

MODELIZACIÓN DE LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL RECURSO HÍDRICO EN LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA SIERRA DE LÍBAR (060.044), SUR DE ESPAÑA. IMPLICACIONES SOCIO-AMBIENTALES

Jiménez-Fernández, P.^(1,2,3) y Jiménez-Gavilán, P.^(1,2)

- (1) Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. Campus de Teatinos, s/n. 29071 Málaga. España. pejifer@uma.es ; pgavilan@uma.es
- (2) Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA). Edificio de Investigación Ada Byron (Módulo B). C/ Arquitecto Francisco Peñalosa, 18. Ampliación Campus Teatinos. 29590 Málaga. España
- (3) Colegio Profesional de Licenciados y Graduados en Ciencias Ambientales de Andalucía (COAMBA). Oficial de Ambientólogos de Andalucía (COAMBA). Coworking Cocorocó. C/ Tejero, 19. 18005 Granada. España. malaga@coamba.es

RESUMEN

Disponer de modelos que reflejen la realidad de funcionamiento de un sistema hídrico se torna fundamental para la gestión eficaz de los recursos hídricos de una cuenca, máxime teniendo en cuenta los diferentes escenarios de cambio climático pronosticados para las regiones mediterráneas por el Grupo I de Trabajo del Equipo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en los informes AR4 (A1, A2, B1 y B2) y AR5 (RCP2,6, RCP4,5, RCP6,0 y RCP8,5), que estima un aumento de las temperaturas medias, así como un descenso del régimen pluviométrico entre un 10 y 30%, respectivamente, para la región mediterránea. Aunque constituye una tarea complicada, el presente trabajo intenta determinar, de manera preliminar, los posibles impactos que estas nuevas hipótesis de cambio climático pueden tener sobre los recursos hídricos de la masa de agua subterránea Sierra de Líbar (060.044), perteneciente a la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, en el Sur de España. Para ello, en primer lugar, se han comparado los resultados obtenidos, para el periodo 1976-2003, del recurso hídrico a nivel mensual con el modelo SIMPA que, tradicionalmente, se ha utilizado para la toma de decisiones en la Planificación Hidrológica, con los precedentes de la simulación a partir del modelo Sacramento, cuya utilización requiere tener un elevado conocimiento previo de la zona de estudio debido al elevado número de parámetros que se utilizan para caracterizar el funcionamiento del sistema hídrico. Posteriormente, se han simulado las nuevas previsiones del IPCC de cambio climático para la zona de estudio (región mediterránea), valorando, de manera preliminar, tanto el grado de afección al recurso hídrico frente a eventuales episodios de sequía como las potenciales implicaciones socio-ambientales que conllevarían.

Palabras clave: Recurso hídrico, modelo, cambio climático, Sierra de Líbar.

1. INTRODUCCIÓN

El agua, es el líquido más abundante en la Tierra, y representa el recurso natural más importante y la base de toda forma de vida. Dada la importancia del agua para todos los seres vivos, y debido a la creciente presión que supone el continuo crecimiento de su demanda, de buena calidad y en cantidades suficientes para todos los usos, se hace necesario tomar medidas para su protección en términos cualitativos y cuantitativos y garantizar así su sostenibilidad (Directiva 2000/60/CE, DMA).

Poder determinar los posibles impactos que el cambio climático puede tener sobre los recursos hídricos es una tarea complicada, debido a la escasez de datos disponibles para la calibración de los modelos, así como al elevado índice de explotación (relación entre el recurso disponible y el grado de aprovechamiento artificial) que presentan las masas de agua de la región de estudio, lo que hace casi imposible la modelización bajo condiciones de funcionamiento del sistema en régimen natural.

La masa de agua subterránea 060.044 Sierra de Líbar (MASSL) se encuentra dentro de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (DHCMA), en el sur de España (Fig. 1A). Esta masa de agua está constituida por una parte importante de una alineación montañosa de dirección NE-SW denominada Sierra de Líbar (Fig. 1B), que constituye el límite entre la Demarcación Hidrográfica Guadalete-Barbate (Noroeste) y la DHCMA (Sureste).

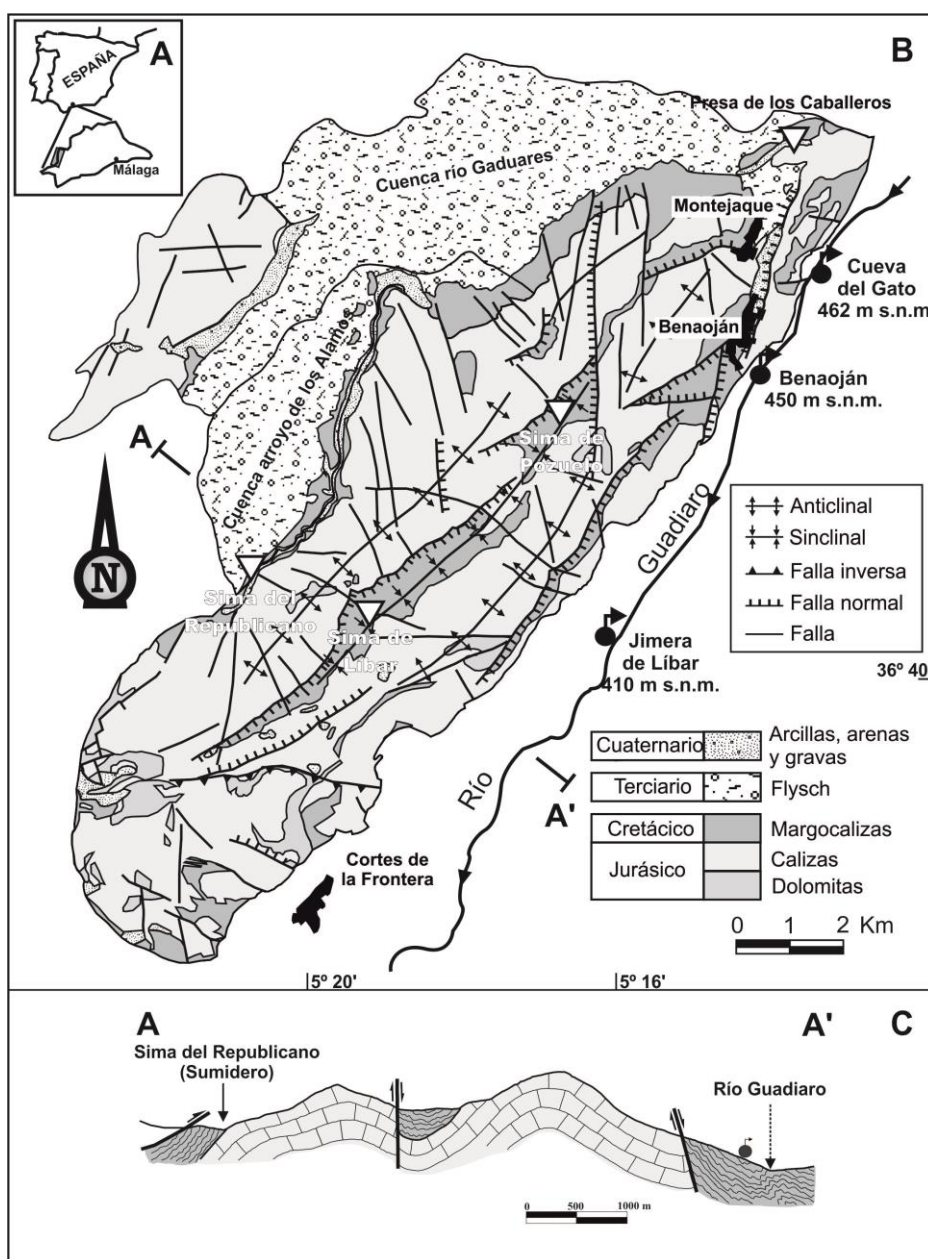


Fig. 1. (A) Situación MASSL, (B) Sierra de Líbar y (C) espesor acuífero (modificado de Andreo et al., 2006).

La Sierra de Líbar forma parte de la Zona Externa de la Cordillera Bética, concretamente del denominado Penibético o Subbético Interno occidental (Martín-Algarra, 1987). La serie estratigráfica general de este dominio geológico está formado, de muro a techo, por tres conjuntos litológicos: dolomías negras del Trías Medio y arcillas con evaporitas del Trías Superior, dolomías y calizas del Jurásico y margas y margocalizas del Cretácico. Debido a la coexistencia de litologías solubles, la disposición de los estratos, la importante fracturación y la elevada precipitación de la zona (1500 mm/año de valor medio), la Sierra de Líbar presenta un desarrollo espectacular del modelado kárstico (Delannoy, 1987 y 1998; Delannoy y Díaz del Olmo, 1987; Durán, 1996; Gracia et al., 2000; Jiménez, 2011). En este macizo es posible observar importantes formas endokársticas, entre las que destaca el complejo Hundidero-Gato con más de 8 km de desarrollo, aunque sobre todo exokársticas, de todos los tipos y tamaños, que van desde campos de lapiaz a poljes, pasando por dolinas (Fig. 2).

