

Determinación de problemas generales de escasez de agua en sistemas regulados en riesgo climático

Beatriz de Lama, Adriadna Chávez, Francisco Martín Carrasco y Luis Garrote

Universidad Politécnica de Madrid

beatriz.delama@upm.es

1 Introducción

Según datos recogidos en el Libro Blanco del Agua en España, existen sistemas de aprovechamiento estructural y coyunturalmente deficitarios, es decir, en ellos sistemáticamente el recurso potencial disponible es inferior al nivel de consumo o están en riesgo de sufrir déficits. Por ejemplo, en esta situación se encuentra una parte importante de los sistemas de explotación de la vertiente mediterránea de la Península Ibérica.

El cambio climático podría ser uno de los factores que afecten a las estrategias de planificación hidráulica. Seguramente en la actualidad no es una cuestión relativamente importante por la incertidumbre de las proyecciones climáticas e hidrológicas, que incide directamente al análisis de la vulnerabilidad del sistema hidráulico al cambio climático.

En general, el efecto del cambio climático sobre la regulación y la función de esta como factor en la adaptación a este fenómeno, no es un tema suficientemente estudiado.

Los estudios realizados hasta ahora sobre este tema en España no son homogéneos, difieren en la escala espacial utilizada, el horizonte temporal, la consideración explícita que realizan del cambio climático y tipo de modelo de impacto empleado. Estos trabajos, en general, proyectan un incremento térmico para la Península Ibérica uniforme a lo largo del siglo XXI, más o menos intenso según se consideren escenarios de emisiones de gases efecto invernadero más o menos severos. Por lo que respecta a las precipitaciones, las tendencias de cambio presentan notables discrepancias entre modelos, aunque coincidiendo en una reducción significativa de las precipitaciones totales anuales, también distintas según el escenario de emisiones. Con relación a las escorrentías los resultados todavía son más difusos, sin embargo todos los trabajos apuntan a un cambio de las mismas que alterará el funcionamiento de los sistemas de aprovechamiento.

Un posible efecto de la reducción de los recursos como consecuencia del cambio climático es la aparición de déficits en los suministros. Esta hipótesis de trabajo requiere el establecimiento de procedimientos sistemáticos que permitan identificar hacia dónde deberían orientarse las acciones para atenuar el impacto. Con la definición operativa de este impacto sobre los sistemas de aprovechamiento se podrían establecer alternativas de adaptación, en previsión de las nuevas circunstancias hidroclimáticas que originarían situaciones de escasez o las acentúan en muchas zonas.

2 Objetivo

El objetivo principal de la investigación que se presenta es la validación de los indicadores de eficiencia (Martín Carrasco *et al.* 2007), a través de su aplicación en un caso de estudio, como herramienta de caracterización del comportamiento de los sistemas hidráulicos frente a los efectos de cambio climático, reducidos a la modificación de la cuantía de las aportaciones al sistema y al cambio en su variabilidad temporal, y de identificación problemas de escasez superficial a largo plazo.

Adelantarse a posibles situaciones de escasez supone considerar en los análisis tendencias y proyecciones hidroclimáticas futuras. La diagnosis de sistemas en riesgo climático serviría para llamar la atención sobre la necesidad, o no, de tomar iniciativas dirigidas a reducir posibles déficits en el suministro futuro.

3 Metodología

3.1 Análisis de escasez hídrica en condiciones de cambio climático

Considerando globalmente el sistema de aprovechamiento de una cuenca, la escasez de recursos superficiales en condiciones de cambio climático depende de la oferta hídrica, que componen las aportaciones futuras y la infraestructura hidráulica disponible, y de la tolerancia de las demandas a la reducción de los recursos.

Para analizar cuantitativamente de esta situación se requiere información sobre los recursos naturales disponibles y la capacidad del sistema, y un método de evaluación que permita integrar en pocos valores los aspectos básicos del suministro, como son los volúmenes suministrados y su garantía con relación a la demanda solicitada.

3.1.1 Determinación de los futuros recursos naturales disponibles

El estudio del impacto del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos necesita de proyecciones hidrológicas fiables y de buena calidad, en forma de series temporales de larga duración construidas a escalas temporal y espacial adecuadas.

Se considera una proyección hidrológica o aportación futura a cada respuesta del sistema hidrológico a un escenario de calentamiento global. El nexo habitual entre las proyecciones climáticas y los futuros recursos naturales es el enfoque “de arriba a abajo”, que estudia el resultado de una serie de modelos climáticos e hidrológicos encadenados de forma secuencial. Sin embargo, en este trabajo de investigación también se establece otro tipo nexo entre la información disponible y la futura hidrología de la cuenca. De este modo, las proyecciones hidrológicas obtenidas del modo secuencial se completan con proyecciones hidrológicas construidas con datos estadísticos, generados a partir del estudio de la escurrentía como variable de salida de modelos climáticos.

3.1.2 Configuración del modelo de gestión del sistema

El modelo de gestión del sistema debe ser una representación simplificada del sistema de aprovechamiento de la cuenca, que recoja adecuadamente las entradas de agua, la infraestructura hidráulica y su interconexión, y la distribución espacial de las demandas. Las variables del modelo deben ser mensuales, correspondiendo con la periodicidad habitual en las labores de planificación.

