

Caracterización del comportamiento de los sistemas de recursos hídricos en un contexto de cambio climático mediante indicadores

Characterization of the water resources behaviour in a climate change context under indicator

Adriadna Chavez-Jimenez¹, Luis Garrote², Álvaro Sordo-Ward³, Francisco Martín-Carrasco⁴
Recibido: Mayo 2013 Aprobado: Setiembre 2013

Resumen.- La disponibilidad de los recursos hídricos podría verse afectada por el cambio climático y con ella el nivel de atención de las demandas. Para valorar dicho nivel de atención es frecuente el uso de indicadores que permiten identificar problemas de escasez de agua. Estos indicadores generalmente han sido desarrollados para análisis de planificación hidrológica a corto y medio plazo donde los efectos del cambio climático no son relevantes. Este artículo analiza la capacidad de dos indicadores: Indicador de calidad de servicio (I1) e Indicador de confiabilidad del suministro (I2) (desarrollados para uso a corto plazo) para su uso en sistemas expuestos al cambio climático (largo plazo). Este análisis se realizó mediante la aplicación de estos indicadores en tres cuencas españolas (Guadalquivir, Duero y Ebro) y bajo diferentes niveles de reducción en las aportaciones debido al cambio climático. Se determinó que I2 no es capaz de capturar los efectos de la variabilidad de dichas aportaciones. Se identificó un nuevo indicador Ip3 que, manteniendo el mismo criterio para su determinación que I2, es capaz de valorar mejor el nivel de atención de las demandas teniendo en cuenta la variabilidad de las aportaciones. Este nuevo indicador se seleccionó de entre tres propuestas de indicadores.

Palabras claves: Cambio climático; indicadores de escasez de agua; sistema de recursos hídricos.

Summary.- *The availability of water resources could be affected by climate change and with it the degree with which the demands are met. To assess the degree with which the demands are met, indicators that allow identifying water scarcity problems are frequently used. These indicators have been generally developed for hydrological planning analyses in the short and medium term where the effects of climate change are not relevant. Therefore, the capability of the indicators: demand-satisfaction index (I1) and demand-reliability index (I2) in this paper it is analyzed. These indicators were developed to be uses in the short term, and here we focus on their use in systems exposed to climate change (long term conditions). This analysis was performed through the application of these indicators in three Spanish basins (Guadalquivir, Duero and Ebro) and under several reduction levels of the streamflows due to climate change. It was determined that I2 is not capable of capturing the effects of the variability of such streamflows. A new indicator Ip3 was identified, so that keeping the same criteria as I2 to its determination, it is capable of determining the best level with which the demands should be met taking into account the variability of the streamflows. This new indicator was selected out of three proposed indicators.*

¹ Universidad de Piura, Perú. Correo: adriadna.chavez@udep.pe

² Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería Civil, Hidráulica y Energética, Madrid, España. Correo: l.garrote@upm.es

³ Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Civil, Cartagena, España. Correo: alvaro.sordo@upct.es

⁴ Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería Civil, Hidráulica y Energética, Madrid, España. Correo: f.martin@upm.es

Keywords: *Climate change; Water scarcity indicators; Water resources system.*

1. Introducción.- Por efecto del cambio climático se espera variaciones en la temperatura, cambio en los patrones de lluvias e incremento en la frecuencia de las sequías, con posible influencia en la disponibilidad de agua [1–3], y con ello en el nivel de atención de las demandas. Para valorar este nivel de atención, es frecuente el uso de indicadores, por ejemplo el índice de vulnerabilidad del agua [4], el índice de vulnerabilidad climática y gobernanza [5] y los indicadores de calidad de servicio (I1) y de confiabilidad de suministro (I2) [6], [7]. Estos indicadores generalmente han sido desarrollados para análisis a nivel de planificación hidrológica a corto y medio plazo donde los efectos del cambio climático no son relevantes. Además, se requiere información detallada que caracterice al sistema de estudio, aspecto que supone una limitante en muchas regiones.

Poder identificar problemas generales de escasez de agua que puedan padecer los sistemas a largo plazo, permitiría dirigir futuras acciones hacia aquellos sistemas que requieran mayor atención. Para ello se hace necesaria la búsqueda de indicadores que permitan identificar estos problemas, en base a información general que caracterice al sistema y su capacidad de aplicación en un contexto de cambio climático (largo plazo). El objetivo de este estudio es analizar la capacidad de los indicadores I1 e I2 (los cuales permiten evaluar cuantitativamente los sistemas de recursos hídricos a partir de las garantías con las que se realizan los suministros) bajo dos nuevas condiciones: 1) análisis a mayor escala haciendo uso de información general que permita caracterizar los principales elementos del sistema en estudio; y 2) su aplicación a largo plazo donde los efectos del cambio climático son relevantes.

Este estudio está organizado en cuatro partes. Primero se definen los indicadores de calidad de servicio (I1) y de confiabilidad de suministro (I2). Segundo se presenta el procedimiento para analizar la capacidad de los indicadores I1 e I2 bajo las dos nuevas condiciones. Tercero, la aplicación de este procedimiento en tres cuencas españolas: Guadalquivir, Ebro y Duero (parte española). Cuarto, se muestran los resultados y se discuten. Finalmente, se presentan las conclusiones.

