fin de mejorar la llegada de la escorrentía superficial al mismo.
- ✓ Restauración de la vegetación de ribera.
- ✓ Ejecución de red de colectores en paralelo a la Rambla de los

Chabarcos.

- ✓ Creación de una serie de pantallas vegetales que eliminan las visuales de zonas excesivamente antropizados en el entorno de la actuación. De esta forma ha incrementado la “naturalización” de la zona.
- ✓ Ejecución de red de alumbrado.
- ✓ Acondicionamiento de los paseos paralelos al cauce.
- ✓ Colocación de talanquera de madera y muretes de mampostería en cabeza de talud.

**ESTADO INICIAL**  
**Problemática existente**

**ACTUACIÓN**  
**Trabajos Realizados**

**ESTADO FINAL**  
**Solución ejecutada.**



Gran cantidad de suciedad, escombros y basuras en el propio cauce. Sección de cauce insuficiente y poco definida.

Aumento de la sección hidráulica del cauce. Acondicionamiento de riberas y creación de sendas.

Aumento de la sección hidráulica del cauce. Creación de sendas. Alumbrado. Plantaciones de ribera. Rastreles.

**ESTADO INICIAL**  
**Problemática existente**



**ACTUACIÓN**  
**Trabajos Realizados**



**ESTADO FINAL**  
**Solución ejecutada.**



Obra de paso existente bajo el paseo de Castilla, reducido a un único tubo de unos 600 mm de diámetro, lo que constituía un grave estrangulamiento de la sección del cauce.

Levantado de la pavimentación del paseo y ejecución de un marco de hormigón armado HA/30/P/20/I compuesto por tres cajones de 2m de ancho por 1 metro de alto cada uno.

Marco de hormigón bajo paseo. Creación de sendas. Alumbrado. Plantaciones de ribera

*Fig. 33. Rambla de los Chabarcos. Comparativa estado inicial – estado final*

Todas estas actividades se han realizado siguiendo los principios generales planteados de cubrir las necesidades de los visitantes, integración paisajística, no degradación del ecosistema y accesibilidad.

### 2.5.5.-El río Júcar en Cuenca ciudad

#### Problemática

El ámbito de esta actuación abarca el tramo del río Júcar comprendido entre el Puente de Valdecabras y el Puente de San Antón, con una longitud total de 5.6 km. El objeto de esta actuación es estrictamente medioambiental y comprende las siguientes actuaciones:

- ✓ Completar las labores de restauración y adecuación de la Fase I, mediante el acondicionamiento de las riberas en un total de 11,2 km y 519.508 m<sup>2</sup> de actuación.
- ✓ Recuperar los márgenes del río para el ciudadano y reivindicar el carácter de público en la zona del dominio hidráulico, poniendo en valor los espacios naturales como recurso turístico de calidad, fomentando el aprovechamiento sostenible del río y favoreciendo la creación de áreas de sociabilización.

La problemática inicial se resume en:

- ✓ El deficiente estado fitosanitario que presentaba la masa forestal comprendida a lo largo de la actuación, debido al exceso de densidad en algunas zonas, así como a la inexistencia de un mantenimiento adecuado. En este sentido, era abundante la presencia de árboles muertos, partidos, puntisecos y ramas secas.
- ✓ La necesidad de minorar el riesgo para personas y bienes ante el peligro por caída de arbolado seco de gran porte sobre los viandantes, pescadores, piragüistas y demás usuarios del

río, así como sobre diferentes edificaciones de la zona. El arbolado con peligro de caída era muy abundante a lo largo de todo el tramo en cuestión.

- ✓ La existencia de restos antrópicos en el cauce y su entorno. La diversidad de estos restos antrópicos era muy variada y abundante. Los restos iban desde papeles, basuras, plásticos y un sinfín de elementos no biodegradables y contaminantes, hasta escombros, jeringuillas y otros elementos peligrosos y posibles focos de enfermedades.
- ✓ La gran cantidad de basura retenida en la masa arbórea y arbustiva de la zona, condicionaba el hábitat y desarrollo de la fauna autóctona, pudiendo verse ésta desplazada.
- ✓ Existencia de zonas del río que impiden el disfrute de los ciudadanos al tratarse de auténticos puntos de vertido de basura, convertidos incluso en zonas de refugio para toxicómanos.
- ✓ La existencia de vertidos al cauce que degradan la calidad de las aguas y el entorno.
- ✓ El estado deteriorado e incluso ruinoso de algunos colectores, como es el caso del colector que discurre junto al barrio de San Juan, y que presentaba numerosas fugas provocando un grave daño para el medioambiente.
- ✓ Necesidad de mejora de las condiciones de seguridad y acceso al río para pescadores y demás usuarios del mismo, en aquellos puntos en que está permitido, mediante la creación de puestos de pesca similares a los existentes en la zona.
- ✓ Necesidad de rehabilitación de algunos elementos del patrimonio en mal estado, como las fuentes naturales existentes, e incluso alguna cuya existencia se redescubrió tras el inicio de los trabajos de desbroce.
- ✓ El gran impacto medioambiental que suponían los cruces de líneas eléctricas aéreas sobre el río y el consiguiente peligro para las aves y en especial, para las rapaces de la zona.

### Descripción de las actuaciones

La obra del Proyecto de “Restauración y Adecuación Medioambiental del río Júcar a su paso por la ciudad de Cuenca. Fase II”, ha contemplado dos tipos de actuaciones sobre la vegetación, una consistente en un tratamiento básico de la vegetación existente y la otra, consistente en completar este tratamiento básico con una repoblación de especies autóctonas.

La masa forestal comprendida a lo largo de la actuación presentaba un estado fitosanitario deficiente, tal y como hemos visto anteriormente, con abundante presencia de árboles muertos, partidos, puntisecos y ramas secas. Además, resultaba abundante la presencia de especies invasoras en el sotobosque, dificultando en algunas zonas del tramo el contacto de la población con las márgenes del río. Ante esta situación se propusieron una serie de tratamientos selvícolas que se detallan a continuación:

- ✓ Tratamiento de la vegetación:
  - Recogida de residuos antrópicos.
  - Desbroce.
  - Poda.
  - Eliminación de pies muertos o partidos.
  - Cortas de entresaca.
  - Plantaciones.
- ✓ Caminos y sendas peatonales, con acceso restringido al tráfico motorizado, que permiten vertebrar ambas márgenes en su totalidad, dividiendo además la obra en 7 tramos según su tipología.



*Fig. 34-Rio Jucar. Creación de sendas.*



*Fig. 35. Arroyo de Bonilla.*

*Fig. 36. Río Júcar. Escala de peces.*



- ✓ Limpieza y acondicionamiento de la desembocadura del Arroyo de Bonilla en el tramo 1, protegiendo sus márgenes, acondicionando la cueva existente, restaurando el antiguo puente que lo cruza y creando un área de esparcimiento.
- ✓ Acondicionamiento e integración de todas las casetas de registro que aparecen a lo largo de la actuación, en su mayoría pertenecientes a una conducción de agua potable existente.
- ✓ Acondicionamiento de diversas fuentes naturales existentes:
- ✓ Soterramiento de diversas líneas eléctricas aéreas de baja y media tensión.
- ✓ Creación de áreas de esparcimiento.
- ✓ Eliminación o conservación de edificaciones en ruinas.
- ✓ Creación de puestos de pesca.
- ✓ Limpieza de sedimentos de la zona del azud que origina la playa artificial.
- ✓ Creación de una escala de peces en el azud de la playa artificial.
- ✓ Acondicionamiento de zonas de aparcamiento de vehículos con motivo de la imitación de acceso de los mismos a la zona de actuación.
- ✓ Ejecución de 2 pasarelas de madera.
- ✓ Acondicionamiento y mejora de la escalera existente en el tramo 6.
- ✓ Dotación de mobiliario urbano. Colocación de talanquera de madera, bionda de madera y muretes de mampuestos en zonas con peligro por caída libre.
- ✓ Limpieza del cauce y sus riberas.
- ✓ Eliminación de vertidos puntuales.



*Fig. 37. Tramo entarimado de la pasarela volada sobre el río Júcar con barandilla de fundición e iluminación.*



*Fig. 38. Rio Júcar. Diversas actuaciones en el cauce.*

### 2.5.6.- El río Júcar en la Aldea de los Nuevos en Alarcón (Cuenca)

#### Problemática

Este conjunto de actuaciones responden al interés general del Estado en recuperar medioambiental y socioeconómicamente un paraje como el entorno de Los Nuevos, en el término municipal de Alarcón (Cuenca), actualmente con bastantes elementos degradados, pero con un gran potencial natural y de puesta en valor para la zona.

Este nivel de degradación en el paraje de Los Nuevos viene motivado por la despoblación de la aldea de los Nuevecillos, así como por el impacto de las actuaciones humanas en la zona.

La despoblación ha generado que las edificaciones del entorno se encuentren en su mayoría deshabitadas, en estado de semi-ruina y las infraestructuras existentes en desuso, fomentándose el abandono de la zona y la pérdida de los valores históricos y culturales relativos a formas de vida tradicionales en plena interacción con el medio ambiente, desde el punto de vista del aprovechamiento de los recursos naturales disponibles y el respeto a la naturaleza. Además, las actuaciones de carácter antrópico han provocado un excesivo nivel de explotación agraria de los cultivos y una poco intensa la presión recreativa, por lo que resultaba necesario la protección del ecosistema así como su restitución allá donde resulte necesario y su acondicionamiento para los usos previstos.

Estas actuaciones servirán para potenciar actividades de promoción comarcal en La Manchuela Conquense de forma que sirvan de base a una política de dinamización rural que funcione como modelo de sostenibilidad. La base para esta dinamización rural es la puesta en valor del entorno desde un punto de vista ambiental, social, económico y cultural. Esta puesta en valor gira en torno a un eje principal que es el río Júcar, mediante el aprovechamiento de sus recursos y su uso como elemento enriquecedor y potenciador del entorno.

Para ello se han considerado acciones de recuperación y adecuación del entorno natural y urbano, además de la creación de infraestructuras para el desarrollo de actividades eco-turísticas, culturales, lúdicas, recreativas y educativas. La gestión de la actuación global se planteó mediante la realización de diversas fases de ejecución, dos de las cuales ya están ejecutadas:

La Fase I, denominada “Proyecto de Restauración Ambiental del Paraje de Los Nuevos (Cuenca)”, fue ejecutada y entregada en 2007.

Esta actuación tuvo por objeto la realización de acciones de protección ambiental y de restauración ambiental, así como la ejecución de una red de riego. Dentro de las labores de protección ambiental, se realizaron trabajos de conservación de ecosistemas riparios y de conservación de la vegetación zonal, como acciones de restauración ambiental. Se procedió a la restauración ambiental del bosque de ribera, de la vegetación climatófila y de los taludes del entorno. Finalmente, se ejecutó una red de riego, con los elementos necesarios para permitir el mantenimiento temporal de las especies vegetales plantadas en la actuación que así lo requieren.

La Fase II, denominada “Proyecto de adecuación ambiental para uso educativo y ecoturístico del Paraje de los Nuevos (Cuenca) y adendas nº 1 y 2”, fue ejecutada y entregada en 2008. Esta actuación tuvo por objeto la ejecución de acciones para la adecuación al uso educativo e interpretativo ambiental, así como para la adecuación al uso turístico-recreativo.

Como culminación a las actuaciones previstas en el paraje de Los Nuevos, se prevé la ejecución de una Fase III, actualmente en proceso de tramitación, que concentra una serie de obras tendentes al establecimiento de un entorno que fomente la educación, interpretación y turismo ambiental; además de ampliar las actuaciones ya comenzadas de protección restauración y adecuación ambiental, abarcando ambas márgenes del río y dotándolas de la vertebración necesaria para conseguir su total integración.

Para conseguir tales fines, se pretende la creación de un centro educacional y de aprovechamiento socio-turístico que gire en torno al Agua, y más concretamente, en torno al Río Júcar. Es por ello que este centro tratará de mostrar los distintos y diversos aprovechamientos del agua y conseguir una dinamización rural y repercusión sobre el entorno, vida social y económica de la región, convirtiéndose en un centro pionero y referente a todos los niveles. Por este motivo, se pretende la educación en técnicas de aprovechamiento del recurso fluvial desde puntos de vista

innovadores y de respeto del medio ambiente, mediante la utilización de tecnologías vanguardistas para el uso y disfrute del río y su entorno, compatibles con tecnologías ecológicas y limpias para el medio ambiente. Para tales efectos es fundamental dotar a la actuación del carácter integral o global que merece, para lo cual se hace indispensable completar el proceso expropiatorio y reforestador de riberas iniciado en las fases anteriores, con la finalidad de disponer de un área suficiente que permita el completo desarrollo de los objetivos y finalidades previstos.

Ello implica la ocupación también de los terrenos de ribera de la margen derecha del río, para su posterior restauración y acondicionamiento, sin los cuales el proyecto no tendría el carácter de obra completa.

### Descripción de las actuaciones

Dentro de la Fase I, denominada “Proyecto de Restauración Ambiental del Paraje de Los Nuevos (Cuenca)”:

Para la revitalización de las potencialidades ambientales que guardan los terrenos degradados como consecuencia del uso humano continuado, se realizaron actuaciones de protección ambiental, acciones de restauración ambiental y ejecución de una red de riego.

Como labores de protección ambiental, se realizaron acciones de conservación de ecosistemas riparios y de conservación de la vegetación zonal. Los trabajos ejecutados fueron:

- ✓ Eliminación del arbolado muerto o en mal estado para aminorar la proliferación de plagas o enfermedades en la masa en pie. Se concreta en la eliminación de los pies muertos o decrepitos (olmos y chopos), en la retirada de los árboles derribados y en la poda de las ramas enfermas o

secas de la masa.

- ✓ Conservación de muestras representativas de la flora y vegetación zonal que encierran valores didácticos.

Como acciones de restauración ambiental, se procedió a la restauración ambiental del bosque de ribera, de la vegetación climatófila y de los taludes del entorno. Para ello:

- ✓ Se realizó la recuperación mediante repoblación del bosque de ribera en una franja de 40 metros de anchura. La reforestación se ha realizado en tres franjas paralelas al cauce y paulatinamente más alejadas de él, compuestas por una saucedada, una alameda y una olmeda.
- ✓ Se aclaró el pinar para favorecer la llegada de la luz al suelo, e implantado especies características de la formación climática, utilizando métodos y técnicas adecuadas a las peculiaridades del medio y respetuosos con él.
- ✓ En los rodales más degradados, complementariamente a las plantaciones, se realizó una siembra con especies típicas de los matorrales zonales, de gran capacidad colonizadora y restauradora y temperamento robusto.
- ✓ Se hidrosembraaron los taludes de la zona de actuación.



*Fig. 39. Río Júcar. Panorámica zona de actuación Fase I.*



*Fig. 40. Río Júcar. Restitución vegetación climatófila.*



*Fig. 41. Río Júcar. Restitución bosque de ribera.*

Finalmente, se ejecutó una red de riego, con los elementos necesarios para permitir el mantenimiento de todas las especies vegetales plantadas en la actuación que así lo requieran.

Dentro de la Fase II, denominada “Proyecto de Restauración Ambiental del Paraje de Los Nuevos (Cuenca)”:

El Plan de Actuación concentra una serie de proyectos tendentes al establecimiento de un complejo de educación, interpretación y turismo ambiental, mediante:

- ✓ La creación de infraestructuras y adecuación del medio para la cumplimentación de actividades de educación e interpretación ambiental en contacto directo con la naturaleza.
- ✓ La dotación del entorno para la acogida de actividades turísticas y recreativas.

Para ello se han realizado actuaciones para la adecuación al uso educativo e interpretativo ambiental, así como para la adecuación al uso turístico-recreativo.

Dentro de las acciones para la adecuación al uso educativo e interpretativo ambiental, se han ejecutado:

- ✓ Un vivero de especies aromáticas.
- ✓ Un jardín botánico.
- ✓ Un Itinerario Ambiental.
- ✓ Un entramado de sendas y caminos.
- ✓ Suministro de especies, siembra manual y plantación de árboles y arbustos.
- ✓ Instalación de la correspondiente red para el riego de las distintas plantaciones.
- ✓ Ejecución de una balsa para el riego de la totalidad de especies, cuyo cambio de ubicación y ampliación motivó la redacción del Proyecto Modificado nº1. Esta solución confirma un considerable incremento en el volumen de almacenamiento mediante el cual se garantizará el riego para las plantaciones de las fases nº 1 y nº 2. Se ha incluido un sistema de abastecimiento de la balsa de forma natural, mediante la creación de un sistema de zanjeados y desarenador que recogen el agua de lluvia de la ladera localizada junto a la misma.



*Fig. 42. Río Júcar. Entramado de sendas y caminos.*



*Fig. 43. Río Júcar. Zonas de esparcimiento.*

*Fig. 44. Río Júcar. Jardín botánico.*



Para la adecuación al uso turístico-recreativo, se ha creado:

- ✓ Un área de aparcamiento.
- ✓ Diversos senderos para paseo.
- ✓ Varias áreas de descanso y esparcimiento.
- ✓ Colocación de mobiliario urbano, como bancos, mesas, papeleras, porta contenedores, aparca bicicletas, y flechas indicadoras.
- ✓ Talanquera de madera.
- ✓ Guía para invidentes.
- ✓ Una pasarela de madera.
- ✓ Paneles interpretativos.
- ✓ Embarcaderos.
- ✓ Observatorios de fauna.
- ✓ Un pabellón de usos múltiples.
- ✓ Un aula de la naturaleza al aire libre.



## **CAPÍTULO 3.- METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE SOLUCIONES EN ACTUACIONES SOBRE RÍOS**

---



### **3.- METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE SOLUCIONES EN ACTUACIONES SOBRE RÍOS.**

En la introducción de esta tesis, se ha indicado que el objetivo de la misma es presentar un sistema experto que significase un procedimiento óptimo para seleccionar la sección transversal de un acondicionamiento de un tramo de río en ámbito urbano. En función de los datos de partida, la situación física real en que se encuentra el tramo, así como los condicionantes adicionales (normativos, sociales, culturales, etc.), existe una variedad de criterios que se pueden utilizar para poder diseñar una elección eficaz, económica, hidráulica y medioambientalmente sostenible de entre todas las soluciones técnicas que están a disposición de los técnicos.

Actualmente en la bibliografía existen multitud de métodos de análisis de decisiones multicriterio discretos. Podemos clasificar los métodos existentes en tres grandes grupos (Belton y Stewart, 2002):

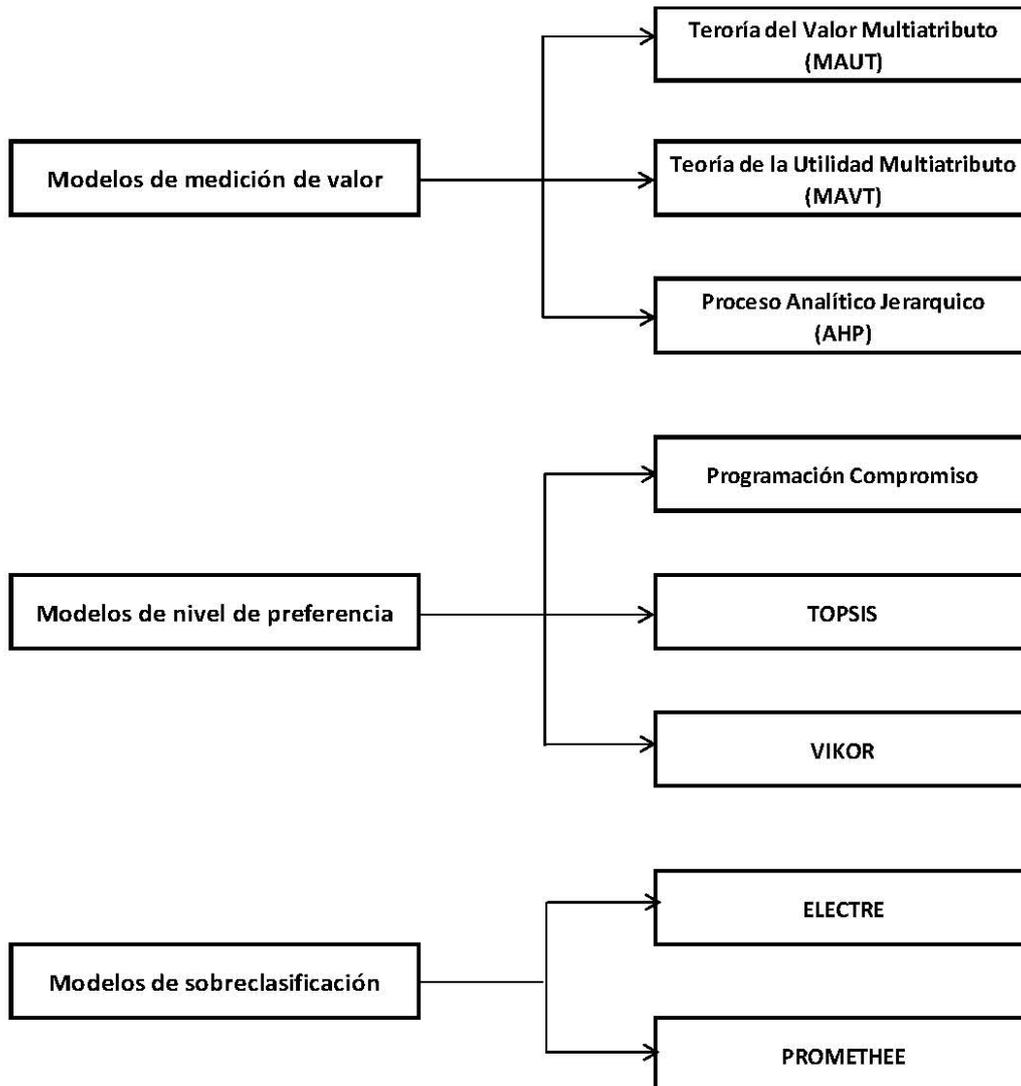
i.- Modelos de medición de valor. En ellos se asigna un resultado numérico a cada alternativa, para representar el grado en que cada una se prefiere a otra. Tales puntuaciones se desarrollan para cada criterio y después se sintetizan para hacer una agregación en el nivel superior del modelo.

ii.- Modelos de metas y nivel de preferencia. En estos se establecen los niveles deseables o satisfactorios de logro para cada criterio. El proceso entonces busca para descubrir las opciones que están en algún sentido más cerca de lograr estos objetivos deseables.

iii.- Modelos de ranking o sobreclasificación. En ellos las alternativas se comparan por pares, inicialmente en relación a cada criterio, para identificar la medida en que se puede afirmar la preferencia de una sobre otra. Agregando tal información de preferencias para todos los criterios relevantes, el modelo busca

establecer la fuerza de la evidencia de la selección de una alternativa respecto a otra.

Los métodos Multicriterio existentes y clasificados en los tres grupos anteriores se muestran en la Figura 45.



*Fig. 45. Clasificación de los métodos multicriterio  
(Fuente: Rojas, 2012)*

Del primer grupo, el método MAUT es uno de los más usados para generar un orden de alternativas. Tiene la ventaja de que es muy axiomático a la hora de tomar decisiones bajo múltiples objetivos. El valor obtenido refleja la utilidad que tiene la alternativa para el decisor. Como desventaja, los atributos deben ser independientes. Además su aplicación requiere la definición de funciones de utilidad para cada atributo. El cálculo es muy complejo.

Respecto al MAVT, se podría decir que es fácil de usar, además de poder manejar criterios cuantitativos y cualitativos. Sin embargo, el formato utilizado no es fácil de comprender lo cual limita la transparencia. Requiere un software especializado. Por último, también como inconveniente principal, se asume una total equivalencia de criterios, por lo que un mal desempeño de uno se puede compensar con el buen desempeño del otro.

Por último, el método AHP es muy simple y flexible, permite tratar problemas complejos y es más fácil de aplicar a problemas reales. Permite la participación de grupos en la valoración de los criterios y permite verificar el índice de consistencia de los juicios y hacer correcciones. Como inconvenientes presenta el riesgo de que la introducción de una nueva alternativa pueda hacer variar las referencias del decisor, además de alguna inconsistencia. Por otro lado, cuando el número de alternativas o criterios es elevado, consume mucho tiempo.

Con respecto al grupo de modelos del nivel de preferencia, el método de Programación Compromiso exige pocos parámetros y es de fácil entendimiento; permite obtener todo el conjunto de soluciones no dominadas y los resultados son muy equilibrados cuando los parámetros son grandes. Por el contrario requiere una carga computacional elevada; cuando los parámetros son pequeños, los resultados son muy desequilibrados; la decisión tiene difícil interpretación.

El método TOPSIS introduce dos puntos de referencia: ideal positivo e ideal negativo y es fácil de identificar la mejor alternativa. Como

aspectos negativos, no considera la importancia relativa de las distancias al ideal y los valores normalizados dependen de la unidad de evaluación de la función del criterio.