Se propone el uso de un modelo de optimización. Los resultados del modelo deben poner de manifiesto, si la infraestructura hidráulica es adecuada (si está correctamente dimensionada), si las demandas son razonables (en relación con los recursos disponibles), y si la modificación de las condiciones hidrológicas por efecto del cambio climático puede poner en riesgo el funcionamiento del sistema.

Con un modelo agregado de optimización se capta la imagen de gestión conjunta de todos los embalses de la cuenca en respuesta a una demanda global. Reproducir de forma básica el balance hidráulico del conjunto de la cuenca permitirá estimar cuantitativamente el impacto regional del cambio climático.

3.1.3 Sistema de evaluación

Una vez realizada la optimización del sistema con cada una de las solicitudes hidrológicas, que suponen los futuros recursos naturales, se procede a realizar la evaluación del funcionamiento del sistema en cada caso. En este trabajo se propone el uso de un conjunto de indicadores denominados indicadores de eficiencia.

El sistema de clasificación de Carrasco *et al.*, basado en unos umbrales fijados por los gestores del sistema, permite la diagnosis de problemas de escasez y la identificación de alternativas de solución a los mismos.

Hasta el momento, los indicadores de eficiencia sólo han sido utilizados en el contexto de la planificación hidrológica, pero se cree que su uso puede ser extendido a la planificación de la adaptación del sistema al cambio climático. En este caso, los resultados del análisis respaldarían la introducción de medidas de adaptación al cambio climático en las labores de planificación hidráulica.

Una evaluación inicial no necesitaría considerar cambios en las demandas ni en la infraestructura. Se trataría de una estimación del grado de exposición del sistema al cambio climático. Un marco específico de adaptación del uso del agua al cambio climático debería contemplar la evolución del sistema y, por tanto, sería pertinente la elaboración de escenarios socioeconómicos de demanda y de alternativas de configuración de la infraestructura.

3.2 Sistema para la clasificación de problemas derivados de escasez superficial

Martín Carrasco *et al.* (2007) procedieron a la evaluación cuantitativa de los subsistemas hidráulicos de la cuenca del Ebro alimentados con aportaciones propias. Este trabajo se apoyó en la elaboración de unos indicadores de eficiencia cuyo valor permitía, a través de un sistema de clasificación, abordar el análisis de la vulnerabilidad de los sistemas regulados a la escasez superficial y la identificación de las correspondientes medidas para su solución. El uso de esta metodología favorece el manejo de parámetros de naturaleza intuitiva, que sirven para transmitir de modo sencillo la información relevante del análisis, además de adoptar una forma numérica que ayuda a la realización de comparaciones entre los subsistemas evaluados.

A continuación se definen de forma abreviada los indicadores de eficiencia y las características de los criterios con los que deben juzgarse. Sus autores recogen esta información en toda su extensión en el trabajo de investigación titulado *Drought-induced water scarcity in water resources systems, Extreme hydrological events: new concepts for security* (Martín Carrasco *et al.* 2007).

3.2.1 Indicadores de eficiencia

Tienen como fundamento el cálculo de la garantía con la que se sirven las demandas. En un sistema hidráulico, éstas se agrupan en categorías dependiendo del uso del agua y de su importancia para la cuenca. Para cada categoría, se determina el nivel de garantía aceptable, rk , con el que debe ser servida.

Los datos necesarios para la caracterización de las demandas y de los suministros son: N , número de años del periodo de análisis; t , subíndice que identifica cada uno de los meses del periodo de análisis ($t = 1, 2, 3, \dots, 12N$); j , subíndice que identifica cada una de las demandas o suministros de una clase ($j = 1, 2, 3, \dots, J$); k , subíndice que identifica la clase de demanda o suministro ($k = 1, 2, 3, \dots, K$); D_{kjt} , volumen de la demanda “j” solicitada en el mes t de la clase k , en unidades de volumen; S_{kjt} , volumen suministrado j de la clase k en el mes t , en unidades de volumen; y A , aportaciones al sistema durante el periodo de análisis, en unidades de volumen.

$$D = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{12N} D_{kjt}$$

Ecuación 1 Volumen de la demanda consuntiva solicitada al sistema durante el periodo de análisis

$$S = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{12N} S_{kjt}$$

Ecuación 2 Volumen total suministrado con cualquier garantía durante el periodo de análisis

$$S^r = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{12N} S_{kjt}^{rk}$$

Ecuación 3 Volumen suministrado durante el periodo de análisis con garantía mayor o igual que la garantía aceptable

$$(S^{r-\Delta r} - S^r) = \left(\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{12N} S_{kjt}^{rk-\Delta r} - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^{12N} S_{kjt}^{rk} \right)$$

Ecuación 4 Volumen suministrado durante el periodo de análisis con garantía muy próxima al nivel aceptable

Tabla 1 Indicadores de eficiencia

Indicador de satisfacción	Indicador de calidad de servicio	Indicador de sostenibilidad	Indicador de potencial de recuperación
$I_1 = \frac{S}{D}$	$I_2 = \frac{S^r}{D}$	$I_3 = \frac{A - S}{A}$	$I_4 = \frac{S^{r-\Delta r} - S^r}{D}$

Los indicadores de eficiencia se definen a partir de estas cantidades y permiten caracterizar: la capacidad del sistema para atender sus demandas (I_1); la capacidad del sistema para atender sus demandas con garantía aceptable (I_2); el nivel de uso de los recursos (I_3); y la capacidad del sistema para mejorar sus prestaciones (I_4).