2. Definición de los indicadores de calidad de servicio y de confiabilidad de suministro.- Estos indicadores permiten identificar problemas de escasez de agua en sistemas de recursos hídricos mediante al análisis de las garantías con la que se realizan los suministros [6], [7]. La garantía se entiende como la probabilidad de que el sistema sea capaz de atender adecuadamente sus demandas. Estas demandas pueden ser agrupadas de acuerdo al uso que se le dé al agua. Dependiendo de los requerimientos para cada uso de agua k , se fijará un nivel de garantía aceptable “ G_a ”. En un sistema de recursos hídricos donde se encuentra diversos usos de agua, el nivel de atención de dichos usos se realiza a través de la curva Garantía Suministro (Curva G-S) (Figura I). Esta curva representa los volúmenes acumulados de los suministros que son atendidos con una garantía dada o mayor. Se construye en base a los resultados de los valores promedio mensuales de las cantidades de agua suministrada para cada uso de agua k , obtenidas como resultado de aplicar modelos de optimización o simulación. En base a valores de esta curva se determinan I_1 e I_2 .

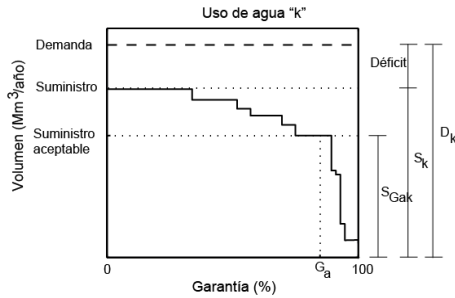


Figura I.- Curva Garantía Suministro para un uso de agua k.

El indicador I_1 permite evaluar la capacidad del sistema para satisfacer las demandas. Su estimación requiere el cálculo del indicador de satisfacción para cada uso de agua k, I_{1k} , mediante la Ec. 1:

$$I_{1k} = \frac{S_k}{D_k} \tag{1}$$

Donde D_k es la demanda de agua promedio para el uso de agua k ($Mm^3/año$); S_k es la cantidad promedio de agua suministrada a las demandas que conforman el uso de agua k, sin tener en cuenta su garantía ($Mm^3/año$). Ambas variables se obtienen de la curva G-S (Figura 1).

El indicador I_1 para el sistema (Ec. 2) hace uso de dos pesos: el peso relativo y el peso de relevancia. El peso relativo, α_k se calcula mediante la Ec. 3. El peso de relevancia para cada uso de agua k, β_k , es asignado subjetivamente dependiendo de los objetivos de las políticas de cuenca. Las demandas de mayor importancia en la gestión de la cuenca tendrían los mayores valores de β_k . La asignación del valor de β_k debe tener en cuenta la restricción dada por la Ec. 4.

$$I_1 = \sum_{k=1}^K \alpha_k \beta_k I_{1k} \tag{2}$$

$$\alpha_k = \frac{D_k}{\sum_{k=1}^K D_k} \tag{3}$$

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k \beta_k = 1 \tag{4}$$

El indicador I_2 cuantifica la garantía con la que son atendidas las demandas del sistema. Su estimación requiere el cálculo del indicador de confiabilidad para cada uso de agua k, I_{2k} , mediante la Ec. 5:

$$I_{2k} = \frac{S_{Gak}}{D_k} \tag{5}$$

Donde S_{Gak} es la cantidad de agua promedio suministrada para una demanda que conforma el uso de agua k con una garantía igual o mayor a una garantía aceptable G_{ak} ($Mm^3/año$) (Figura I). El indicador I_2 para el sistema es obtenido mediante la Ec. 6:

$$I_2 = \sum_{k=1}^K \alpha_k \beta_k I_{2k} \quad (6)$$

El uso conjunto de los indicadores I_1 e I_2 permite identificar problemas de escasez de agua, mediante su clasificación en tres niveles: favorable, neutro y desfavorable[6], [7] (Figura II).

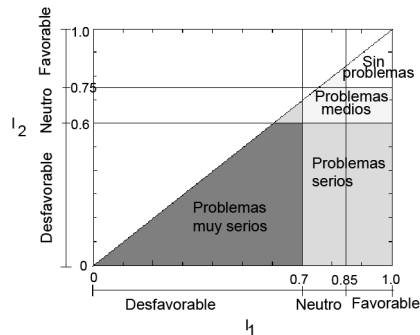


Figura II.- Intensificación de problemas de escasez de agua, según los indicadores I_1 e I_2 . Fuente: [6]

3. Metodología.- El procedimiento propuesto está conformado por tres pasos. El primero es la configuración del modelo de optimización del sistema de recursos hídricos, tomando como base información general que caracterice al sistema. El segundo es la determinación de I_1 e I_2 bajo diferentes niveles de reducción de las aportaciones por efectos del cambio climático. Y, finalmente, el tercero es un análisis de sensibilidad de dichos indicadores e identificación de los más adecuados para ser usados en sistemas afectados por cambio climático.

3.1. Configuración del modelo de optimización.- Para simular el aprovechamiento hidráulico del sistema se utiliza un modelo de optimización de recursos hídricos a escala mensual. En este estudio se emplea el módulo de optimización OPTIGES [8] del programa AQUATOOL. Este modelo permite asignar los suministros a partir de las aportaciones, los volúmenes de regulación y los volúmenes de demanda (variables del sistema), con criterios de prioridad según el tipo de demanda y considerando como restricciones las pérdidas por evaporación y los caudales medioambientales. Teniendo en cuenta que conforme aumenta el tamaño de la cuenca crece la complejidad del modelo, la topología de los sistemas se ha simplificado mediante la agrupación de aportaciones, embalses y demandas. Los resultados de su aplicación son los déficits mensuales (durante el periodo de estudio considerado) en cada una de las demandas consideradas.

