

GUÍA METODOLÓGICA

“Sostenibilidad y adaptación de sistemas de recursos hídricos a escenarios futuros a largo plazo” (SAWARES)

Contacto: D. Pulido-Velazquez (IGME), d.pulido@igme.es; M. Pulido-Velázquez (UPVLC), mapuve@hma.upv.es

A continuación se sintetiza la propuesta metodológica y conclusiones obtenidas en el marco del proyecto coordinado IGME-UPV del Plan Nacional de i+D+I del Ministerio de Economía y Competitividad, “SOSTENIBILIDAD Y ADAPTACIÓN DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS A ESCENARIOS FUTUROS A LARGO PLAZO (SAWARES)”. (subproyectos CGL2009-13238-C02-01 and CGL2009-13238-C02-02). La finalidad del proyecto es desarrollar una metodología y herramientas para diagnosticar los efectos a largo plazo del cambio climático y global sobre la gestión de sistemas de recursos hídricos e identificar estrategias óptimas de adaptación para mitigar sus impactos a diferentes escalas espaciales: a escala cuenca y a escala acuífero.

SÍNTESIS DEL PROYECTO

Se han desarrollado *metodologías y herramientas* para evaluar efectos potenciales del cambio climático y global sobre sistemas de recursos hídricos e identificar estrategias óptimas de adaptación a escala cuenca y acuífero. La metodología se basa en construcción de escenarios futuros (con reescalado y simulación hidrológica, y proyección de demandas y usos) y modelos de gestión para evaluar múltiples impactos (hidrológicos, económicos, agronómicos y ambientales) y estrategias.

Para determinación de *series hidrológicas futuras*, se propone un método de selección de modelos climáticos con mejor ajuste entre escenario de control e histórico bajo la hipótesis de que proporcionan proyecciones más fiables, así como de “ensamblado” de simulaciones con pesos según el ajuste control-histórico. Se propone generar series hidrológicas futuras en un sistema perturbando las históricas según los cambios en medias y desviaciones típicas previstos en las proyecciones climáticas disponibles en Europa (proyectos PRUDENCE y ENSEMBLE) mediante dos enfoques: corrección de series hidrológicas históricas y simulación hidrológica de series climáticas corregidas. Ambos se utilizaron para definir escenarios futuros de recarga y aportaciones y generar múltiples escenarios sintéticos futuros con modelos ARMA. En cuanto a la simulación hidrológica, se han desarrollado metodologías para simulación eficiente del flujo subterráneo y relación río-acuífero en modelos de gestión. En el acuífero Serral-Salinas se simuló escenarios futuros de recarga, mostrando el efecto clave de cambios en la varianza de las series de lluvia en zonas semiáridas sobre la recarga total. Para el caso Mancha Oriental, un modelo de simulación hidrológica detallado en SWAT ha permitido la simulación integral de procesos lluvia-escurrentía y procesos agronómicos en escenarios futuros. Además, se ha desarrollado una metodología que, mediante matrices de respuesta y funciones de lixiviado, permite vincular cambios en el uso de fertilizantes con concentraciones de nitrato en el acuífero. Los trabajos han permitido caracterizar el impacto del cambio climático en la *demanda* de riego, producción de cultivos y lixiviado mediante modelos agronómicos (funciones de producción y lixiviado de nitratos en Mancha Oriental con EPIC). Usando cadenas de Markov y autómatas celulares se obtuvieron mapas probabilísticos de futuros *usos del suelo* combinando tendencias históricas, fuerzas motrices y proyecciones europeas (EuRuralis).