Ha de tenerse en cuenta que ($S^{F-Ar} - S^r$) representa el volumen servido por el sistema con garantía muy próxima a la aceptable y, por tanto, el volumen que con medidas de mejora de baja intensidad podría servirse con garantía suficiente, incrementando la calidad del servicio.

Por su propia definición, el indicador de calidad siempre tendrá valores menores o iguales al indicador de satisfacción. El indicador de satisfacción y el de calidad pueden tomar valores favorables, neutros o desfavorables, en función de los límites que se consideren razonables por los gestores del sistema, cuyo conocimiento detallado de los usos de la cuenca podrán fijar estos valores con objetividad. Los indicadores de sostenibilidad y recuperación del sistema no son favorables ni desfavorables, sino simplemente altos (positivos) o bajos (negativos). En el primer caso puede acudir a criterios establecidos de carácter medioambiental, para determinar si el grado de aprovechamiento de los recursos es elevado o no. En el segundo caso, la separación entre alto y bajo debe definirse para cada caso.

3.2.2 Cuadro de diagnosis del sistema

En función del nivel que tengan los indicadores de satisfacción y calidad, y de las combinaciones que puedan darse entre ellos, se determina la gravedad de los problemas de falta de suministro que pueden aparecer en el sistema. Las soluciones más adecuadas para resolver la escasez y/o mala calidad del servicio dependen del valor combinado de los cuatro indicadores. Simplificando el tipo de soluciones, se pueden catalogar en: (A) Actuaciones sobre las demandas, aconsejadas cuando el nivel de explotación de los recursos es alto; (B) Obras de regulación; (C) Movilización de recursos adicionales, es decir, fuentes no superficiales y/o no convencionales; y (D) Acciones no estructurales, idóneas en sistemas con un elevado indicador de satisfacción. Distintas medidas pueden contribuir a solucionar un mismo problema; una medida puede hacer frente a distintas cuestiones. Todas las medidas pueden diseñarse con diferente gradación según la intensidad del problema a resolver.

En general, los sistemas con un desfavorable indicador de satisfacción requieren acciones para incrementar la disponibilidad de los recursos regulados, ya sea desde la propia cuenca o desde otras cuencas. Los sistemas con un desfavorable índice de calidad requieren generalmente acciones no estructurales para mitigar el impacto de la escasez de recursos recurrente, o bien acciones estructurales si se desea consolidar el suministro de las demandas. Cuando esos problemas coinciden con valores bajos del índice de sostenibilidad, las acciones deben enfocarse primeramente en el lado de la demanda, tratando de mejorar la conservación de los recursos reduciendo pérdidas, aumentando la eficiencia de uso del agua, impulsando el reciclaje de agua y tratando de compatibilizar las demandas. Finalmente, el índice de recuperación permite tener una idea de la entidad de las acciones que deben adoptarse, que son mayores cuanto más bajo es este índice. La Figura 1 ilustra esta discusión.

Se desea explorar si la aplicación de esta metodología de evaluación con proyecciones hidroclimáticas permite reducir la incertidumbre asociada al comportamiento de los sistemas en el supuesto de cambio climático. En principio se busca confirmar la efectividad de los indicadores como evaluadores del funcionamiento del sistema y herramientas de detección de los problemas de escasez que pueda aparecer.

		$I_1 = \uparrow$		$I_1 = \downarrow$		$I_1 = \downarrow$		
		Problema	Solución	Problema	Solución	Problema	Solución	
$I_2 = \uparrow$	$I_3 = +$			1	B1	1	B2 - C1	
	$I_3 = -$			1	A - B1	1 - 3	A - B2 - C2	
$I_2 = \downarrow$	$I_3 = +$	$I_4 = +$	2	D	1 - 2	B1	1 - 2	B2 - C1
		$I_4 = -$	2	D	1 - 2	B2	1 - 2	B3 - C1
	$I_3 = -$	$I_4 = +$	2	A - D	1 - 2	A - B1	1 - 2 - 3	A - B2 - C2
		$I_4 = -$	2	A - D	1 - 2	A - B2	1 - 2 - 3	A - B3 - C2
$I_2 = \downarrow$	$I_3 = +$	$I_4 = +$	2	B1 - D	1 - 2	B2 - C1	1 - 2	B3 - C1
		$I_4 = -$	2	B1 - D	1 - 2	B3 - C1	1 - 2	B3 - C1
	$I_3 = -$	$I_4 = +$	2 - 3	A - B1 - D	1 - 2 - 3	A - B2 - C2	1 - 2 - 3	A - B3 - C2
		$I_4 = -$	2 - 3	A - B1 - D	1 - 2 - 3	A - B3 - C2	1 - 2 - 3	A - B3 - C2
Intensidad del problema								
		sin problema	media	seria	muy seria			

Figura 1 Cuadro de diagnosis del sistema e identificación de alternativas de solución

4 Caso de estudio

Se han seleccionado como caso de estudio tres cuencas Españolas: Guadalquivir, Ebro y Duero (parte Española), las cuales presentan una extensión de 57.500 km², 85.000 km² y 79.000 km² respectivamente (Figura 2). Estas cuencas presentan una gran variabilidad hidrológica que se ve reflejada en la disponibilidad de sus recursos para atender las demandas, presentándose en gran parte de la cuenca del Duero y la margen izquierda del Ebro regiones con superávit y la cuenca del Guadalquivir con problemas de déficits, según lo indican sus respectivos Planes Hidrológicos de Cuencas.