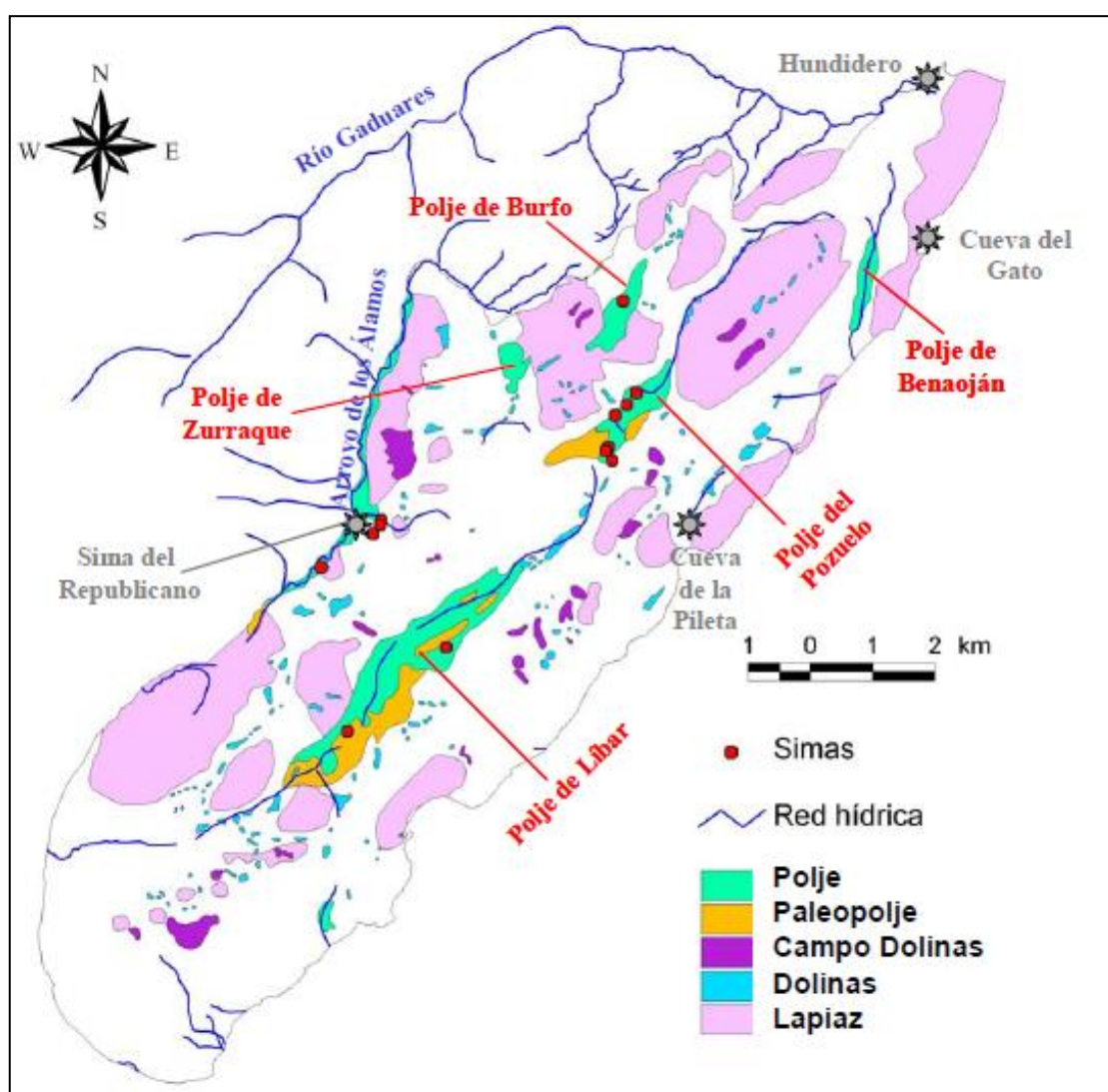


Fig. 2. Esquema geomorfológico de la Sierra de Líbar (simplificado de Delannoy, 1987).

Las calizas y dolomías que afloran en la Sierra de Líbar son permeables por fracturación y karstificación, por lo que constituyen un importante acuífero (Jiménez, 2011), con un espesor de más de 400 m (Fig. 1C).

La principal recarga de este acuífero proviene de la infiltración directa del agua de lluvia sobre los afloramientos carbonáticos y del agua que se infiltra a través de los sumideros kársticos de los poljes. Además, existe una aportación de la escorrentía producida en las cuencas del Río Gadaures (44 km²) y del arroyo de los Álamos (30 km²), constituidas por materiales arcillosos del Flysch (Fig. 1B), que vierten sus aguas hacia formas superficiales de absorción (simas). El agua de escorrentía del Río Gadaures se acumula en el embalse de Montejaque, cuya cerrada (Presa de Los Caballeros) se asienta sobre calizas karstificadas, lo que provoca la pérdida total del agua almacenada y, por tanto, la recarga artificial del acuífero (Jiménez, 2011).

La descarga se produce en el borde occidental hacia el río Guadiaro, en altitudes más bajas. Los principales manantiales kársticos que drenan esta masa son cuatro: Cueva del Gato, Benaoján, Jimera de Líbar y Charco del Moro. Los diferentes materiales que afloran en la zona de estudio se han agrupado en tres categorías según sus comportamientos hidrológicos: impermeables, carbonatos de media permeabilidad y carbonatos de alta permeabilidad (Fig. 3).

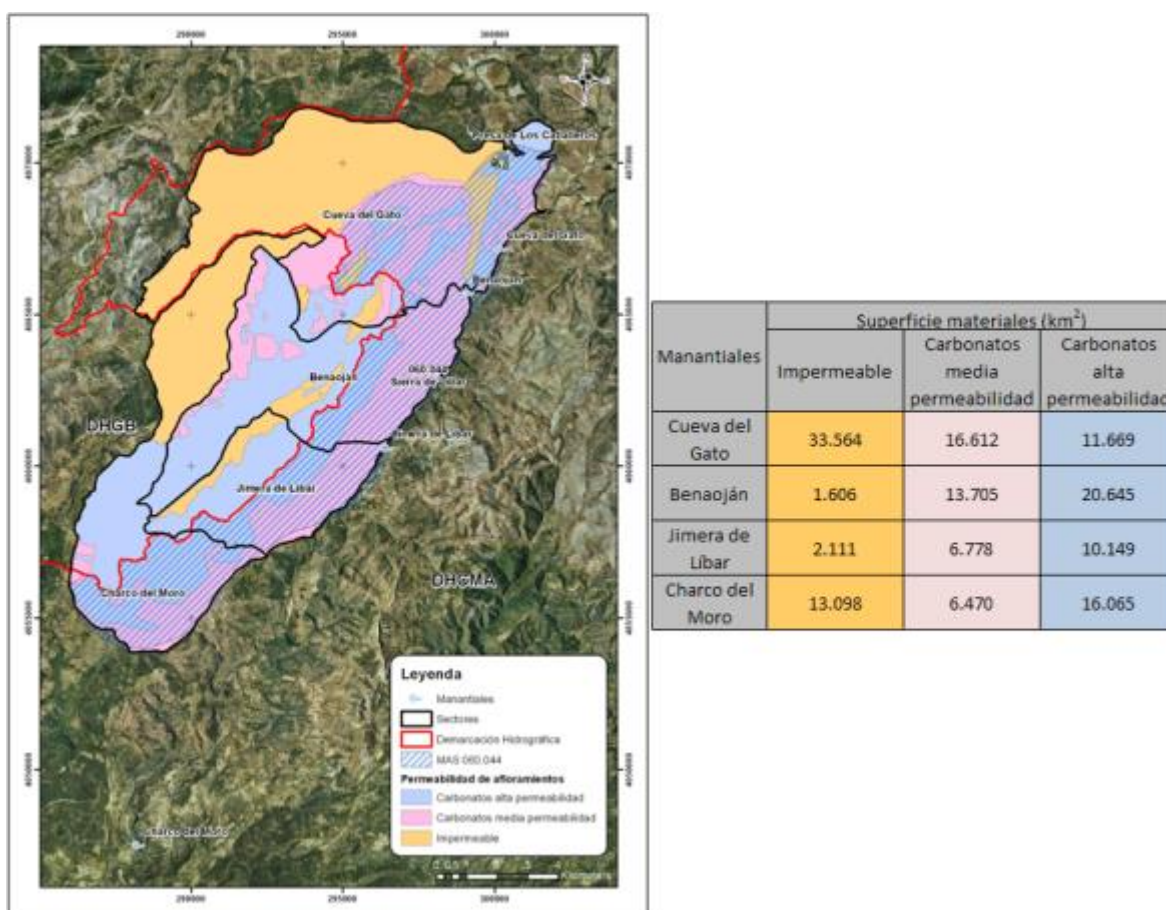


Fig. 3. Situación de los principales puntos de descarga (manantiales), límites de la MASSL y extensión y grado de permeabilidad de los materiales aflorantes (modificado de IGME, 2013).