La investigación en *modelos hidroeconómicos* se ha centrado en su desarrollo para simular el impacto del cambio global y evaluar y diseñar estrategias de adaptación. Se han desarrollado modelos probabilísticos de redes bayesianas para incorporación explícita de las distintas fuentes de incertidumbre en la gestión y adaptación, tanto en el complejo sistema Mancha Oriental y en el acuífero de Serral-Salinas, mediante redes bayesianas dinámicas. Se han desarrollado modelos hidroeconómicos de simulación para valoración de impactos y estrategias de adaptación en las cuencas del Serpis y Júcar, y modelos de optimización para la selección óptima de un programa de medidas de adaptación al cambio climático, con aplicación a la cuenca del río Orb, Francia. Por último, se ha estudiado el potencial de instrumentos económicos, como políticas eficientes de precios del agua, para gestionar la escasez.

Se han publicado 11 artículos SCI del primer cuartil y presentado más de 20 ponencias en congresos internacionales, finalizando con unas jornadas internacionales para difundir los resultados e intercambiar experiencias con expertos (Granada, junio 2013). Más información en la web del proyecto: <http://www.iama.upv.es/igme/sawares>

RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS DE IMPACTOS Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Se proponen los siguientes pasos y recomendaciones:

I) ESCENARIOS HIDROLÓGICOS DE CAMBIO CLIMÁTICO (CC) PARA MODELOS DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

I.A. GENERACIÓN DE ESCENARIOS HIDROLÓGICOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA MODELOS DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Se trata de incorporar la información disponible sobre la posible evolución del clima en la definición de escenarios hidrológicos futuros en los sistemas a estudiar. Se aplicarán una serie de transformaciones que permitan adaptar la información inicial a la escala de análisis requerida por el sistema.

Revisión y análisis de las estimaciones disponibles

Para generar escenarios de cambio climático en un sistema primeramente se recomienda llevar a cabo un análisis crítico de las estimaciones disponibles en la literatura sobre los efectos del cambio climático. Conviene, por ejemplo, revisar las predicciones del IPCC sobre emisiones y variables climáticas, y la información disponible sobre escenarios climáticos e hidrológicos en España derivada de diferentes proyectos internacionales y europeos PRUDENCE¹; ENSEMBLES²; o CORDEX³ (ofrecen posibilidades de descarga de series temporales de las variables climáticas relevantes para los escenarios futuros de cambio climático) así como los trabajos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet) en colaboración de la Universidad de Castilla-La Mancha y la Fundación para la Investigación del Clima en el marco del PNACC, etc.

En el proyecto se analizaron críticamente las estimaciones disponibles sobre CC en España. Se seleccionó, procesó y facilitó el acceso a la información a la escala espacio-temporal más adecuada para generar escenarios futuros. Se estudió la bondad de las calibraciones de los modelos climáticos regionales (MCR) con objeto de realizar una selección razonada de las proyecciones. Se elaboraron mapas para la península que sintetizan la información necesaria para corregir según la metodología propuesta (Sanz, 2010) las series climáticas/hidrológicas históricas incorporando el efecto del CC.

Reescalado de información

Tradicionalmente las predicciones del cambio climático se han realizado mediante modelos de circulación general (GCMs) que simulan el flujo de circulación general atmosférico. Son herramientas fundamentales para la evaluación del cambio climático, pero por otro lado constituyen modelos muy groseros en cuanto a resolución (resolución horizontal típica de unos cientos de kilómetros). En las últimas décadas se ha trabajado en el desarrollo de técnicas de regionalización, reescalado o “downscaling” para traducir las variaciones del clima en resultados a escala regional y local. Aunque hay una extensa literatura sobre las fortalezas y debilidades de los métodos de “downscaling” (dinámicos y estadísticos) para diferentes variables climáticas (ej., Fowler et al., 2007) se ha prestado escasa atención a la elección de métodos de downscaling para examinar el impacto del cambio climático en sistemas de recursos hídricos y poder evaluar la sostenibilidad en escenarios futuros. Lógicamente, cuando se estudia la gestión de un sistema