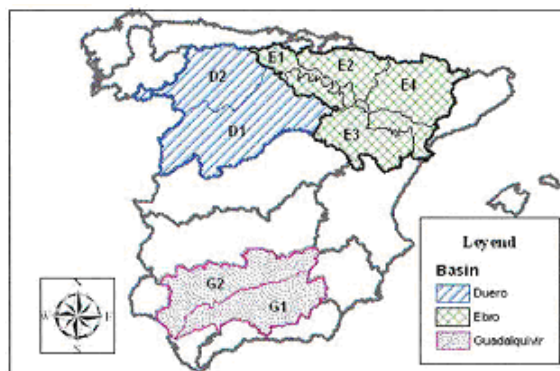


Figura 2 Ubicación de la cuencas del Guadalquivir, Duero y Ebro, y su zonificación

4.1 Aportación actual y futura en las cuencas de estudio

La evaluación de las prestaciones del sistema en diferentes horizontes temporales requiere del conocimiento de las aportaciones. Las aportaciones actuales consideradas proceden de la revisión que se realizó, con motivo de la elaboración de los Planes Hidrológicos de Cuenca (LBAE 2000), de las series mensuales de aportaciones naturales en el periodo 1940/41 - 1995/96 con el Sistema Integrado de Modelización Precipitación-Aportación (SIMPA) aplicado a todas las cuencas peninsulares (Estela & Quintas 1996).

Las proyecciones hidrológicas empleadas en este estudio se han construido modificando las aportaciones actuales a partir de dos trabajos previos: el informe de Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural (CEDEX 2009) y el Estudio de análisis hidrológico de los escenarios de cambio climático en España (González Zeas 2010).

Tabla 2 Alteraciones en la media anual ($\Delta\mu$) del periodo (2070 – 2100) con relación al periodo (1960 – 1990) de las proyecciones hidrológicas CEDEX en las cuencas de estudio

Guadalquivir				Duero				Ebro			
Escenario A2 CEDEX		Escenario B2 CEDEX		Escenario A2 CEDEX		Escenario B2 CEDEX		Escenario A2 CEDEX		Escenario B2 CEDEX	
Nombre	$\Delta\mu_{A2}$ (%)	Nombre	$\Delta\mu_{B2}$ (%)	Nombre	$\Delta\mu_{A2}$ (%)	Nombre	$\Delta\mu_{B2}$ (%)	Nombre	$\Delta\mu_{A2}$ (%)	Nombre	$\Delta\mu_{B2}$ (%)
CA	-48	CB	-23	CA	-31	CB	-10	CA	17	CB	-4
EA	-49	EB	-43	EA	-40	EB	-29	EA	-31	EB	-25
HA	-20	HB	-24	HA	4	HB	-2	HA	3	HB	-9
PA	-45	SB	0	PA	-33	SB	8	PA	-40	SB	-11
SA	-44	UB	-33	SA	-23	UB	-16	SA	-30	UB	-17
UA	-29	PB	-28	UA	-47	PB	-24	UA	-46	PB	-29
Med	-43	Med	-24	Med	-31	Med	-13	Med	-28	Med	-16

En las Tablas 2 y 3 se muestran las proyecciones hidrológicas empleadas, donde aparece el nombre con el que se identifica cada una de las proyecciones, el tipo al que corresponden según procedan de la alteración de la media anual (proyecciones CEDEX) o de la media y la desviación típica anuales (proyecciones PRUDENCE), las variaciones porcentuales de estos parámetros respecto a las aportaciones actuales (situación de control), y el escenario de emisiones al que corresponden. Los nombres respetan la denominación original con la que fueron identificadas las alteraciones hidrológicas en los trabajos de investigación consultados. Las proyecciones hidrológicas resultantes, para el horizonte futuro correspondiente al periodo 2070 - 2100, responden a los escenarios de emisiones A2 o B2 (IPCC 2007) en función de las variables climáticas elegidas de las bases de datos PRUDENCE (PRUDENCE 2001) y AEMET (AEMET 2008). En total son 29 proyecciones; con base de datos del PRUDENCE son 11 proyecciones para el escenario A2-PRUDENCE y 4 proyecciones para el escenario B2-PRUDENCE y con la base de datos del AEMET son 7 proyecciones para el escenario A2-CEDEX y 7 proyecciones para el escenario B2-CEDEX.