La evaluación del recurso hídrico es un aspecto fundamental a tener en cuenta para una correcta planificación y gestión del mismo. Básicamente, existen dos metodologías para evaluar el recurso hídrico: la restitución a régimen natural y la modelación precipitación-escorrentía. Ambas metodologías suelen ser complementarias y necesarias. Tradicionalmente en España, se ha utilizado para los estudios de planificación

hidrológica, los datos procedentes del modelo de simulación de aportaciones mensuales SIMPA (Cabezas et al., 1999; Ruiz, 1999; Estrela y Quintas, 1996), siendo éste un modelo de precipitación-escorrentía que reproduce los procesos esenciales de transporte de agua que tienen lugar en las diferentes fases del ciclo hidrológico y que al tratarse de un modelo cuasidistribuido permite obtener caudales medios mensuales en régimen natural en puntos de la red hidrográfica de una cuenca (Fig. 4).

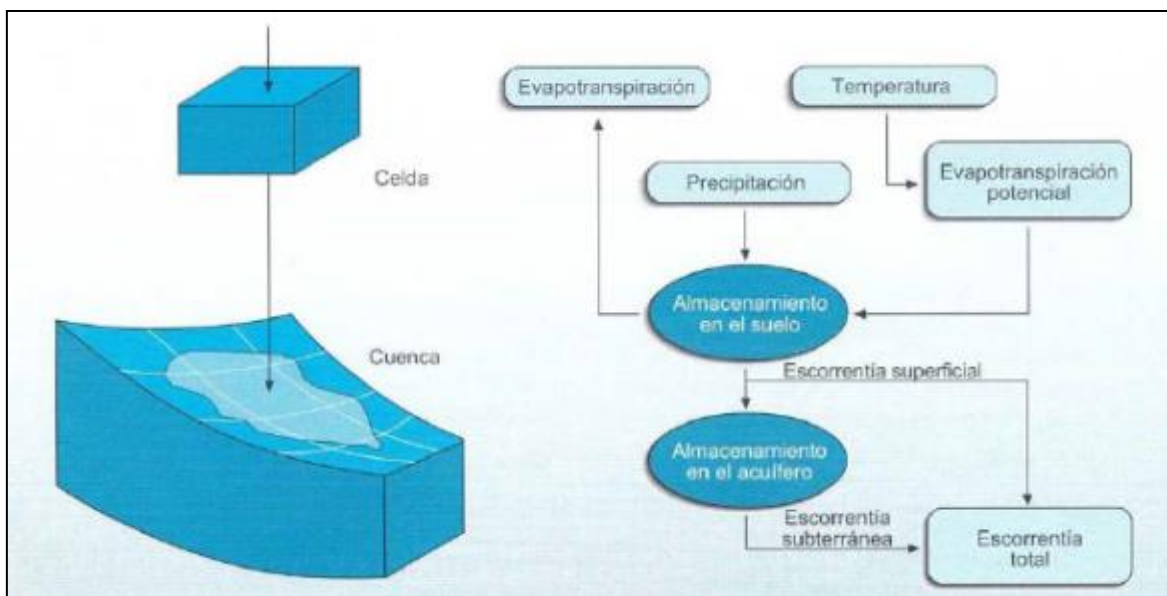


Fig. 4. Modelo SIMPA (Cabezas et al., 1999; Ruiz, 1999; Estrela y Quintas, 1996).

Existen otros modelos precipitación-escorrentía como el modelo Témez (Témez, 1977), modificado por Estrela (Estrela, 1997), de pocos parámetros y con una larga trayectoria de aplicación en España para la evaluación de recursos hídricos; el modelo HBV (Berström, 1995) de gran tradición en los países nórdicos, o el modelo Sacramento (Burnash et al., 1973) también conocido como "SAC-SMA" y que utiliza hasta 16 parámetros para modelar.

El objetivo de la presente investigación persigue, en primer lugar, comparar para la masa de agua subterránea Sierra de Líbar (060.044), los resultados obtenidos para el recurso hídrico a nivel mensual por el modelo SIMPA con los procedentes de la simulación mediante el modelo Sacramento, incluido éste dentro del software *Evaluación de los recursos Hídricos* (EVALHID) desarrollado por el Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos de la Universidad Politécnica de Valencia (Fig. 5). El segundo objetivo pretendido consiste en simular las previsiones del IPCC de cambio climático para la zona de estudio (región mediterránea), que se encuentran recogidas en el Informe AR5 y en el que se han definido cuatro nuevos escenarios de emisión, denominados Sendas Representativas de Concentración (RCP). Éstas últimas se identifican por su forzamiento radiativo (FR) total para el año 2100, que varía desde 2,6 a 8,5 $W\ m^{-2}$ y pueden contener los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático en el siglo XXI. Se han simulado las previsiones recogidas en los escenarios RCP4,5 y RCP8,5 para los intervalos de tiempo 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100 (IPCC, 2013).

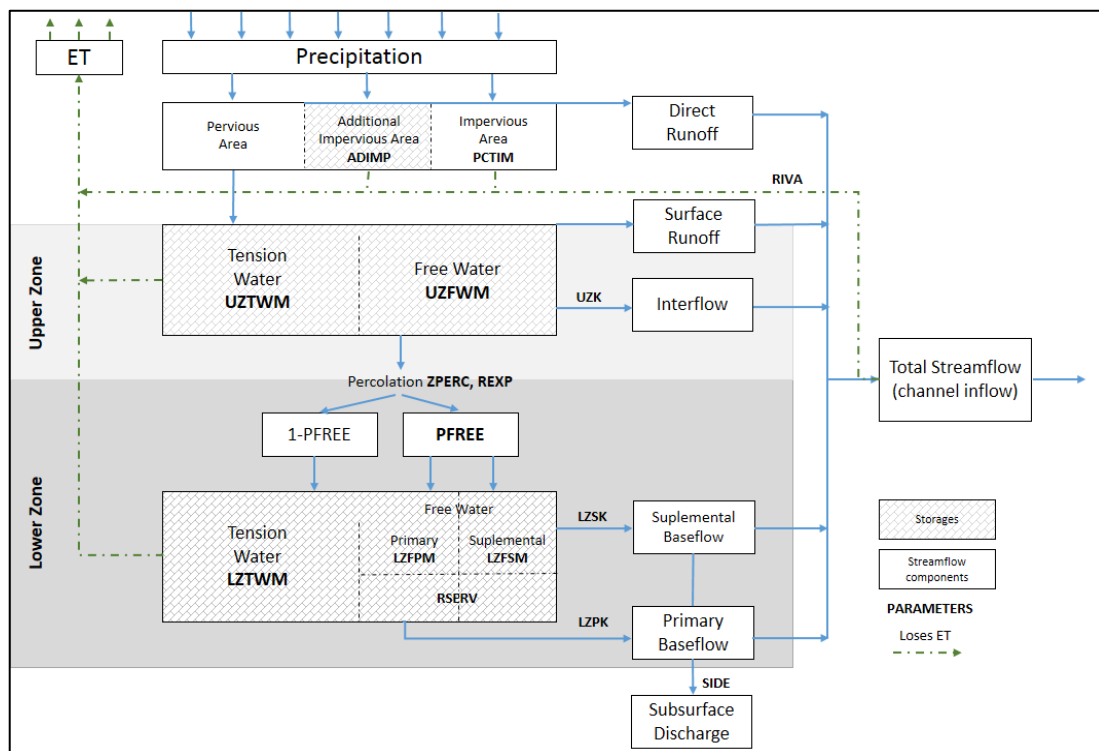


Fig. 5. Modelo Sacramento (Paredes-Arquiola et al, 2012).

2. METODOLOGÍA

La MASSL se encuentra definida por criterios hidrológicos, por lo que el primer paso que se ha llevado a cabo ha sido la definición de los límites reales de los que se tiene conocimiento, a partir del conocimiento del área drenada por las principales surgencias asociadas a dicha masa. Para ello se ha tenido en cuenta la bibliografía existente sobre la misma, fundamentalmente de Jiménez (2011), así como la comprobación de los mismos mediante un trabajo de fotointerpretación.

Para poder alcanzar los objetivos expuestos en el apartado anterior se ha seguido la siguiente metodología.

2.1 Recopilación bibliográfica

El modelo Sacramento requiere de un elevado número de parámetros para su funcionamiento, lo que implica tener un elevado conocimiento previo de la zona de estudio para poder determinarlos y que sean representativos de la realidad del sistema estudiado. En este sentido, se ha llevado a cabo un análisis pormenorizado de toda la información relativa a la aplicación de metodologías para la caracterización del funcionamiento hidrodinámico de acuíferos, pero particularmente en relación con los acuíferos de la Cordillera Bética (Delannoy, 1998; Andreo et al., 2002; Barberá et al., 2008; Jiménez, 2011), así como de aquella información referente a los distintos escenarios de cambio climático que se prevén por parte del IPCC (IPCC, 2013).