¹ <http://prudence.dmi.dk/>

² <http://www.ensembles-eu.org/>

³ <http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr/>

de recursos hídricos, la hidrología histórica se debe caracterizar con un nivel de detalle espacial acorde con el caso de estudio y los datos disponibles. El estado hidrológico del sistema se reproducirá con mayor detalle y precisión con la serie histórica elaborada para construir el modelo de gestión (de ahora en adelante, la "serie hidrológica original") que utilizando directamente los escenarios de control de los MRC. Se revisaron distintas metodologías para traducir los resultados de modelos climáticos regionales en series temporales hidrológicas (aportaciones superficiales y recarga a acuíferos, básicamente) de sistemas, realizándose una valoración crítica sobre las técnicas de regionalización existentes y sus aplicaciones. Se identificaron puntos débiles, en la corrección de series históricas para la generación de series futuras incorporando el efecto del CC. No se encontraron casos en los que las series históricas se corrijan, además de con las variaciones en medias mensuales, con las variaciones en otros estadísticos como la varianza. Se elaboró un procedimiento (D. Pulido-Velazquez et al., 2011, 2014) para derivar series correspondientes a escenarios futuros de cambio climático cuyos estadísticos principales (orden 1 y 2) se obtienen variando los de la serie histórica de acuerdo con las predicciones disponibles en la región de estudio (diferencias entre escenario de control y escenarios de cambio climático disponibles).

A continuación se describen los pasos a seguir para modificar la serie original:

1. Obtener las series de las variables climáticas/hidrológicas históricas a utilizar: $y^{x,j}(O)$ donde x varía de 0 a $X-1$ (siendo X el número de años de la serie) y j varía desde 1 a 12 representando los meses de Enero a Diciembre. Por lo tanto, el producto representa el número de meses en la serie.
2. Identificar la celda del RCM donde la serie histórica es representativa para el sistema y obtener el valor promedio mensual (μ^j) y la desviación estándar (σ^j) de la serie $y^{x,j}(s)$ (donde s puede adoptar dos valores, 1 para el escenario de control y 2 para el escenario futuro).
3. Para normalizar la serie $y^{x,j}(s)$ (tanto para la serie de control como la futura) se utiliza $\mu^j(s)$ con $\sigma^j(s)$. La serie normalizada se obtendrá como

$$y_N^{x,j}(s) = [y^{x,j}(s) - \mu^j(s)] / \sigma^j(s) \quad (1)$$

4. El cambio relativo en la media y la desviación estándar vendrá dado por

$$\Delta\mu^j = \mu^j(2) - \mu^j(1) / \mu^j(1) \quad y \quad \Delta\sigma^j = \sigma^j(2) - \sigma^j(1) / \sigma^j(1) \quad (2)$$

5. La serie modificada para tener en cuenta el efecto del cambio climático ($y^{x,j}(C)$) se calcula como:

$$y^{x,j}(C) = \sigma^j(C) \cdot y_N^{x,j}(O) + \mu^j(C) \quad (3)$$

Dónde $\sigma^j(C) = \sigma^j(O) \cdot (1 + \Delta\sigma^j)$ y $\mu^j(C) = \mu^j(O) \cdot (1 + \Delta\mu^j)$, donde (O) se emplea para indicar que se refiere a la serie original.

Se proponen generar series hidrológicas futuras en un sistema perturbando las históricas según los cambios en medias y desviaciones típicas previstos en las proyecciones climáticas disponibles en Europa (proyectos PRUDENCE y ENSEMBLE) mediante dos enfoques: corrección de series hidrológicas y simulación hidrológica de series climáticas corregidas (D. Pulido-Velazquez et al., 2011, 2014). Ambos se utilizaron para definir escenarios futuros de recarga y aportaciones y generar múltiples escenarios sintéticos futuros con modelos ARMA (Monte, 2012).