Para evitar enmascarar problemas locales de escasez (provocados por la evaluación conjunta de la cuenca), se realiza el análisis dividiendo al sistema en regiones, atendiendo a tres criterios: 1) las características hidrológicas; 2) las densidades de las demandas y del volumen de regulación; y 3) las posibilidades de interconexión entre los embalses de la red hidráulica.

Por causa del cambio climático se verán afectadas las aportaciones, demandas y el desarrollo de nueva infraestructura hidráulica. Sin embargo, en este estudio solo se han considerado las variaciones en las aportaciones futuras (proyecciones hidrológicas futuras-PHF). No se ha considerado la modificación de las demandas porque bajo la legislación española éstas están asociadas a concesiones, que otorgan el derecho al uso del agua en un amplio horizonte temporal (de 25 a 75 años), por lo que presentan una gran rigidez a la baja. Tampoco se ha supuesto modificación sustancial de la infraestructura hidráulica porque las cuencas analizadas presentan suficiente capacidad de regulación y no se prevén ya grandes desarrollos de infraestructura. La finalidad del estudio es conocer la sensibilidad de los indicadores al identificar los problemas de escasez de agua en sistemas afectados por el cambio climático. Para ello, se eligieron dos periodos de estudio. El primero, denominado periodo de control, donde las aportaciones, las demandas y los volúmenes de regulación corresponden al periodo 1960-1990. El segundo es el

periodo futuro (2070-2100), donde las aportaciones son las únicas afectadas por el cambio climático, las demandas y volúmenes de regulación corresponden al periodo actual.

3.2. Determinación de los indicadores I_1 e I_2 .- La determinación de I_1 e I_2 se realiza según las ecuaciones mostradas en el apartado 2. La información requerida para la determinación de estos indicadores son los déficits y suministros obtenidos como resultado de la optimización del sistema, tanto para el periodo de control como para cada una de las PHF que conforman el periodo futuro.

3.3. Análisis de sensibilidad de I_1 e I_2 e identificación de los más indicados para ser usados bajo cambio climático.- El análisis de sensibilidad permite la comparación de la reducción que sufren los valores normalizados de I_1 e I_2 respecto a la reducción normalizada de las proyecciones hidrológicas futuras (PHF). Siendo la normalización de los indicadores y de las PHF respecto a sus valores en el periodo de control. La tendencia que presentan estos indicadores de forma individual frente a la reducción de aportaciones por cambio climático, permite identificar si dichos indicadores pueden ser utilizados o no para evaluar problemas de escasez de agua en sistemas afectados por dichos cambios. En función de este análisis se plantearon nuevas propuestas de indicadores de las cuales se seleccionó aquella alternativa que permitió obtener un conjunto de indicadores capaces de capturar las variaciones de las PHF.

4. Caso de estudio.- Se seleccionaron tres cuencas españolas: Guadalquivir, Ebro y Duero (parte española - Figura III). La figura también muestra las regiones en las que se han dividido cada una de estas cuencas. La Tabla I muestra las características de las aportaciones, demandas, volúmenes de regulación e interconexión de la infraestructura hidráulica para cada una de las regiones estudiadas. En la cuenca del Guadalquivir, por ejemplo, G2 recibe el 71% de las aportaciones, presenta un mayor nivel de regulación y un mayor nivel de interconexión que G1. En la cuenca del Ebro, el 45% de las aportaciones se encuentran concentradas en E4. Esta misma región presenta el mayor número de reservorios, el mayor volumen de regulación, así como la mayor interconexión de su infraestructura. La región E3 por el contrario, es la región con menor recurso hídrico (recibe el 12% de las aportaciones de la cuenca), el nivel más bajo de regulación e interconexión de su infraestructura. Un caso especial es la región E1, que corresponde al río principal de la cuenca (Figura III). Los recursos de E1 están conformados por sus propios recursos (mostrados en la Tabla I) y los aportes sobrantes procedentes de las regiones E2, E3 y E4. Por ello, es capaz de atender un volumen de demandas superior a los recursos propios (Tabla I).

Los volúmenes de regulación, demandas y criterios de prioridad requeridos para la configuración del modelo de optimización de cada cuenca fueron obtenidos de sus respectivos Planes Hidrológicos. Las aportaciones mensuales proceden del Sistema Integrado de Modelización Precipitación-Aportación (SIMPA) [9] para el periodo 1960-1990. Se usaron los índices basados en la ocurrencia de fallos. La garantía anual para la demanda agrícola y la garantía mensual para la demanda urbana. La ocurrencia de fallos se basó en la normativa española [10].

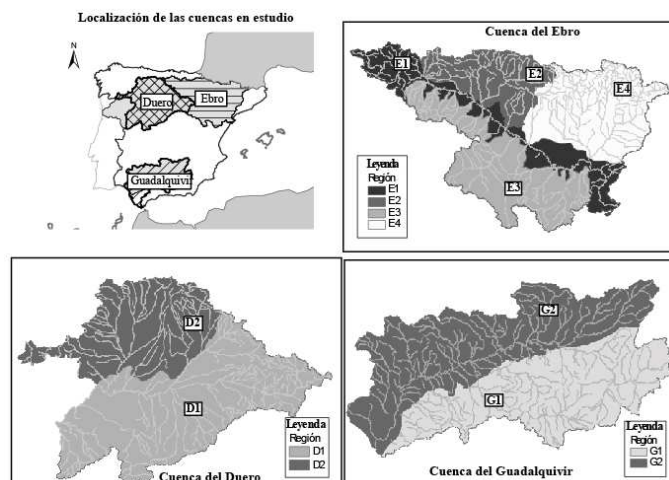


Figura III.-Ubicación de las cuencas y regiones estudiadas.