Por último, el método VIKOR es una herramienta útil para facilitar la toma de decisiones en una situación de múltiples objetivos para obtener resultados razonables; es muy adecuado cuando el decisor no sabe expresar sus preferencias al comienzo del diseño del problema; permite tratar criterios que son conflictivos y con unidades diferentes; los decisores tienen la responsabilidad de aprobar la solución final y sus preferencias deben ser incluidas; y un análisis de estabilidad permite determinar la ponderación de los intervalos de estabilidad. Como aspectos negativos, los resultados dependen de la solución ideal, por lo que la inclusión de una alternativa puede afectar a la gradación del nuevo grupo de alternativas; además presenta problemas en la obtención del ranking de preferencias, por lo que ya se han estudiado modificaciones para obtener este ranking.

Por último, analizando los modelos de sobreclasificación, en el caso del método ELECTRE, permite utilizar criterios discretos de naturaleza cuantitativa o cualitativa consiguiendo una completa ordenación de alternativas; el decisor puede expresar su estricta preferencia o ausencia de ella al comparar las alternativas para cada criterio; se obtienen relaciones de superioridad frente a la preferencia estricta y no requiere grandes esfuerzo del decisor. Como inconvenientes nos encontramos en que la operativa es detallista; los umbrales de concordancia y discordancia son subjetivos; necesita en todos los casos un análisis de sensibilidad para despejar dudas sobre los umbrales citados y no considera la intensidad de las preferencias.

Respecto al método PROMETHEE, es uno de los más intuitivos; el decisor puede expresar su estricta preferencia o ausencia de ella al comparar las alternativas para cada criterio; permite obtener una ordenación total o parcial de las alternativas no dominadas; y es fácil de aplicar a problemas reales. Los inconvenientes principales

son que es poco sólido teóricamente; es muy subjetivo en relación a la definición de parámetros de los criterios.

Vista la descripción de los diferentes métodos existentes, la metodología propuesta es un procedimiento de toma de decisiones estructurado, capaz de tratar con criterios tangibles e intangibles, con el fin de llegar a un consenso para elegir qué solución técnica es la más adecuada. El método propuesto proporciona un marco en el que las decisiones se pueden tomar de manera eficiente para los problemas complejos, aprovechando los procesos naturales de la toma de decisiones.

El sistema de apoyo a la decisión propuesto es un método híbrido que combina el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) (Saaty, 1980) con el método Delphi (Linstone y Turoff, 2002) y la técnica VIKOR (Opricovic, 1979; Utrillas et al, 2014).

En primer lugar, se empleará la técnica Delphi durante las fases de obtención de datos, con la consulta a diversos expertos en el tema que nos ocupa. En este caso, se les pide que valoren la mayor o menor importancia de los diversos criterios de elección adoptados al compararlos entre sí, dos a dos.

En segundo lugar, se utilizará el AHP para la ponderación de los pesos de los diferentes criterios, partiendo del resultado obtenido del método Delphi de consulta a expertos.

Por último, con el método VIKOR se evaluarán las alternativas propuestas y se elige aquella que es idónea a partir de la ponderación anterior.

Veremos seguidamente de forma detallada el proceso seguido en cada una de estas fases.

### 3.1.- EL Método Delphi.

Es un método de estructuración de un proceso de comunicación grupal que es efectivo a la hora de permitir a un grupo de individuos, como un todo, tratar un problema complejo (Linstone y Turoff, 2002)

Es una técnica idónea como medio y método para la creación de consenso mediante el uso de una serie de cuestionarios para recoger datos a partir de un panel de expertos seleccionado. Este procedimiento se realiza para facilitar un eficiente proceso de carácter dinámico de consenso entre dichos expertos (Hsu y Sandord, 2007; Roubelat, 2011; Gracht, 2012).

Es una técnica cualitativa para establecer una priorización de criterios. Como características fundamentales de este método se encuentran las siguientes:

- Anonimato: Durante el Delphi ningún experto conoce la identidad de los otros que componen el grupo de debate.
- Iteración y realimentación controlada: La iteración se consigue al presentar varias veces el mismo cuestionario, lo que permite disminuir el espacio intercuartil, ya que se consigue que los expertos vayan conociendo los diferentes puntos y puedan ir modificando su opinión.
- Respuesta del grupo en forma estadística: La información que se presenta a los expertos no es solo el punto de vista de la mayoría sino que se presentan todas las opiniones indicando el grado de acuerdo que se ha obtenido.
- Heterogeneidad: Pueden participar expertos de determinadas ramas de actividad sobre las mismas bases.

El método Delphi está especialmente indicado cuando se quiere alcanzar los siguientes objetivos (Hsu y Sandord, 2007):

- Determinar o desarrollar una gama de alternativas posible de un programa
- Explorar o exponer supuestos subyacentes o información a diferentes juicios
- Buscar información que puede generar un consenso por parte del grupo consultado
- Correlacionar los juicios informados sobre un tema que abarca una amplia gama de disciplinas
- Educar al grupo consultado en cuanto a los aspectos diversos e interrelacionados del tema

Como todo método de expertos requiere un conjunto de pasos en los que participan un grupo de expertos con un adecuado conocimiento de las particularidades de un problema específico. La determinación depende de la experiencia acumulada y la calificación de los especialistas que realizan la evaluación. Su empleo persigue la selección y evaluación de todas o algunas características de un proceso. Normalmente, cuando se da alguna de las siguientes situaciones, es conveniente utilizar el método Delphi (Linstone y Turoff, 2002):

- No existe información disponible o la información con que se cuenta es insuficiente; con este método se puede extraer la información que posea cada participante.
- El problema no se presta para el uso de una técnica analítica precisa, pero si puede beneficiarse de juicios subjetivos sobre bases colectivas.
- Los individuos que deben contribuir al examen de un problema complejo o amplio no tienen antecedentes de comunicación adecuada.
- Se necesitan más participantes expertos de los que pueden interactuar en forma eficiente en un intercambio cara a cara.

- Por problemas de costes y de tiempo de los participantes, no es posible llevar a cabo encuentros presenciales periódicos del grupo.
- Puede aumentarse la efectividad de las reuniones cara a cara con un proceso de comunicación del grupo suplementario
- Se desea mantener una cierta heterogeneidad de los participantes a fin de asegurar la validez de los resultados, por lo que es preferible este método a los encuentros cara a cara, porque así se evitan los efectos de grupos de dominación por personalidades: efecto bandwagon.
- Los desacuerdos entre los individuos son tan graves o políticamente difíciles de aceptar que el proceso de comunicación debe ser arbitrado o asegurado el anonimato.
- Habida cuenta de la separación geográfica de los expertos, que pertenecen a diferentes ámbitos e incluso países que interviene en el proyecto, esta técnica es particularmente útil para generar flujos de retroalimentación.
- Esta técnica es recomendable cuando los participantes expertos están físicamente dispersos y requieren el anonimato, como ocurre en nuestro estudio.

El panel de expertos consta de personas elegidas para formular su opinión, y la elección de estas debe recaer sobre las personas que se consideren más competentes en la materia y, a ser posible, que la contemplen desde perspectivas diferentes, tendiendo así a la formación de unos grupos interdisciplinares. No hay acuerdo relativo entre el número de personas que deben conformar el grupo. Algunos autores indican que debe estar compuesto por un mínimo de 7 personas y nunca superar los 30. (Linstone y Turoff, 2002). Según Delbecq y Ven, el tamaño del panel de expertos puede estar en el rango de diez a quince participantes, cuando el grupo sea relativamente homogéneo (Hsu y Sandord, 2007). Parece que todos los valores manejados en la bibliografía establecen un límite superior de 50 expertos. Estos límites se fijan para obtener un nivel de confianza estadístico suficiente y a su vez una calificación elevada como experto. La determinación del número de expertos se realiza utilizando criterios basados en la distribución binomial de

probabilidad. En la medida en que se aumenta la cantidad de expertos en un grupo aumentará la cantidad de estos con menos calificación y en la medida en que se disminuya, disminuye el nivel de confianza de los resultados.

La base de la metodología Delphi surge del reconocimiento de la superioridad del juicio de grupo sobre el juicio individual. Los juicios emitidos a nivel individual han demostrado ser ineficientes en la obtención de resultados, especialmente cuando se trata de resolver problemas complejos en condiciones de incertidumbre y con escasa información disponible.

El método Delphi difiere de las encuestas corrientes en que incluye varias rondas de cuestionarios o interacciones. Cada ronda puede verse influida por el resultado grupal de la anterior. Existe un proceso de interacción anónima que tiende a la convergencia en la opinión grupal resultante. Las respuestas son anónimas, lo cual evita que los participantes de más prestigio influyan excesivamente en las opiniones de los demás. Este anonimato se entiende en el sentido de que cada encuestado desconoce la forma en que contestan los demás. Cada miembro del grupo es considerado por igual. El anonimato facilita una mayor franqueza de opiniones y que el participante pueda modificar sus opiniones iniciales, sin verse influido por las opiniones de los expertos con más prestigio. Existe una interacción con retroacción controlada. La interacción entre los elementos del grupo se realiza mediante sucesivas iteraciones del cuestionario, comunicando la opinión de la mayoría. En sucesivos envíos el experto debe contestar reafirmando en su opinión o rectificándola. Los participantes lo son a nivel personal y no representan a las instituciones a las cuales están vinculados.

Las diferentes fases a seguir en el desarrollo del método son las siguientes (Hsu y Sandord, 2007):

Fase 1.- En la primera ronda, el proceso Delphi tradicionalmente empieza con un cuestionario relativamente abierto. Este sirve como margen de la información específica solicitada. Después de recibir

las respuestas de los expertos, los investigadores necesitan convertir la información recogida en un cuestionario bien estructurado. Este cuestionario es utilizado como el instrumento de partida para la segunda ronda de recogida de datos. Hay que indicar que sería aceptable aportar ya un cuestionario bien definido en la primera ronda si fuera posible aprovechando la experiencia y la bibliografía disponible.

Fase 2.- En esta ronda, cada experto recibe un segundo cuestionario y se le pide que revise los diferentes criterios indexados por los investigadores en función de la información recogida en la ronda anterior. Además se les pide que ordenen los criterios para establecer prioridades entre ellos. Como resultado de esta segunda ronda, es posible identificar las áreas de acuerdo y desacuerdo. En algunos casos, a los expertos se les pide las razones que justifican la priorización realizada entre los diferentes criterios.

Fase 3.- En la tercera ronda, cada experto recibe un cuestionario que incluye los criterios y la clasificación realizada por los investigadores en la ronda previa y se les pide que revisen sus juicios o especifiquen las razones por los que mantienen sus discrepancias con el consenso. Esta ronda da opción a los expertos una oportunidad de realizar nuevas aclaraciones de la información y sus juicios sobre la importancia relativa de los criterios. Sin embargo, solo se puede esperar un ligero incremento de consenso respecto a la fase anterior.

Fase 4.- En la cuarta y, a menudo, última ronda, la lista de criterios definitivos, su priorización, opiniones minoritarias y criterios con consenso se les envía a los especialistas. Esta ronda provee una oportunidad final para los expertos para revisar sus juicios. Debería recordarse que el número de iteraciones depende del grado de consenso conseguido entre los expertos y puede variar entre tres y cinco.

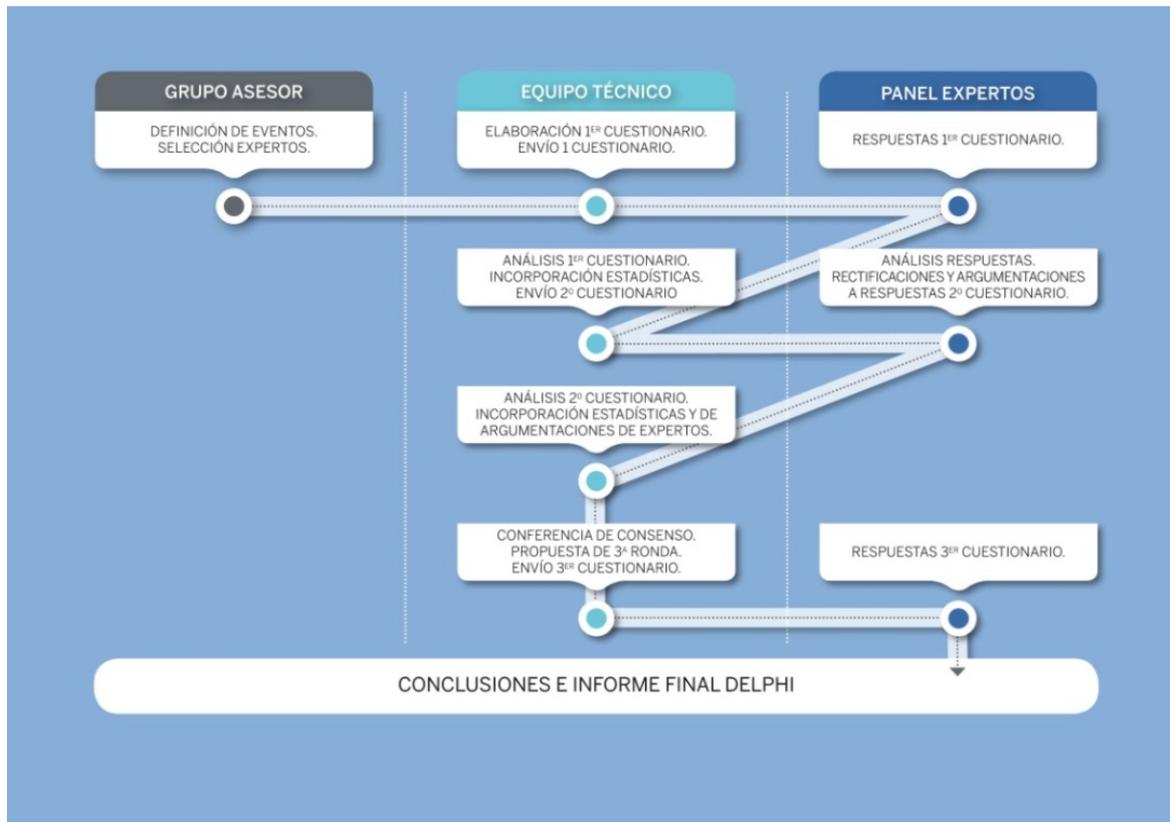


Fig. 46. Esquema de procedimiento del método Delphi  
(Fuente: [www.eoi.es](http://www.eoi.es))

Como se ha dicho, ningún experto conoce la identidad de los otros que componen el grupo de debate, lo que tiene aspectos positivos como son la no influencia del factor personalidad o autoridad del experto, se permite el cambio de opinión sin justificación a terceras personas, no se tiene miedo al ridículo puesto que no hay interacción grupal, que de existir esta interacción está controlada, así como la existencia de retroalimentación de la información, y a su vez se puede obtener información estadística de los cuestionarios.

Se les pide completar una serie de cuestionarios distribuidos en varias rondas, considerándose en general suficiente realizar dos rondas (Adams, 2001; Miller, 2006)

Los resultados obtenidos con esta metodología tienen las fortalezas y limitaciones propias de las técnicas cualitativas que los sustentan. Entre las primeras, la técnica Delphi se ha mostrado eficaz para generar una lista priorizada de factores. En cuanto a sus limitaciones, la forma de selección de los sujetos a estudio y el tamaño de la muestra introducen un cierto nivel de subjetividad grupal. A su vez los resultados, por su carácter de consenso, tienen un nivel de detalle no pormenorizado. A pesar de sus limitaciones, los resultados son cualitativamente valiosos, por haber sido facilitados por un grupo de profesionales especialmente conocedores del tema y del contexto real. Aunque la valoración de la validez y fiabilidad del instrumento de medida resulta difícil de establecer en estudios cualitativos, permite hacer aproximaciones bastante certeras.

## **3.2.- Método del Procedimiento de Análisis Jerárquico (AHP).**

### **3.2.1.- Descripción del método**

La sociedad y sus componentes deben tomar continuas decisiones, las cuales son más sencillas cuando se pueden apoyar en la ciencia, la cual basa sus conclusiones en datos empíricos comprobados que, en algunos casos se plasman en leyes físicas. Sin embargo, no siempre es posible abordar problemas que se puedan solucionar con el único apoyo de la ciencia. Por ejemplo, en el caso de asuntos de carácter social o en problemas con la suficiente complejidad para los que no se cuenta con datos numéricos, o en los que interactúan elementos tangibles e intangibles. En la mayor parte de los problemas sobre los que se debe decidir, intervienen muchas variables, que difícilmente son independientes entre sí. En estos casos, cuando actúa gran número de variables, que pueden producir muchos efectos, la mente humana no es capaz de abstraer todo ello valorando a la vez todas las variables. Por lo tanto, no hay seguridad de que la decisión sea la más adecuada ya que muchas

variables o no se tienen en cuenta o no se hace con la importancia que tiene.

Al final, para llegar a tomar una decisión se requiere ordenar los criterios de valoración priorizándolos, con objeto de lograr objetivos en el corto plazo que superen en importancia a los otros, alcanzando las soluciones óptimas respecto al bien del grupo. Sin embargo, la solución es subjetiva ya que cada uno fijará de forma subjetiva igualmente la gradación de criterios o prioridades. No es nada sencillo llegar a un acuerdo a la hora de priorizar los objetivos e, igualmente es complicado cuales de los problemas se pueden estudiar más profundamente para obtener mejor información que ayude a dilucidar si los cambios que se puedan producir en la evaluación de la situación pudieran influir más o menos en las opiniones y los juicios. Deberá abandonarse la toma de decisiones basada en criterios intuitivos, sobre todo cuando el problema se hace mucho más complejo, intentando llegar a valoraciones lo más objetivas posibles.

Sin embargo, para conseguirlo es necesario organizar los problemas de forma eficaz, de manera que se permita la interacción entre los factores que entren en juego pero evaluándolos de forma sencilla y más individualizada. Esto es lo que consigue el proceso analítico jerárquico AHP. El método proporciona un marco en el que se pueden tomar decisiones eficaces en problemas complejos, aprovechando nuestros procesos naturales en la toma de decisiones. El método descompone una situación no estructurada y compleja en sus partes, de forma que éstas pueden ser ordenadas en un orden jerárquico, asignando valores numéricos a juicios subjetivos en la comparación entre las variables. De esta forma es posible determinar qué variables tienen mayor prioridad, para que, actuando sobre estas, se pueda influir en el resultado de la situación.

El método AHP de análisis multicriterio es un método de decisión multicriterio discreto desarrollado por Thomas Saaty en los años 70 con el fin de gestionar la crisis de los misiles en la guerra fría entre

EEUU y la URSS. Además, ha servido para multitud de problemas de todo tipo, como por ejemplo, para predecir probabilidades de innovaciones técnicas, para predecir elecciones presidenciales en EEUU o para estimar la popularidad de grupos de rock. Actualmente se está utilizando en los procesos de toma de decisiones en escenarios más o menos complejos, donde interactúan criterios tangibles e intangibles. Es un método que puede ser usado para la selección de la mejor opción de entre otras muchas consideradas. Como todo procedimiento de apoyo a la toma de decisiones implica la elección de alternativas y criterios, y establecer prioridades entre ellos. En este método se han de organizar los elementos del problema desde el punto de vista jerárquico. Medir los intangibles es la principal preocupación de los procesos matemáticos del método AHP (Ozdemir y Saaty, 2006; Saaty, 2012b). La experiencia recogida en los últimos años con la metodología AHP en una amplia variedad de áreas de toma de decisiones demuestra que es adecuado para estructurar el conocimiento pertinente sobre el consenso de expertos en problemas multicriterio complejos (Lee y Chan, 2008; Syamsuddin, 2010; Hopfe, 2013).

El grupo de especialistas o expertos lleva a cabo juicios de comparación por parejas que se utilizan para elaborar las prioridades generales para la clasificación de las alternativas. Los expertos eligen los diferentes criterios a utilizar, que son los más importantes del problema y que abarcan aspectos intangibles o tangibles, tales como los medio ambientales y los culturales, así como los aspectos económicos, respectivamente (Martin-Utrillas et al, 2014). Todos ellos, con sus diferentes pesos, se analizan en relación con la solución posible a implementar. El AHP analiza la teoría de las medidas relativas traducidas a escalas absolutas capaces de operar con los criterios intangibles, todo ello basado en cuestionarios realizados a expertos según criterios de comparación por parejas. Posteriormente, veremos con detalle el proceso a seguir.

El proceso tiene su base en la capacidad del ser humano que puede observar, discriminar, establecer relaciones sobre lo observado,

realizar una síntesis y comunicar. Esta capacidad se refleja en tres fases que componen el método AHP:

Fase 1.- Fase de identidad y descomposición: Establece la estructura jerárquica del problema. Esta estructura jerárquica se compone de: i. Objetivo o meta, que ocupa el nivel superior y es adonde se quiere llegar; ii. Los criterios, que son evaluados y discriminados en función de su importancia para conseguir la meta; y iii. Las alternativas, que son las distintas soluciones para alcanzar la meta y que son evaluadas con respecto a cada criterio.

La jerarquía se construye de forma que cada elemento de un mismo nivel tengan el mismo orden de magnitud y puedan relacionarse con algunos o todos los elementos del nivel inferior. En general en la jerarquía típica, el objetivo se encuentra en el nivel superior; los elementos que afectan a la decisión se colocan en los niveles intermedios, por lo que en ellos se suelen situar los criterios; y los niveles más bajos se ocupan con las opciones de decisión o alternativas.

El objetivo, los criterios y las alternativas se representan gráficamente como nodos situados en el nivel correspondiente, y son los elementos del problema de decisión del AHP. Un ejemplo de representación se muestra en la Figura 47.

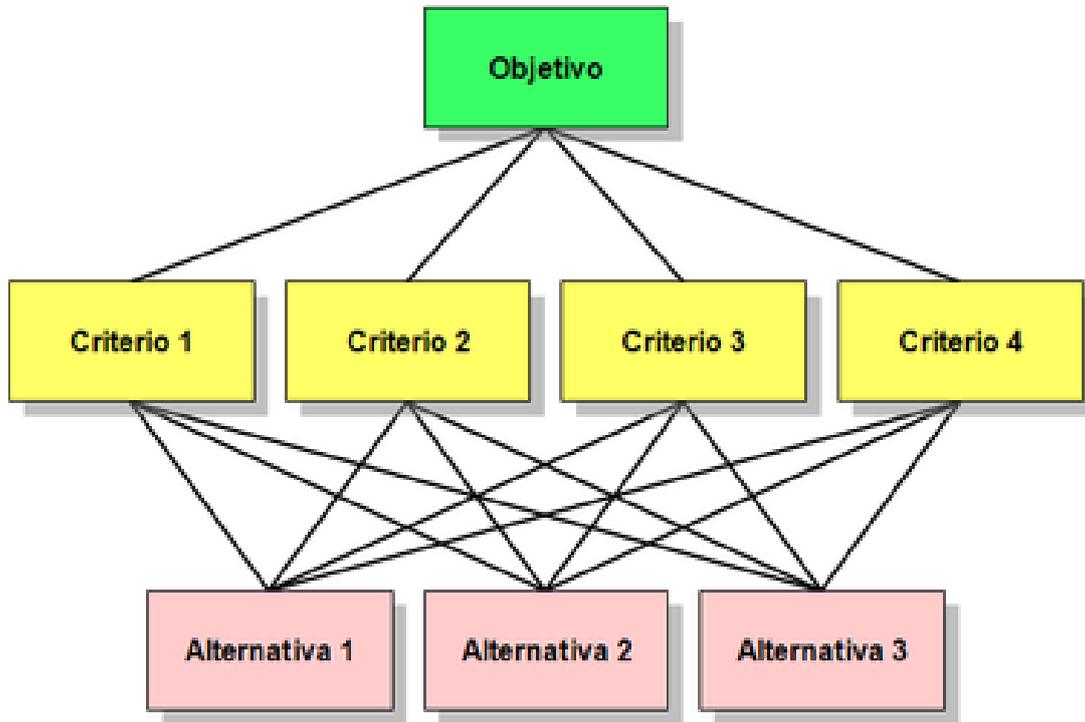


Fig. 47. Jerarquización del problema según el método AHP  
(Fuente: [www.decision-making-solutions.com](http://www.decision-making-solutions.com))

Las líneas indican lo siguiente:

- En el caso de las líneas que unen el objetivo con cada criterio significa que los criterios deben compararse por parejas, para verificar la importancia de cada criterio para alcanzar la meta.
- En el caso de las líneas que unen cada criterio con las diversas alternativas indican que las alternativas se deben comparar por parejas para determinar el orden de preferencia de estas alternativas para cumplir dicho criterio.