Aplicaciones:

Se pretende estimar la variación en las series de recarga a acuíferos, evaporaciones en embalse y aportaciones superficiales o escorrentía superficial del sistema (suma de la escorrentía directa el flujo subsuperficial y flujo base), variables que está relacionada con la precipitación, la evapotranspiración y la forma y características geológicas de la cuenca, tal y como se suele reflejar en los modelos lluvia-escorrentía. La metodología propuesta se aplica tanto en sistemas a escala de cuenca como a escala de acuífero. Los casos de estudio analizados (Serpis y Júcar a escala de cuenca y Serral Salinas y Mancha Oriental a escala de acuífero) han permitido extraer conclusiones sobre la aplicabilidad de la metodología (D. Pulido-Velazquez et al., 2011, 2014). Entre las conclusiones generales derivadas de la aplicación para diferentes variables y escalas espacio-temporales destacan:

- La metodología no es aplicable cuando se pretende perturbar series de variables que físicamente no pueden adoptar valores negativos y que contienen un elevado número de ceros (por ejemplo, precipitaciones a escala diaria). Las series perturbadas presentan en estos casos numerosos negativos, y si se sustituyen por ceros no se preservaría el cambio en media y desviación estándar impuesto a priori.
- En el resto de aplicaciones realizadas funciona de forma correcta, permitiendo incorporar más información que el simple cambio de media impuesto mediante el método clásico de multiplicar directamente la serie histórica por unos coeficientes.

I.B SIMULACIÓN DE IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LA RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO.

Se espera que los cambios previstos en temperatura y precipitaciones alteren la recarga a los acuíferos, produciendo variaciones en el nivel freático, y por tanto, en la disponibilidad de recursos, en la relación río-acuífero, en los costes de bombeo, y en la contaminación de las aguas subterráneas. Aunque los trabajos sobre la sensibilidad de los sistemas de aguas subterráneas han crecido sensiblemente en los últimos años (Green et al., 2011; Candela et al., 2012; Klove et al., 2013) siguen siendo reducidos frente a los estudios de estudios sobre las aguas superficiales, y en pocos de ellos se estudian los impactos del CG sobre la calidad (Alley, 2001; Dragoni and Sukhija, 2008).

Comparativa y análisis de herramientas y técnicas disponibles:

Entre las técnicas clásicas de simulación distribuida de flujo subterráneo en DF y EF se seleccionará la que mejor se adapte al problema a simular y la información existente. En aplicaciones en las que se desee estudiar aspectos relativos a la calidad, por su importancia en la gestión del sistema, se seleccionará para simular el transporte una herramienta de las disponibles en la literatura que sea apropiada a la naturaleza de la contaminación y los procesos a modelar.

Metodología y aplicación a casos de estudio:

Se calibrarán modelos en DF o EF del flujo para los casos a analizar. Los modelos se utilizará para simular el impacto del cambio climático en la recarga del acuífero y en los niveles piezométricos, volúmenes y relación río-acuífero. También se simulará el transporte de contaminantes para el estudio de la contaminación subterránea.

I.C. SIMULACIÓN DE LA HIDROLOGÍA DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN MODELOS DE GESTIÓN

Se ha desarrollado una guía sobre las técnicas y herramientas más apropiadas para integrar la componente subterránea en modelos de gestión según la naturaleza del problema a modelar (tanto a escala de cuenca como a escala de acuífero) y el objetivo del análisis a llevar a cabo. La guía que

pretende servir de apoyo en la toma de decisiones respecto a la elección de técnicas apropiadas para la modelación de las aguas subterráneas y la relación río acuífero en modelos de gestión.

En dicha guía se asume una escala temporal de simulación mensual, que es la habitualmente empleada en los modelos de gestión para analizar sistemas de recursos hídricos. A esta escala, la simulación del flujo superficial en modelos de gestión puede ser aproximada mediante un simple balance en una red de flujo. Pero la simulación del flujo y transporte subterráneo y la interacción aguas superficiales-subterráneas normalmente requiere recurrir a modelos distribuidos más complejos para resolver la ecuación de flujo en medio poroso con una adecuada precisión (Gorelick, 1983).

En la elección de las técnicas de modelación juega un papel fundamental la escala espacial adoptada para el estudio (escala de cuenca o escala de acuífero) y la conexión de la masa de agua subterránea con el sistema superficial.