Cuenca	Región	Area Mm ²	APO Mm ³ /yr	APO %	CV	VR Mm ³ /yr	NR	D Mm ³ /yr	DU %	DA %	IIH*
Guadalquivir	G1	26951	2007	29%	0.77	2547	13	739	9	91	0
	G2	30549	4833	71%	0.81	3858	22	2119	10	90	1
Duero	D1	28741	6234	51%	0.56	4582	9	993	10	90	1
	D2	50259	6110	49%	0.38	2157	7	1542	6	94	1
Ebro	E1	17493	2758	16%	0.32	2290	6	4841	66	34	-
	E2	26814	4896	29%	0.27	1263	8	1007	33	67	1
	E3	15154	1764	12%	0.44	500	4	968	5	95	0
	E4	25538	7618	45%	0.29	3074	9	3208	4	96	2

* Una mayor interconexión en la infraestructura hidráulica implica un mayor valor de IIH

Tabla I.- Aportación media anual (APO), coeficiente de variación de las aportaciones (CV), volumen de almacenamiento (VR), número de reservorios (NR), demanda total (D), demanda urbana (DU), demanda agrícola (DA) e interconexión de la infraestructura hidráulica (IIH)

Numerosos estudios han evaluado las variaciones que pueden sufrir las aportaciones por efecto del cambio climático, brindando información sobre los porcentajes de cambio en media (μ) y coeficiente de variación (CV) de dichas aportaciones respecto al periodo de control. En la Tabla II se muestra un conjunto de 29 PHF, representadas mediante estos porcentajes de cambio. Los porcentajes de cambio únicamente en μ proceden de estudios realizados por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas [11] y los porcentajes de cambio en μ y CV proceden del proyecto PRUDENCE [12].

5. Resultados y discusión

5.1. Determinación de I₁ e I₂.- Se construyeron las curvas G-S para las ocho regiones de estudio, tanto para el periodo de control como para el conjunto de PHF que conforman el periodo futuro. Por ejemplo, en la Figura IV se muestran estas curvas para las regiones G2 y E1. En la región G2 en la situación de control, el 84% de las demandas agrícolas son atendidas con garantías aceptables, mientras que las demandas urbanas son atendidas con garantías por debajo de las aceptables. Por el contrario, en E1 el total de las demandas agrícolas y urbanas son

atendidas con garantías aceptables. Para el periodo futuro, se observan dos efectos en las curvas G-S. El primero es la reducción de los suministros (S_k) con los que son atendidas las demandas (aumento del déficit). Este efecto es capturado mediante el indicador I_1 . El segundo es la reducción de las demandas atendidas con garantías aceptables. Aunque estos efectos se observan en ambas regiones (G2 y E1), en G2 son más acusados que en E1 (Figura IV). Por ello, la capacidad de la curva G-S para valorar los suministros y garantías aceptables, muestra que ésta es capaz de describir la respuesta de las diferentes regiones a la reducción y variabilidad de las aportaciones.

Acronimo del modelo	Escenario de emisiones A2						Acronimo del modelo	Escenario de emisiones B2					
	Guadalquivir		Duero		Ebro			Guadalquivir		Duero		Ebro	
	μ	CV	μ	CV	μ	CV		μ	CV	μ	CV	μ	CV
CA	-48	-	-31	-	-17	-	CB	-23	-	-10	-	-4	-
EA	-49	-	-40	-	-31	-	EB	-43	-	-29	-	-25	-
HA	-20	-	4	-	3	-	HB	-24	-	-2	-	-9	-
SA	-45	-	-33	-	-40	-	SB	0	-	8	-	-11	-
UA	-44	-	-23	-	-30	-	UB	-33	-	-16	-	-17	-
PA	-29	-	-47	-	-46	-	PB	-28	-	-24	-	-29	-
Prom1	-43	-	-31	-	-28	-	Prom2	-24	-	-13	-	-16	-
SMHI	-65	40	-36	59	-33	31	SMHI	-44	15	-24	30	-25	13
UCM	-81	53	-38	56	-36	72	UCM	-73	44	-32	42	-25	64
DMI1	-50	-50	-43	48	-28	-11	DMI1	-41	-37	-35	13	-16	1
DMI2	-47	61	-49	-28	-35	-28	-	-	-	-	-	-	-
DMI3	-59	36	-50	50	-39	-2	-	-	-	-	-	-	-
ETH	-61	93	-37	22	-45	58	-	-	-	-	-	-	-
GKSS	-69	97	-25	48	-31	19	-	-	-	-	-	-	-
ICTP	-8	26	35	44	28	2	-	-	-	-	-	-	-
KNMI	-79	36	-60	38	-46	38	-	-	-	-	-	-	-
MPI	-43	14	-50	-12	-42	6	-	-	-	-	-	-	-
Prom3	-56	19	-35	32	-31	19	Prom4	-53	7	-30	29	-22	26

C=Modelo global CGCM2 y regionalización FIC; E=Modelo global ECHAM4 y regionalización FIC; H=Modelo global HadAM3 y regionalización FIC; S=Modelo global HadAM3 y regionalización SDSM; U=Modelo global HadCM3 y regionalización PROMES (PRUDENCE-UCM); P=Modelo global ECHAM4 y regionalización RCAO (PRUDENCE-SMHI); A y B son los escenarios de emisiones A2 y B2 respectivamente.