Hay que ocupar tiempo en crear una jerarquía adecuada. Esta debe ser completa, pero a la vez no debe ser redundante además de mínima (debe incluir solo aquellos aspectos relevantes). Su construcción requiere un consenso entre todas las partes implicadas en el proceso de decisión. Hay que dedicar esfuerzos en

identificar el problema real, lo cual puede ocurrir después de una serie de discusiones en las que se consideren muchas propuestas, se prioricen y se decida cuales se seleccionarán para su análisis. De hecho en nuestro caso, ese proceso se realiza en la fase de aplicación del método Delphi. En el apartado 3.1, donde se describen las fases a aplicar en el método, se solicita al panel de expertos que aporten opiniones sobre criterios y critiquen las propuestas de los cuestionarios en las primeras fases, lo que sirve para centrar tanto el objetivo como los criterios a adoptar.

Fase 2.- Fase de discriminación y juicios comparativos: Los mencionados elementos jerárquicos son comparados por parejas, emitiéndose los correspondientes juicios de valor o preferencias en cada uno de los niveles jerárquicos establecidos. El responsable de valorar tiene que emitir juicios de valor que definan la importancia relativa de los criterios o alternativas, de forma que se refleje así la mayor o menor importancia de cada elemento respecto al que se compara respecto al atributo del nivel superior que se toma como cualidad común. Saaty propone una escala, que se muestra en la Tabla 11, basada en estudios psicológicos, para establecer la valoración. Normalmente se utilizan los valores impares. Los valores 2, 4, 6, 8 suelen utilizarse para situaciones intermedias, y las cifras decimales en estudios de gran precisión.

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio
3	Levemente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen levemente a un elemento frente al otro
5	Notablemente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen notablemente a un elemento frente al otro
7	Fuertemente más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en la práctica
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	Cuando es necesario expresarlo.
Inversos de todos los valores anteriores	Si al comparar $i$ con $j$ se ha obtenido uno de los valores anteriores, al comparar $j$ con $i$ se le asigna el inverso	

*Tabla 11. Escala de valoración en método AHP según Saaty (Saaty, 2012a)*

Esta tabla permite aplicar el método AHP tanto si los factores son cuantitativos como cualitativos ya que el responsable de la decisión puede asignar un valor numérico en el caso de que los factores sean cualitativos sin más que aplicar esta tabla.

Incidimos en el hecho de que las comparaciones por parejas, en nuestro caso se han obtenido por medio de un panel de expertos que han sido objeto de la aplicación de un método Delphi. Estos expertos han valorado por parejas, cada uno de los criterios respecto al objetivo fijado, así como cada dos alternativas respecto a los criterios que se han incluido en el proceso.

Una vez se realiza este proceso se obtiene una matriz cuadrada denominada Matriz de comparaciones pareadas. En ellas, cada componente  $a_{ij}$ , representa la intensidad de preferencia del elemento  $i$  (criterio o alternativa), respecto al elemento  $j$ , con el que se compara.

Fase 3.- Fase de priorización y síntesis: Es una aproximación a la mejor solución mediante la combinación de cada nivel de jerarquía con la escala asignada. Las prioridades se obtienen para el segundo nivel (alternativas) multiplicando las prioridades locales de cada alternativa por la prioridad del criterio para el que se están valorando y adicionándolos por cada criterio, en un nivel acorde a los efectos. El propio Saaty (1998) definió la prioridad como rangos numéricos en una escala de razón. Una escala de razón es un conjunto de números positivos cuyas relaciones se mantienen igual si se multiplican todos los números por un número arbitrario positivo. El objeto de la evaluación es emitir juicios concernientes a la importancia relativa de los elementos de la jerarquía para crear escalas de prioridad de influencia.

Respecto a las formas de medición de los valores para aplicar el método AHP, podemos diferenciar tres tipos:

- Medición relativa: En ella se asigna una evaluación de preferencia a cada par de elementos con respecto a una propiedad que tienen en común; es decir, se comparan pares de elementos que se encuentran en un nivel de jerarquía con respecto a los elementos con los que se relacionan en el nivel anterior.
- Medición absoluta: Las prioridades de cada elemento (alternativa o criterio) son comparadas frente a un estándar (o propiedad ideal)

- Medición benchmark. En lugar de intensidades, se compara cada alternativa con respecto a alternativas bien conocidas llamadas benchmarks (puntos de referencia) que son diferentes y van desde lo mejor a lo peor para cada criterio.

En nuestro caso, como veremos en el apartado 4, hemos utilizado la primera de las opciones de medición. Por ejemplo, se comparan pares de alternativas entre sí con respecto a cada uno de los criterios de evaluación fijados. Además, reiteramos que la obtención de estas mediciones se obtienen a través de un panel de expertos que forman parte de un sistema Delphi de obtención de estas mediciones, como indicamos en el apartado 3.1 anterior.

Por otro lado, ya dijimos que Saaty (1998) basándose en los antecedentes de teorías sobre la medida de Lebesgue construyó su Escala Fundamental, que se mostró en la Tabla 11, en la que plantea que en la utilización de juicios para estimar el elemento dominante al realizar la comparación entre dos elementos, en especial si es intangible, en vez de utilizar dos números de una escala es preferible utilizar su cociente.

El método AHP dispone las alternativas según la escala que posibilita ordenar recursos y escoger. La mencionada escala se usa para responder cuestiones básicas por parejas. Tiene esta escala las características:

- 1.- Distintas percepciones de las personas cuando se realizan las comparaciones.
- 2.- Considerando la escala de valores  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , entonces  $x_{i+1} - x_i = 1$  para  $i=1, \dots, n-1$ , el panelista experto puede elegir todos los valores simultáneamente. Para que exista más consistencia, una persona no debe comparar a la vez aproximadamente más de siete entes u objetos, se tiene  $n= 7 +2$ . Este principio fue fijado por el psicólogo George Miller en 1950 y luego fue incorporado al método AHP. Usando el

intervalo de la unidad entre los elementos de la escala, y adoptando el valor  $x=1$  en la comparación identitaria, se tiene que los valores escalares tienen un rango de 1 a 9. AHP permite cierta inconsistencia que está unida al trabajo con conceptos intangibles. Entonces surge la necesidad de la redundancia que mejora la verosimilitud del valor. No se permite inconsistencias superiores al 10%.

En los juicios numéricos se tolera adoptar aproximaciones. Actualmente se usa la raíz de la desviación media y la media absoluta de la desviación. Estos parámetros se usan en comparar escalas o comparar escalas interindividuales en juicios. No son útiles en medidas absolutas de la calidad del ajuste. El psicólogo Weber, en 1946 establece que el cambio de sensación se percibe cuando el estímulo es incrementado en un porcentaje constante del propio estímulo. Estas investigaciones fueron corregidas por Gustav Fechner (1966), el cual comprobó que para una secuencia creciente de estímulos que cumplieran la ley de Weber, para un valor del estímulo, la respuesta permanecía estable hasta que el valor del estímulo era incrementado suficientemente en relación al valor del estímulo. Fechner construyó una escala, que se utiliza mucho en Psicología. Se considera que la escala Saaty se deriva de la función logarítmica de respuesta psicofísica de Weber-Fechner que establece una relación cuantitativa entre la magnitud de un estímulo físico y cómo este es percibido, o bien puede expresarse como que si un estímulo crece en progresión geométrica, la percepción evolucionará en progresión aritmética.

### **3.2.2.- Desarrollo matemático del método**

Como hemos indicado, el método se basa en la comparación por pares de los elementos del mismo nivel respecto a algún atributo del nivel inmediatamente anterior.

De esta comparación se definirá una matriz cuadrada de rango  $n$ , siendo  $n$ , el número de elementos del mismo nivel analizados. Los componentes de esta matriz, que llamaremos  $A$ , son  $a_{ij}$ , que se definen como:

$a_{ij}$ : el número de veces que es más importante el elemento  $i$  que el elemento  $j$ , comparándolos ambos para cumplir el atributo común del nivel inmediatamente anterior.

En este caso se cumple:

- $a_{ii} = 1$
- Lo mismo ocurre para cualquier  $a_{ii}$  para el que el valorador considere que tiene igual importancia el elemento  $i$  que el elemento  $j$ .
- Si  $a_{ij} = w$ , entonces  $a_{ji} = 1/w$ . Esto es claro. Si el elemento  $i$  tiene una importancia 3 veces mayor que el  $j$  para un atributo analizado, la importancia de  $j$  es 3 veces menor que la de  $i$ . En este caso tendríamos  $a_{ij} = 3$  y  $a_{ji} = 1/3$

Por tanto, los diferentes valores se estructurarán en una matriz, denominada Matriz de comparación. Esta es una matriz cuya diagonal, como hemos indicado anteriormente estará compuesta por números 1, ya que la comparación de un elemento evaluado consigo mismo no puede sino responder a la opción “Las dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo” de la escala de Saaty vista.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & 1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Seguidamente, vamos comparando el elemento  $i$ , componente de cada fila, con cada uno de los demás elementos de forma

individualizada, desde el 1 hasta el elemento n. De esta forma, si el responsable de la evaluación considera que el criterio i tiene una fuerte importancia en el atributo que estamos analizando, respecto a la importancia que tiene el criterio j, colocaremos el valor 5 en la casilla  $a_{ij}$ . Por el contrario, en la casilla  $a_{ji}$  colocaremos su inverso, es decir  $1/5$ , por la razón que hemos explicado anteriormente.

Con todos los valores obtenidos, podremos crear la matriz A, cuya forma será la siguiente:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Resulta evidente que el responsable de la evaluación de los elementos solo necesita realizar la comparación de los  $a_{ij}$  que se encuentran por encima de la diagonal, porque los otros no son más que el valor inverso correspondiente, o bien tienen el valor “1” en la diagonal. Como se puede apreciar en las tablas de valoración de criterios de los expertos que se incluyen en el punto 4 siguiente, así se ha hecho, y se ha valorado cada criterio con los siguientes, según el orden establecido de valoración. El criterio n° 1 se evalúa por pares con los criterios n° 2, 3, 4... n. Mientras que el criterio n° 3 se evalúa con los criterios n° 4, 5,..., n. Pero no con el n° 1 ni el n° 2.

Una vez conocidos estos valores que cuantifican los juicios de mayor importancia entre pares de elementos, es posible asignar un conjunto de pesos numéricos  $w_1, w_2, \dots, w_n$  a los diferentes elementos, que pueden reflejar los valores  $a_{ij}$  de los juicios reflejados. De esta forma, el valor  $a_{ij}$  se puede expresar como:

$$a_{ij} = w_i/w_j \quad (4)$$

Es decir  $a_{ij}$  refleja el número de veces que es más importante el elemento  $i$  que el  $j$ , haciendo una división entre los pesos de cada uno. Por tanto, podríamos expresar la matriz  $A$  como:

$$A = \begin{pmatrix} w1/w1 & w1/w2 & \dots & w1/wn \\ w2/w1 & w2/w2 & \dots & w2/wn \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ wn/w1 & wn/w2 & \dots & wn/wn \end{pmatrix} \quad (5)$$

Si tomamos la primera fila y multiplicamos el primer elemento por  $w_1$ , el segundo por  $w_2$  y así sucesivamente, obtenemos:

$$w_1 * w_1/w_1 + w_2 * w_1/w_2 + \dots + w_n * w_1/w_n = n * w_1. \quad (6)$$

Por tanto, se cumple que:

$$w_1 * n = \sum_1^n (a_{1j} * w_j) \quad (7)$$

$$w_1 = \frac{1}{n} * \sum_1^n (a_{1j} * w_j) \quad (8)$$

Haciendo lo mismo para todas las filas, obtenemos la siguiente expresión:

$$w_i = \frac{1}{n} * \sum_1^n (a_{ij} * w_j) \text{ para } i=1,2,3,\dots,n \quad (9)$$

Matricialmente, esta expresión se puede expresar de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} w1/w1 & w1/w2 & \dots & w1/wn \\ w2/w1 & w2/w2 & \dots & w2/wn \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ wn/w1 & wn/w2 & \dots & wn/wn \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} w1 \\ w2 \\ \vdots \\ wn \end{pmatrix} = n * \begin{pmatrix} w1 \\ w2 \\ \vdots \\ wn \end{pmatrix} \quad (10)$$

Llamando  $W$  a la matriz  $n \times 1$  de los pesos, se puede expresar como:

$$A * W = n * W \quad (11)$$

El objetivo sería encontrar los valores de los pesos  $w$  de cada elemento que estamos analizando. Para ello utilizaremos los fundamentos matemáticos de autovectores y autovalores de una matriz.

Se define autovector  $X$  de una matriz cuadrada  $M$  de dimensiones  $n \times n$  a un vector distinto de cero, tal que  $M * X = \lambda * X$ , para algun  $\lambda \in \mathbb{R}$ . A  $\lambda$  se le conoce como autovalor asociado a la matriz  $M$ .

Se denomina espacio propio de la matriz  $M$  al conjunto de autovalores  $\lambda$ ,  $V(\lambda)$ , tales que son solución de la ecuación matricial:

$$M * X = \lambda * X \quad (12)$$

El objetivo que estamos buscando es encontrar los autovalores ( $\lambda$ ) y los autovectores  $W$ , que resuelvan la ecuación anterior, para la matriz  $A$ . Para resolverlo, podemos despejar en la ecuación que estamos manejando, y obtenemos:

$$A * W = \lambda * W \quad (13)$$

$$(A - \lambda I) * W = 0 \quad (14)$$

Esta ecuación matricial corresponde a un sistema homogéneo de ecuaciones lineales. Como por definición debe ocurrir que  $W \neq 0$ , para que esta ecuación tenga más solución que la trivial, se debe cumplir que:

$$\text{Det}(A - \lambda I) = 0 \quad (15)$$

Desarrollando esta ecuación obtendremos lo que denominamos polinomio característico. Para la matriz  $A$ , su valor es:

$$P_A(\lambda) = \det(A - \lambda I) \quad (16)$$

Los valores de  $\lambda$  que son raíces de este polinomio serán los autovalores de la matriz A. A partir de ellos podremos determinar los autovectores asociados a cada valor de  $\lambda$ .

Volviendo a la construcción de la matriz A, esta está formada por los elementos  $a_{ij}$ , que nos indican cuanto de más importante es el elemento i respecto al elemento j respecto a un atributo común. Si estos valores fueran coherentes debería haber una relación exacta entre estos valores. Por ejemplo, si el elemento de la matriz  $a_{12}$  vale 3, significa que el criterio 1 es tres veces más importante que el 2 para el atributo común que se está analizando. Si el elemento  $a_{23}$  valiese 2, debería cumplirse que el  $a_{13}$  tuviese un valor de 6, ya que el criterio 1 es tres veces mejor que el 2 y este es dos veces mejor que el 3. Por tanto, el criterio 1 sería 6 veces mejor que el 3. A esto le denominamos consistencia de los juicios emitidos. Si se diese consistencia perfecta entre los criterios, el autovalor de la ecuación sería n, es decir, el número de criterios analizados (Martin-Utrillas et al, 2105a).

Sin embargo, hemos de recordar que esto no tiene porque ser así, y los valores de  $a_{ij}$  varían respecto a los que tendrían consistencia perfecta. En efecto, estos valores se obtienen a partir de los juicios subjetivos del responsable de la valoración de estos criterios, dos a dos, respecto al atributo analizado. En nuestro caso, mediante un método Delphi aplicado a un panel de expertos que han fijado estos valores de los elementos  $a_{ij}$ . Por tanto, deberemos conocer como de consistentes son los valores  $a_{ij}$  con los que estamos trabajando.

Para ello se define el índice de consistencia (CI), que se calcula de la siguiente manera:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (17)$$

Siendo  $\lambda_{\max}$ , el mayor de los autovalores de la ecuación. Este valor se utiliza para mejorar la consistencia de estos juicios. Para ello se compara con el valor que corresponda del índice de consistencia

aleatorio (RI), cuyo valor es función de la dimensión de la matriz A. Este valor se obtiene de la escala de Saaty:

Tamaño de la matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio RI	0	0,53	0,88	1,12	1,25	1,34	1,40	1,45	1,49

*Tabla 12. Valores del RI según tamaño de matriz  
(Fuente: Saaty, 2012a)*

Algunos autores sugieren la siguiente estimación para el índice RI:

$$RI = \frac{1.98*(n-2)}{n} \quad (18)$$

A partir de los dos índice anteriores se calcula el Ratio de Consistencia (CR), como el cociente entre ellos:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (19)$$

Cuando el valor de CR es menor que 0.10, podremos decir que la matriz A de cuantificación de juicios es consistente y se acepta el vector de pesos obtenido. Para matrices de orden pequeño, menor de 5, se adoptan valores aceptables del ratio de consistencia CR de 0.05 para el orden de la matriz (n) igual a tres y 0.09 para n=4.

En la aplicación del método se debe conseguir matrices coherentes en todos los casos (tanto en la comparación de los criterios respecto al objetivo, como en la comparación de las distintas alternativas respecto a cada criterio). Por tanto, en el caso de que no sea así, los juicios deben ser revisados por los expertos, e incluso mejorados. Todos los pasos se realizan para todos los niveles de la jerarquía. Una vez calculado el valor de la consistencia, se debe comprobar que es menor que el máximo admitido que se explicaba antes para que la matriz expuesta pueda usarse en fases posteriores.

Una vez aplicado este método dispondremos de un autovector que nos dará el peso relativo de cada elemento analizado respecto a cumplir con el objetivo que representa el atributo común. En nuestro caso aplicaremos el método AHP para priorizar los distintos criterios respecto al objetivo final de la decisión, como para la priorización de las diferentes soluciones respecto a cada uno de los criterios.

Agregando los pesos de las alternativas respecto a cada criterio con los pesos de cada criterio, se podría determinar la alternativa más adecuada para alcanzar el objetivo. Sin embargo, para realizar este último paso, utilizaremos el método VIKOR, que pasamos a describir en el apartado siguiente.

### **3.3.- La técnica VIKOR.**

Una vez finalizada la fase de evaluación de alternativas, que se realiza mediante el método AHP, pasamos a la siguiente fase en la que se procede a la selección de la alternativa que presente un mejor comportamiento desde el punto de vista de los criterios adoptados.

Como dijimos en la introducción del apartado 3, de los tres grupos de métodos multicriterio, para nuestro caso parecían más adecuados a la hora de la clasificación de las alternativas los modelos de nivel de preferencia por su facilidad de manejo frente a problemas complejos, flexibilidad, transparencia e interactividad con los decisores, lo que lo hace muy interesante a la hora de tomar decisiones. De ellos, la técnica VIKOR añade el concepto de estabilidad cuando se ordenan las soluciones compromiso. Esto aporta una robustez muy interesante en la toma de decisiones. Además el VIKOR es muy fácilmente compatible con el método AHP, lo cual permite utilizar ambos, aprovechando las fortalezas de cada uno de ellos, aportando más consistencia en los resultados que se obtienen.

La técnica VIKOR encuentra una solución de compromiso en los problemas de decisión con criterios contradictorios y no conmensurables que es el más cercano al ideal (Sayadi et al, 2009). Las alternativas son evaluadas de acuerdo con todos los criterios establecidos. Y la solución de compromiso alcanzado proporciona una utilidad máxima de la mayoría, y una cesión mínima individual del oponente. Vamos a ir explicando más exhaustivamente esta técnica de forma que se comprenda mejor lo indicado respecto de ella.

Geométricamente, la solución de compromiso definida por Po-Lung Yu y por Milan Zeleny en 1973 es una solución que se encuentra más cerca al punto ideal (Sakawa et al, 2013). Como sabemos, los problemas prácticos complejos se caracterizan por verse afectados de varios criterios no mesurables y conflictivos entre ellos. De esta forma, no existe una solución que pueda satisfacer todos los criterios de forma simultánea. Por ello, la solución se compone de un conjunto de soluciones posibles o de una solución de compromiso de acuerdo con las preferencias del responsable que toma las decisiones. La solución de compromiso es una solución viable, que es la más cercana al ideal, como hemos indicado anteriormente. Compromiso significa llegar a un acuerdo entre concesiones mutuas.

Aprovechando este concepto de solución de compromiso, Serafin Opricovic (1979) desarrollo las ideas básicas del método VIKOR. Su nombre se define en 1990 y proviene de la traducción desde el serbio de “Optimización Multicriterio y Solución de Compromiso”, es decir; en Serbio: “VišeKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje”.

Este método forma parte de los modelos de nivel de preferencia. Como tal método multicriterio sirve para resolver problemas en los que entran en juego criterios contradictorios o criterios con diferentes unidades. Como los demás métodos de nivel de preferencia, se acepta que el compromiso, como lo definimos anteriormente, es una solución aceptable para resolver el conflicto

entre los criterios (Liou et al, 2011, Martin-Utrillas et al, 2015b). El objetivo del responsable de las decisiones es encontrar la solución que esté lo más cercana posible a la solución ideal. Las diferentes alternativas se evalúan de acuerdo a todos los criterios fijados. Este método VIKOR se centra en clasificar y seleccionar una serie de alternativas y determinar la solución de compromiso que es la más cercana a la ideal; todo ello con la intención de ayudar al responsable a alcanzar una solución final.

La medida multicriterio para la clasificación de compromiso se desarrolla desde la  $L_p$ -metric, utilizada como función de agregación en el método.

Las  $m$  alternativas se evalúan de acuerdo con la función de cada uno de los  $n$  criterios. La clasificación de compromiso se construye comparando la medida de la cercanía a la alternativa ideal. Nombraremos las alternativas como  $A_1, A_2, \dots, A_m$ . Para la alternativa  $A_i$ , el valor de la función del criterio  $j$  se nombra como  $f_{ij}$ , esto es,  $f_{ij}$  es el valor de la función del criterio  $j$  para la alternativa  $A_i$ . Los elementos  $f_{ij}$  forman la matriz denominada de rendimiento o decisión.

La función  $L_p$  métrica que se utiliza para empezar el cálculo y desarrollo del método VIKOR es la siguiente:

$$L_p i = \left\{ \sum_1^n [(f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)]^p \right\}^{\frac{1}{p}} \quad (20)$$

Siendo:  $1 \leq p \leq \infty$ ;

$$i = 1, 2, \dots, m$$

Como veremos, en nuestro caso, el número de alternativas es 6 y el número de criterios es de 7. Por tanto,  $m=7$  y  $n=6$ .

Vamos a describir el algoritmo de la clasificación de compromiso del método VIKOR. Los pasos a seguir son los siguientes:

a.- Se determina los valores mejor,  $f_j^*$  y peor,  $f_j^-$ , de las funciones de cada criterio para todas las alternativas. Con esto se obtienen estos dos valores para cada uno de los criterios. Por tanto  $j= 1,2,\dots, n$ . Si la función  $j$  representa un beneficio, entonces:

$$f_j^* = \max f_{ij} \text{ para } i=1,2,\dots,m \quad (21)$$

$$f_j^- = \min f_{ij} \text{ para } i=1,2,\dots,m \quad (22)$$

b.- Se calculan los valores de  $S_i$  y de  $R_i$ , para  $i=1,2,\dots, m$  por medio de las relaciones siguientes:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j (f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-) \quad (23)$$

$$R_i = \max (w_j (f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)), \forall j = 1,2, \dots, m \quad (24)$$

Donde  $w_j$  son los pesos de los criterios, expresando su importancia relativa.

El valor  $S_i$  equivale al valor de la  $L_p$  métrica,  $L_{1,i}$ . Por el contrario, el valor  $R_i$  se corresponde con el valor de la  $L_p$  métrica,  $L_{\infty,i}$ . Estos valores  $L_{1,i}$  y  $L_{\infty,i}$ , se utilizan para formular la medida de clasificación.

La alternativa que obtenga el mínimo valor de  $S_i$  es la que presenta el consenso máximo del grupo (regla de la mayoría). Por el otro lado, aquella alternativa que obtenga el valor mínimo de  $R_i$ , es aquella que obtiene el mínimo rechazo individual del oponente.

c.- Se computan los valores de la lista  $Q_i$ ; para  $i=1,2,\dots, m$  por medio de la relación siguiente:

$$Q_i = v * (S_i - S^*) / (S^- - S^*) + (1 - v) * (R_i - R^*) / (R^- - R^*) \quad (25)$$

Siendo:  $S^* = \min S_i$   
 $S^- = \max S_i$   
 $R^* = \min R_i$   
 $R^- = \max R_i$   
 $v =$  Estrategia asociada a la máxima utilidad del grupo  
 $1-v =$  Peso del mínimo rechazo individual de los oponentes.