Tabla 3 Alteraciones en la media ($\Delta\mu$) y desviación típica ($\Delta\sigma$) anuales del periodo (2070 – 2100) con relación al periodo (1960 – 1990) de las proyecciones hidrológicas PRUDENCE en las cuencas de estudio

Guadalquivir				Duero				Ebro			
Escenario A2 PRUDENCE				Escenario A2 PRUDENCE				Escenario A2 PRUDENCE			
Nombre	$\Delta\mu_{A2}$ (%)	Nombre	$\Delta\sigma_{A2}$ (%)	Nombre	$\Delta\mu_{A2}$ (%)	Nombre	$\Delta\sigma_{A2}$ (%)	Nombre	$\Delta\mu_{A2}$ (%)	Nombre	$\Delta\sigma_{A2}$ (%)
DMI1	-50	DMI1	25	DMI1	-43	DMI1	-21	DMI1	-28	DMI1	3
DMI2	-47	DMI2	29	DMI2	-49	DMI2	14	DMI2	-35	DMI2	10
DMI3	-59	DMI3	21	DMI3	-50	DMI3	-25	DMI3	-39	DMI3	1
ETH	-61	ETH	-57	ETH	-37	ETH	-8	ETH	-45	ETH	-26
GKSS	-69	GKSS	-67	GKSS	-25	GKSS	-12	GKSS	-31	GKSS	-6
ICTP	-8	ICTP	-2	ICTP	35	ICTP	15	ICTP	-28	ICTP	1
KNMI	-79	KNMI	-28	KNMI	-60	KNMI	-23	KNMI	-46	KNMI	-17
MPI	-43	MPI	6	MPI	-50	MPI	-6	MPI	-42	MPI	-3
SMHI	-65	SMHI	-26	SMHI	-36	SMHI	-21	SMHI	-33	SMHI	-10
UCM	-81	UCM	-43	UCM	-38	UCM	-21	UCM	-36	UCM	-26
Med	-56	Med	-11	Med	35	Med	11	Med	-31	Med	-6
Guadalquivir				Duero				Ebro			
Escenario B2 PRUDENCE				Escenario B2 PRUDENCE				Escenario B2 PRUDENCE			
Nombre	$\Delta\mu_{A2}$ (%)	Nombre	$\Delta\sigma_{A2}$ (%)	Nombre	$\Delta\mu_{A2}$ (%)	Nombre	$\Delta\sigma_{A2}$ (%)	Nombre	$\Delta\mu_{A2}$ (%)	Nombre	$\Delta\sigma_{A2}$ (%)
DMII	-41	DMII	15	DMII	-35	DMII	-5	DMII	-16	DMII	-0.2
SMHI	-44	SMHI	-7	SMHI	-24	SMHI	-7	SMHI	-25	SMHI	-3
UCM	-74	UCM	-33	UCM	-32	UCM	-13	UCM	-25	UCM	-16
PRUDEN	-53	PRUDEN	-4	PRUDEN	-30	PRUDEN	-9	PRUDEN	-22	PRUDEN	-6

4.2 Modelo de optimización

Los modelos de optimización se han trabajado a escala de cuenca, por ser esta un marco amplio y racional para la gestión de los sistemas de recursos hídricos, más apropiado que cualquier otra unidad espacial definida por límites políticos, administrativos o locales (Döl et al, 1998, Directiva Marco del Agua 2000/60/EC). La caracterización del sistema de explotación de cada cuenca incluye los recursos naturales que le llegan, las demandas que dependen de él y las prioridades con las que deben atenderse, los caudales ecológicos a respetar y los volúmenes de regulación disponibles.

Para conseguir la mejor asignación global de recursos por cuenca, se ha empleado el programa de optimización OPTIGES, desarrollado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, que realiza la optimización de la gestión de un sistema de recursos hidráulicos de acuerdo con unas hipótesis, objetivos y restricciones dadas por el usuario y con decisiones y variables hidrológicas a escala mensual. Este modelo ha sido usado desde 1987 en varios casos reales, por lo que casi cualquier sistema de recursos hidráulicos puede ser representado de forma simplificada mediante su uso (Andreu *et al.* 1996).

Los modelos desarrollados para las tres cuencas de estudio siguen el mismo esquema que el utilizado en los estudios técnicos previos al Plan Hidrológico Nacional (2000), actualizado con datos procedentes de sus respectivos Planes Hidrológicos de Cuenca.

Cada sistema de aprovechamiento se ha desagregado en subzonas para el análisis de los datos obtenidos con la optimización a fin de evitar enmascarar problemas locales de escasez y de resaltar la distribución de los embalses y los diferentes rasgos hidrográficos característicos de una misma cuenca. La cuenca del Guadalquivir se ha dividido en dos zonas, G1 (margen izquierda) y G2 (margen derecha); La cuenca del Duero se ha dividido en dos zonas, D1 (margen izquierda) y D2 (margen derecha); y la cuenca del Ebro en cuatro zonas, E1 (eje), E2 (margen izquierda superior), E3 (margen derecha) y E4 (margen izquierda inferior). Esta desagregación está representada en la Figura 2.

En la Tabla 4 se muestran los valores anuales por zonas de las aportaciones (APO), demandas totales (DT) y volúmenes de regulación (VR), para la situación de control. En el estudio del comportamiento de los sistemas a largo plazo, se han mantenido constantes las demandas y los volúmenes de regulación.