DMI=instituto Meteorológico de Dinamarca (HIRHAM)*; SMHI=Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia (RCAO)*; UCM= Universidad Complutense de Madrid (PROMES)*; ETH=Escuela Superior politécnica de Zurich (CHRM)*; GKSS= Instituto de Investigaciones Costeras (CLM)*; ICTP=Centro Internacional de física Teórica (RegCM)*; KNMI= real Instituto Meteorológico de Holanda (RACMO)*; MPI= Instituto Max Planck (REMO)*

* Proyecciones climáticas regionalizadas dinámicamente a partir de un mismo modelo global: PRUDENCE-HadAM3.

Prom1 y Prom2 son los promedios de los modelos sin CV. Prom3 y Prom4 son los promedios de los modelos con CV. Estos promedios también fueron utilizados como PHF.

Tabla II.- Características del conjunto de proyecciones hidrológicas futuras

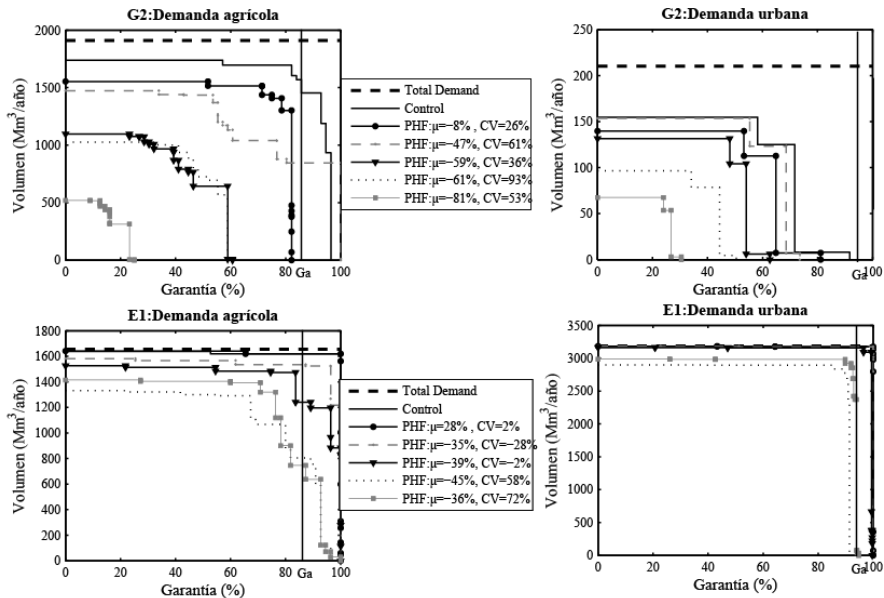


Figura IV.- Curvas G-S para G2 y E1 para las demandas agrícola e urbana, para la situación de control como para cinco PHF. Las garantías aceptables consideradas para la demanda agrícola y urbana fueron de 85% y 95% respectivamente.

En base a las curvas G-S, tanto para la situación de control como para el conjunto de PHF, se determinaron los problemas de escasez de agua para las diferentes regiones (mediante I_1 e I_2) (Figura V). Se observa la formación de grupos dispersos que no permiten representar adecuadamente la intensidad de los problemas de escasez de agua, debido a las reducciones y variabilidad de las aportaciones por efecto del cambio climático. Por ejemplo, en G1, G2 y E3 se identificaron problemas de muy seria intensidad bajo el conjunto de PHF, sin embargo el rango en la reducción de las aportaciones para G1 y G2 se encuentra entre 8 y 81% y entre 4% y 46% para E3. Para las dos regiones del Duero y tres regiones del Ebro (E1, E2 y E4) se presentan varios pequeños grupos, que pese a permitir una mayor identificación de problemas de escasez de agua, siguen siendo poco representativos tomando en cuenta el rango de reducción de aportaciones que sufren, entre 2% y 60% para el Duero y entre 4% y 46% para el Ebro.

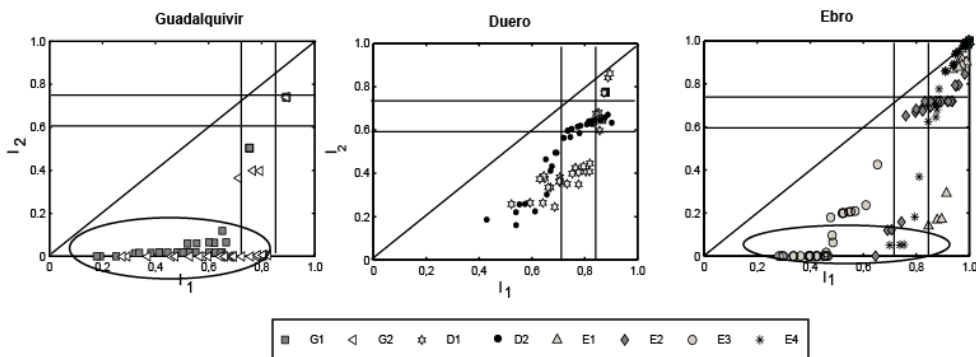


Figura V.- Identificación de la intensidad en los problemas de escasez de agua para las ocho regiones de estudio mediante la relación de I_1 e I_2 .