El peso de la estrategia “v” toma los valores en el rango entre 0 y 1. Un valor de  $v=0.50$  implica una estrategia de consenso entre ambas posturas; si  $v>0.50$  la mayoría decide; por el contrario si  $v<0.50$  la minoría decide (veto). Los resultados de  $S_i$ ,  $R_i$  y  $Q_i$  son tres listas de clasificación (o ranking) ordenados en forma decreciente.

d.- Se propone como solución de compromiso a la alternativa  $A_i$ , la cual esté mejor posicionada en el ranking de la métrica Q (la denominaremos  $A^{[1]}$  y será la de menor valor de la variable Q), solamente si se cumplen las siguientes condiciones:

Condición 1.- Ventaja aceptable:

$$Q(A^{[2]})-Q(A^{[1]}) \geq DQ \quad (26)$$

$$DQ = 1 \times (M-1)^{-1} \quad (27)$$

Donde:  $A^{[2]}$  = Es la segunda mejor solución de compromiso (alternativa ) del ranking Q

$DQ$  = Relación de comparación que depende del número de alternativas

$M$  = Número de alternativas

Condición 2.- Estabilidad aceptable en la toma de decisiones

La alternativa  $A^{[1]}$  debería ser también la alternativa mejor posicionada en el ranking de la métrica S (de satisfacción) y/o R (métrica de rechazo). Es decir, la que alcance valores menores de ambas variables. En caso de que no ocurra, debe proponerse un grupo de soluciones de compromiso si una de las condiciones no se satisface (Martin-Utrillas et al, 2015b).

Para ello se pueden dar las siguientes posibilidades:

- Si la condición 2 no se satisface, entonces la  $A^{[1]}$  y la  $A^{[2]}$  serán las mejores soluciones.
- Si la condición 1 no se satisface, entonces las mejores soluciones serán  $A^{[1]}$ ,  $A^{[2]}$ , ...,  $A^{[M]}$ , donde  $A^{[M]}$  se determina por la relación siguiente:

$$Q(A^{[M]}) - Q(A^{[1]}) \leq DQ \quad (28)$$

para el máximo valor de M.

Se dice que la posición de estas alternativas es de cercanía.

La solución de compromiso obtenido podrá ser aceptada por el responsable de las decisiones, ya que esta proporciona una utilidad máxima de la mayoría (representado por  $\min S$ ), y un rechazo mínimo individual del resto del grupo (representado por  $\min R$ ). Las medidas S y R están integrados en Q para una solución de compromiso, la base de un acuerdo establecido por concesiones mutuas.

## **CAPÍTULO 4.- APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA EN ACTUACIONES SOBRE RÍOS**

---

## **4.- APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA EN ACTUACIONES SOBRE RÍOS.**

### **4.1.- Selección de Proyecto de Rehabilitación del río Huécar.**

El río Huécar forma parte de la cuenca del río Júcar, siendo un afluente del mismo. Ambos cruzan la ciudad de Cuenca y entre los dos bordean el casco histórico de Cuenca, declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO (1995), tanto sus Hoces fluviales como la Ciudad de Cuenca. En particular, el río Júcar bordea por el norte, mientras que el río Huécar ha quedado totalmente integrado en medio del casco urbano, formando la llamada Hoz del río Huécar y desembocando en el Júcar dentro de la misma ciudad.

La Convención del Patrimonio Mundial de la UNESCO califica los diferentes entornos para la inscripción en la Lista del Patrimonio Mundial (WHL) sobre la base de seis criterios culturales y cuatro naturales (UNESCO, 1995). Para ser incluido en la WHL, los sitios deben ser de valor universal excepcional y cumplir con al menos uno de los diez criterios de selección (UNESCO, 2006). En nuestro caso, la histórica ciudad amurallada de Cuenca y el río Huécar se clasificó para inscripción en la WHL sobre la base de criterios iii, iv y v. Estos criterios se centran en que ostenta una singularidad única o al menos un excepcional testimonio de una tradicional cultura; siendo un ejemplo sobresaliente de edificio, arquitectónico o de paisaje que ilustre una etapa significativa en la historia de la humanidad; y ser un ejemplo excepcional de asentamiento humano, uso de la tierra tradicional que sea representativo de una cultura o de la interacción humana con el medio ambiente, especialmente cuando se ha vuelto vulnerable por los efectos del cambio irreversible. Un factor clave para lograr estos criterios ha sido la integración entre la fortaleza medieval ciudad alta y el río Huécar y su paisaje circundante. Además, la naturalización del río recibe hoy más atención debido a la creciente conciencia pública sobre la

degradación del medio ambiente. Por lo tanto, los criterios que intervienen en el desarrollo de este proyecto deben incluir factores ambientales, paisajísticos, arquitectónicos, sociales, culturales y urbanos. El proyecto de rehabilitación es pues complejo requiriendo un panel multidisciplinar de expertos con una metodología sistémica que sirva de apoyo a la decisión (Kelly et all, 2013).

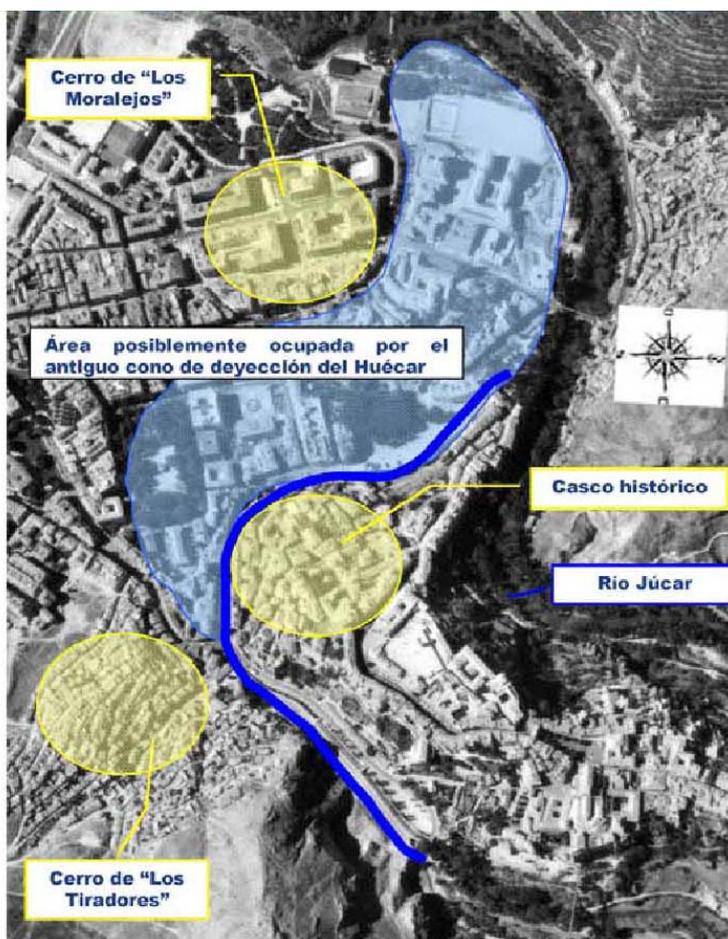
Con el fin de mejorar el estado del río Huécar se plantea un proyecto de rehabilitación en el entorno físico citado. Para incrementar la integración ambiental del río en el entorno de esta ciudad histórica se ha de buscar la sinergia entre el paisaje de la ciudad, sus edificios y murallas medievales, las gargantas rocosas del río Huécar, su medio ambiente y su patrimonio natural mejorando también los aspectos naturales, para sentar las bases que posibiliten mediante otras actuaciones futuras.



*Fig. 48. Río Huécar (cauce inferior) en su confluencia con el río Júcar (cauce superior) y el casco urbano antiguo de Cuenca (entre ambos cauces).*

El peso histórico del entorno es muy elevado, en todas las épocas datadas, especialmente en el Medievo, este río era parte del recinto que rodeaba las murallas de la ciudad, y en la época de los Austrias (S.XVI) sirvió de coso o recinto inundado para las corridas de toros (Muñoz, 2012). Asimismo, la toma de la ciudad por parte de Alfonso VIII, se consumó desde la denominada puerta de Valencia junto al río Huécar, al comienzo del tramo urbano, justo donde termina la Hoz del mencionado río, que da paso al antiguo cono de deyección y su consiguiente desembocadura en el río Júcar.

El río tuvo una función fundamental de defensa de la ciudad. Sin embargo, debido al proceso de desarrollo del casco urbano, en el último siglo aparecieron problemas de inundaciones.



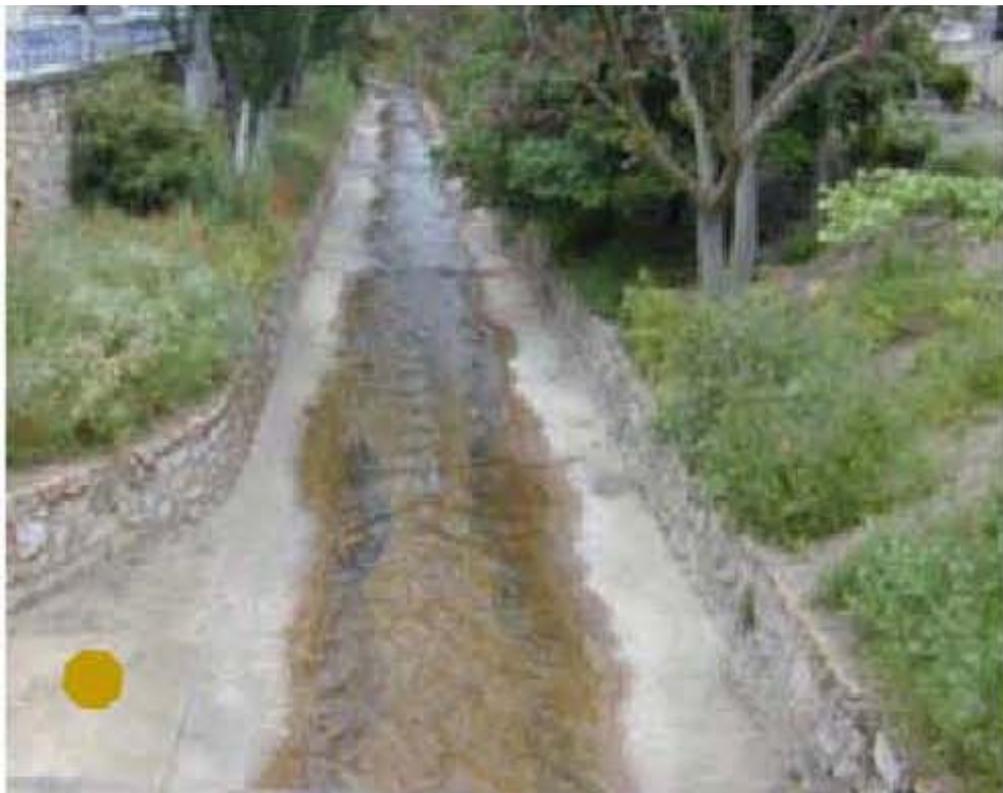
*Fig. 49. Vista esquemática del cono de deyección del río Huécar (susceptible de inundación) antes de la desembocadura en el Júcar.*



*Fig. 50. Algunos períodos de inundaciones en el casco urbano de Cuenca durante el pasado siglo.*

*(Fuente: Fernández, 2012)*

A finales del S.XX, se canaliza el río en su tramo urbano, por lo que este acentúa su aspecto desagradable durante los períodos de bajo nivel de agua, cuando el caudal del río desaparece.



*Fig. 51. Río Huécar antes de la actuación. Canalización dura y con escasez o ausencia de lámina de agua.*



*Fig. 52. Vista del río Huécar antes de la actuación por la calle de Los Tintes. Su aspecto es el de un canal más que de un río.*

Por tanto, los objetivos primarios que se plantean en esta actuación de rehabilitación sobre el río Huécar en su paso por Cuenca consisten en conseguir su acondicionamiento, asegurando la defensa frente a avenidas (aspecto hidráulico de la sección a adoptar) del entorno del río, además de mejorar el ecosistema fluvial en lo que sea posible (mantenimiento de lámina de agua que posibilite la vida del ecosistema, formación de remansos y pozas,

creación de vegetación en márgenes, etc.), y devolver el funcionamiento de este ecosistemas del río a un estado más natural, o equivalente a su pre-deterioro. Para conseguir esto último es necesario asegurar un flujo continuo de agua (Lavandier et al, 2006; Radsten-Ekman et al, 2013), con el fin de alcanzar un buen estado ecológico de las masas de agua (Luderitz et al, 2011).

Ante las posibles soluciones posibles a adoptar para la sección transversal de la actuación se aplica el método multicriterio descrito en el punto 3 de esta tesis, que nos permita llegar a la solución de compromiso adecuada a partir de los criterios fijados. Con la aplicación de esta metodología, se analizan las diferentes soluciones posibles de sección transversal del río con flujo continuo de agua y entre ellas se elige la óptima, teniendo en cuenta las condiciones de contorno. Seguidamente vamos a mostrar la aplicación práctica de la metodología propuesta a este caso particular, así como los resultados obtenidos, los cuales se plasman finalmente en la actuación concreta sobre el río.

#### **4.2.- Protocolo de toma de decisiones y selección de criterios y secciones transversales tipo del río.**

El modelo AHP-Delphi, superando la falta de datos concretos y el uso de criterios intangibles, se aplicará para elegir un conjunto de alternativas. La integración de la AHP con un proceso Delphi ofrece al panel de expertos multidisciplinar un enfoque sistemático para evaluar mediante análisis multicriterio las múltiples alternativas que precisan juicios que involucran características intangibles. El análisis multicriterio AHP se puede utilizar para la selección de la mejor de las muchas opciones consideradas (Saaty, 2012a).

Para buscar una solución, es necesario tener en cuenta una serie de criterios que se ajusten al problema y evaluar las diferentes opciones o alternativas. A menudo sucede que se consideran los

criterios para representar los objetivos que son a veces hasta contradictorios. Por ejemplo, puede ser que la solución más barata no sea la más fiable. Por lo tanto, la selección final es siempre un compromiso basado en los pesos relativos asignados a los criterios individuales (Canto-Perello et al, 2015). Nosotros tratamos de cuantificar las prioridades relativas para un determinado conjunto de alternativas, usando una escala de valoraciones, en base a la opinión de cada experto, o la persona que toma las decisiones, haciendo hincapié en la importancia de los juicios intuitivos hechos en un proceso de toma de decisiones y en la coherencia de respuestas en la comparación de alternativas. La fuerza de este enfoque es que organiza los factores tangibles e intangibles de una manera sistemática, y proporciona una solución estructurada todavía relativamente simple a los problemas de toma de decisiones. A través de este proceso, un gran problema se descompone en múltiples pares simples de temas, de manera que se va desde abajo en pasos graduales; siendo capaces de dar prioridad a todas las propuestas de solución al problema.

El método Delphi se basa en las opiniones de expertos sobre el problema de fondo y proporciona resultados agregados. Este método tiene como objetivo reunir por una parte las opiniones de los expertos sobre un tema en particular, y por otro lado, tiene la intención de que cada uno de estos expertos reaccione a las opiniones de otros colegas. En la primera fase de Delphi, las alternativas y los criterios son explorados y discutidos entre los expertos. Para lograr este objetivo, un primer cuestionario anónimo fue enviado en dos fases, la segunda fase ajustada a los resultados obtenidos a partir de la primera. No se pretende que los expertos se enfrenten entre sí, pero se trata de estudiar la convergencia de puntos de vista sobre la cuestión planteada. El cuestionario y los expertos difieren por sector. El aspecto participativo no está incluido en este método sobre todo porque se trata de identificar las convergencias de opinión entre los expertos, sobre todo evitando cualquier posible fuente de discordia o conflicto.

Se eliminan criterios y alternativas que se estiman de poca importancia. Una adecuada selección de criterios es un factor clave para este procedimiento como se discutirá más adelante. Para entender el proceso, se sigue una breve descripción de este tipo de acciones y criterios seleccionados.

Se van a utilizar diferentes criterios en función de las estrategias planteadas y del objetivo del análisis. Por lo tanto, se considera que una persona es experta si además de conocimiento de un tema tiene experiencia en dicho tema. Como el proyecto tiene aspectos multidisciplinarios es necesario abordarlo por un conjunto de expertos en diferentes campos. También cada experto debe poseer un conocimiento suficiente de los demás aspectos involucrados en el problema, en particular, sobre la interrelación de su tema con los demás, pues ayuda a reforzar los efectos sinérgicos dentro del mismo proyecto (Curiel-Esparza et al, 2014). En este trabajo, como se ha dicho, se considera la ayuda de expertos en las siguientes disciplinas: paisaje, hidráulica y medio ambiente.

De acuerdo con el proceso de Delphi, el primer cuestionario, que se envía al panel de expertos, se utilizará para elegir criterios principales y un conjunto de alternativas o soluciones del problema. Se logra la interacción entre el panel de expertos con comentarios anónimos. Después, el método AHP se utiliza para dividir la decisión general reduciéndolo en componentes de decisión más pequeños.

Después de este cuestionario se propuso las siguientes condiciones en siete categorías principales:

- Patrimonio Cultural (CUH): Esta condición tiene en cuenta el paisaje, vistas singulares, exactitud histórica, integración de murallas y edificios medievales (Muñoz, 2012; Carles et al, 1999).

- Patrimonio Natural (NAH): el uso de materiales locales y vegetación autóctona, la creación de espejos de agua y la ruptura de la linealidad (Gullino y Larcher, 2013).
- Flujo de agua (WAF): Analiza la cantidad de agua en cualquier temporada y el régimen del movimiento del agua en el río, basado principalmente en la cuenca vertiente, en la sección húmeda y en la rugosidad (Mejía y Reed, 2011).
- Naturalización del río (RIN): Ribereña y vegetación acuática, río ecosistema (Luderitz et al, 2011), la caracterización fisico-química del agua (Tanago et al, 2012), consolidación de los ecotones del río (Mitsch y Jorgensen, 2004)
- La interacción de la corriente del agua (IWS): esta condición estudia los efectos de los sonidos del agua sobre la percepción acústica medio ambiental (Radsten-Ekman et al, 2013), para el medio ambiente sonoro (Jeon et al, 2012) y su contribución en la evaluación de los paisajes sonoros urbanos (Lavandier y Defreville, 2006; Galbrun y Ali, 2013; You et al, 2010). El sonido de la naturaleza es una fuente de placer natural y facilita la recuperación después de una situación de estrés psicológico (Alvarsson et al, 2010). El otro factor principal es el efecto de la temperatura del agua en las orillas de los ríos y los alrededores (Taha, 1997; Hathway y Sharples, 2012).
- Los costos de construcción (COC): esta condición tiene en cuenta los costes de construcción, montaje electromecánico de maquinaria y la jardinería. Es un factor cuantitativo y fácilmente obtenido. Los beneficios a corto plazo son conceptualmente análogos pero al tratarse de un concepto extrínseco al proyecto.
- Los costos de operación y mantenimiento (OMC): esta condición refleja la operación, el mantenimiento y la gestión de la infraestructura, la jardinería y la instalación. Este coste del proyecto debería ser mucho menor que los beneficios económicos,

sociales y ecológicos (Luderitz , 2011). Es otro valor cuantitativo que cambia con el tiempo.

En otras condiciones, los costes COC y OMC se deberían de minorar por medio de los beneficios directos e indirectos, considerando el tiempo a corto, medio y largo plazo. Al tratarse de conceptos extrínsecos al proyecto, es decir, no considerados en la repercusión del mismo, no se consideran en este estudio. Si al plantear este proyecto la actuación conllevara una devolución o retorno de los costes invertidos habrían de considerarse los beneficios mencionados.

Por otra parte, se escoge un grupo representativo de soluciones a partir de las diferentes propuestas aportadas por el panel de expertos. Previamente, se les proporciona un amplio elenco de soluciones para la rehabilitación del río mediante una forma parametrizada de las secciones transversales del mismo:

$$B(x) / Br(x) = (H(x) / Hr(x))^a \quad (29)$$

Donde  $x$  es el valor de la longitud en el sentido horizontal de la sección del río,  $B [x]$  es el ancho de la parte superior del canal,  $Br [x]$  es un ancho de referencia,  $H [x]$  es la profundidad del canal,  $Hr [x]$  es una profundidad de referencia, y el exponente “ $a$ ” controla la forma de la sección transversal. La forma de la sección transversal es rectangular para  $a= 0$ , parabólica para  $a= 0.5$ , triangular para  $a = 1$ . (Garbrecht, 1990; Henderson, 1996; Valiani, 2009; Mejía, 2011). Considerando la forma trapezoidal en lugar de la forma parabólica, porque ambos son muy similares y el primero es mucho más práctico, económico y rápido, desde el punto de vista de su construcción.

Después del análisis realizado por el grupo de expertos, el cuestionario dio las siguientes seis soluciones de secciones transversales tipo incluyendo flujo continuo de agua en todas:

- Sección transversal inicial (IS): es una forma rectangular, 4.5 metros de ancho y 1.0 metros de altura, con base de hormigón y mampostería lateral, respectivamente, y se introduce en el sistema 80 l/s de agua.
- Sección transversal en U (US): Se profundiza la base del canal 20 cm, se pone de piedra con un diámetro máximo de 150 mm, y se introduce en el sistema 80 l/s de agua.
- Sección transversal en T (TS): En la sección inicial se profundiza la base del canal 30 cm, se pone piedra con un diámetro máximo de 200 mm, y se introduce en el sistema de 80 l/ s de agua.
- Sección transversal Triangular (GS): Se profundiza la base del canal 40 cm., se pone piedra con un diámetro máximo de 300 mm, y se introduce en el sistema de 40 l/s de agua.
- Sección transversal Triangular Modificada (MS): Se profundiza la base del canal 50 cm, se pone de piedra con un diámetro máximo de 400 mm, y se introduce en el sistema 40 l/s de agua.
- Sección transversal trapezoidal (PS): Se profundiza la base del canal 60 cm. Se pone piedra con un diámetro máximo de 500 mm, y se introduce en el sistema de 40 l/s de agua.

Estas secciones se muestran esquemáticamente en la Figura 53. Posteriormente, una vez elegida la solución de sección transversal del río, se ha de estudiar su desarrollo longitudinal, es decir, en la medida que lo permita la geometría y dimensiones del río y de la sección transversal tipo, se introducen medidas de probado éxito en obras ejecutadas de restauración de ríos (Luderitz et al, 2011), tales como lagunajes, múltiples canalizaciones o divertículos, y el establecimiento de áreas ribereñas o análogas medidas. Es decir, es necesario romper la linealidad longitudinalmente, y transversalmente según las condiciones de contorno.

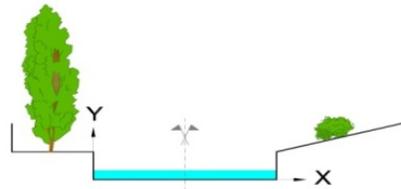
A partir de los criterios de selección más importantes y de las secciones transversales del río más representativas, se obtiene la siguiente estructura jerárquica que se presenta en la Figura 54 siguiente.

Para determinar el peso relativo de los criterios, se les preguntó a los expertos por medio de un segundo cuestionario haciendo comparaciones por pares utilizando una escala de 1-9 de preferencia. Esta escala no sólo ha sido validada por su eficacia, sino que también a través de comparaciones teóricas con un gran número de otras escalas (Saaty, 2012b). Este segundo cuestionario fue cumplimentado por cada experto que indicaba su preferencia por cada criterio. A partir de los datos de preferencia presentado por cada experto, se confecciona una matriz agregada en la que cada elemento de esta matriz se obtiene mediante el cálculo de la media geométrica ponderada de los valores del juicio individual de cada experto.  $A(c) = (a_{ij}(c))_{n \times n}$ ,, donde:

$$a_{ij} = \left( \prod_{k=1}^n a_{ij(k)} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (30)$$

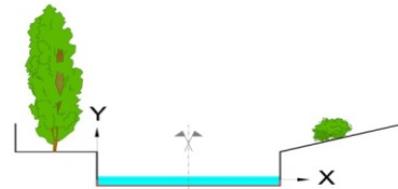
siendo  $a_{ij}(k)$ : valor de juicio del experto k.