En el caso de análisis de sistemas a escala de cuenca nos enfrentamos a problemas de gestión generalmente más complejos, por el elevado número de elementos (embalses, recursos superficiales y subterráneos, demandas, etc) que interaccionan entre sí y los múltiples aspectos a analizar. La simulación de numerosas alternativas sobre largos horizontes temporales o la optimización de sistemas complejos de gran escala espacial obliga al uso de modelos de flujo subterráneo computacionalmente eficientes (D. Pulido-Velázquez et al., 2006a). Por otro lado, hoy en día se precisa recurrir a aproximaciones multiobjetivo para analizar problemas de gestión de agua, por lo que se necesitan modelos matemáticos cada vez más complejos que permitan analizar simultáneamente los aspectos hidrológicos, económicos e institucionales conjuntamente con los usos del agua y las decisiones para una adecuada gestión integral del recurso (McKinney et al., 1999). El coste computacional en estos casos de la simulación del flujo subterráneo es un aspecto crucial para que los modelos de gestión sean operativos. Por ese motivo es frecuente recurrir a modelos agregados para representar la hidrología subterránea. Pero para obtener aproximaciones con una aceptable precisión se requiere en muchos casos el uso de modelos distribuidos de flujo y transporte subterráneo. Sin embargo, la necesidad de cumplir el requisito de bajo coste computacional en modelos de gestión complejos ha motivado el uso de modelos que difieren de los clásicos en diferencias finitas, con mayores requerimientos (Theodossiou, 2004). En estos casos se suele recurrir a soluciones explícitas de menor coste computacional derivadas mediante funciones de influencia o matrices de respuesta (ej. Schwartz, 1976; Andreu et al., 1982) o ecuaciones de estado como las obtenidas por el Método de Autovalores (Andreu y Sahuquillo, 1987; D. Pulido-Velázquez et al., 2007).

Notar que el interés en usar estas técnicas de simulación distribuida de menor coste computacional crece cuando existe conexión hidráulica entre los acuíferos y la componente superficial. En estos casos, para obtener una aproximación adecuada de la solución se deben considerar en cada paso de tiempo simultáneamente la interacción (descargas, detracciones por bombeos, etc) entre las aguas superficiales y subterráneas para todos los acuíferos implicados. El menor interés de las soluciones por autovalores y las particularidades de las mismas en casos sin conexión con el sistema superficial se describe en más detalle en los artículos (D. Pulido-Velázquez et al., 2011b y 2012).

Sin embargo, en los modelos de gestión “menos complejos” en cuanto al número de elementos que componen el sistema, los centrados exclusivamente en un sistema acuífero, si que se puede recurrir a técnicas clásicas de simulación de flujo subterráneo (que además permiten modelar también comportamientos no lineales) como se pone de manifiesto en la herramienta GWM (Ahlfeld et al., 2005) desarrollada para el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Esta herramienta sin embargo presenta limitaciones en aplicaciones de sistemas a escala de cuenca, siendo sólo utilizable en casos con pocos elementos y analizados sobre periodos temporales no excesivamente largos (D. Pulido-Velázquez

et al., 2008).

En la siguiente tabla (Tabla 1) se resumen las recomendaciones incluidas en la presente guía para modelar e integrar la componente subterránea aproximándola de forma distribuida en modelos de gestión:

MODELOS DISTRIBUIDOS	TÉCNICAS DE INTEGRACIÓN	IDONEIDAD PARA MODELOS DE GESTIÓN	
		SIST COMPLEJOS CON MÚLTIPLES ELEMENTOS (CUENCA)	SIST. ACUÍFERO
Métodos numéricos clásicos	Método de acoplamiento	NO	SI (sol explicita)
	Simulación-optimización acoplados	NO	SI
Soluciones analíticas para una acción (Glover y Jenkins; Hantush, Hunt, etc)	Funciones de influencia	SI (supone acuífero lial)	Sólo acuíferos lineales
Ecuación de estado por autovalores (Método de Autovalores, MPE)	Método de acoplamiento*	SI (supone acuífero lial)	Sólo acuíferos lineales

Tabla 1. Modelos y técnicas recomendadas para integrar la simulación distribuida del flujo subterráneo en distintos problemas de gestión.