5.2. Análisis de sensibilidad de I_1 e I_2 . En la Figura VI se muestra el análisis de sensibilidad para I_1 e I_2 . Se observa que I_1 es sensible a la reducción de las aportaciones, y por tanto adecuado para ser usado en sistemas afectados por cambio climático. Sin embargo, I_2 presenta una

tendencia a sufrir caídas bruscas cuando las aportaciones sufren reducciones por encima del 20%. Esta tendencia no permite valorar adecuadamente la respuesta del sistema a la variación de las aportaciones y es la causa de la formación de grupos dispersos en la determinación de los problemas de escasez de agua (Figura IV). Este comportamiento se debe a que I_2 depende de un valor puntual de la curva G-S como es el suministro con garantía aceptable ($S_{G_{ak}}$), muy sensible a las fuertes reducciones de las aportaciones. Frente a estas reducciones, $S_{G_{ak}}$ sufre fuertes reducciones que generan un desplazamiento de la curva G-S hacia la derecha (Figura IV), que no es capturado por I_2 . Se concluye que I_2 no es adecuado para ser usado en sistemas afectados por cambio climático, siendo necesaria su reformulación.

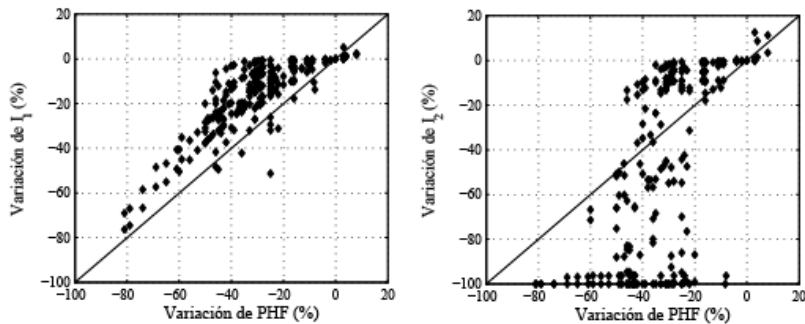


Figura VI.- Reducción de I_1 e I_2 respecto a la reducción de las aportaciones por efecto del cambio climático.

5.3. Identificación de los indicadores más adecuados para ser usados bajo cambio climático.- En base a las conclusiones del análisis de sensibilidad se han planteado tres propuestas de indicadores (Tabla III). Su cuantificación, al igual que I_1 e I_2 , requiere la determinación de los indicadores parciales por cada uso de agua k que se basan en la información de la curva G-S, dada su capacidad para capturar el déficit y las garantías con las que son atendidas las diferentes demandas. Además, para evitar caídas bruscas de estos indicadores debido a las fuertes reducciones de las aportaciones, se ha trabajado con el área bajo la curva en lugar de un valor puntual de dicha curva.

Propuesta de indicador	Indicador	
	Parcial	Sistema
Nº1	$I_{p1k} = \frac{\int_0^{100} F(GS)_k dG_k}{D_k * 100\%} = \frac{AGi_k}{ADGi_k}$	$I_{p1} = \sum_{k=1}^K \alpha_k \beta_k I_{p1k}$
Nº2	$I_{p2k} = \frac{\int_0^{G_{ak}} F(GS)_k dG_k}{S_k * G_{ak}} = \frac{AGa_k}{ASGa_k}$	$I_{p2} = \sum_{k=1}^K \alpha_k \beta_k I_{p2k}$
Nº3	$I_{p3k} = \frac{\int_0^{G_{ak}} F(GS)_k dG_k}{D_k * G_{ak}} = \frac{AGa_k}{ADGa_k}$	$I_{p3} = \sum_{k=1}^K \alpha_k \beta_k I_{p3k}$

I_{p1k} , I_{p2k} , I_{p3k} son los indicadores parciales de las propuestas 1, 2 y 3 respectivamente para cada uso de agua k ; I_{p1} , I_{p2} e I_{p3} son los indicadores propuestos para el sistema; $F(GS)_k$ es la curva G-S; AGi_k es el área bajo la curva G-S para garantías que van desde 0% hasta 100%; $ADGi_k$ es el producto de D_k por la garantía del 100%; AGa_k es el área bajo la curva G-S para garantías que van desde 0% hasta G_{ak} ; $ASGa_k$ es el producto de S_k por G_{ak} ; y $ADGa_k$ es el producto de D_k por G_{ak} . Estas variables se muestran gráficamente en la Figura VII.