El IPCC ha publicado en Octubre del 2014 el Quinto Informe de Evaluación (AR5), en el que se definen los nuevos escenarios de cambio climático estimados por dicho organismo. Los escenarios utilizados en el Grupo de trabajo I del IPCC se han centrado

en las emisiones antropogénicas y no incluyen cambios en impulsores naturales, como el forzamiento solar o volcánico o las emisiones naturales, por ejemplo, de CH₄ y N₂O (IPCC, 2014).

Para el AR5, la comunidad científica ha definido un conjunto de cuatro nuevos escenarios, denominados trayectorias de concentración representativas (RCP), que se caracterizan por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo total en el año 2100 en relación con 1750, esto es, 2,6 W m⁻², en el caso del escenario RCP2,6; 4,5 W m⁻², en el caso del escenario RCP4,5; 6,0 W m⁻², en el caso del escenario RCP6,0, y 8,5 W m⁻², en el caso del escenario RCP8,5 (IPCC, 2014). Los cuatro escenarios de RCP comprenden un escenario de mitigación conducente a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2,6); dos escenarios de estabilización (RCP4,5 y RCP6,0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8,5). Por consiguiente, los escenarios de RCP pueden representar una variedad de políticas climáticas del siglo XXI, frente a los Escenarios del Informe especial sobre escenarios de emisiones (SRES), que no contemplaban políticas climáticas, utilizados en el Tercer y Cuarto Informe de Evaluación (IPCC, 2013).

En el presente estudio se han considerado las previsiones llevadas a cabo por los modelos de circulación global (percentil 75) para los escenarios RCP4,5 y RCP8,5 y para la zona de estudio (Tabla 1).

Fecha	Temperatura °C					
	2016-2035	2016-2035	2046-2065	2046-2065	2081-2100	2081-2100
	RCP4,5	RCP4,5	RCP4,5	RCP8,5	RCP8,5	RCP8,5
Dic-Feb	1	2	2	1	3	4
Mar-May	1.5	2	3	1.5	3	5
Jun-Ago	1.5	3	3	2	4	7
Sep-Nov	1.5	2	3	1.5	3	5
Fecha	Precipitación %					
	2016-2035	2016-2035	2046-2065	2046-2065	2081-2100	2081-2100
	RCP4,5	RCP4,5	RCP4,5	RCP8,5	RCP8,5	RCP8,5
Oct-Mar	0	-10	-10	0	-10	-20
Abr-Sep	-10	-10	-10	0	-20	-30

Tabla 1. Previsiones de cambio climático para los escenarios RCP4,5 y RCP8,5. Percentil 75 de los diferentes modelos utilizados (IPCC, 2013).

2.2 Recopilación de datos hidrometeorológicos

El modelo SIMPA proporciona información para los principales componentes del ciclo hidrológico en régimen natural, sin embargo, esta información se encuentra recogida en una serie de capas ráster que cubren todo el territorio de España a nivel mensual para el periodo comprendido entre 1940 y 2012. Se ha desarrollado una herramienta SIG para la extracción, en primer lugar, de la información referente a precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial (ETP), estas series son las que se han utilizado como entrada de datos al sistema para el periodo 1976-2003, siendo este periodo del que se tienen datos de hidrometría del manantial de la Cueva del Gato y que permiten calibrar y comparar ambos modelos.

En segundo lugar, se extrajeron los referentes a escorrentía superficial, escorrentía subterránea y aportación.

Por último, en esta fase se compararon los datos procedentes del modelo SIMPA con los procedentes de una estación meteorológica (Pileta) situada en la zona de estudio, resultando necesario la modificación de las series de precipitación de SIMPA mediante un coeficiente de 1.19 (Fig. 6).

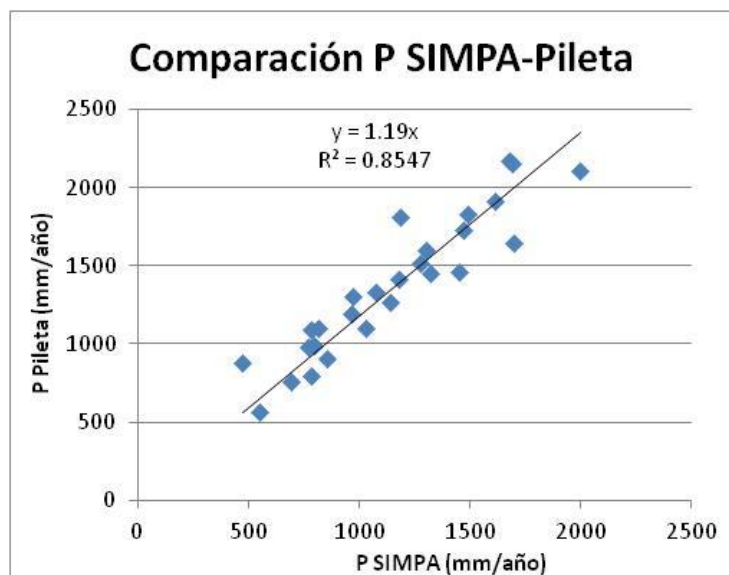


Fig. 6. Comparativa precipitación SIMPA-Pileta (periodo 1976-2003).

2.3 Modelización y calibración del modelo

Las series de datos de precipitación corregida, temperatura y ETP procedentes del modelo SIMPA se han utilizado como entrada al sistema. Una vez calibrado el sistema, comparando los resultados obtenidos con los observados, se determinó el valor de los diferentes parámetros utilizados por el modelo Sacramento (Tabla 2).

Parámetro	Materiales		
	Impermeable	Carbonatos media permeabilidad	Carbonatos alta permeabilidad
Uztw m	44.059	121.192	49.674
Uzfw m	30.250	106.739	164.786
Uzk	0.583	0.446	0.204
Pctim	0.003	0.002	0.000
Adimp	0.160	0.100	0.000
Riva	0.000	0.000	0.000
Zperc	60.691	20.767	3.235
Rexp	0.874	0.284	0.474
Lztw m	104.320	188.478	124.699
Lzfs m	84.244	148.708	217.569
Lzfp m	126.299	331.080	296.118
Lzsk	0.137	0.638	0.704
Lzpk	0.006	0.085	0.401
Pfree	0.439	0.443	0.828
Side	0.000	0.000	0.000
Rserv	0.000	0.500	0.900
Dt	1.000	1.000	1.000

Tabla 2. Parámetros determinados del modelo Sacramento.

- UZTWM: máxima cantidad de agua en tensión que puede ser almacenada en la zona alta.
- UZFWM: máxima cantidad de agua libre, capaz de ser almacenada en la zona alta.
- UZK: porción de agua libre de la zona alta que genera el flujo intermedio en un día. Corresponde a la tasa de recesión diaria de este estanque de agua libre.
- PCTIM: Fracción de la cuenca que es permanentemente impermeable. Corresponde a las superficies libres de agua y a sus riberas que por procesos geológicos son impermeables.
- ADIMP: Máxima fracción de la cuenca temporalmente impermeable. Esta fracción corresponde a la máxima proporción de pantanos y vertientes de flujos temporales, que puede tener una cuenca.
- RIVA: porción de la cuenca cubierta por vegetación ribereña.
- ZPERC: corresponde al aumento relativo de percolación al cambiar las condiciones saturadas por secas.
- REXP: define la forma de la curva de percolación entre los valores extremos entre las condiciones saturadas y las condiciones de sequedad total en el nivel inferior.
- LZTWM: máxima cantidad de agua en tensión que puede ser almacenada en la zona baja.
- LZFSM: capacidad del estanque de agua libre suplementario de la zona baja.
- LZFPM: capacidad del estanque de agua libre primario de la zona baja.
- LZSK: porción de agua libre del estanque suplementario que drena como flujo base en un día.
- LZPK: porción de agua libre del estanque primario que drena como flujo base en un día. Corresponde a la tasa de recesión diaria del embalse primario.
- PFREE: porción de la percolación que llega directamente al acuífero, aunque el estanque de agua en tensión de la zona baja no se haya llenado.
- SIDE: la razón entre el flujo base que no drena y el que drena por la sección de salida.
- RSERV: porción de la capacidad del agua libre de la zona baja incapaz de transferir agua a la zona en tensión. Corresponde al agua libre de la zona baja ubicada a una profundidad mayor que las raíces más profundas.
- Dt: escala temporal.

2.4 Cambio climático

Se han simulado para la zona de estudio, las previsiones de cambio climático que se recogen en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC para los escenarios RCP4,5 y RCP8,5 y los periodos 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100. Las series de datos se han construido tomando como referencia los datos procedentes del modelo SIMPA para el periodo 1986-2005. Estas series se han construido introduciendo los cambios temporales previstos (temperatura y precipitación) recogidos en el AR5 para la zona mediterránea, discriminando los resultados específicos para el área de estudio (Fig.7).