Notar que las ecuaciones de estado obtenidas por autovalores y las soluciones analíticas en general asumen comportamiento lineal del acuífero (se han desarrollado algunos trabajos para mejorar la aproximación que las citadas ecuaciones de estado [D. Pulido-Velazquez et al., 2009; D. Pulido-Velazquez et al., 2007; D. Pulido-Velazquez et al., 2006] y las funciones de influencia [Maddock, 1974] proporcionan para problemas no lineales), mientras que los métodos numéricos clásicos si permiten modelar comportamientos no lineales.

Las técnicas de funciones de influencia también han sido utilizadas para integrar la simulación del transporte de contaminantes en problemas de optimización de la gestión a escala de acuífero (Pena-Haro et al., 2010) asumiendo linealidad en el comportamiento del sistema.

I.D. INCERTIDUMBRES EN LAS ESTIMACIONES DEL IMPACTO HIDROLÓGICO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Se pretende valorar algunas incertidumbres asociadas al estudio del impacto del CC en la hidrología de un sistema: las incertidumbres ligadas a los MCR empleados (I.D.1), la aleatoriedad de las series de entradas hidrológicas (I.D.2); y las incertidumbres en las características hidrogeológicas (I.D.3)

Incertidumbres asociadas a los MCR

Para cuantificar las entradas hidrológicas futuras en un sistema, se ha propuesto una metodología que persigue valorar las incertidumbres asociadas a los MCR y poder seleccionar justificadamente las características hidrológicas (estadísticos) más representativas de un determinado escenario climático futuro en un sistema de recursos hídricos. Se propone un análisis multiobjetivo para la selección de los modelos de cambio climático con mejor ajuste entre el escenario de control e histórico bajo la hipótesis de que proporcionan proyecciones más fiables, junto con un procedimiento de “ensamblado” de proyecciones con pesos basados en el ajuste control-histórico (Pulido-Velazquez et al., 2014).

Los “ensamble” de proyecciones aglutinando resultados de distintas proyecciones individuales, permiten obtener proyecciones más robustas y representativas que las basadas en un solo modelo. Con esta filosofía nació el proyecto integrado ENSEMBLES (2005–2009), financiado por el VI Programa Marco de la Unión Europea. Los ensamblados están constituidos idealmente por un número suficiente de miembros que permiten cuantificar las incertidumbres de las proyecciones, bien sea mediante rangos, o mediante funciones de densidad de probabilidad. Las proyecciones probabilísticas basadas en ensamblados pueden asignar un peso a cada miembro del ensamblado que dependa de la calidad o

grado de confianza que se asigne a cada uno de ellos. Esta ponderación de los miembros es actualmente tema de investigación activa y no existe un grado suficiente de consenso sobre su aplicación práctica. De hecho, en la mayoría de las implementaciones operativas para predicción probabilística tanto para el corto como medio plazo se consideran todos los miembros del ensamblado como equiprobables (AEMET, 2009). La metodología de ensamblado que se desarrolla a continuación pretende dar un peso mayor a las proyecciones obtenidas con los modelos que mejor calibran los principales estadísticos climáticos históricos en el sistema considerado como caso de estudio.

Dado que estamos interesados en reproducir los cambios en el año medio para los estadísticos principales de cada mes (para su posterior utilización en la generación de series futuras), el análisis de las calibraciones obtenidas se centrará en dichas variables.

Para sintetizar la bondad de los ajustes obtenidos se ha definido un indicador (I_d) como la sumatoria (para los doce meses del año medio representados en las figuras) del valor absoluto de la distancia relativa entre la media de la serie histórica y el escenario de control (diferencia entre la media de la serie histórica y el escenario de control, dividida entre la serie histórica).