Tabla III.- Indicadores propuestos

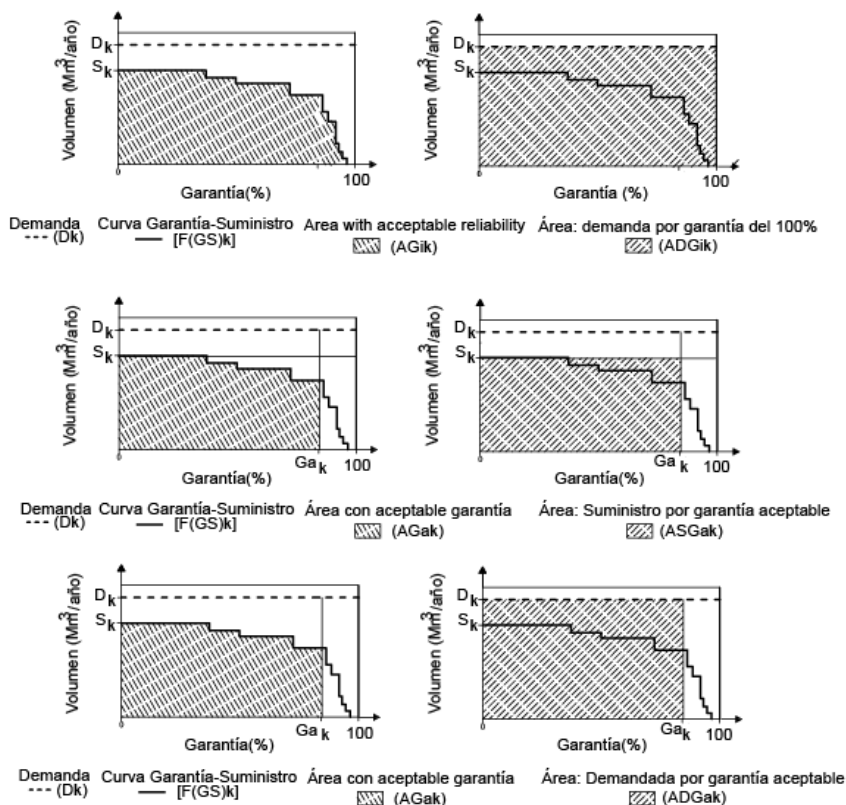


Figura VII.- Variables para la determinación de los indicadores propuestos para un uso de agua k .

En la Figura VIII se muestra la relación de I_1 con cada uno de los indicadores propuestos, para las ocho regiones de estudio y para el conjunto de PHF. Se observa un mayor rango de respuesta frente a las diversas reducciones de las aportaciones (no se forman grupos dispersos), aunque cada propuesta presenta un comportamiento particular. Este comportamiento viene dado por los criterios de garantía usado para la determinación de estos indicadores, así como del área considerada en el denominador. En la Figura VIII-a se observa que las máximas mejoras obtenidas bajo la propuesta N°1 (I_{p1}) no llegan al valor de la unidad. Esto se debe a que se valora el comportamiento del sistema con respecto a una situación donde todas las demandas son atendidas con una garantía del 100% (ADG_{ik}), es decir, una “situación ideal”. Por otro lado, no se tiene en cuenta si las demandas son o no atendidas con una garantía aceptable (Ga) (criterio esencial para una adecuada gestión del recurso hídrico) lo que supone una desventaja al valorar los problemas de escasez de agua.

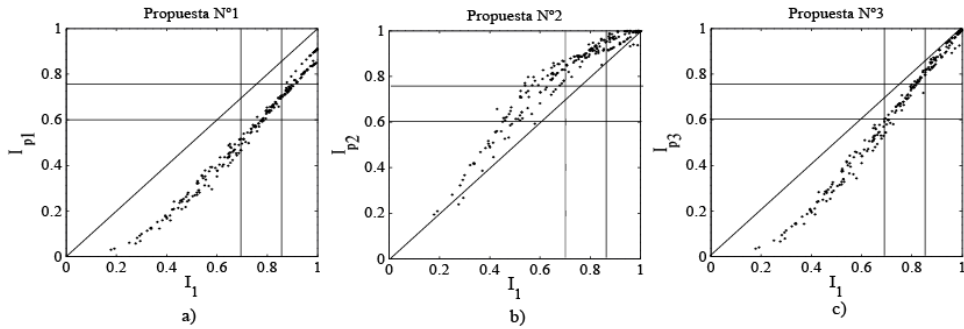


Figura VIII.- Problemas de escasez de agua en las ocho zonas de estudio mediante la relación de I_1 y cada uno de los indicadores propuestos.

Con la propuesta N°2 (I_{p2}) se soluciona el problema de I_{p1} , ya que se toma en cuenta G_a como límite máximo del área bajo la curva, en lugar del 100% (Tabla III y Figura VII). De esta manera, el máximo valor de $I_{p2}=1$ indicaría que el sistema permite atender todas sus demandas con garantía aceptable. Las demandas atendidas con garantías mayores a G_a no son tomadas en cuenta, ya que se considera que dichas demandas tienen acceso a una cantidad de recurso hídrico mayor que la requerida, indicando que no tienen problemas de recurso hídrico. La desventaja de este indicador es que relaciona el área bajo la curva respecto al producto de S_k por G_k (Figura VII), no toma en cuenta el área de déficit que presenta el sistema. Con la propuesta N°3 se corrige el problema del indicador I_{p2} , tomando en cuenta en el denominador el producto de G_k por D_k en lugar de S_k . En la Figura VIII-c se muestra la relación de I_1 e I_{p3} . Se observa que a medida que mejora I_1 , I_{p3} decrece también. La reducción de I_{p3} es más pronunciada a medida que I_1 se aleja del valor de 0.85, lo que se refleja al observar como los valores se van alejando de la diagonal principal. Este comportamiento significa que ante una reducción de la cantidad del suministro, la calidad del suministro se ve más afectada.

En la Figura IX se muestra que I_{p3} es capaz de identificar mejor los problemas de escasez de agua frente a un amplio rango de reducciones de las aportaciones debido al cambio climático. Por ello se considera que este indicador, denominado Indicador de confiabilidad del suministro bajo cambio climático, es el más adecuado (de los estudiados en este trabajo) para ser usado junto con I_1 en la evaluación de sistemas afectados por cambio climático.