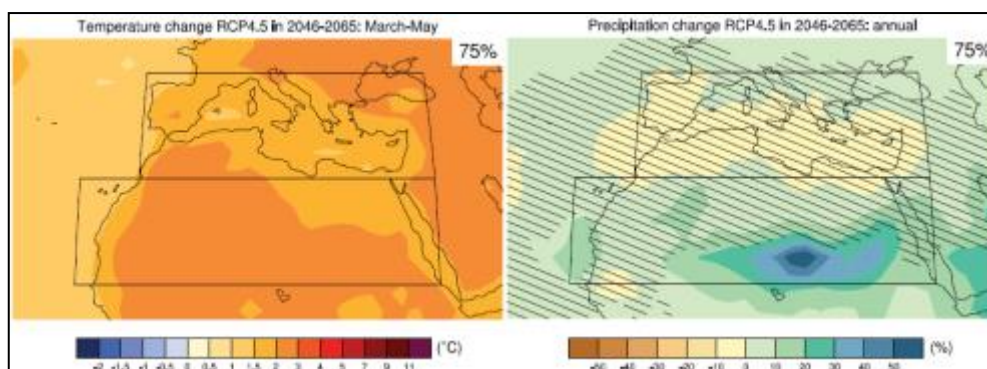


Fig. 7. Ejemplo de mapa de cambio de temperatura y precipitación para el escenario RCP4,5 (IPCC, 2013).

Para la ETP, se han construido las series mediante una combinación de los métodos de Thornthwaite y Penman-Monteith, corrigiendo los valores obtenidos por el primero de ellos (Thornthwaite) mediante factores de corrección mensual extraídos de la comparación entre los valores calculados de ETP y los datos extraídos del modelo SIMPA (Fig. 8).

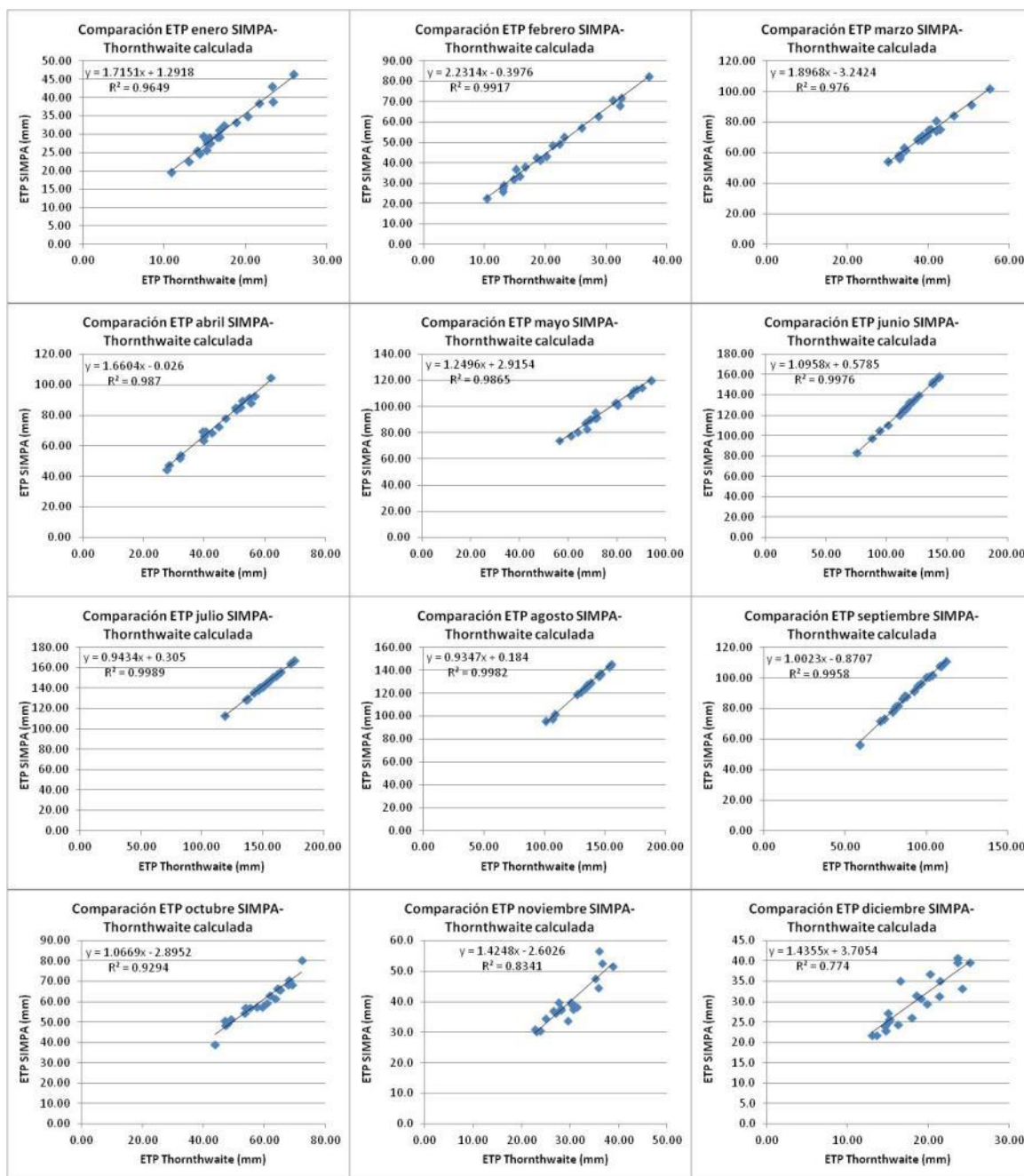


Fig. 8. Factores de corrección ETP.

No se ha podido disponer de los datos de los modelos generales de circulación utilizados en el AR5, debido a que éste ha sido recientemente publicado (Octubre de 2014). Sin embargo, el presente estudio pretende servir como una aproximación preliminar a una futura regionalización de los datos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han obtenido resultados muy similares para ambos modelos (SIMPA y Sacramento) para el sector drenado por el manantial de la Cueva del Gato, el cual se ha usado para la calibración de los modelos (Figs. 9 y 10).

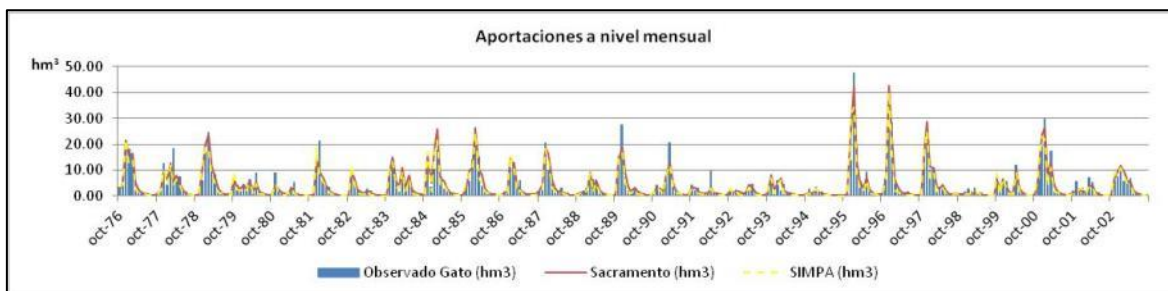


Fig.9. Series de aportación a nivel mensual para el manantial de la Cueva del Gato.

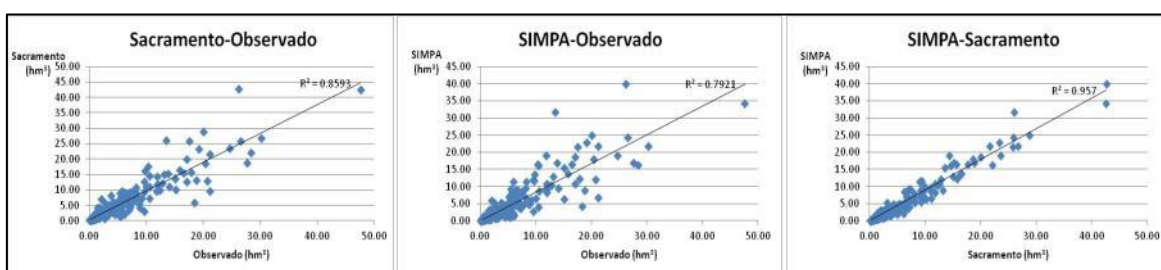


Fig. 10. Comparación de modelos.

Por otra parte, la comparación de la serie de datos observados respecto de la estimada por el modelo Sacramento, y la extraída del modelo SIMPA, para el periodo 1976-2003, se ha llevado a cabo mediante el Coeficiente de eficiencia de modelos de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970). Este coeficiente es una herramienta para evaluar la capacidad predictiva de un modelo hidrológico, y se expresa como:

$$RN_2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_0^-)^2}$$

donde:

- RN_2 : Coeficiente de Nash-Sutcliffe
- Q_0 : Valores observados
- Q_m : Valores simulados
- Q_0^- : Promedio de los valores observados

Según el valor obtenido del coeficiente de Nash-Sutcliffe, para el periodo de calibración, las series mensuales presentan una bondad de ajuste muy buena (0.85) para el modelo Sacramento y buena (0.78) para el modelo SIMPA (Tabla 3).