INITIAL SECTION (IS)



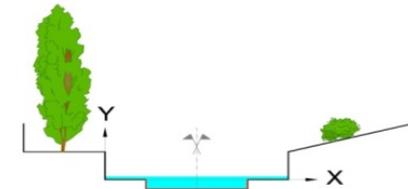
Digging excavation (De):  $y = 0.00$  m

U SECTION (US)



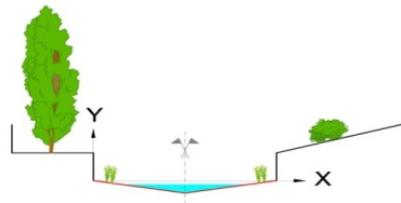
De:  $y = - 0.20$  m

T SECTION (TS)



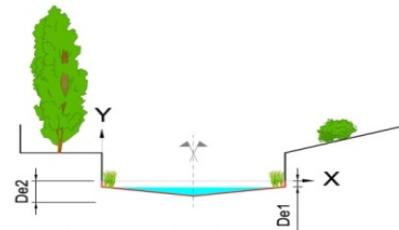
De:  $y = - 0.30$  m

TRIANGULAR SECTION (GS)



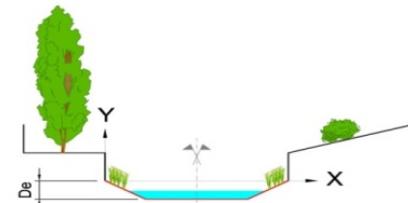
De:  $y = - 0.40$  m

MODIFIED TRIANG. SECTION (MS)



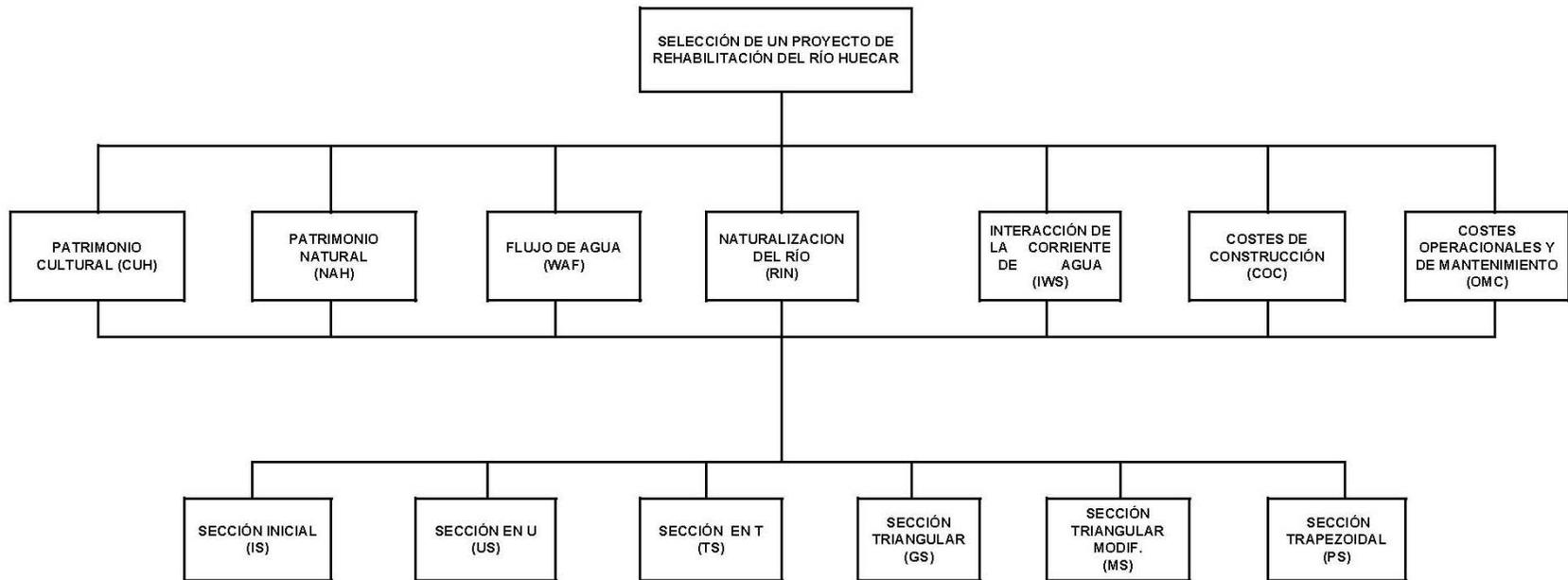
De1:  $y = - 0.20$  m  
De2:  $y = - 0.50$  m

TRAPEZOIDAL SECTION (PS)



De:  $y = - 0.60$  m

*Fig. 53. Propuesta de secciones transversales tipo para la rehabilitación del río Huécar.*



*Fig. 54. Estructura jerárquica para la selección de un proyecto de rehabilitación para el río Huécar.*

Estos valores medios dan una matriz recíproca  $n$ -por- $n$   $AC = [AC_{ij}]$ , donde  $AC_{ii} = 1$  (en la diagonal) y  $AC_{ji} = 1 / AC_{ij}$ . El vector director propio de  $AC_{ij}$  es el vector de prioridad  $\omega$  deseado. Para encontrar este vector prioridad, el sistema lineal  $A \omega = \lambda \omega$  (o  $\det [A - \lambda I] = 0$ ) deben ser resueltos (Saaty, 1980).

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio
3	Levemente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen levemente a un elemento frente al otro
5	Notablemente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen notablemente a un elemento frente al otro
7	Fuertemente más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en la práctica
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	Cuando es necesario expresarlo.
Inversos de todos los valores anteriores	Si al comparar $i$ con $j$ se ha obtenido uno de los valores anteriores, al comparar $j$ con $i$ se le asigna el inverso	

*Tabla 13. Escala de 9 puntos con términos lingüísticos para las comparaciones por pares en AHP. (Saaty, 2012a)*

<b>Pares de comparación</b>
Cómo es de importante el Patrimonio Cultural (CUH) en comparación con el Patrimonio natural (NAH)
Cómo es de importante el Patrimonio Cultural (CUH) en comparación con el Flujo del Agua (WAF)
Cómo es de importante el Patrimonio Cultural (CUH) en comparación con la Naturalización del Río (RIN)
Cómo es de importante el Patrimonio Cultural (CUH) en comparación con la Interacción de la Corriente del Agua (IWS)
Cómo es de importante el Patrimonio Cultural (CUH) en comparación con los Costes de Construcción (COC)
Cómo es de importante el Patrimonio Cultural (CUH) en comparación con los Costes de Operación y Mantenimiento (OMC)
Cómo es de importante el Patrimonio Natural (NAH) en comparación con el Flujo del Agua (WAF)
Cómo es de importante el Patrimonio Natural (NAH) en comparación con la Naturalización del Río (RIN)
Cómo es de importante el Patrimonio Natural (NAH) en comparación con la Interacción de la Corriente de Agua (IWS)
Cómo es de importante el Patrimonio Natural (NAH) en comparación con los Costes de Construcción (COC)
Cómo es de importante el Patrimonio Natural (NAH) en comparación con los Costes de Operación y Mantenimiento (OMC)
Cómo es de importante el Flujo de Agua (WAF) en comparación con la Naturalización del Río (RIN)
Cómo es de importante el Flujo del Agua (WAF) en comparación con la Interacción de la corriente del Agua (IWS)
Cómo es de importante el Flujo del Agua (WAF) en comparación con los Costes de Operación y Mantenimiento (OMC)
Cómo es de importante el Flujo del Agua (WAF) en comparación con los Costes de Construcción (COC)
Cómo es de importante la Naturalización del Río (RIN) en comparación con la Interacción de la Corriente del Agua (IWS)
Cómo es de importante la Naturalización del Río (RIN) en comparación con los Costes de Construcción (COC)
Cómo es de importante la Naturalización del Río (RIN) en comparación con los Costes de Operación y Mantenimiento (OMC)
Cómo es de importante la Interacción de la Corriente de Agua (IWS) en comparación con los Costes de Construcción (COC)
Cómo es de importante la Interacción de la Corriente de Agua (IWS) en comparación con los Costes de Operación y Mantenimiento (OMC)
Cómo es de importante los Costes de Construcción (COC) en comparación con los Costes de Operación y Mantenimiento (OMC)

*Tabla 14-a. Cuestionario para evaluar los criterios principales para la selección de un proyecto de rehabilitación del río Huécar.*

Si esta condición es la más importante de las dos de la fila, indicar el grado de importancia					Si esta condición es la más importante de las dos de la fila, indicar el grado de importancia					
Patrimonio Cultural (CUH)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Patrimonio Natural (NAH)
Patrimonio Cultural (CUH)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Flujo del Agua (WAF)
Patrimonio Cultural (CUH)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Naturalización del río (RIN)
Patrimonio Cultural (CUH)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Interacción del Agua (IWS)
Patrimonio Cultural (CUH)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Costes de Construc (COC)
Patrimonio Cultural (CUH)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Costes de Manten (OMC)
Patrimonio Natural (NAH)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Flujo del Agua (WAF)
Patrimonio Natural (NAH)	9	7	6	3	1	3	5	7	9	Naturalización del río (RIN)
Patrimonio Natural (NAH)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Interacción del Agua (IWS)
Patrimonio Natural (NAH)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Costes de Construc (COC)
Patrimonio Natural (NAH)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Costes de Manten (OMC)
Flujo del Agua (WAF)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Naturalización del río (RIN)
Flujo del Agua (WAF)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Interacción del Agua (IWS)
Flujo del Agua (WAF)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Costes de Construcc (COC)
Flujo del Agua (WAF)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Costes de Manten (OMC)
Naturalización del río (RIN)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Interacción del Agua (IWS)
Naturalización del río (RIN)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Costes de Construc (COC)
Naturalización del río (RIN)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Costes de Manten (OMC)
Interacción del Agua (IWS)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Costes de Construc (COC)
Interacción del Agua (IWS)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Costes de Manten (OMC)
Costes de Construc (COC)	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Costes de Manten (OMC)

*Tabla 14-b. Cuestionario para evaluar los criterios principales para la selección del proyecto de rehabilitación.*



### **4.3.- AHP para la obtención de la sección transversal óptima del río.**

En el apartado 3 anterior se ha descrito el fundamento matemático del método AHP, así como el proceso que se sigue para obtener los datos de los pesos tanto de los criterios como de las alternativas comparadas con cada criterio.

A continuación aplicaremos el método AHP indicado al caso particular que estamos analizando.

En primer lugar se obtuvieron los cuestionarios definitivos de los expertos, según se indica en el apartado 4.2. En total, el panel de expertos se compuso de diez individuos.

#### **4.3.1.- Obtención de la prioridad de los criterios respecto al objetivo**

Los expertos rellenaron las encuestas en las diferentes fases, hasta que se llegó a la versión definitiva. En ellas se compararon por parejas los siete (7) criterios adoptados, y que se han descrito anteriormente en este punto 4.

En la siguiente Tabla 15 se presenta el cuestionario, donde se aportan las puntuaciones dadas por el experto 1 en la comparación de criterios.

**Tabla 15.** Puntuación de ponderación de los Criterios por el panelista experto n° 1

Criterio	Mas importante que			Igual	Menos importante que			Criterio		
CUH	9	7	5	3	1	3	5	7	9	NAH
CUH	9	7	5	3	1	3	5	7	9	WAF
CUH	9	7	5	3	1	3	5	7	9	RIN
CUH	9	7	5	3	1	3	5	7	9	IWS
CUH	9	7	5	3	1	3	5	7	9	COC
CUH	9	7	5	3	1	3	5	7	9	OMC
NAH	9	7	5	3	1	3	5	7	9	WAF
NAH	9	7	6	3	1	3	5	7	9	RIN
NAH	9	7	5	3	1	3	5	7	9	IWS
NAH	9	7	5	3	1	3	5	7	9	COC
NAH	9	7	5	3	1	3	5	7	9	OMC
WAF	9	7	5	3	1	3	5	7	9	RIN
WAF	9	7	5	3	1	3	5	7	9	IWS
WAF	9	7	5	3	1	3	5	7	9	COC
WAF	9	7	5	3	1	3	5	7	9	OMC
RIN	9	7	5	3	1	3	5	7	9	IWS
RIN	9	7	5	3	1	3	5	7	9	COC
RIN	9	7	5	3	1	3	5	7	9	OMC
IWS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	COC
IWS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	OMC
COC	9	7	5	3	1	3	5	7	9	OMC

A partir de los valores de los diez expertos, se obtiene la matriz agregada de comparación, A, en la que cada uno de sus elementos  $a_{ij}$ , se obtiene aplicando la media geométrica a los diez valores correspondientes de cada experto.

La citada matriz se muestra seguidamente.

**Tabla 16.** Vector de prioridad y el análisis de la consistencia de la matriz de comparación por pares de los criterios en la selección de una sección transversal del río.

	CUH	NAH	WAF	RIN	IWS	COC	OMC
CUH	1.0000	1.8089	6.0617	1.1161	1.3797	7.7403	5.5311
NAH	0.5528	1.0000	1.7056	0.6834	0.8513	4.7452	2.2708
WAF	0.1650	0.5863	1.0000	0.1812	0.3217	2.8071	0.8027
RIN	0.8960	1.4633	5.5198	1.0000	1.1746	7.0569	4.9939
IWS	0.7248	1.1746	3.1090	0.8513	1.0000	5.6415	2.8071
COC	0.1292	0.2107	0.3562	0.1417	0.1773	1.0000	0.3333
OMC	0.1808	0.4404	1.2457	0.2002	0.3562	3.0000	1.0000

A partir de esta tabla A, aplicando el fundamento matemático de los autovalores y autovectores, se obtendrá la matriz de los pesos de cada criterio.

En el apartado 3 se describe como obtener los autovalores. Sin embargo, falta por describir el mecanismo para resolver el sistema y llegar a obtener estos autovalores.

Si tuviésemos una matriz A de 2x2, obtendríamos lo siguiente. La ecuación sería:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \end{pmatrix} = \lambda * \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \end{pmatrix} \quad (31)$$

Operando, obtendríamos:

$$\begin{pmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \end{pmatrix} = 0 \quad (32)$$

Luego, para que la matriz de pesos tenga solución no trivial, el determinante  $(A-\lambda I)=0$ .

Por tanto, el polinomio característico que sale y que debe igualarse a cero es:

$$P_A(\lambda) = (a_{11}-\lambda)*(a_{22}-\lambda)-a_{12}*a_{21} \quad (33)$$

Operando:

$$(a_{11}*a_{22}-a_{12}*a_{21})- (a_{11}+a_{22})*\lambda + \lambda^2=0 \quad (34)$$

Las raíces de este polinomio serán los autovalores de nuestra matriz cuadrada A de 2x2.

En este caso es posible resolver la ecuación y obtener la matriz. Sin embargo, en casi ningún caso, el rango de la matriz será de 2. Siempre tendremos un rango mucho mayor, por lo que la resolución de la ecuación ya no es inmediata.

Por tanto, deberíamos tantear los valores que resuelven la ecuación o bien aplicar un método que nos permita resolver el sistema. Este método existe y es el método de la potencia iterada.

Por tanto, la resolución se ha efectuado siguiendo este método.

Los resultados obtenidos se presentan seguidamente.

**Tabla 17.** Vector de prioridad y el análisis de la consistencia de la matriz de comparación por pares de los criterios en la selección de una sección transversal del río.

	CUH	NAH	WAF	RIN	IWS	COC	OMC	Vector de pref.
CUH	1.0000	1.8089	6.0617	1.1161	1.3797	7.7403	5.5311	0.2800
NAH	0.5528	1.0000	1.7056	0.6834	0.8513	4.7452	2.2708	0.1405
WAF	0.1650	0.5863	1.0000	0.1812	0.3217	2.8071	0.8027	0.0594
RIN	0.8960	1.4633	5.5198	1.0000	1.1746	7.0569	4.9939	0.2478
IWS	0.7248	1.1746	3.1090	0.8513	1.0000	5.6415	2.8071	0.1805
COC	0.1292	0.2107	0.3562	0.1417	0.1773	1.0000	0.3333	0.0287
OMC	0.1808	0.4404	1.2457	0.2002	0.3562	3.0000	1.0000	0.0632

$\lambda_{max} = 7.1104$  ,  $CI = 0.0184$  ,  $CR = 0.0136 < 0.1$   
OK

#### 4.3.2.- Obtención de la prioridad de las alternativas respecto a cada uno de los criterios.

Tal como explicamos en el apartado 4.3.1, los expertos rellenaron las encuestas en las que también se comparaban las diferentes alternativas de secciones transversales para cada uno de los criterios fijados. Como en el caso de los criterios, se realizó una comparación por parejas las 6 alternativas para cada uno de los 7 criterios, Las alternativas han sido descritas anteriormente en este punto 4.

En total se dispone de 70 tablas con el resultado de estas encuestas, correspondiente a las siete (7) encuestas (una por cada criterio donde se comparan las seis (6) alternativas dos a dos), que tuvo que rellenar cada uno de los diez expertos. De estas 70 tablas, se obtienen los resultados para poder seguir con la aplicación de la metodología propuesta. El proceso seguido para todos los criterios es el mismo:

-Se toman las diez (10) encuestas de los expertos correspondientes a la comparación de las alternativas respecto a uno de los criterios.

-Se obtiene la matriz de comparación agregada donde cada elemento  $a_{ij}$  se obtiene como la media geométrica de los (10) resultados de las encuestas para esa posición.

Una vez se tiene la matriz A, se obtiene el autovalor máximo y el autovector asociado, que representa el conjunto de pesos de cada alternativa respecto a ese criterio.

Por último se realiza un análisis de consistencia para comprobar que los resultados tienen esa consistencia que permite asegurar que los datos son lógicos y nos permiten dar por buenos los resultados obtenidos.

Como hemos dicho, de este proceso se obtienen setenta (70) tablas, correspondientes a las encuestas de comparación de las alternativas para los siete (7) criterios realizadas por cada uno de los 10 expertos. Sin embargo, presentamos tan solo las 7 tablas de comparación correspondientes al experto n° 1.

**Tabla 18.1.** Puntuación de ponderación de las secciones transversales para el Criterio CUH por el experto nº 1

<b>Secciones Transversales</b>	<b>Mas preferida que</b>				<b>Igual</b>	<b>Menos preferida que</b>				<b>Secciones Transversales</b>
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	US
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TS
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TS
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS
GS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS
GS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS
MS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS

**Tabla 18.2.** Puntuación de ponderación de las secciones transversales para el Criterio NAH por el experto nº 1.

Secciones Transversales		Mas preferida que				Igual	Menos preferida que				Secciones Transversales
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	US	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TS	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS	
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
GS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
GS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
MS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	

**Tabla 18.3.** Puntuación de ponderación de las secciones transversales para el Criterio WAF por el experto n° 1

Secciones Transversales	Mas preferida que				Igual	Menos preferida que				Secciones Transversales
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	US
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TS
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TS
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS
GS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS
GS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS
MS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS

**Tabla 18.4.** Puntuación de ponderación de las secciones transversales para el Criterio RIN por el experto n° 1

Secciones Transversales	Mas preferida que					Igual	Menos preferida que				Secciones Transversales
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	US	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TS	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS	
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
GS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
GS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
MS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	

**Tabla 18.5.** Puntuación de ponderación de las secciones transversales para el Criterio IWS por el experto nº 1.

Secciones Transversales		Mas preferida que				Igual	Menos preferida que				Secciones Transversales
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	US	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TS	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS	
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
GS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
GS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
MS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	

**Tabla 18.6.** Puntuación de ponderación de las secciones transversales para el Criterio COC por el experto nº 1.

Secciones Transversales	Mas preferida que		Igual	Menos preferida que			Secciones Transversales			
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	US
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TS
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TS
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS
GS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS
GS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS
MS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS

**Tabla 18.7.** Puntuación de ponderación de las secciones transversales para el Criterio OMC por el experto nº 1.

Secciones Transversales		Mas preferida que				Igual	Menos preferida que				Secciones Transversales
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	US	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TS	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
IS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	TS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
US	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	GS	
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
TS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
GS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	MS	
GS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	
MS	9	7	5	3	1	3	5	7	9	PS	

De las tablas similares a las anteriores pero de los 10 expertos consultados, se obtiene la matriz de comparación correspondiente al criterio CUH.

Seguidamente se presentan las 7 matrices de comparación obtenidas.

<b><i>criterio CUH</i></b>	<b>IS</b>	<b>US</b>	<b>TS</b>	<b>GS</b>	<b>MS</b>	<b>PS</b>
<b>IS</b>	1.0000	0.8027	0.8960	0.2717	0.2717	0.2717
<b>US</b>	1.2457	1.0000	0.5774	0.2882	0.2331	0.2331
<b>TS</b>	1.1161	1.7321	1.0000	0.4404	0.2717	0.2800
<b>GS</b>	3.6801	3.4700	2.2708	1.0000	0.5774	0.5173
<b>MS</b>	3.6801	4.2896	3.6801	1.7321	1.0000	0.7333
<b>PS</b>	3.6801	4.2896	3.5714	1.9332	1.3636	1.0000

*Tabla 19.1. Matriz de comparación de las alternativas en relación al criterio CUH*

<b><i>criterio NAH</i></b>	<b>IS</b>	<b>US</b>	<b>TS</b>	<b>GS</b>	<b>MS</b>	<b>PS</b>
<b>IS</b>	1.0000	0.44038	0.3385	0.2180	0.1677	0.1542
<b>US</b>	2.2708	1.0000	0.3720	0.2331	0.1779	0.1542
<b>TS</b>	2.9542	2.6879	1.0000	0.3333	0.2105	0.1720
<b>GS</b>	4.5882	4.2896	3.0000	1.0000	0.4635	0.3562
<b>MS</b>	5.9618	5.6215	4.7510	2.1577	1.0000	0.3535
<b>PS</b>	6.4836	6.4836	5.8138	2.8071	2.8288	1.0000

*Tabla 19.2. Matriz de comparación de las alternativas en relación al criterio NAH*

<b>criterio WAF</b>	<b>IS</b>	<b>US</b>	<b>TS</b>	<b>GS</b>	<b>MS</b>	<b>PS</b>
<b>IS</b>	1.0000	1.0000	0.5774	0,3010	0.2215	0.1808
<b>US</b>	1.0000	1.0000	0.7192	0.2860	0.2372	0.1968
<b>TS</b>	1.7321	1.3904	1.0000	0.4185	0.2602	0.2071
<b>GS</b>	3.3227	3.4968	2.3898	1.0000	0.5774	0.3749
<b>MS</b>	4.5144	4.2154	3.8433	1.7321	1.0000	0.2582
<b>PS</b>	5.5311	5.0817	4.8287	2.6673	3.8730	1.0000

*Tabla 19.3. Matriz de comparación de las alternativas en relación al criterio WAF*

<b>criterio RIN</b>	<b>IS</b>	<b>US</b>	<b>TS</b>	<b>GS</b>	<b>MS</b>	<b>PS</b>
<b>IS</b>	1.0000	0.6444	0.5213	0.2180	0.1690	0.1336
<b>US</b>	1.5519	1.0000	0.5173	0.2453	0.1903	0.1503
<b>TS</b>	1.9184	1.9332	1.0000	0.3167	0.2142	0.1541
<b>GS</b>	4.5882	4.0760	3.1572	1.0000	0.3720	0.2453
<b>MS</b>	5.9161	5.2556	4.6689	2.6879	1.0000	0.3010
<b>PS</b>	7.4842	6.6541	6.4889	4.0760	3.3227	1.0000

*Tabla 19.4. Matriz de comparación de las alternativas en relación al criterio RIN*

<b>criterio IWS</b>	<b>IS</b>	<b>US</b>	<b>TS</b>	<b>GS</b>	<b>MS</b>	<b>PS</b>
<b>IS</b>	1.0000	0.4915	0.3590	0.1936	0.1528	0.1260
<b>US</b>	2.0345	1.0000	0.3167	0.2000	0.1808	0.1325
<b>TS</b>	2.7855	3.1572	1.0000	0.3010	0.2035	0.1541
<b>GS</b>	5.1648	5.0000	3.3227	1.0000	0.3333	0.2331
<b>MS</b>	6.5444	5.5311	4.9136	3.0000	1.0000	0.3516
<b>PS</b>	7.9373	7.5482	6.4890	4.2896	2.8439	1.0000

*Tabla 19.5. Matriz de comparación de las alternativas en relación al criterio IWS*

<i>criterio COC</i>	<b>IS</b>	<b>US</b>	<b>TS</b>	<b>GS</b>	<b>MS</b>	<b>PS</b>
<b>IS</b>	1.0000	4.2154	4.7452	6.4890	6,4890	8.3464
<b>US</b>	0.2372	1.0000	1.8228	3.6165	4.2154	6.4890
<b>TS</b>	0.2107	0.5486	1.0000	3.3227	3.6801	5.9161
<b>GS</b>	0.1541	0.2765	0.3010	1.0000	1.7321	4.0760
<b>MS</b>	0.1541	0.2372	0.2717	0.5774	1.0000	3.6801
<b>PS</b>	0.1198	0.1541	0.1690	0.2453	0.2717	1.0000

*Tabla 19.6. Matriz de comparación de las alternativas en relación al criterio COC*

<i>criterio OMC</i>	<b>IS</b>	<b>US</b>	<b>TS</b>	<b>GS</b>	<b>MS</b>	<b>PS</b>
<b>IS</b>	1.0000	0.5173	0,3333	0.2105	0.1748	0.1528
<b>US</b>	1.9332	1.0000	0.5774	0.2453	0.1870	0.1690
<b>TS</b>	3.0000	1.7321	1.0000	0.3167	0.1934	0.1870
<b>GS</b>	4.7510	4.0760	3.1572	1.0000	0.3167	0.3010
<b>MS</b>	5.7203	5.3481	5.1711	3.1572	1.0000	0.8960
<b>PS</b>	6.5444	5.9161	5.3481	3.3227	1.1161	1.0000

*Tabla 19.7. Matriz de comparación de las alternativas en relación al criterio OMC*

Tomando estas matrices, pasamos a resolverlas utilizando el método de la potencia iterada, con lo que obtenemos el autovalor mayor y el autovector asociado en cada una. Por último realizamos el cálculo de consistencia. En todos los casos, estos índices nos han dado valores adecuados, lo que implica que las opiniones de los expertos eran consistentes, y los resultados obtenidos son aceptables y se pueden utilizar.