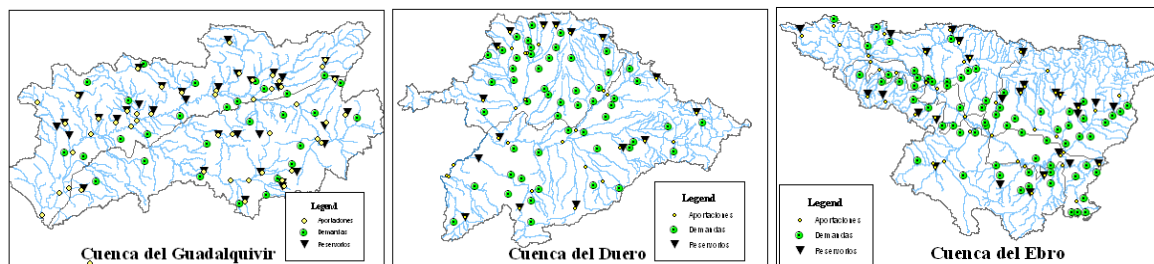


Figura 3 Sistemas de recursos hídricos estudiados

Tabla 4 Valores anuales de la aportación actual, demanda total y volumen de regulación por cuencas

Cuencas	Zonas	APO hm ³	DT hm ³	VR hm ³
Guadalquivir	G1	2006.64	739.00	2998.00
	G2	4832.52	2118.80	3407.00
Duero	D1	6234.03	992.70	4582.00
	D2	6110.12	154L60	2157.00
Ebro	E1	2758.22	4840.90	1263.00
	E2	4896.11	1007.20	2885.00
	E3	1763.69	967.60	2290.00
	E4	7618.04	3207.90	689.00

4.3 Comportamiento de los sistemas

Los resultados del modelo de optimización son un conjunto de series que, para cada una de las demandas, indican los déficits mensuales en los que ha incurrido el modelo al optimizar el reparto del agua. Con dichos resultados, y teniendo en cuenta un criterio temporal con mínimos volumétricos, se han determinando las garantías con las que se sirven cada una de las demandas.

A partir de estos datos se representa gráficamente la curva de Garantía vs. Demanda por zonas, en situación de control y para las diferentes proyecciones hidrológicas. Esta curva se construye con los suministros acumulados de las demandas servidas con una garantía igual o superior a unos valores determinados. Por ejemplo, en la Figura 4 se muestra el comportamiento de los sistemas Guadalquivir y Ebro, en las correspondientes zonas G1 y E1, con la proyección hidrológica del periodo de control y con las proyecciones B2- PRUDENCE.

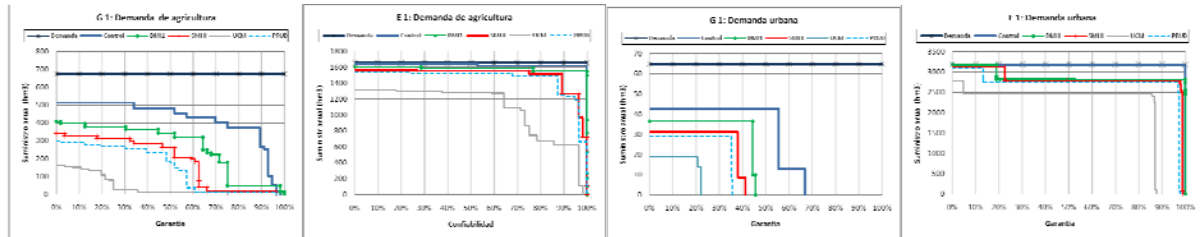


Figura 4 Curva Garantía vs. Demanda en las zonas G1 y E1 con las proyecciones de control y B2 – PRUDENCE

A partir de estos datos se representa gráficamente la curva de Garantía vs. Demanda por zonas, en situación de control y para las diferentes proyecciones hidrológicas. Esta curva se construye con los suministros acumulados de las demandas servidas con una garantía igual o superior a unos valores determinados. Por ejemplo, en la Figura 3 se muestra el comportamiento de los sistemas Guadalquivir y Ebro, en las correspondientes zonas G1 y E1, con la proyección hidrológica del periodo de control y con las proyecciones B2- PRUDENCE.

Se considera que una demanda urbana falla, cuando el déficit en el suministro mensual es superior al 10% de la correspondiente demanda mensual. Se considera que una demanda agrícola falla, cuando el déficit en el suministro anual es superior al 50% de la correspondiente demanda anual. En abastecimiento se considera aceptable una garantía del 95% y en agricultura del 85%.

De la observación de las curvas se deduce que en la zona G1: aparecen déficits importantes tanto en la situación de control como a largo plazo; y las garantías de suministro sólo son aceptables para la demanda agraria en la situación de control. En la zona E1: salvo para la proyección UCM, los déficits del sistema son reducidos; y a excepción también de la proyección UCM, las garantías se mantienen muy próximas al nivel aceptable. En general se puede decir que en la zona E1 es de esperar un buen comportamiento futuro del sistema.

4.4 Análisis del comportamiento de los indicadores en evaluaciones a largo plazo

Se determinaron los indicadores de Satisfacción (I_1), de Calidad de servicio (I_2), de Sostenibilidad (I_3) y el indicador de Potencial de Recuperación (I_4) propuestos por Martín Carrasco *et al.*, para cada uno de las zonas en las que se han dividido las tres cuencas de estudio, con la proyección hidrológica de control (aportaciones actuales) como con las proyecciones hidrológicas futuras (aportaciones a largo plazo). En la Figura 5 se muestra que los indicadores I_1 e I_3 disminuyen con la disminución de las aportaciones, mientras que los indicadores I_2 e I_4 no mantienen una tendencia a disminuir sino que sufren una fuerte variabilidad.