Indicador	Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Pobre	Muy pobre
RN_2	>0.95	0.8 - 0.95	0.75 - 0.8	0.5 - 0.75	0.3 - 0.5	<0.3

Tabla 3. Criterio para la evaluación de la bondad de ajuste de Nash-Sutcliffe (Van Dijk et al., 2008).

Sin embargo, la principal diferencia radica en el origen de los recursos, SIMPA asigna una mayor cantidad de los mismos a la escorrentía superficial mientras que el modelo Sacramento imputa una mayor cantidad al aporte subterráneo en el sector ocupado por afloramientos carbonáticos de media y alta permeabilidad (Fig. 11).

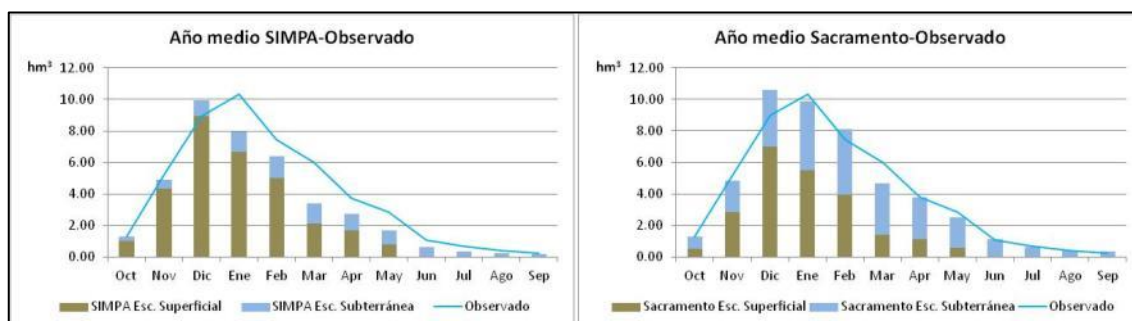


Fig. 11. Escorrentía superficial y subterránea (Media periodo 10/1976-09/2003).

Esta diferencia se acentúa si se consideran los recursos procedentes de la Cuenca del río Gadares (sector impermeable) como subterráneos, una vez se infiltran en la presa de Los Caballeros, recogién dose rápidamente en el manantial de la Cueva del Gato (Fig. 12).

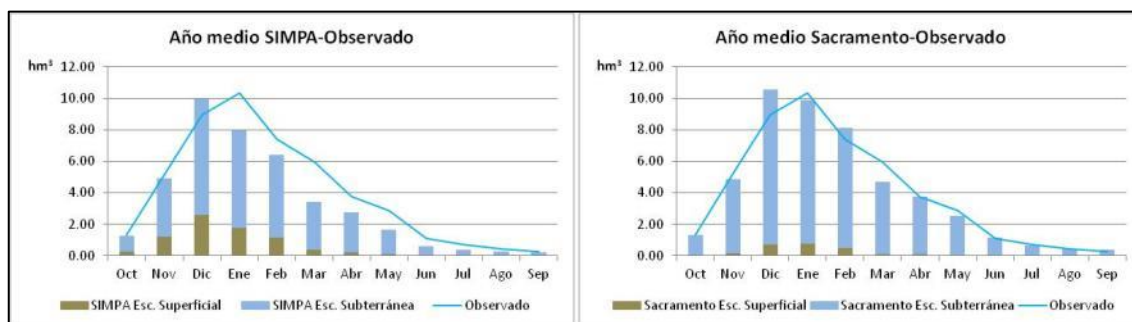


Fig. 12. Escorrentía superficial y subterránea (Media periodo 10/1976-09/2003).

Finalmente, la cantidad total de recursos drenados por la MASSL a través de sus cuatro manantiales principales, obtenidos mediante el modelo Sacramento para el periodo 1976-2006 se recogen en la Fig. 13 y la Tabla 4.

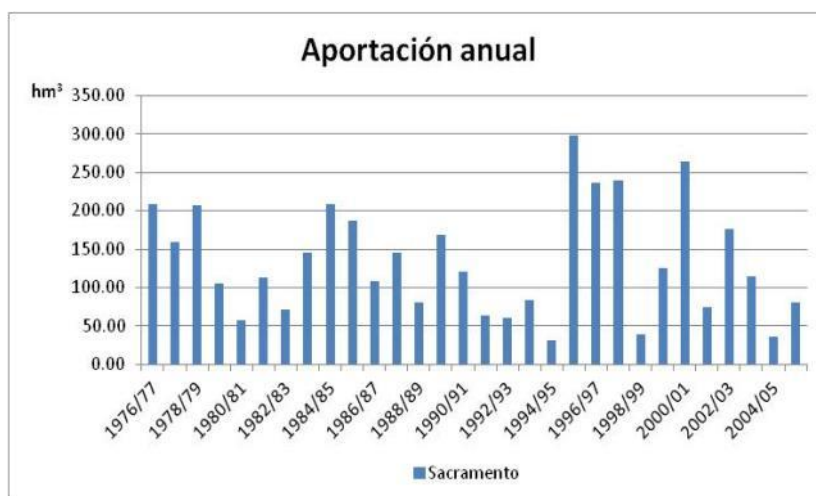


Fig. 13. Aportación anual MASSL.

AÑO MEDIO		
Mes		Sacramento hm ³
Oct	10	4.33
Nov	11	12.75
Dic	12	25.91
Ene	1	25.68
Feb	2	21.54
Mar	3	14.57
Abr	4	11.37
May	5	8.01
Jun	6	4.32
Jul	7	2.38
Ago	8	1.52
Sep	9	1.34
Total		133.72

Tabla 4. Aportación año medio MASSL.

En la Fig. 14 se representan los resultados medios obtenidos por el modelo Sacramento para el recurso total, así como su descomposición según la imputación que el mismo hace a la componente superficial y subterránea para el periodo de referencia 1986-2005, así como los simulados para los escenarios RCP4,5 y RCP8,5 en los periodos 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100.

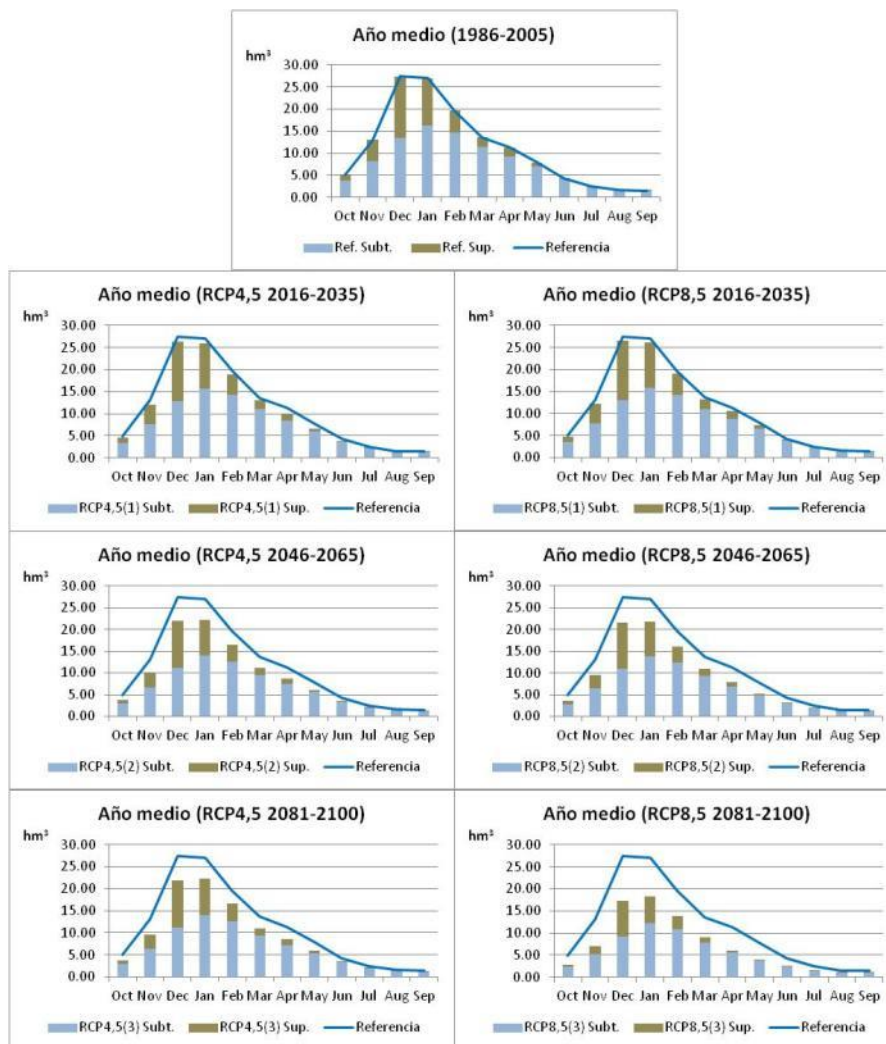


Fig. 10. Aportación, escorrentía superficial y escorrentía subterránea según escenarios.