Presentamos seguidamente, el resultado de los cálculos.

<i>criterio CUH</i>	IS	US	TS	GS	MS	PS	Vector de pref.
IS	1.0000	0.8027	0.8960	0.2717	0.2717	0.2717	0.0672
US	1.2457	1.0000	0.5774	0.2882	0.2331	0.2331	0.0643
TS	1.1161	1.7321	1.0000	0.4404	0.2717	0.2800	0.0856
GS	3.6801	3.4700	2.2708	1.0000	0.5774	0.5173	0.1943
MS	3.6801	4.2896	3.6801	1.7321	1.0000	0.7333	0.2767
PS	3.6801	4.2896	3.5714	1.9332	1.3636	1.0000	0.3118

$$\lambda_{\max} = 6.0739, \text{ CI} = 0.0146, \text{ CR} = 0.0130 < 0.10 \text{ OK}$$

*Tabla 20.1. Obtención de autovector y autovalor máximo de las alternativas respecto al criterio CUH*

<i>criterio NAH</i>	IS	US	TS	GS	MS	PS	Vector de pref.
IS	1.0000	0.4404	0.3385	0.2180	0.1677	0.1542	0.0360
US	2.2708	1.0000	0.3720	0.2331	0.1779	0.1542	0.0488
TS	2.9542	2.6879	1.0000	0.3333	0.2105	0.1720	0.0787
GS	4.5882	4.2896	3.0000	1.0000	0.4635	0.3562	0.1652
MS	5.9618	5.6215	4.7510	2.1577	1.0000	0.3535	0.2572
PS	6.4836	6.4836	5.8138	2.8071	2.8288	1.0000	0.4141

$$\lambda_{\max} = 6.3101, \text{ CI} = 0.0584, \text{ CR} = 0.0521 < 0.10 \text{ OK}$$

*Tabla 20.2. Obtención de autovector y autovalor máximo de las alternativas respecto al criterio NAH*

<b>criterio WAF</b>	<b>IS</b>	<b>US</b>	<b>TS</b>	<b>GS</b>	<b>MS</b>	<b>PS</b>	<b>Vector de pref.</b>
<b>IS</b>	1.0000	1.0000	0.5774	0,3010	0.2215	0.1808	0.0531
<b>US</b>	1.0000	1.0000	0.7192	0.2860	0.2372	0.1968	0.0561
<b>TS</b>	1.7321	1.3904	1.0000	0.4185	0.2602	0.2071	0.0744
<b>GS</b>	3.3227	3.4968	2.3898	1.0000	0.5774	0.3749	0.1623
<b>MS</b>	4.5144	4.2154	3.8433	1.7321	1.0000	0.2582	0.2229
<b>PS</b>	5.5311	5.0817	4.8287	2.6673	3.8730	1.0000	0.4312

$\lambda_{\max}=6.1808$ ,  $CI=0.0349$ ,  $CR=0.0312 < 0.10$  OK

*Tabla 20.3. Obtención de autovector y autovalor máximo de las alternativas respecto al criterio WAF*

<b>criterio RIN</b>	<b>IS</b>	<b>US</b>	<b>TS</b>	<b>GS</b>	<b>MS</b>	<b>PS</b>	<b>Vector de pref.</b>
<b>IS</b>	1.0000	0.6444	0.5213	0.2180	0.1690	0.1336	0.0377
<b>US</b>	1.5519	1.0000	0.5173	0.2453	0.1903	0.1503	0.0463
<b>TS</b>	1.9184	1.9332	1.0000	0.3167	0.2142	0.1541	0.0633
<b>GS</b>	4.5882	4.0760	3.1572	1.0000	0.3720	0.2453	0.1460
<b>MS</b>	5.9161	5.2556	4.6689	2.6879	1.0000	0.3010	0.2464
<b>PS</b>	7.4842	6.6541	6.4889	4.0760	3.3227	1.0000	0.4603

$\lambda_{\max}=6.2467$ ,  $CI=0.0470$ ,  $CR=0.0420 < 0.10$  OK

*Tabla 20.4. Obtención de autovector y autovalor máximo de las alternativas respecto al criterio RIN*

<b>critério IWS</b>	<b>IS</b>	<b>US</b>	<b>TS</b>	<b>GS</b>	<b>MS</b>	<b>PS</b>	<b>Vector de pref.</b>
<b>IS</b>	1.0000	0.4915	0.3590	0.1936	0.1528	0.1260	0.0318
<b>US</b>	2.0345	1.0000	0.3167	0.2000	0.1808	0.1325	0.0415
<b>TS</b>	2.7855	3.1572	1.0000	0.3010	0.2035	0.1541	0.0717
<b>GS</b>	5.1648	5.0000	3.3227	1.0000	0.3333	0.2331	0.1488
<b>MS</b>	6.5444	5.5311	4.9136	3.0000	1.0000	0.3516	0.2590
<b>PS</b>	7.9373	7.5482	6.4890	4.2896	2.8439	1.0000	0.4472

$$\lambda_{\max} = 6.3795, CI = 0.0705, CR = 0.0630 < 0.10 \text{ OK}$$

*Tabla 20.5. Obtención de autovector y autovalor máximo de las alternativas respecto al criterio IWS*

<b>critério COC</b>	<b>IS</b>	<b>US</b>	<b>TS</b>	<b>GS</b>	<b>MS</b>	<b>PS</b>	<b>Vector de pref.</b>
<b>IS</b>	1.0000	4.2154	4.7452	6.4890	6,4890	8.3464	0.4900
<b>US</b>	0.2372	1.0000	1.8228	3.6165	4.2154	6.4890	0.1999
<b>TS</b>	0.2107	0.5486	1.0000	3.3227	3.6801	5.9161	0.1534
<b>GS</b>	0.1541	0.2765	0.3010	1.0000	1.7321	4.0760	0.0721
<b>MS</b>	0.1541	0.2372	0.2717	0.5774	1.0000	3.6801	0.0571
<b>PS</b>	0.1198	0.1541	0.1690	0.2453	0.2717	1.0000	0.0276

$$\lambda_{\max} = 6.3863, CI = 0.0717, CR = 0.0640 < 0.10 \text{ OK}$$

*Tabla 20.6. Obtención de autovector y autovalor máximo de las alternativas respecto al criterio COC*

<b>Criterio OMC</b>	<b>IS</b>	<b>US</b>	<b>TS</b>	<b>GS</b>	<b>MS</b>	<b>PS</b>	<b>Vector de pref.</b>
<b>IS</b>	1.0000	0.5173	0,3333	0.2105	0.1748	0.1528	0.0375
<b>US</b>	1.9332	1.0000	0.5774	0.2453	0.1870	0.1690	0.0525
<b>TS</b>	3.0000	1.7321	1.0000	0.3167	0.1934	0.1870	0.0733
<b>GS</b>	4.7510	4.0760	3.1572	1.0000	0.3167	0.3010	0.1595
<b>MS</b>	5.7203	5.3481	5.1711	3.1572	1.0000	0.8960	0.3245
<b>PS</b>	6.5444	5.9161	5.3481	3.3227	1.1161	1.0000	0.3526

$$\lambda_{\max} = 6.2203, CI = 0.0422, CR = 0.0377 < 0.10 \text{ OK}$$

Tabla 20.7. Obtención de autovector y autovalor máximo de las alternativas respecto al criterio OMC

En la siguiente gráfica se muestran los pesos para cada una de las seis alternativas en relación a cada uno de los criterios.

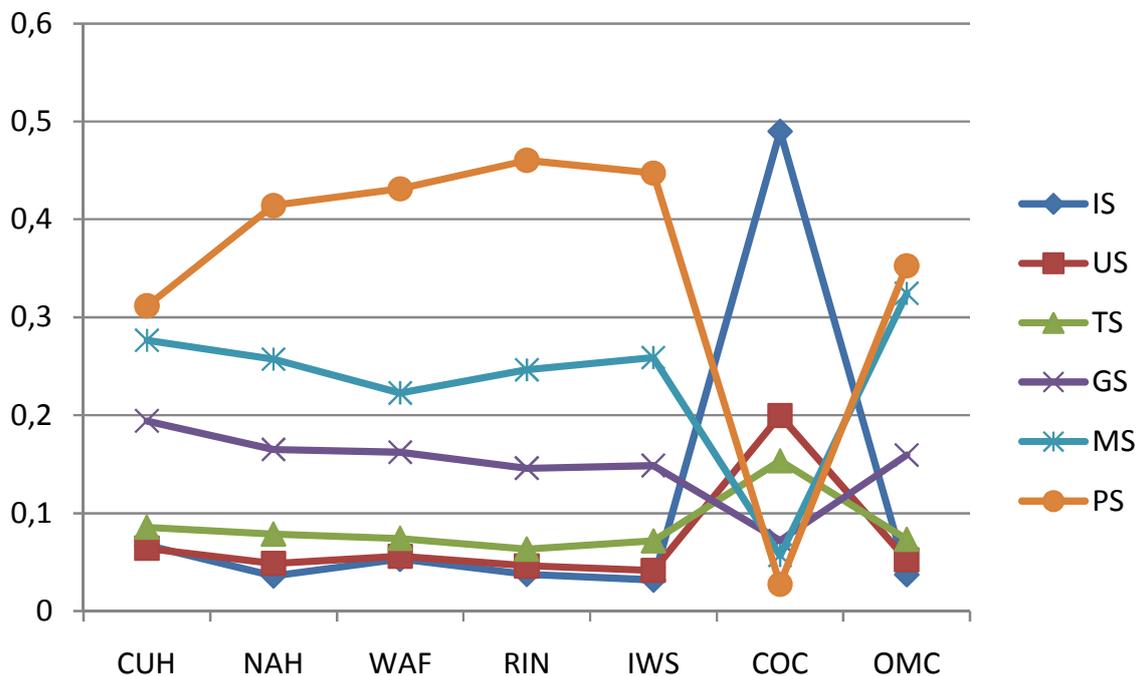


Fig. 55. Variación de los pesos de cada alternativa en relación a los criterios

Se aprecia cierta uniformidad en los pesos obtenidos por la alternativas en cada uno de los criterios, excepto en el criterio COC. Costos de construcción, en el que se invierten sensiblemente los valores de los pesos. Por ejemplo, la alternativa IS. Sección inicial tiene un peso de 0.49 cuando para el resto de criterios, su peso oscilaba entre 0.03 y 0.06 aproximadamente.

En la siguiente gráfica hemos representado los pesos agrupados para cada alternativa. Se vuelve a apreciar las grandes diferencias en los pesos que aparecen entre el criterio COC y el resto.

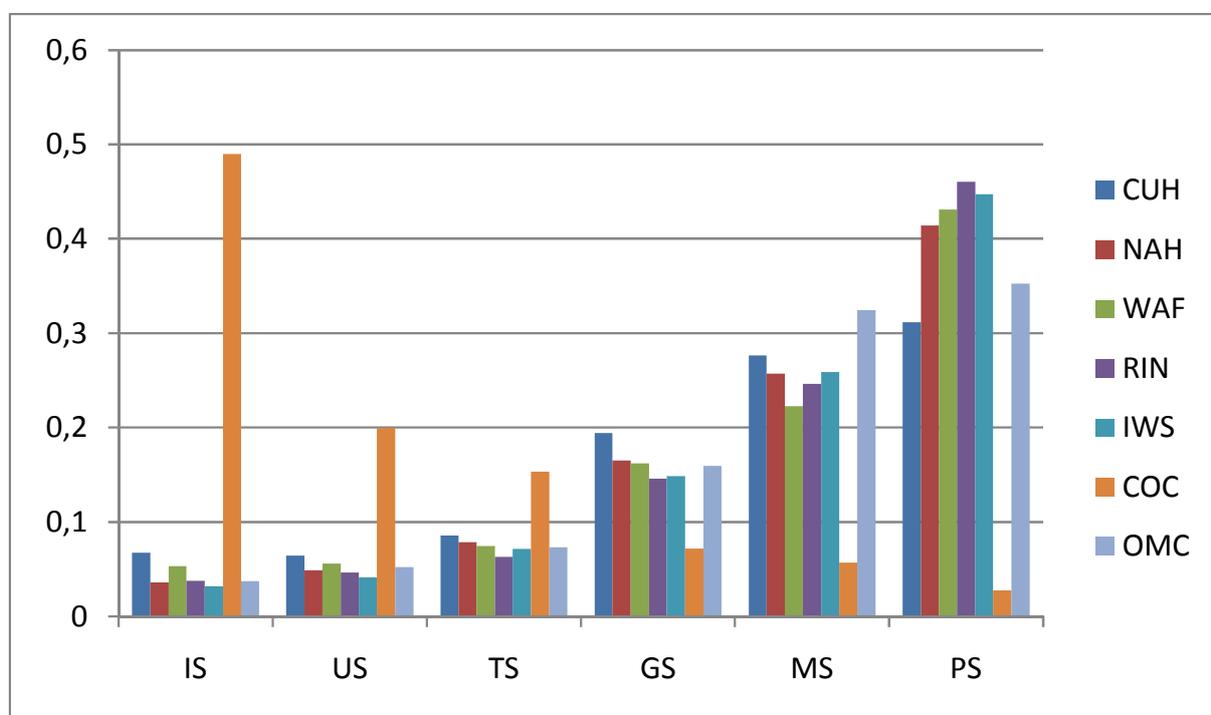


Fig. 56. Pesos de cada alternativa para cada uno de los criterios.

Por último presentamos la matriz que relaciona los pesos de cada alternativa para cada uno de los criterios.

	CUH	NAH	WAF	RIN	IWS	COC	OMC	Prioridad Global
<b>IS</b>	0.0672	0.036	0.0531	0.0377	0.0318	0.49	0.0375	0.0585
<b>US</b>	0.0643	0.0488	0.0561	0.0463	0.0415	0.1999	0.0525	0.0562
<b>TS</b>	0.0856	0.0787	0.0744	0.0633	0.0717	0.1534	0.0733	0.0771
<b>GS</b>	0.1943	0.1652	0.1623	0.146	0.1488	0.0721	0.1595	0.1625
<b>MS</b>	0.2767	0.2572	0.2229	0.2464	0.259	0.0571	0.3245	0.2568
<b>PS</b>	0.3118	0.4141	0.4312	0.4603	0.4472	0.0276	0.3526	0.3890

*Tabla 21. Peso de las alternativas para cada uno de los criterios.*

Hemos añadido una columna denominada prioridad global, que se obtiene para cada alternativa, ponderando el peso de cada criterio por el peso de la alternativa para cada criterio y sumando todos los productos. Aunque vamos a utilizar el método VIKOR para determinar la solución de compromiso, según esta valoración, la solución PS sería la más adecuada, con una prioridad global del 38.9%.

#### 4.4.- Obtención de la Sección Transversal de consenso por el Método VIKOR.

En el apartado 3.3 hemos descrito los fundamentos matemáticos del método VIKOR. Vamos seguidamente a aplicarlo a nuestro caso particular.

Como dijimos, el método VIKOR se utiliza para llegar a un consenso en la selección del proyecto de rehabilitación que estamos analizando. Como Opricovic (2009) expone, esta solución alcanza una utilidad máxima de grupos de la mayoría y un lamento

individual mínimo. Los proyectos de rehabilitación son evaluados de acuerdo con los criterios; la solución de compromiso se obtiene mediante la comparación de la medida de la cercanía con el proyecto ideal (Tavakkoli-Moghaddam y Mousave, 2011; Fallahpour y Moghassem, 2012). Se va a determinar la solución del proyecto de rehabilitación de compromiso del conjunto de  $J$  proyectos factibles  $RP_1, RP_2, \dots, RP_j, j = 1, \dots, 6$ , evaluada según siete criterios. Los valores de entrada son los datos de la matriz de decisión con los vectores de prioridad de las diferentes secciones transversales del río respecto a cada criterio que se obtuvo en el apartado anterior y que se vuelve a presentar seguidamente.

	CUH	NAH	WAF	RIN	IWS	COC	OMC
IS	0.0672	0.0360	0.0531	0.0377	0.0318	0.4900	0.0375
US	0.0643	0.0488	0.0561	0.0463	0.0415	0.1999	0.0525
TS	0.0856	0.0787	0.0744	0.0633	0.0717	0.1534	0.0733
GS	0.1943	0.1652	0.1623	0.146	0.1488	0.0721	0.1595
MS	0.2767	0.2572	0.2229	0.2464	0.2590	0.0571	0.3245
PS	0.3118	0.4141	0.4312	0.4603	0.4472	0.0276	0.3526

Tabla 22. Peso de las alternativas para cada uno de los criterios. Matriz de partida para el método VIKOR

En primer lugar, calcularemos la mejor  $f_j^*$  y los peores valores  $f_j^-$  de todos los criterios de la siguiente forma:

$$f_j^* = \max_i \{x_{ij}\} \quad (35)$$

$$f_j^- = \min_i \{x_{ij}\} \quad (36)$$

Para ello, transponemos la matriz anterior, y añadimos dos columnas donde se presentan los valores de  $f_j^*$  y  $f_j^-$

	IS	US	TS	GS	MS	PS	$f_j^*$	$f_j^-$
<b>CUH</b>	0.0672	0.0643	0.1423	0.1666	0.2767	0.3118	0.3118	0.0643
<b>NAH</b>	0.0360	0.0488	0.1321	0.1600	0.2572	0.6175	0.6175	0.0360
<b>WAF</b>	0.0531	0.0561	0.0895	0.1887	0.2229	0.5943	0.5943	0.0531
<b>RIN</b>	0.0377	0.0463	0.0895	0.1887	0.2464	0.5943	0.5943	0.0377
<b>IWS</b>	0.0318	0.0415	0.0947	0.1858	0.2590	0.6349	0.6349	0.0318
<b>COC</b>	0.4900	0.1998	0.1167	0.0972	0.0571	0.0435	0.4900	0.0435
<b>OMC</b>	0.0375	0.0525	0.3043	0.3043	0.3245	0.3043	0.3245	0.0375

Tabla 23. Matriz transpuesta y obtención de las variables  $f_j^*$  y  $f_j^-$

En segundo lugar, el grupo de los valores de  $S_i$  and  $R_i$  se calculan con las fórmulas siguientes:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (37)$$

$$R_i = \max_j w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (38)$$

Donde  $w_j$  son las prioridades de los criterios, obtenidas en nuestro caso por el método AHP.

Para ello creamos las matrices siguientes, donde se aportan los datos necesarios. Los valores  $a_{ij}$  de la matriz son el resultado de restar  $f_j^*$  menos los valores de la matriz transpuesta anterior.

	IS	US	TS	GS	MS	PS	$f_j^*$	$f_j^-$	$a_j = \frac{f_j^*}{f_j^-}$	$w_j$
	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6				
<b>CUH j=1</b>	0.2446	0.2475	0.1696	0.1452	0.0352	0.0000	0.3118	0.0643	0.2475	0.2800
<b>NAH j=2</b>	0.5815	0.5687	0.4855	0.4575	0.3603	0.0000	0.6175	0.0360	0.5815	0.1405
<b>WAF j=3</b>	0.5412	0.5382	0.5048	0.4057	0.3715	0.0000	0.5943	0.0531	0.5412	0.0594
<b>RIN j=4</b>	0.5566	0.5480	0.5048	0.4057	0.3479	0.0000	0.5943	0.0377	0.5566	0.2478
<b>IWS j=5</b>	0.6031	0.5934	0.5402	0.4490	0.3758	0.0000	0.6349	0.0318	0.6031	0.1805
<b>COC j=6</b>	0.0000	0.2901	0.3733	0.3928	0.4328	0.4464	0.4900	0.0435	0.4464	0.0287
<b>OMC j=7</b>	0.2870	0.2720	0.0202	0.0202	0.0000	0.0202	0.3245	0.0375	0.2870	0.0632

Tabla 24. Matriz auxiliar para cálculo de la lista de valores  $S$  y  $R$

A continuación creamos una matriz en la que cada elemento tiene el siguiente valor:

$$a_{ji} = w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (39)$$

Además obtenemos  $S_i$  como la suma de los elementos de cada columna y  $R_i$  como el valor máximo de esa columna. Se aportan todos los datos en la misma matriz.

	IS	US	TS	GS	MS	PS
	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6
<b>CUH j=1</b>	0.2767	0.2800	0.1918	0.1643	0.0398	0.0000
<b>NAH j=2</b>	0.1405	0.1374	0.1173	0.1105	0.0871	0.0000
<b>WAF j=3</b>	0.0594	0.0590	0.0532	0.0445	0.0407	0.0000
<b>RIN j=4</b>	0.2478	0.2439	0.2247	0.1806	0.1549	0.0000
<b>IWS j=5</b>	0.1805	0.1775	0.1616	0.1343	0.1125	0.0000
<b>COC j=6</b>	0.0000	0.0186	0.0240	0.0252	0.0278	0.0287
<b>OMC j=7</b>	0.0632	0.0599	0.0044	0.0044	0.0000	0.0044
<b><math>S_i</math></b>	0.9681	0.9765	0.7793	0.7793	0.4627	0.0331
<b><math>R_i</math></b>	0.2767	0.2800	0.1918	0.1643	0.1549	0.0287

Tabla 25. Matriz para el cálculo de los valores  $S_i$  y  $R_i$

En tercer lugar, los valores de  $Q_j$  se calculan como sigue:

$$Q_i = \gamma \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - \gamma) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (40)$$

dónde, el valor de  $\gamma = 0.5$  se aplica como un peso para una estrategia de consenso, tal y como explicamos en el apartado 3.3. Los resultados se muestran en la siguiente tabla. Además, en nuestro caso se tienen los siguientes valores de las variables:

$$S^- = \max (S_i) = 0.9765$$

$$S^* = \min (S_i) = 0.0331$$

$$R^- = \max (R_i) = 0.2800$$

$$R^* = \min (R_i) = 0.0287$$

	IS	US	TS	GS	MS	PS
	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6
<b>S<sub>i</sub></b>	0.9681	0.9765	0.7793	0.7793	0.4627	0.0331
<b>R<sub>i</sub></b>	0.2767	0.2800	0.1918	0.1643	0.1549	0.0287
<b>Q<sub>i</sub></b>	0.9890	1.0000	0.7855	0.6977	0.4787	0.0000

*Tabla 26. Matriz para el cálculo de los valores  $Q_i$*

En la tabla anterior, ya hemos presentado la relación de valores S, R y Q para todas las secciones.

En principio, la solución de compromiso a proponer será la PS, cuyo valor de  $Q$  es mínimo.

Además, las dos condiciones de ventaja y estabilidad aceptables son también satisfechas como se muestra a continuación:

- Ventaja aceptable:

La diferencia entre los proyectos de rehabilitación PS y MS, que son los dos con menores valores de la variable  $Q$  satisface:

$$Q(MS) - Q(PS) = 0.4787 \geq DQ \quad (41)$$

dónde,

$$DQ = 1/(J-1) = 0.2 \quad (42)$$

En nuestro caso, sabemos que  $j=6$ .

- Estabilidad aceptable: La sección transversal PS es la mejor clasificada por  $Q$  y también por  $S$  y  $R$ , como se muestra en la Tabla anterior.

Por lo tanto, al cumplirse las dos condiciones de ventaja y estabilidad, la propuesta como solución de compromiso es la Sección transversal trapezoidal denominado proyecto de rehabilitación PS.

## 4.5.- Descripción de la actuación llevada a cabo.

### Problemática.

El entorno del río Huécar dentro de la ciudad permite realizar una ruta cultural que discurre desde la desembocadura cerca del Parque Palafox y el puente de la Trinidad hasta el puente sobre el río que une con la carretera a Palomera y Molinos de Papel. Esta bonita ruta la comenzaremos en la Iglesia del Salvador (s. XVII). Durante el s. XIX fue la iglesia más importante de la ciudad. De estilo neogótico y situada en el barrio del Salvador. Bajando por la calle San Vicente, a la derecha veremos las Escuelas del Obispo Palafox, y continuando por la calle Alonso de Ojeda se llega a la calle de la Moneda, calle estrechísima cargada de historia, en la que vivían gran cantidad de moriscos. Tras atravesar el túnel y pasar sobre el río Huécar, nos encontramos con la otra calle histórica: la calle de los Tintes, donde tenían su taller los artesanos que conseguían los denominados "colores de Cuenca", utilizados para teñir las lanas que tanta fama dieron a la ciudad. Destaca la antigua muralla y las fachadas con abundante coloración.