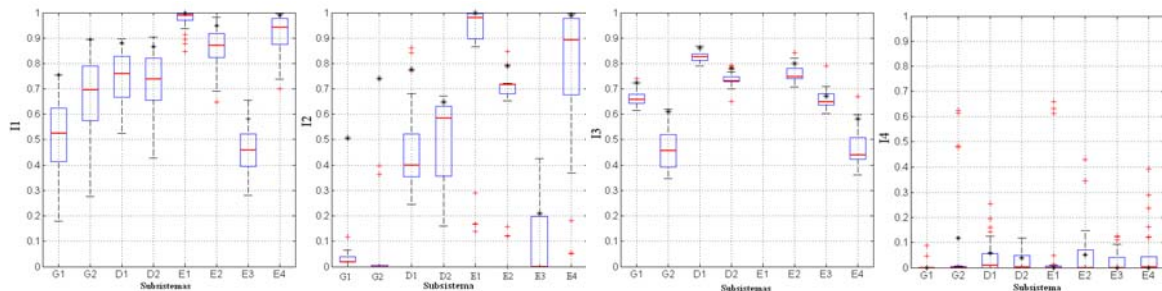


Figura 5 Variación de los indicadores de eficiencia a largo plazo en las zonas de estudio

Según el cuadro de diagnóstico propuesto por Martín Carrasco *et al.* se pueden clasificar los problemas derivados de la escasez de recursos y su intensidad, así como la orientación que deben tomar las acciones a emprender para subsanarlos. Al representar por cuencas los indicadores I_1 e I_2 , para cada proyección y zona de estudio, se observa que aparecen grupos dispersos que no permiten una identificación clara de la intensidad de los problemas de escasez que pueden presentarse en el sistema por efecto del cambio climático; por ejemplo, en la cuenca del Guadalquivir se identifica que la mayor parte de aportaciones tanto para la situación de control como para las proyecciones hidrológicas se encuentran reunidas en un solo grupo que diagnostica serios problemas de escasez de agua (Figura 6, *rojo*), en la cuenca del Duero se pueden identificar dos grandes grupos que identifican problemas medios y muy serios de escasez de agua (Figura 6, *azul*) y en la cuenca del Ebro se identifican tres grandes grupos (Figura 6, *verde*) donde se identifica una zona sin problemas de agua y dos zonas con problemas serios y muy serios de escasez de agua.

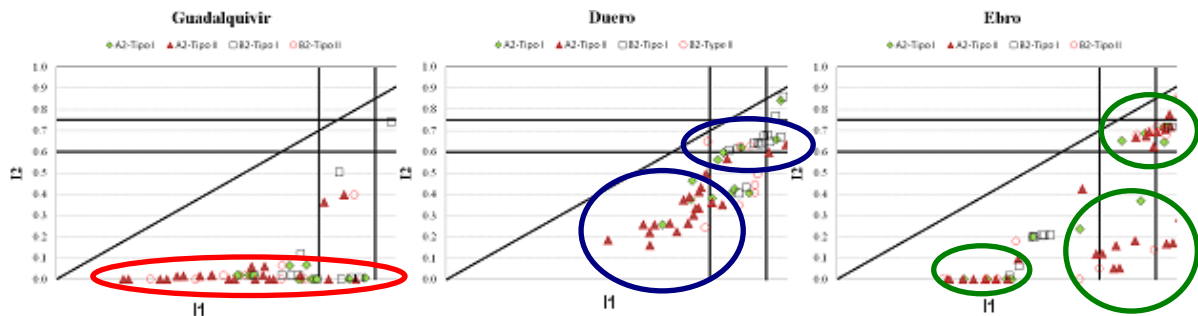


Figura 6 Diagnóstico de la intensidad de los problemas derivados de la escasez en las cuencas de estudio

Por otro lado, se ha comparado la variación de los indicadores para las ocho zonas respecto a la variación de las aportaciones, ambas normalizadas con relación a sus valores de control, comprobándose que: los indicadores I_1 e I_3 presentan una tendencia a disminuir con la disminución de las proyecciones hidrológicas (aportaciones en escenario de cambio climático) por estar basados en variables generales como son los suministros totales que se atienden en cada subsistema, este resultado manifiesta el adecuado comportamiento del indicador en el análisis de los efectos de cambio climático; y los indicadores I_2 e I_4 no mantienen dicha tendencia sino una fuerte variabilidad que llega incluso al 100% respecto a si situación de control, este comportamiento se debe a que dichos indicadores se encuentran en función de valores puntuales obtenidos a partir de los resultados del funcionamiento del sistema y, por tanto, son muy sensibles a la variación de las aportaciones, concluyéndose que su definición no es adecuada para evaluar los sistemas afectados por el cambio climático (Figura 7).