En las Tablas 5, 6 y 7 se muestran las variaciones, tanto en valor absoluto como en porcentajes, que se obtienen para los diferentes escenarios simulados, respecto del periodo de referencia, para el recurso total y para la componente superficial y subterránea.

Mes		Aportaciones hm ³						Disminución de porcentaje respecto al periodo de referencia %						
		1986-2005	2016-2035	2046-2065	2081-2100	2016-2035	2046-2065	2081-2100	2016-2035	2046-2065	2081-2100	2016-2035	2046-2065	2081-2100
		Referencia	RCP4,5 (1)	RCP4,5 (2)	RCP4,5 (3)	RCP8,5 (1)	RCP8,5 (2)	RCP8,5 (3)	RCP4,5 (1)	RCP4,5 (2)	RCP4,5 (3)	RCP8,5 (1)	RCP8,5 (2)	RCP8,5 (3)
Oct	10	4.97	4.53	3.79	3.74	4.72	3.57	2.76	8.91	23.77	24.69	5.08	28.22	44.44
Nov	11	13.04	12.06	9.86	9.60	12.29	9.44	7.07	7.50	24.41	26.39	5.78	27.61	45.78
Dic	12	27.45	26.38	22.06	21.93	26.57	21.56	17.27	3.89	19.63	20.11	3.20	21.46	37.09
Ene	1	26.99	25.98	22.16	22.25	26.11	21.82	18.36	3.75	17.90	17.59	3.29	19.15	31.97
Feb	2	19.62	18.97	16.41	16.56	19.09	16.09	13.84	3.30	16.38	15.62	2.72	18.01	29.44
Mar	3	13.64	13.10	11.19	11.05	13.20	10.92	9.06	3.93	17.99	18.95	3.24	19.94	33.57
Abr	4	11.25	9.79	8.78	8.52	10.67	7.81	6.08	13.00	21.92	24.28	5.11	30.52	45.93
May	5	7.80	6.56	6.10	5.88	7.35	5.24	4.01	15.83	21.73	24.56	5.71	32.76	48.55
Jun	6	4.26	3.62	3.36	3.29	3.98	2.95	2.32	15.11	21.12	22.91	6.53	30.85	45.49
Jul	7	2.37	2.07	1.94	1.90	2.25	1.74	1.43	12.68	18.36	19.70	5.16	26.65	39.80
Ago	8	1.54	1.38	1.29	1.28	1.48	1.18	0.99	10.49	15.87	16.98	4.05	23.17	35.66
Sep	9	1.48	1.28	1.22	1.21	1.42	1.08	0.88	13.31	17.38	18.27	3.94	27.16	40.58
Total		134.41	125.73	108.16	107.20	129.12	103.40	84.08	6.46	19.53	20.24	3.93	23.07	37.44

Tabla 5. Aportaciones Sierra de Líbar.

Mes		Escorrentía superficial hm ³						Disminución de porcentaje respecto al periodo de referencia %						
		1986-2005	2016-2035	2046-2065	2081-2100	2016-2035	2046-2065	2081-2100	2016-2035	2046-2065	2081-2100	2016-2035	2046-2065	2081-2100
		Referencia	RCP4,5 (1)	RCP4,5 (2)	RCP4,5 (3)	RCP8,5 (1)	RCP8,5 (2)	RCP8,5 (3)	RCP4,5 (1)	RCP4,5 (2)	RCP4,5 (3)	RCP8,5 (1)	RCP8,5 (2)	RCP8,5 (3)
Oct	10	1.23	1.08	0.76	0.74	1.13	0.70	0.44	11.66	37.77	39.26	7.89	42.75	64.19
Nov	11	4.94	4.46	3.29	3.16	4.56	3.07	1.91	9.83	33.41	36.02	7.73	37.83	61.32
Dic	12	14.00	13.57	10.87	10.83	13.66	10.59	8.08	3.11	22.42	22.66	2.47	24.42	42.31
Ene	1	10.76	10.30	8.12	8.19	10.33	7.99	6.20	4.33	24.58	23.91	3.99	25.80	42.39
Feb	2	5.01	4.78	3.88	3.95	4.81	3.78	3.05	4.62	22.41	21.13	3.95	24.48	39.11
Mar	3	2.27	2.16	1.72	1.63	2.18	1.65	1.18	4.90	24.53	28.48	3.94	27.41	48.15
Abr	4	2.14	1.48	1.40	1.28	1.99	0.94	0.50	30.83	34.58	40.23	7.28	56.09	76.46
May	5	0.91	0.60	0.59	0.51	0.84	0.36	0.16	34.39	35.11	43.43	7.66	60.69	82.21
Jun	6	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	39.11	44.89	47.22	14.74	68.08	83.22
Jul	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.94	9.94	9.94	0.00	19.95	29.95
Ago	8	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	31.03	31.18	31.18	2.92	52.85	68.37
Sep	9	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.01	31.64	32.60	32.87	4.97	52.86	67.06
Total hm³		41.35	38.47	30.68	30.35	39.57	29.11	21.55	6.95	25.80	26.61	4.29	29.60	47.89

Tabla 6. Escorrentía superficial Sierra de Líbar.

Mes		Escorrentía subterránea hm ³						Disminución de porcentaje respecto al periodo de referencia %						
		1986-2005	2016-2035	2046-2065	2081-2100	2016-2035	2046-2065	2081-2100	2016-2035	2046-2065	2081-2100	2016-2035	2046-2065	2081-2100
		Referencia	RCP4,5 (1)	RCP4,5 (2)	RCP4,5 (3)	RCP8,5 (1)	RCP8,5 (2)	RCP8,5 (3)	RCP4,5 (1)	RCP4,5 (2)	RCP4,5 (3)	RCP8,5 (1)	RCP8,5 (2)	RCP8,5 (3)
Oct	10	3.75	3.45	3.03	3.00	3.59	2.87	2.32	8.01	19.19	19.92	4.16	23.47	37.98
Nov	11	8.10	7.60	6.56	6.44	7.73	6.37	5.16	6.08	18.92	20.51	4.58	21.36	36.29
Dic	12	13.45	12.81	11.20	11.10	12.92	10.98	9.19	4.71	16.73	17.45	3.95	18.38	31.65
Ene	1	16.23	15.69	14.04	14.06	15.77	13.84	12.16	3.36	13.47	13.40	2.83	14.75	25.06
Feb	2	14.61	14.20	12.52	12.61	14.28	12.31	10.79	2.85	14.32	13.73	2.29	15.79	26.13
Mar	3	11.37	10.94	9.47	9.43	11.01	9.27	7.88	3.74	16.68	17.05	3.09	18.45	30.65
Abr	4	9.11	8.30	7.38	7.24	8.69	6.88	5.58	8.81	18.95	20.53	4.60	24.51	38.75
May	5	6.89	5.97	5.51	5.37	6.51	4.89	3.85	13.38	19.97	22.07	5.45	29.07	44.12
Jun	6	4.23	3.60	3.34	3.27	3.96	2.94	2.32	14.94	20.95	22.74	6.47	30.58	45.22
Jul	7	2.37	2.07	1.94	1.90	2.25	1.74	1.43	12.68	18.36	19.71	5.16	26.65	39.80
Ago	8	1.53	1.37	1.29	1.27	1.47	1.18	0.99	10.39	15.79	16.91	4.05	23.02	35.50
Sep	9	1.44	1.25	1.19	1.18	1.38	1.06	0.87	12.79	16.95	17.85	3.91	26.43	39.83
Total hm³		93.07	87.25	77.48	76.86	89.55	74.30	62.54	6.25	16.74	17.41	3.77	20.17	32.80

Tabla 7. Escorrentía subterránea Sierra de Líbar.

Los valores de escorrentía superficial para la MASSL, simulada por el modelo Sacramento, muestran un descenso mayor al que cabría esperar únicamente por la variación de la precipitación en los diferentes escenarios y periodos respecto del de referencia. Esto se debe al aumento de los valores de evapotranspiración potencial, asociado al aumento de temperatura y que provoca un cambio en las condiciones de humedad del suelo, por lo que parte de la precipitación que formaría parte de esta componente se detrae de la misma, para suplir el déficit de humedad del suelo. Sin embargo, la componente subterránea varía en el mismo sentido y rango que el valor de la precipitación, debido principalmente al funcionamiento que presenta el sistema, donde el elevado grado de karstificación funcional en los afloramientos de rocas jurásicas de la zona de estudio, puestos de manifiesto anteriormente por métodos de caracterización hidrodinámica e hidroquímica (Jiménez, 2011), produce que la recarga se origine de forma muy rápida, dejando de estar estos recursos disponibles para la evapotranspiración.

Esta disminución del recurso hídrico comprometerá a largo plazo el cumplimiento de los objetivos ambientales cuantitativos y cualitativos de las masas de agua superficiales y subterráneas que se encuentran aguas abajo del área de estudio. A su vez, afectará a la disponibilidad de recursos para la cuenca baja del río Guadiaro, una zona con una elevada demanda de recursos para regadío y abastecimiento y en la que se prevé un aumento de la demanda para ambos tipos de uso (BOJA, 2013).