A la izquierda, un poco más allá, las Escalerillas del Gallo, en la calle de los Tintes, donde se llega a la Puerta de Valencia (de la que sólo se conserva el nombre y que fue una de las puertas de Cuenca, hoy desaparecida, donde cuentan que descansaron las tropas de Alfonso VIII). Allí se puede contemplar el Convento de la Concepción Franciscana (S.XVI) conocido por los conquenses como las Concepcionistas de la Puerta de Valencia. Fundado en 1504 y con dos escudos sobre la portada. Un edificio a destacar en esta zona: la Casa de las Rejas, con cuatro enormes y magníficas rejas y el escudo de la familia destacada que vivió aquí (hoy es un conocido establecimiento hotelero). Cruzaremos el puente sobre el río Huécar desde donde comenzaremos nuestro paseo bordeando el río y

disfrutando de las vistas del barrio de San Martín. Pasamos junto al Teatro-Auditorio de Cuenca. Bonita construcción entre las rocas de la Hoz del Huécar inaugurado el año 1994. Siguiendo el paseo, cogeremos el camino de la derecha (el de la cuesta) que nos conduce al Parador Nacional de Turismo y al Puente de San Pablo.

El camino de la izquierda nos conduce a los dos pueblos conuenses con encanto citado: Molinos de Papel y Palomera. Merece la pena subir la cuesta, pues una vez arriba, podemos contemplar las pictóricas vistas de la Hoz del Huécar, las Casas Colgadas, el Parador Nacional de Turismo (antiguo convento de San Pablo) y la Iglesia de San Pablo.

En todo este entorno se encuentra el río Huécar. Como hemos dicho, el río se encaja en la orografía formando una hoz a su paso por la ciudad. Se caracteriza por su escaso caudal y su irregularidad. Este hecho junto con su situación totalmente dentro del casco urbano había llevado a una sucesiva degradación del cauce, que se centró en los tres aspectos siguientes:

- Desaparición del paisaje fluvial con una actuación dura sobre el cauce, con muros de mampostería y solera de hormigón.
- Utilización del cauce para el trazado de canalizaciones y servicios urbanos
- Frecuente utilización del cauce como vertedero incontrolado.

Todo ello condujo a que se adivinara en el río Huécar a su paso por Cuenca una situación contradictoria: un intenso proceso de deterioro del río junto a un conjunto patrimonial histórico y cultural importantísimo.

Con objeto de revitalizar el cauce y proceder a una integración adecuada, devolviéndole su carácter inicial, se decidió acometer las obras de mejora del encauzamiento del Huécar a su paso por Cuenca.

### Descripción del proyecto y de las actuaciones

Se redactaron dos proyectos y se ejecutaron las obras para la mejora del río Huécar: “Proyecto de acondicionamiento medioambiental del encauzamiento urbano del río Huécar (Cuenca)” y “Obras complementarias del proyecto de acondicionamiento medioambiental del encauzamiento urbano del río Huécar (Cuenca)”. En ambos casos, se fijaron fundamentalmente dos objetivos:

- a) Mejora de la capacidad hidráulica del cauce.
- b) Mejora de las condiciones ambientales del cauce y recuperación del carácter del río.

Para obtener estos objetivos, se contó con una serie de condicionantes:

- a) El cauce está totalmente encajado en la trama urbana, contando para la actuación estrictamente con el actual cauce que se limita por los muros de contención del mismo.
- b) El cauce tiene un régimen irregular, no discurrendo en general caudal por el mismo.

El proyecto prevé la actuación en una longitud de 1.060 m, desde la desembocadura del Huécar en el Júcar hasta el puente sobre el río de la carretera de Palomera.

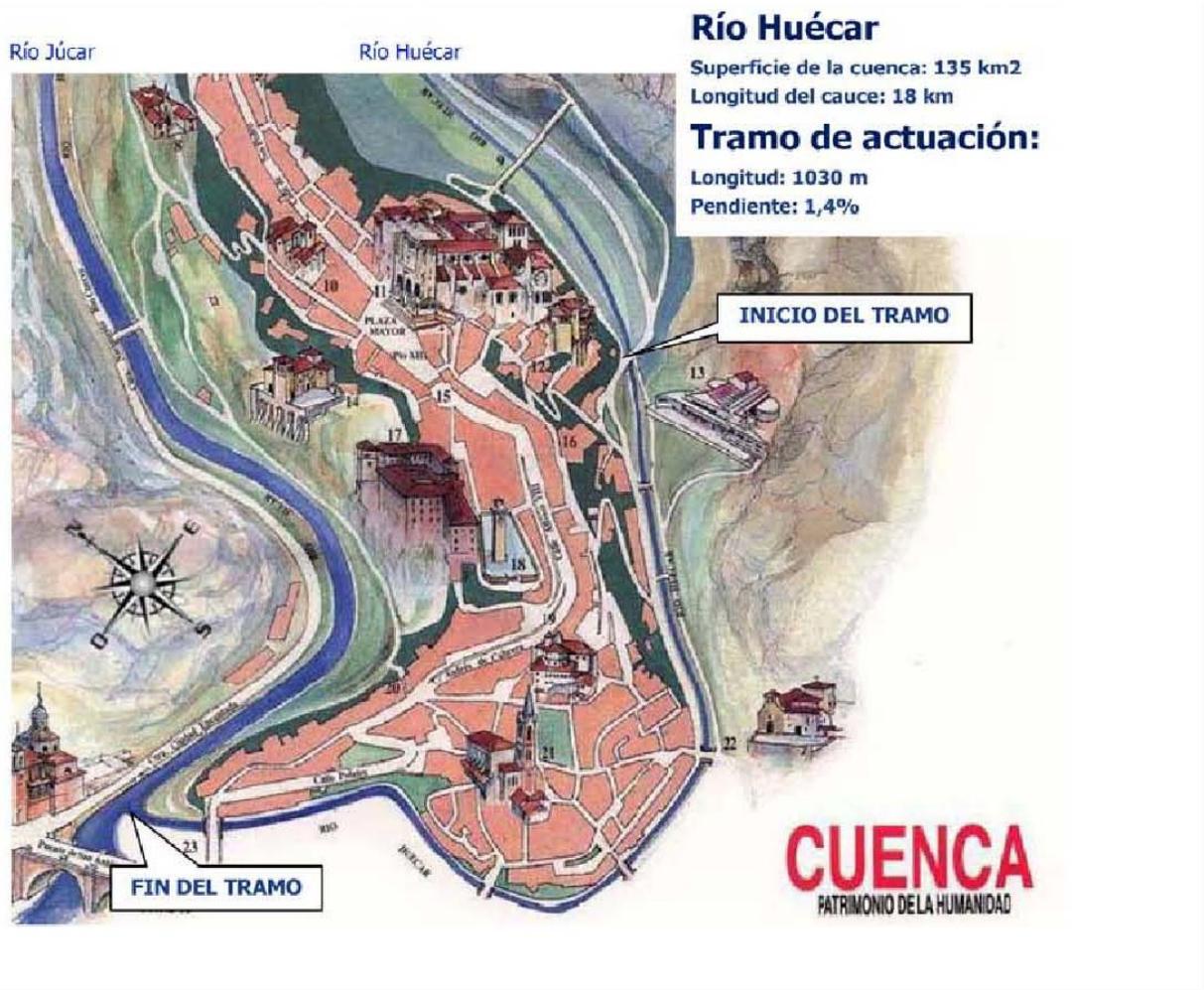


Fig. 57. Esquema del tramo del cauce del río Huécar sobre el que se actúa y características del mismo.  
 (Fuente: Fernández, 2012)

La propuesta pasa por realizar en el cauce una regularización del mismo, además de conseguir una sección más natural, permitiendo incluso la plantación de vegetación en unas terrazas en ambos lados.

Se modifica la sección transversal, plasmando la sección elegida a partir de la metodología utilizada para la obtención de la solución de compromiso descrita en los puntos anteriores.

Se pasa de una sección rectangular a una trapezoidal. Una de las premisas fundamentales de la actuación, como dijimos, fue la mejora de la capacidad hidráulica del cauce. La disposición de la vegetación citada en las terrazas laterales debía además mejorar más la citada capacidad hidráulica del cauce. Para ello se debería aumentar la sección mediante la excavación del fondo. El necesario aumento de la sección traería aparejado un riesgo de descalce de los muros de contención existentes, de los que no se conocía la cota y el tipo de su cimentación, además de contar con muchas reservas sobre su futura estabilidad.

Para solucionar todos estos condicionantes, se optó por un cajado del cauce en la zona central, que implicaba la mejora de las condiciones hidráulicas, además de la disposición de las terrazas laterales más elevadas donde disponer la vegetación prevista, compuestas por especies adecuadas, que dieran al cauce un carácter más natural. A ello también colaboraría el tratamiento dado a la solera, que dejaría de ser de hormigón, para pasar a estar formada por una capa de escollera. Las terrazas servirían, además para estabilizar los muros existentes, sirviendo de protección para evitar los descalces posibles por el flujo hidráulico.

La vegetación prevista en las terrazas estaría sobre el nivel de las aguas, pudiendo estar inundada en momentos de crecida.

En segundo lugar, se decidió dar al río un caudal ficticio de agua, que permitiese acentuar más su carácter, evitando así la sensación existente sobre el río hasta el momento, en que se consideraba el mismo incluso como posible vertedero. Para ello se decidió aprovechar el frecuente excedente de agua con el que cuentan los depósitos de abastecimiento a la ciudad. Hasta ese momento, dicho excedente era vertido sin ningún fin. Se decidió realizar las obras necesarias para canalizar dicho excedente de agua, haciéndolo pasar por el tramo urbano del río. Se prolongó una canalización hasta el puente de la carretera de Palomera. Allí se realizó una salida de agua al cauce de forma que dicho caudal discurriría por el mismo hasta desembocar al Júcar, dando una utilidad paisajística

a dicho caudal que hasta ahora era vertido sin más. Para evitar usos de caudal indebido y para los momentos en que no se dispusiera de dicho caudal excedentario se construyó una estación de bombeo en el río Júcar, en la zona denominada Recreo Peral. Dicho bombeo, formado por dos bombas sumergibles verticales, tomaría caudal del Júcar, bombeándolo hasta el mismo punto de salida anterior. Un sistema de automatización y telemando, discriminaría cuando se pone en funcionamiento el bombeo o no en función de dos variables: nivel del agua en los depósitos de abastecimiento y nivel del agua en el cauce, de forma que tan solo se utilizara el bombeo cuando no exista excedente de caudal de abastecimiento y tampoco discurra caudal natural por el río.

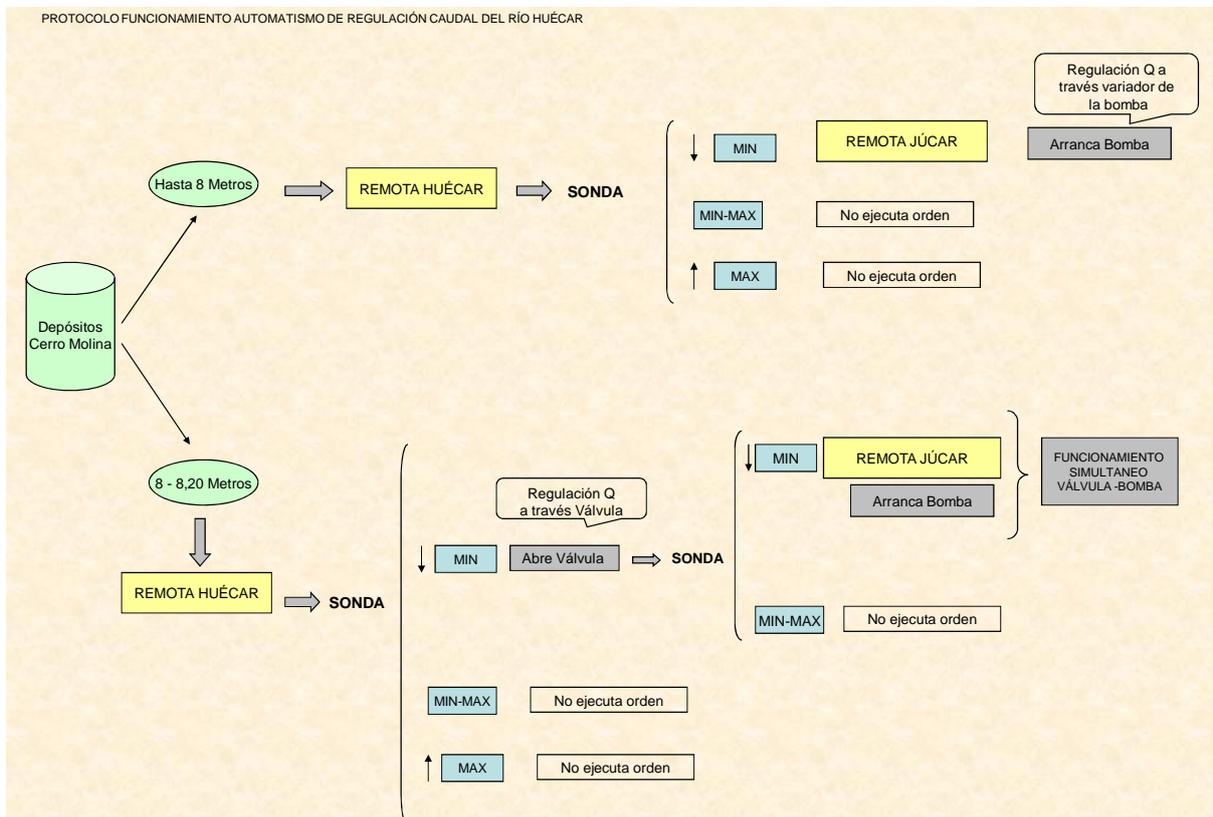


Fig. 58.- Esquema de funcionamiento del telemando del río Huécar.

Al punto de salida se le dio un tratamiento especial, construyendo una fuente mediante escollera que quedara totalmente integrada en el entorno, sin afectar al flujo del cauce, dándole a todo el conjunto un carácter natural. Por último, el perfil longitudinal del cauce se corrigió mediante la construcción de tramos pseudo-horizontales y pequeños saltos que crean zonas tranquilas, así como caídas de agua que ambientan acústicamente el entorno del río.

En las siguientes imágenes se muestra gráficamente la actuación que se llevó a cabo, una vez ejecutada de la solución de compromiso obtenida tras la aplicación del método desarrollado en esta tesis.



*Fig. 59. Río Huécar. Vista del cauce antes de la actuación.*



*Fig. 60. Río Huécar. Vista del cauce tras la actuación.*



*Fig. 61. Vista del estado anterior a la actuación y tras la misma en la Calle de Los Tintes. Se crean resaltos naturales en el cauce que permite mantener una lámina de agua permitiendo crear un ecosistema fluvial y hacer presente el río en el entorno (aspecto sonoro).  
(Fuente: Fernández, 2012)*



*Fig. 62. Vista del estado anterior a la actuación y tras la misma en otro punto del cauce del río. De nuevo se aprecia la creación de saltos de agua, así como una zona de vegetación en los márgenes del cauce.  
(Fuente: Fernández, 2012)*



Fig. 63. Vista del estado anterior a la actuación y tras la misma en la calle de Los Tintes cerca del Parque del Huécar. Los saltos de hormigón se naturalizan, se mantiene una lámina de agua constante y se genera una franja de vegetación en los márgenes del cauce.

(Fuente: Fernández, 2012)

ACTUACIÓN	EFECTOS			
	Hidráulico	Ambiental	Escénico	Social
<b>Naturalización del lecho</b>	Aumenta la rugosidad. Es necesario rebajar la cota del lecho para mantener la capacidad de evacuación	Recuperación del lecho como soporte de vida. Pueden desarrollarse macroinvertebrados y macrófitas.	Recupera la imagen de río	
<b>Sucesión de rápidos y remansos</b>	Disipación de energía	Generar diversidad de biotopos acuáticos Asegurar la transitabilidad del tramo para la ictiofauna	Aportar diversidad escénica a la lámina de agua	
<b>Adecuación de la vegetación</b>	Ordenar con criterios hidráulicos, ambientales y estéticos las terrazas del cauce de avenida.	Incorporar vegetación al lecho y orillas	Recuperar una orla de vegetación riparia	
<b>Asegurar un flujo permanente de agua</b>			Mantener la impronta fluvial a lo largo de todo el año.	
<b>Participación pública</b>				Educar Concienciar Implicar Complicidad

Tabla 27. Resumen de las actuaciones adoptadas y los efectos conseguidos (Fuente: Fernández, 2012)

## **CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES**

---



## 5.- CONCLUSIONES.

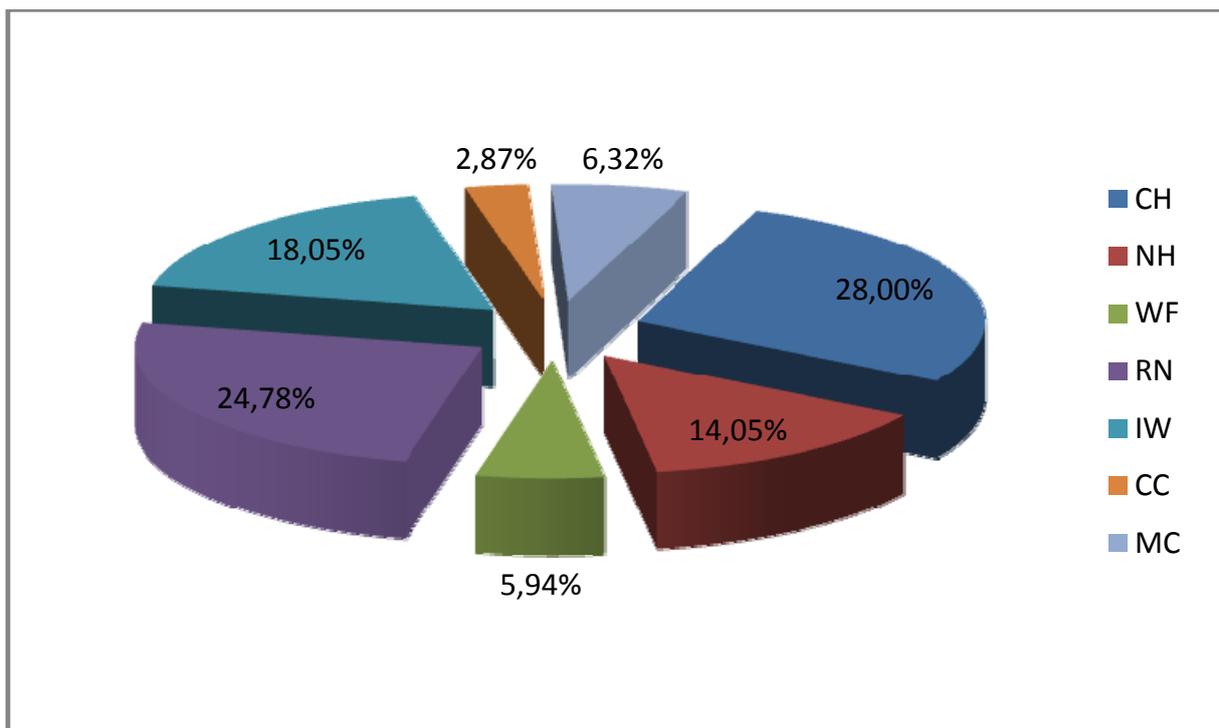
Los proyectos de mejora de los ríos tienden a orientarse en dos principales líneas de actuación. Por un lado, la defensa y prevención de avenidas e inundaciones, siguiendo criterios hidráulicos, para reducir los riesgos y daños sobre personas y bienes. Por otro lado, la mejora medioambiental e integración del río en su entorno considerando el río como un ecosistema fluvial sensible y complejo. Ambas líneas de actuación, en muchos casos contrapuestas, han de compatibilizarse. Actualmente, esta segunda línea de actuación es la asignatura pendiente en muchos núcleos urbanos en los cuales se ha aplicado tradicional y exclusivamente la primera línea de actuación; proscribiendo y marginado el río, en detrimento de otros aspectos también importantes; calidad de vida, estéticos, patrimoniales, turísticos, socioeconómicos y sanitarios.

Este trabajo se centra en la mejora medioambiental de los ríos en entornos urbanos; integrando el entorno con el cauce fluvial y respetando el ecosistema, sin olvidar los aspectos de defensa y prevención de inundaciones. Todo proyecto que actúe para mejorar un tramo fluvial debe considerar numerosos factores: hidráulicos, hidrológicos, ambientales, culturales, sociales, de ocio, etc. El diseño de la solución más idónea es complejo debido a la gran cantidad de factores que influyen. Asimismo, para garantizar la selección de dicha solución idónea hay considerar en el proceso de decisión un panel multidisciplinar de expertos, dada la especialización existente en los diversos campos científicos que convergen en el problema.

En este trabajo se presenta un método multicriterio para elegir la solución idónea en la actuación de mejora medioambiental de un río en un entorno urbano. El método propuesto se basa fundamentalmente en el Proceso Analítico Jerárquico, apoyado por los métodos Delphi y VIKOR. Con este método es más fácil llegar a un consenso, salvando las particularidades de cada experto. En

efecto, tras obtener los pesos de cada una de las alternativas y criterios, el método VIKOR proporciona una solución estable y de compromiso entre los expertos consultados. El uso del método Delphi permite la obtención de los diferentes criterios a adoptar, así como datos de preferencias entre los diferentes criterios por parte de los diferentes expertos participantes en la ponderación de los criterios. Esta metodología depende de la importancia dada por los expertos a los diferentes criterios.

La solución de compromiso estable lograda con el sistema soporte de decisiones híbrido propuesto tiene en cuenta diferentes aspectos como la cultura, paisaje urbano, medioambientales y económicos. El proyecto de rehabilitación se selecciona utilizando la experiencia del grupo de expertos en todos los cuestionarios como se muestra en las Tablas 13, 14a y 14b. Estos cuestionarios se han gestionado mediante el método Delphi. Las prioridades de los criterios y los proyectos de rehabilitación se han evaluado aplicando el método de AHP. Los criterios más valorados por los panelistas han sido CUH y RIN con el 28% y 25% respectivamente. En tercera posición, criterio IWS ha obtenido un peso de 18%. Los cuatro criterios restantes representan un 29% del total. Todos estos datos se presentan en la Tabla 17. En la Figura 64 se muestran los porcentajes de ponderación obtenidos para cada uno de los criterios tras procesar todos los datos obtenidos de las encuestas a los expertos consultados.



*Fig. 64.-Porcentajes de ponderación obtenidos para los diferentes criterios adoptados*

Lo mismo se hace con las alternativas, obteniendo los datos de las preferencias de las mismas respecto a cada criterio para los diversos expertos, ver Tabla 16. La participación de diversos expertos, de forma anónima, permite independizar la resolución de la ponderación de los criterios de la subjetividad y de los datos disponibles del responsable del proyecto. Además, se aprovecha la experiencia de estos expertos. Por último, este anonimato permite más libertad en las valoraciones, lo que conlleva resultados más cercanos a la objetividad. Con el método AHP, a partir de los datos obtenidos por las encuestas del método Delphi, se obtiene la ponderación de los criterios que se valoran, respecto al objetivo, cuyos resultados obtenidos se plasman en la Figura 64, y la ponderación de las alternativas respecto a cada criterio, ver Figura 65, donde se plasma los porcentajes de ponderación obtenidos por las alternativas planteadas para cada uno de estos criterios.