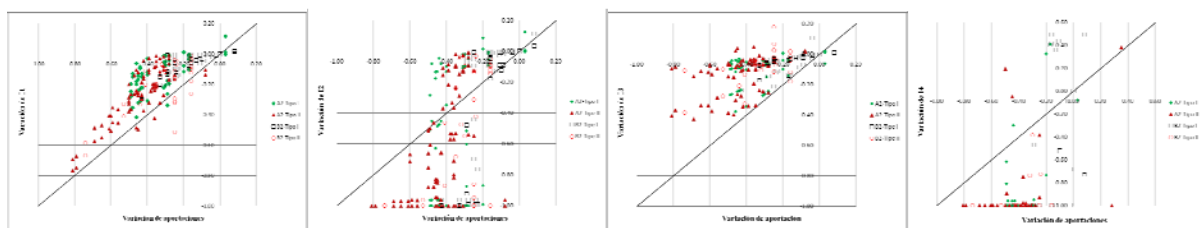


Figura 7 Variación de los indicadores de eficiencia en función de la variación de las aportaciones

5 Conclusiones

La evaluación de sistemas hidráulicos en riego climático requiere de indicadores basados en variables que permitan caracterizar dicho comportamiento y, por ende, los indicadores usados en la planificación hidrológica, con aportaciones estacionarias y ligeros cambios en las demandas e infraestructura, deben ser evaluados previamente para conocer si responden adecuadamente al comportamiento del sistema a largo plazo. Con este objetivo, se ha estudiado la utilidad de los indicadores de eficiencia (Martín Carrasco *et al.* 2007).

En un contexto de cambio climático, las variaciones de las aportaciones pueden ser muy fuertes y, en algunos casos, el valor de estos indicadores presenta una saturación muy rápida. Los indicadores de calidad de servicio y potencial de recuperación no responden bien a cambios fuertes en las aportaciones. Si la respuesta de un indicador es la misma a distintas señales, no puede establecerse una gradación en la respuesta. Podría ser conveniente matizar la definición de estos indicadores para establecer una gradación de la respuesta en la escala de trabajo empleada.

Se deduce que dos de los indicadores de eficiencia son adecuados para la evaluación de problemas de escasez bajo efecto de cambio climático, el indicador de satisfacción de la demanda (I_1) y el indicador de sostenibilidad (I_3), mientras que los indicadores de potencial de recuperación (I_4) y de calidad de servicio (I_2) no son adecuados para la evaluación a largo plazo, tal como están definidos.

Esta selección viene dada por la sensibilidad de las variables a la escala de análisis. Los primeros presentan un buen comportamiento por su dependencia de variables globales; los segundos no consiguen tan buenos resultados por su dependencia de valores específicos derivados de la curva Garantía vs. Demanda que refleja el funcionamiento del sistema.

Conforme aumenta el tamaño de la cuenca crece la complejidad del modelo de optimización. Para simplificarlo se agrupan aportaciones, embalses y demandas, con lo que se tiene una visión agregada del funcionamiento del sistema, aunque su evaluación se realice por zonas. Es posible que la curva Garantía vs. Demanda en esas mismas zonas pueda modificarse si cambia el grado de detalle del modelo y, en ese sentido, el tamaño de escala es determinante. Teniendo en cuenta esta limitación, la escala de análisis debe ser coherente con los criterios de garantía con el que se estudian la calidad del servicio y el potencial de recuperación.

Reproducir de forma básica el balance hidráulico del conjunto de la cuenca, permite estimar, cuantitativamente y de forma general, el impacto regional del cambio climático a través del indicador de satisfacción de la demanda y del indicador de sostenibilidad. Una contabilidad global es imprescindible para dar consistencia a estudios posteriores, que con modelos más elaborados puedan obtener estimaciones más precisas y detalles locales.

Finalmente resaltar que la vulnerabilidad del sistema hidráulico al cambio climático recibe la influencia de las incertidumbres asociadas. En este trabajo se ha analizado el comportamiento del sistema de tres cuencas con 29 juegos diferentes de series de aportaciones, que corresponden a supuestos hidrológicos futuros. Con elevada incertidumbre, la pauta general a seguir es considerar que la obtención de resultados, en un mismo sentido con numerosos juegos de datos de entrada en el modelo, da solidez a los mismos.

6 Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico prestado por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino de España a través del proyecto 200800050084350 Vulnerabilidad, impactos y adaptación al cambio climático: Estudio integrado sobre la agricultura, recursos hídricos y costas (ARCO).

7 Referencias bibliográficas

Álvarez, J. (1992). Modelo OPTIGES de Optimización de la Gestión de Esquemas de Recursos Hídricos. Manual del Usuario. Versión 2.0. Universidad Politécnica de Valencia.

CEDEX (2009). *Evaluación de impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen naturales España*.

González Zeas, D. (2010). *Análisis Hidrológico de los Escenarios de Cambio Climático en España*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

LBAE. (2000). *Libro Blanco de Agua en España*. Ministerio de Medio Ambiente.

Martín Carrasco, F., & Garrote de Marcos, L. (2007). Drought-induced water scarcity in water resources systems. *Conference Information: Nato Advance Research Workshop on Extreme Hydrological Events*, (pág. 11).

PHN. (Septiembre de 2000). Plan Hidrológica Nacional: Análisis de los sistemas hidráulicos. Madrid, España.

PRUDENCE. (2001). Prediction of Regional scenarios and Uncertainties [or Defining European Climate change risks and effects. Project EVK2-CT2001.00132 in the EU 5th Framework program for Energy, Environment and Sustainable development.