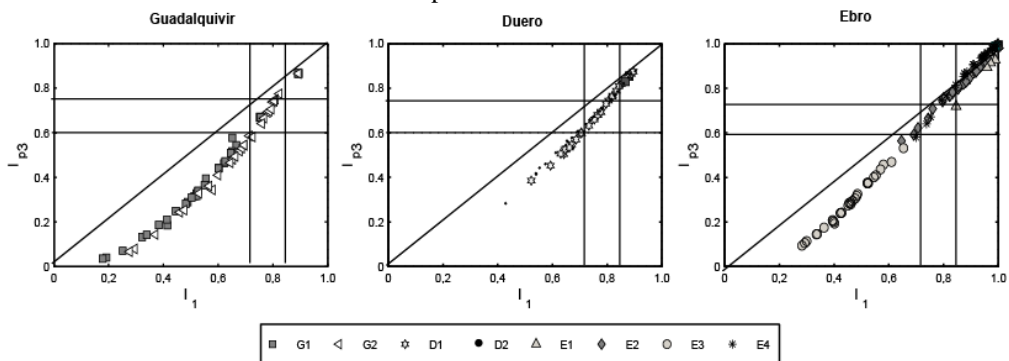


Figura IX.- Identificación de la intensidad en los problemas de escasez de agua para las ocho regiones de estudio mediante la relación de I_1 e I_{p3} .

6. Conclusiones.- En este estudio se presenta un procedimiento que evalúa el comportamiento de los indicadores I_1 e I_2 (desarrollados inicialmente para análisis a nivel de planificación hidrológica a corto y medio plazo) para periodos a largo plazo donde los efectos del cambio climático son

relevantes. La evaluación se realizó a una mayor escala de análisis, permitiendo trabajar con información general que describa al sistema.

Este procedimiento fue aplicado a tres cuencas españolas: Guadalquivir, Ebro y Duero (parte española) bajo 29 proyecciones hidrológicas futuras que representan los cambios en la aportaciones debido al cambio climático. Se concluyó que el indicador de calidad de servicio (I_1) puede ser aplicado en sistemas afectados por el cambio climático. El indicador de confiabilidad del suministro (I_2) no presenta un buen comportamiento. Esto se debe a que depende de un valor puntual de la curva G-S como es el suministro con garantía aceptable (SG_a), muy sensible a las reducciones de aportaciones debido al cambio climático.

Se identificó un nuevo indicador al que se le ha dado como nombre Indicador de confiabilidad del suministro bajo cambio climático (I_{p3}), que mantiene el mismo criterio para su determinación que I_2 pero basado en el área bajo la curva G-S. Su selección se realizó de entre tres propuestas de indicadores. Este nuevo indicador junto con I_1 permite una mejor respuesta en la identificación de problemas de escasez de agua en sistemas afectados por el cambio climático. Además, estos indicadores al requerir de información general que describa al sistema, pueden ser aplicados a regiones donde la información es limitada.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico prestado al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo - CYTED a través del proyecto VIAGUA (410AC0399). Se han utilizado datos procedentes del proyecto PRUDENCE, financiado por la Unión Europea mediante el contrato EVK2-CT2001-00132.

8. Referencias

- [1] J. Alcamo, M. Flörke, and M. Märker, "Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes," *Hydrological Sciences Journal*, no. September 2012, pp. 37–41, 2007.
- [2] IPCC, "Cambio climático 2007: Mitigación del Cambio climático. Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático," 2007.
- [3] L. Garrote, B. De Lama, and F. Martín-Carrasco, "Previsiones para España según los últimos estudios de cambio climático," in *El cambio climático en España y sus consecuencias en el sector agua*, A.-U. R. J. Carlos, Ed. Universidad Rey Juan Carlos, 2008, pp. 3–15.
- [4] C. a. Sullivan, "Quantifying water vulnerability: a multi-dimensional approach," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 25, no. 4, pp. 627–640, Jul. 2010.
- [5] G. Jubeh and Z. Mimi, "Governance and Climate Vulnerability Index," *Water Resources Management*, vol. 26, no. 14, pp. 4147–4162, Sep. 2012.
- [6] F. Martín-Carrasco, L. Garrote, A. Iglesias, and L. Mediero, "Diagnosing Causes of Water Scarcity in Complex Water Resources Systems and Identifying Risk Management Actions," *Water Resources Management*, Jul. 2012.
- [7] F. Martín-Carrasco and L. Garrote, "Drought-induced water scarcity in water resources systems," in *Vasiliev, O.F., van Gelder, P.H.A.J.M., Plate, E.J., Bolgov, M.V. (Eds.), Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security – ISBN 978- 1-4020-5739-7. NATO Science Series, vol. 78, Part 4. pp 301– 311. DOI: 10.1007/978-1-4020-5741-0_2., 2007, pp. 301–311.*

- [8] J. Andreu, J. Capilla, and E. Sanchis, “AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management,” *Journal of Hydrology*, vol. 177, no. 3–4, pp. 269–291, Apr. 1996.
- [9] T. Estrela and L. Quintas, “El sistema integrad de modelización precipitación escorrentía (SIMPA).,” *Revista de Ingeniería Civil*, vol. N°10, pp. 43–52. CEDEX Ministerio de Fomento, 1996.
- [10] MMARM, *Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, ORDEN ARM/2656/2008: Instrucción de Planificación Hidrológica*. 2008.
- [11] CEDEX, “Evaluación del Impacto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos en régimen natural - Resumen Ejecutivo. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, Madrid, España.,” 2011.
- [12] PRUDENCE, “Prediction of regional scenarios and uncertainties for defining European climate change risks and effects. Project EKV2-CT2001-00132 in the EU 5th Framework program for energy, environment and sustainable development,” 2007.