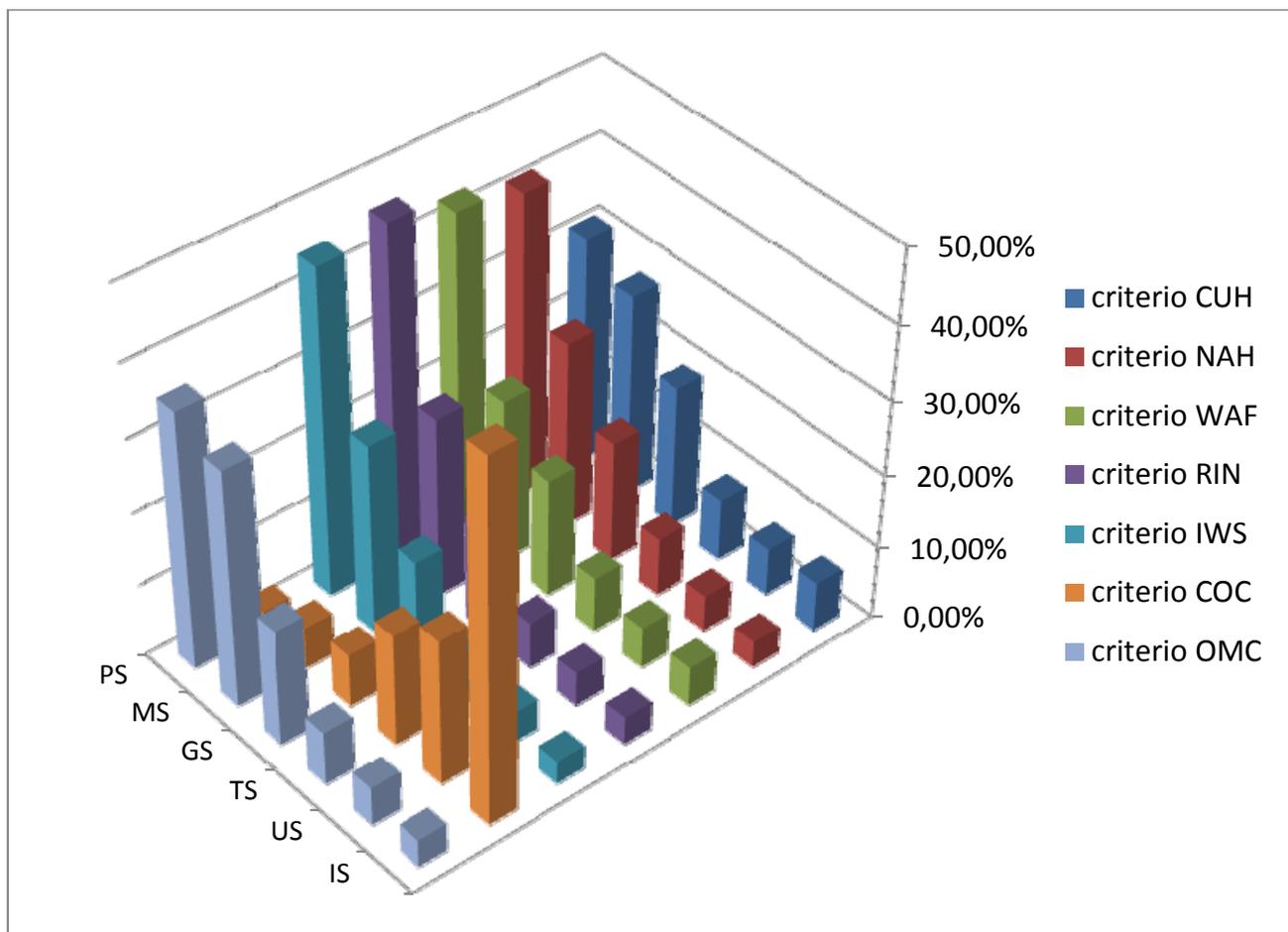


Fig. 65.-Porcentajes de ponderación obtenidos por las alternativas para cada uno de los criterios.

Se aprecia que, en nuestro caso, los porcentajes de ponderación de las diferentes alternativas siguen una tendencia común para todos los criterios, excepto para el criterio COC (Coste de construcción) donde los porcentajes toman valores totalmente inversos, las alternativas más ponderadas con los otros criterios son las peores en este caso; y viceversa. El peso de la estrategia de la toma de decisiones en VIKOR ha sido ajustado a 0.5, es decir por consenso. En el análisis VIKOR ha destacado la sección PS como la mejor opción. La sección transversal PS ha conseguido una ventaja y una estabilidad aceptable sobre la sección transversal de MS, valorada como segunda, como se muestra en las Tabla 25 y la Tabla 26. En

la gráfica siguiente, se plasman los valores de las Variables  $S_j$ ,  $R_j$  y  $Q_j$ , utilizadas para determinar la solución de compromiso.

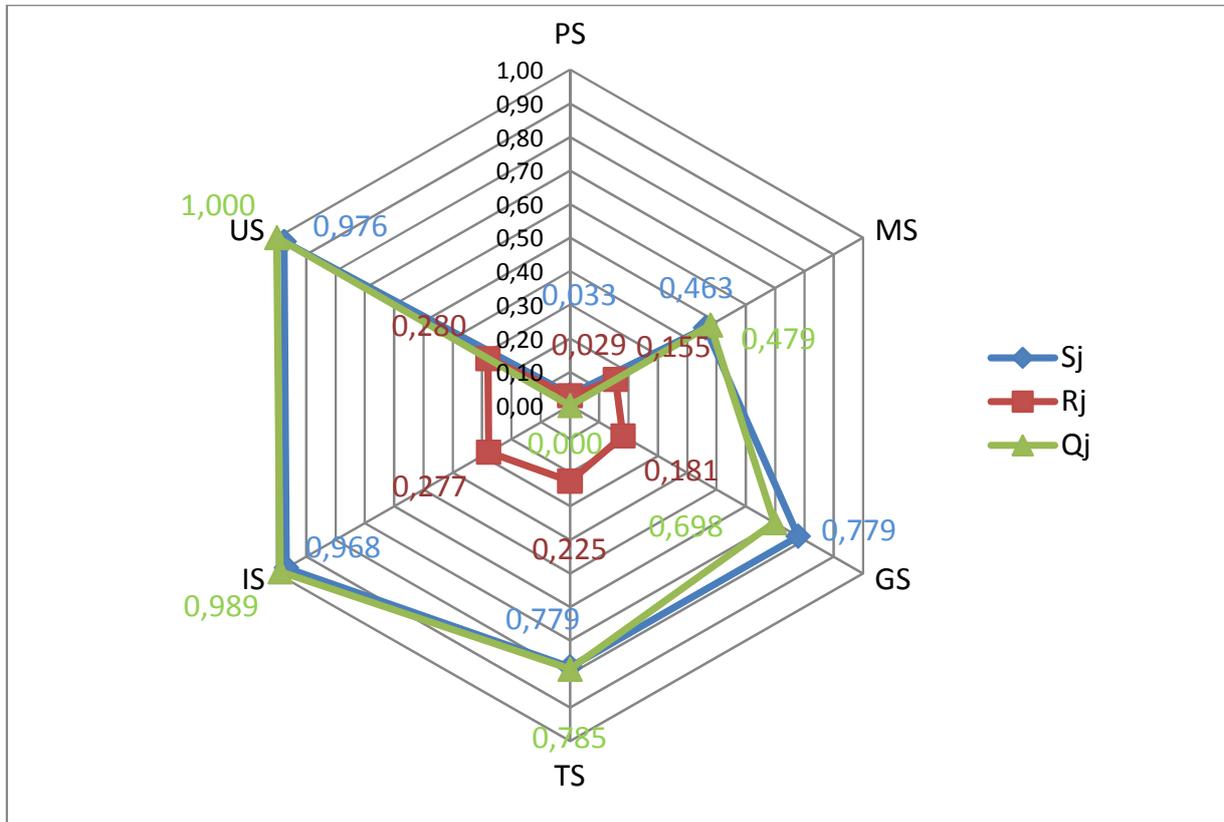


Fig. 66.-Plasmación gráfica de las variables obtenidas por el método VIKOR para cada una de las alternativas

Por lo tanto, el desarrollo de la solución de proyecto PS facilitaría la integración óptima del río en la ciudad medieval de Cuenca.

El modelo híbrido propuesto ha demostrado ser un método fiable de decisiones. Se puede observar en la Figura 66 una clara diferencia entre el PS y GS y las otras cuatro secciones transversales. Estas diferencias se muestran especialmente en la integración de las edificaciones históricas y el paisaje urbano, que se corresponde con los criterios CUH y NAH. Por otra parte, en estos proyectos de

rehabilitación hay una mejora de los aspectos ambientales que corresponden a los criterios de RIN, IWS y WAF. Además, el proyecto de rehabilitación PS aumenta la vegetación ribereña y el agua en movimiento causando una disminución mayor de las temperaturas en el entorno y una disminución del ruido del tráfico sobre este histórico entorno urbano, de acuerdo con el criterio de IWS.

El método híbrido Delphi-AHP-VIKOR propuesto ha sido útil para lograr un proyecto consensuado de rehabilitación de un río en un entorno urbano clasificado por sus altos valores patrimoniales, como es el río Huécar a su paso por la ciudad de Cuenca, a través de un sistema de soporte de decisiones estructurado utilizando un panel multidisciplinar de expertos. Los resultados obtenidos indican que una buena decisión en la etapa de diseño puede proporcionar una solución satisfactoria. Se comprueba la alta aceptación de la presente actuación de mejora fluvial realizada en el ámbito de los foros de expertos en este tipo de actuaciones además de tener esta obra una alta consideración social, política y económica tanto a escala regional como en la propia ciudad de Cuenca.

A partir del contenido de esta tesis, se considera que pueden abrirse varios campos de investigación: Se considera que el sistema es aplicable en su generalización, por lo que se podría utilizar para las diferentes actuaciones de mejora medioambiental de ríos, y además de aplicarse en cualquier ubicación, también se podría investigar su utilidad en proyectos de actuación sobre ríos en fases previas. En este caso, se analizarían alternativas relacionadas con la planificación de las actuaciones, de forma que se permitiese obtener soluciones más globales. Se llegarían a soluciones de compromiso en las que se definiría la orientación en que deberían ir las actuaciones. Estas, posteriormente, se definirían y concretarían en el proyecto correspondiente, pudiéndose aplicar de nuevo el método como se ha hecho en este caso.

## **CAPÍTULO 6.- REFERENCIAS**

---



## 6.- REFERENCIAS.

Adams, S.J. 2001. Projecting the next decade in safety management: a Delphi technique study. *Professional Safety* 46 (10), 26-29.

Allan, J.D., Castillo, M. 2007. *Stream Ecology*. Ediciones Springer. 317-357.

Alvarsson, J.J., Wiens, S., Nilsson, M.E. 2010. Stress recovery during exposure to nature sound and environmental noise. *International Journal of environmental research and public health* 7 (3) 1036-1046.

Arumi, J.L., Rivera, D., Muñoz, E., Billib, M. 2012. Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Bío Bío de Chile. *Obras y Proyectos* 12, 4-13.

Belton, V., Stewart, T. 2002. Multiple criteria decision analysis. An integrated approach. Ed. Kluwer Academic Publishers. 39-52.

Bosch, A. P. 2001. Sobreexplotación de acuíferos y desarrollo sostenible. Problemática de la gestión del agua en regiones semiáridas. Instituto de Estudios Almerienses. 115-132.

Cabezas, F., Simón, A., Romero, R., Bueno, F. 2009. Mito y verdad de la Directiva Marco. *Ingeniería y Territorio* 85, 84-95.

Canto-Perello, J., Martinez-Garcia, M.P., Curiel-Esparza, J., Martin-Utrillas, M. 2015. Implementing sustainability criteria for selecting allana roof assembly typology in medium span buildings. *Sustainability* 7 (6), 6854-6871.

Carles, J.L., Lopez-Barrio, I., Lucio, J.V. 1999. Sound influence on landscape values. *Landscape and Urban Planning* 43 (4), 191-200.

Casini, M., Mocenni, C., Poletti, S., Pranzo, M. 2015. Decision support system development for integrated management of European coastal lagoons. *Environmental Modelling and Software* 64, 47-57.

Chin, A. 2006. Urban transformation of river landscapes in a global context. *Geomorphology* 79 (3-4), 460-487.

Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2007. "Proyecto de acondicionamiento medioambiental del encauzamiento urbano del río Huécar (Cuenca)".

Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2007. "Obras complementarias del proyecto de acondicionamiento medioambiental del encauzamiento urbano del río Huécar (Cuenca)".

Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2010. "Proyecto de adecuación de la desembocadura del río Palancia".

Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2010. Obras complementarias del "Proyecto de adecuación de la desembocadura del río Palancia".

Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2009. "Proyecto de Restauración y Acondicionamiento Medioambiental del río Valdemembra a su paso por Villanueva de la Jara (Cuenca)".

Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2009. "Proyecto de acondicionamiento del Arroyo de la Cañada en Casasimarro (Cuenca)".

Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2010. Obras Complementarias del

“Proyecto de acondicionamiento del Arroyo de la Cañada en Casasimarro (Cuenca)”.

Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2010. “Proyecto De Obras Accesorias Del Acondicionamiento del Arroyo de la Cañada en Casasimarro (Cuenca)”.

Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2011. “Proyecto de recuperación y acondicionamiento del puente de Villalpardo (Cuenca)”.

Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2010. “Proyecto de restauración y adecuación medioambiental del Júcar a su paso por la ciudad de Cuenca - Fase II”.

Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2007. “Proyecto de Restauración Ambiental del Paraje de Los Nuevos (Cuenca)”. 2007. Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2008. “Proyecto de adecuación ambiental para uso educativo y ecoturístico del Paraje de los Nuevos (Cuenca) y adendas nº 1 y 2”.

Curiel-Esparza, J., Cuenca-Ruiz, M.A., Martin-Utrillas, M., Canto-Perello, J. 2014. Selecting a sustainable disinfection technique for wastewater reuse projects. *Water* 6, 2732-2747.

Delgado-Galvan, X., Izquierdo, J., Benitez J., Perez-Garcia R. 2014. Joint stakeholder decision-making on the management of the Silao-Romita aquifer using AHP. *Environmental Modelling and Software* 51, 310-322.

European Union. 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 Oct 2000 on the management of the water in the EU. Official Journal of the European Union. L 182, 0001-0019.

Fechner, G., Boring E.G., Howes D.H. 1966. Elements of Psychophysics. New York : Holt, Rinehart & Winston. 112-122.

Ferrer, J., Hernández, J.M. 2009. El régimen de caudales mínimos en el nuevo ciclo de planificación hidrológica. Aspectos metodológicos y de concertación social. Ingeniería y Territorio 85, 46-55.

Fallahpour, A.R., Moghassem, A.R. 2012. Evaluating applicability of VIKOR method of multicriteria decision making for parameters selection problem in rotor spinning. Fibers and Polymers 13, 802-808.

Fernández , J.A. 2003, junio. La recuperación de ríos en entornos urbanos: el caso del río Zadorra en Vitoria-Gasteiz. Aula de Ecología Urbana de Vitoria-Gasteiz. Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. Available at <https://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/http/contenidosEstaticos/adjuntos/es/67/40/36740.pdf> (último acceso 13 de agosto 2015).

Fernández, J.A. 2012. Principios básicos de la restauración de ríos en entornos urbanos. El caso de la rehabilitación del río Huécar a su paso por Cuenca. “Ciudad, arte y naturaleza”. XXXIX Congreso de Parques y Jardines Públicos”. Available at [http://oa.upm.es/20911/1/INVE\\_MEM\\_2012\\_131423.pdf](http://oa.upm.es/20911/1/INVE_MEM_2012_131423.pdf) (último acceso 12 agosto 2015).

Ferreira, M.T. 2012. Restauración, rehabilitación y gestión fluvial. Dentro de la publicación Restauración y gestión ecológica fluvial. Ed. Ricover. 15-81.

Forman, E., Peniwati, K., 1998. Aggregating individual judgments and priorities with the Analytic Hierarchy Process, *European Journal of Operational Research* 108, 165– 169.

Galbrun, L., Ali, T.T. 2013. Acoustical and perceptual assessment of water sounds and their use over road traffic noise. *Journal of the Acoustical Society of America* 133 (1), 227- 237.

Garbrecht, J. 1990. Analytical representation of cross-section hydraulic properties. *Journal of Hydrology* 119, 43-56.

Gistau, R. 2000. Las necesidades humanas. *Gestión del abastecimiento humano. Ingeniería y Territorio* 51, 14-21.

Gómez-Orea, D. 2004. Recuperación de espacios degradados. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa. Cap. I, II & XVII.

Gracht, H.A. 2012. Consensus measurement in Delphi studies, review and implications for future quality assurance. *Technology Forecasting Social Change.* 79 (8), 1525-1536.

Gullino P, Larcher F. 2013. Integrity in UNESCO World Heritage Sites. A comparative study for rural landscapes. *Journal of Cultural Heritage* 14, 389-395.

Gurnell, A., Lee, M., South, C. 2007. Urban rivers: Hydrology, Geomorphology, Ecology and Opportunities for change. *Geography Compass* 1, 1118-1137.

Hathway, E.A., Sharples, S. 2012. The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: a UK case study. *Building and Environment* 58, 14-22.

Henderson, F.M. 1996. *Open Channel Flow.* Prentice Hall Ed., New York. 21-44.

Hernandez, S. 2000. Los ríos. El agua como soporte de vida. Ingeniería y Territorio 50, 100-103.

Herrera Espino, J.A. y Marín Pacheco, G, 2000. El tratamiento de los cauces. Ingeniería y Territorio 51. 40-50.

Hsu, C.C., Sandord, B.A. 2007. The Delphi technique: making sense of consensus. Practical Assessment, Research and Evaluation 12 (10), 1-7.

Jeon, J.Y., Lee, P.J., You, J., Kang, J. 2012. Acoustical characteristics of water sounds for soundscape enhancement in urban open spaces. Journal of the Acoustical Society of America 131 (3), 2101- 2109.

Kelly, R.A., Jakeman, A.J., Barreteau, O., Borsuk, M.E., ElSawah, S., Hamilton, S.H., Henriksen, H.J., Kuikka, S., Maier, H.r., Rizzoli, A.E., Delden, H., Voinov, A.A. 2013. Selecting among five common modeling approaches for integrated environmental assessment and management. Environmental Modelling and Software 47, 159-181.

Lane, E. W., 1955. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. Proceedings, American Society of Civil Engineers 745 (7).

Lavandier, C., Defreville, B. 2006. The contribution of sound source characteristics in the assessment of urban soundscapes. Acta Acustica United with Acustica 92 (6) 912-921.

Lee, G.K.L., Chan, E.H.W. 2008. The analytic hierarchy process (AHP) approach for assessment of urban renewal proposals. Social Indicators Research 89 (1), 155-168.

Linstone, H.A. y Turoff, M. 2002. The Delphi method. Techniques and Applications. Available at <http://is.njit.edu/pubs/delphibook/delphibook.pdf> (último acceso 10 octubre 2014).

Liou, J.J.H., Tsai, C., Lin, R., Tzeng, G. 2011. A modified VIKOR multiple criteria decision method for improving domestic airlines service quality. *Journal of Air Transport Management* 17, 57- 61.

Luderitz, V., Speierl, T., Langheinrich, U., Volkl, W., Gersberg, R.M. 2011. Restoration of the Upper Main and Rodach rivers. *Journal of Ecological Engineering* 37(12), 2044- 2055.

Maestu Unturbe, J. 1999. Cómo estamos considerando el medio ambiente en las actuaciones urbanas. Aprendiendo de nuestras propias experiencias. Segundo catálogo español de buenas prácticas. Available at <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n36/acalv.html> (último acceso 2 octubre 2014)

Martin-Utrillas, M., Reyes-Medina, M., Curiel-Esparza, J., Canto-Perello, J. 2015a. Hybrid method for selection of the optimal process of leachate treatment in waste treatment and valorization plants or landfills. *Clean Technology and Environmental Policy* 17, 873-885.

Martin-Utrillas, M., Azorin-Carrion, A., Canto-Perello, J., Curiel-Esparza, J. 2015b. Multi-criteria decision-making model for establishing the optimal typology for clinker storage silos. *ZKG International* 68, 50-58.

Martin-Utrillas, M., Juan-Garcia, F., Canto-Perello, J., Curiel-Esparza, J. 2015c. Optimal infrastructure selection to boost regional sustainable economy. *The International Journal of Sustainable Development and World Ecology* 22, 30-38.

Martín-Vide, J.P. 2002. *Ingeniería de ríos*. Edicions UPC, Barcelona 2002. ISBN: 84-8301-563-3. 25-45.

Martín-Vide, J.P. 2004. Utilidad de la hidráulica fluvial. *Ingeniería y Territorio* 68, 44-50.

Medina A., Galarza F., Carrera J., Alcolea A. 2001. El problema inverso en hidrología subterránea. Aplicaciones. Boletín Geológico y Minero 112, 93-106.

Mejia, A.I., Reed, S.M. 2011. Evaluating the effects of parameterized cross section shapes and simplified routing with a coupled distributed hydrologic and hydraulic model. Journal of Hydrology. 409, 512- 524.

Miller, L.E. 2006. Determining what could/should be: The Delphi Technique and its application. Paper presented at the meeting of the 2006 annual meeting of the Mid-Western Education Research Association, Columbus, Ohio.

Mitsch, W.J., Jorgensen, S.E. 2004. Ecological Engineering and Ecosystem Restoration. John Wiley & Sons, New Jersey. 99-125.

Monclus, F.J. 1997. Ríos, ciudades, parques fluviales, corredores verdes. Ciclo de conferencias "Ríos y Ciudades". Institución Fernando El Católico (C.S.I.C.). Excma. Diputación de Zaragoza. 11-63. Available at <http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0643698.pdf> (último acceso 8 marzo 2015)

Muñoz, J.L. 2012. Fiestas de toros en el coso del Huecar. Biblioteca temas de Cuenca. 23- 26.

Ozdemir, M.S., Saaty, T.L. 2006. The unknown in decision making, what to do about it. European Journal of Operational Research 174 (1), 349-359.

Opricovic, S. 1979. An extension of compromise Programming to the solution of dynamic Multicriteria Problems. 9<sup>th</sup> IFIP Conference on Optimization Techniques.

Opricovic, S., Tzeng, G. 2007. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. European Journal of Operational Research 178, 514- 529.

Opricovic, S. 2009. A Compromise Solution in Water Resources Planning. *Water Resources Management*. 23, 1549-1561.

Radsten-Ekman, M., Axelsson, O., Nilsson, M.E. 2013. Effects of sounds from water on perception of acoustic environments dominated by road-traffic noise. *Acta Acoustica United with Acustica*. 99 (2), 218-225.

Redondo, F.J., Vara, M. 1999. Encauzamientos en zonas urbanas. *Ingeniería y Territorio* 46, 18-30.

Rojas, J.C. 2012. Planificación de suministro eléctrico en aéreas rurales de los países en vías de desarrollo: un marco de referencia para la toma de decisiones. Universidad de Zaragoza. Departamento de Ingeniería eléctrica. Tesis Doctoral. Available at <http://personal.unizar.es/jmyusta/wp-content/uploads/2014/09/Tesis-Juan-Rojas.pdf> (último acceso 10 septiembre 2015).

Roubelat, F. 2011. The Delphi method as a ritual: inquiring the Delphi Oracle. *Technological Forecasting and Social Change* 78 (9), 1491-1499.

Saaty, T.L. 1998. Método analítico Jerárquico (AHP). Principios básicos. En *evaluación y decisión multicriterio. Reflexiones y Experiencias*. Ed. Universidad de Santiago.

Saaty, T.L. 2012a. Global awareness, future city design and decision making. *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 21 (3), 337-355.

Saaty, T.L. 2012b. *Decision making for leaders. The analytic hierarchy process for decisions in a complex world*. Pittsburgh: RWS Publications.

Sayadi, M.K., Heydari, M., Shahanaghi, K. 2009. Extension of VIKOR method for decision making problem with interval numbers. *Applied Mathematical Modelling* 33, 2257-2262.

Sakawa, M., Yano, H. et Nishizaki, I, 2013. Linear and multiobjectiva Programming with fuzzy stochastic Extensions. Ed. Springer. 73-103.

Syamsuddin, J.H. 2010. The use of AHP in security policy decision making: an open office calc application. *Journal of Software* 5 (10), 1162-1169.

Taha, H. 1997. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings* 25, 99-103.

Tamames, R y Rueda, A. 2008. Estructura económica de España. Alianza Editorial.

Tanago, M., García-Jalon, D. 2007. Restauración de Ríos. Guía metodológica para la elaboración de proyectos. Ministerio de Medio Ambiente. Cap.7.

Tanago, M.G., Jalon, D.G., Roman, M. 2012. River Restoration in Spain: Theoretical and Practical Approach in the context of the European Water Framework Directive. *Environmental Management* 50 (1), 123-139.

Tavakkoli-Moghaddam, R., Mousave, S.M. 2011. An integrated AHP-VIKOR methodology for plan location selection. Reserch note. *International Journal of Engineering* 24, 127- 137.

UNESCO. The Historic Walled Town of Cuenca. World Heritage List: Declaration N°781. 1995.

UNESCO. Criteria for Selection for World Heritage List. Retrieved 14 October 2006. Available at <http://whc.unesco.org/en/criteria/> (último acceso 14 octubre 2015).

Ureña, J.M. 1997. La ordenación de los espacios fluviales en las ciudades. Conferencia impartida en Zaragoza en noviembre de 1997 en el ciclo Ríos y Ciudades. Institución Fernando El Católico (C.S.I.C.). Excma. Diputación de Zaragoza. 45-63. Available at <http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0643698.pdf> (último acceso 20 julio 2015).

Ureña, J.M. Ascorbe, V., Canteras, J.C., Garmendia, C., García, J.C., Liaño, A., Puente, L., Rivas, V., Sainz, A. 1999. Ordenación de las áreas fluviales en las ciudades: un enfoque metodológico. Ingeniería y Territorio 46, 4-18.

Valiani, A., Caleffi, V. 2009. Analytical findings for power law cross-sections: uniform flow depth. Advances in Water Resources 32 (9), 1404-1412.

You, J., Lee, P.J., Jeon, J.Y. 2010. Evaluating water sounds to improve the soundscape of urban areas affected by traffic noise. Noise Control Engineering Journal 58 (5) 447-483.