4. CONCLUSIONES

En el presente estudio sobre la comparación de modelos para el cálculo del recurso hídrico en acuíferos carbonáticos, llevado a cabo para la MAS Sierra de Líbar-060.044, se concluye que el modelo Sacramento es más representativo de la realidad de funcionamiento de este tipo de sistemas que el modelo SIMPA, tanto para el cálculo del recurso total como de las componentes superficiales y subterráneas. Este resultado es debido en gran medida al elevado número de parámetros utilizados por el modelo Sacramento, el cual permite definir con mayor precisión los diferentes componentes que forman parte del sistema y los procesos que en ellos ocurren.

La escasa regulación que presenta este tipo de sistemas tan poco inerciales no permite amortiguar los efectos del cambio climático en los valores a nivel mensual del recurso hídrico, provocando éstos (aumento de temperatura y descenso de precipitación) un gran impacto. En este sentido, se propone la continuación de los trabajos descritos en el presente estudio sobre medios más inerciales, con el fin de observar si éstos son capaces de presentar un efecto amortiguador sobre las principales variaciones del cambio climático en nuestra región.

La respuesta hidrológica del sistema bajo las condiciones de cambio climático están condicionadas por muchas fuentes de incertidumbres, derivadas de los modelos seleccionados y la aplicación de los mismos, así como por los futuros cambios en el uso del suelo que se puedan dar en el medio.

Los valores estimados en el presente estudio para los diferentes parámetros que utiliza el modelo Sacramento pueden considerarse, a priori, útiles para aquellos sistemas que presenten un funcionamiento hidrogeológico similar (medio carbonático con un elevado grado de karstificación funcional), y de los que no se dispongan de series de datos de hidrometría para poder llevar a cabo una calibración de los mismos.

Los resultados obtenidos para los diferentes escenarios de cambio climático tratados en el presente estudio han de considerarse como preliminares, debido a que todavía no se ha llevado a cabo una regionalización de los datos procedentes de los diferentes modelos de circulación global utilizados para la elaboración del AR5 del IPCC, el cual acaba de ser publicado recientemente (Octubre 2014). No obstante, los resultados obtenidos están en sintonía con las predicciones que para la región mediterránea se recogen en dicho informe.

Finalmente, se recomienda el uso del modelo Sacramento para este tipo de medios en los estudios de planificación hidrológica, siempre que se tenga un elevado conocimiento previo de la zona de estudio, así como no perder de vista las incertidumbres y el valor del nivel de confianza que se puedan alcanzar en la regionalización de los datos de las diferentes proyecciones de los escenarios de cambio climático, aunque sí deben ser considerados para las futuras políticas ambientales a seguir a nivel global y regional con el fin de mitigar los posibles efectos previsibles del cambio climático.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución al proyecto Water Accounting in a Multi-Catchment District (WAMCD-8.06.UE/44.7066) de la Comisión Europea y al Grupo de Investigación RNM-308 de la Junta de Andalucía.

6. REFERENCIAS

- Andreo, B., Carrasco, F., Bakalowicz, M., Mudry, J. y Vadillo, I., 2002. Use of hydrodynamic and hydrochemistry to characterise carbonate aquifers. Case study of the Blanca–Mijas unit (Málaga, southern Spain). *Environmental Geology*, 43 (1-2): 108-119.
- Andreo, B., Goldscheider, N., Vadillo I., Vías, J.M., Neukum, C., Sinreich, M., Jiménez, P., Brechenmacher, J., Carrasco, F., Hötzl, H., Perles, M. J. and Zwahlen, F., 2006. Karst groundwater protection: First application of a Pan-European Approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Líbar (Southern Spain). *Science of the Total Environment*, 357(1-3): 54-73.
- Barberá J.A. y Andreo B., 2008. Tránsito aguas bajas-aguas altas de los principales manantiales de los sistemas carbonatados de las sierras orientales de Ronda (Málaga). En: López-Geta, J.A., Rubio, J.C. y Martín-Machuca, M. (Eds.). *VII Simposio del Agua en Andalucía*, Baeza (España): 321-330.
- Bergström, S., 1995. The HBV model. In Singh V.P. (ed.) *Computer Models in Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highland Ranch, CO, pp. 443-476. ISBN 0-918334-91-8.
- BOJA, 2013. Orden de 2 de julio de 2013, por la que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, aprobado por el Real Decreto 1331/2012, de 14 de septiembre. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, 138, pp. 67-289. <http://www.juntadeandalucia.es/boja/2013/138/16>
- Burnash, R.J., Ferral, R.L. and McGuire, R.A., 1973. A Generalized Streamflow Simulation System-Conceptual Modeling for Digital Computers. Joint Federal-State River Forecast Center, Sacramento, CA, 204 p.
- Cabezas, F., Estrada, F. y Estrela, T., 1999. Algunas contribuciones técnicas del Libro Blanco del Agua en España. *Ingeniería Civil*, 115, 79-96.

- Candela, L., Elorza, F.J., Jiménez-Martínez, J. and Von Igel, W., 2012. Global change and agricultural management options for groundwater sustainability. *Comput. Electron. Agric.* 86, 120-130.
- Candela, L., Tamoh, K., Olivares, G. and Gómez, M., 2012. Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). *Sci. Total Environ.* 440, 253-260.
- Candela, L., Von Igel, W., Elorza, F.J. and Aronica, G., 2009. Impact assessment of combined climate and management scenarios on groundwater resources and associated wetland (Majorca, Spain). *J. Hydrol.* 376, 510–527.
- Delannoy, J. y Díaz del Olmo, F., 1987. La Serranía de Grazalema (Málaga-Cádiz). *Karstologia Mémoires*, 1: 55-70.
- Delannoy, J.J., 1987. *Reconocimiento biofísico de Espacios Naturales de Andalucía*. Junta de Andalucía - Casa de Velázquez (Eds.), Madrid. 50 páginas.
- Delannoy, J.J., 1998. Contribución al conocimiento de los macizos kársticos de las Serranías de Grazalema y de Ronda. En: J.J Durán y J.L. Martínez (Eds.) *El Karst en Andalucía*, Instituto Tecnológico Geominero de España; Madrid (España), 93-129.
- Durán, J.J., 1996. Los sistemas kársticos de la provincia de Málaga y su evolución: contribución al conocimiento paleoclimático del Cuaternario en el Mediterráneo Occidental. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid (España). 409 páginas.
- Estrela, T., 1997. Formulación teórica del modelo Témez. Publicaciones del CEDEX, 18 p.
- Estrela, T. y Quintas, L., 1996. El sistema integrado de modelización precipitación-aportación SIMPA. *Ingeniería Civil*, 104, 43-52.
- Gracia, F.J., Benavente, J. y Anfuso, G., 2000. Implicaciones endokársticas de la evolución geomorfológica de los poljes de Zurraque y Burfo (Sierra de Líbar, Málaga). En A. Santiago, A. Martínez y J. Mayoral (Eds.) *Actas del Primer Congreso Andaluz de Espeleología*. Ronda, Excmo. Ayuntamiento de Ronda, 341-351.
- Hartmann, A., Goldscheider, N., Wagener, T., Lange, J. and Weiler, M., 2014. Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches, *Rev. Geophys.*, 52, doi:10.1002/2013RG000443.
- IGME, 2013. Mapa de permeabilidades de España a escala 1/200.000.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., XXX pp.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlomer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jiménez, P., 2011. Los acuíferos carbonáticos del Sur de España. Caracterización y clasificación a partir de sus respuestas naturales. Académica Española – Lap Lambert Academic Publishing GmbH & Co. 384 p.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, part I: A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282-290.
- Martín Algarra, A., 1987. Evolución geológica Alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética (Sector Occidental). Tesis Doctoral, Universidad de Granada (España). 1171 páginas.
- Paredes-Arquiola, J., Solera Solera, A., Andreu Álvarez, J. y Lerma Elvira, N., 2012. Manual técnico de la herramienta EVALHID para la evaluación de recursos hídricos. Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos. Universitat Politècnica de València.
- Quintas, L., 1996. La base de datos hidrológicos "HIDRO" del CEDEX. Ingeniería Civil, 104. 117-126.
- Ruiz, J. M., 1999. Modelo distribuido para la evaluación de recursos hídricos. Monografías CEDEX M67.
- Témez, J.R., 1977. Modelo matemático de transformación "Precipitación-Aportación". Asociación de Investigación Industrial Eléctrica (ASINEL), 39 p.
- Unión Europea, 2000. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 72 pp.
- Van Dijk, A., Kirby, J., Paydar, Z., Podger, G., Mainuddin, M., Marvanek, S. and Peña-Arancibia, J., 2008. Uncertainty in river modeling across the Murray-Darling Basin. A report to the Australian Government from the CSIRO Murray-Darling Basin Sustainable Yields Project CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship.
- <http://www.clw.csiro.au/publications/waterforahealthycountry/mdbsy/technical/O-SurfaceWaterModelUncertainty.pdf>