A partir del valor adoptado por esta variable se ha llevado a cabo un análisis multiobjetivo para detectar aquellos modelos que son “inferiores” al resto en cuanto a la bondad de la calibración obtenida, es decir aquellos que quedan fuera de la frontera. Este análisis multiobjetivo consiste en la comparación de todos los modelos entre sí para la eliminación de aquellos que son “peores” que alguno de los modelos en todo (calibran peor todas las variables consideradas: media y desviación estándar de la precipitación y de la temperatura).

Para los modelos finalmente seleccionados (eliminando los inferiores) se ha definido un nuevo índice globalizado (I_b') como la suma de los índices I_p (los 4 índices asociados a las medias y desviaciones estándar de precipitación y temperatura) de cada modelo. Este índice ha sido reescalado definiendo el índice I_b^* , que cumple que la suma de los valores obtenidos para todos los modelos correspondientes a un mismo escenario de emisión sea igual a 1 (tanto para los modelos de PRUDENCE, empleados para simular escenarios de emisiones A2, como los de ENSEMBLES usados para escenarios A1B). Los valores complementarios del índice I_b^* , $(1-I_b^*)$ nuevamente reescalados a 1 (índice I_b) serán utilizados como peso por el que deben ser ponderadas las series obtenidas con cada modelo para llevar a cabo un “ensemble” de predicciones en que tengan una mayor influencia los modelos mejor calibrados (modelos más parecidos al histórico).

Dicha metodología ha sido aplicada en el estudio de la recarga en los acuíferos Serral Salinas (D. Pulido-Velazquez et al., 2014) y Mancha Oriental (Trillo, 2013) y en la cuenca del Júcar (Escribá et al., en revisión).

Aleatoriedad de las entradas hidrológicas:

Se ha trabajado en incorporar el efecto de la aleatoriedad de las series de entradas hidrológicas futuras en un sistema (para unas mismas condiciones climáticas) utilizando modelos estocásticos que permitan generar múltiples series sintéticas con los mismos estadísticos que caracterizan unas determinadas condiciones climáticas o hidrológicas.

Se pretende incorporar la incertidumbre asociadas a la hidrología al valorar un determinado escenario hidrológico de cambio climático. Dicho escenario viene caracterizado por una serie hidrológica (obtenida para cada variable hidrológica seleccionada) representativa de la situación de cambio climático que puede ser derivada para un modelo climático regional mediante la técnica de perturbación de series

históricas propuesta y descrita en la actividad I.A. La serie obtenida es una de las infinitas que podrían generarse preservando los estadísticos correspondientes a la nueva situación de cambio climático (escenario climático correspondiente al modelo regional adoptado). Suponiendo que se preserva la correlación espacio-temporal de las series en las nuevas condiciones de cambio climático, se podrían generar múltiples series sintéticas (mediante modelos ARMA) para obtener conjuntos de series hidrológicas que responden a un mismo escenario de cambio climático. Dichas series podrían ser utilizadas posteriormente para cuantificar incertidumbres relativas a los resultados obtenidos con una determinada gestión del sistema analizando mediante el Método de Montecarlo los resultados obtenidos con el modelo de gestión para cada una de las citadas series. La metodología se aplicó en el marco del proyecto en el sistema Serpis (Monte, 2012).

Incertidumbres en las características hidrogeológicas

Finalmente, se considera el efecto que las incertidumbres en las características hidrogeológicas pueden tener en el estado del acuífero y en modelos de gestión. Se propone generar múltiples campos equiprobables de parámetros hidrodinámicos y analizar los resultados obtenidos al simular la evolución del estado del acuífero para cada uno de ellos aplicando el Método de Montecarlo. La metodología ha sido aplicada en acuíferos sintéticos para explorar un mayor rango de variabilidad en los parámetros (Pulido-Velazquez D et al. 2011 y 2012). El análisis realizado será útil para posteriores estudios de CC en sistemas reales.

II) IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS DEMANDAS, CALIDAD Y CONSECUENCIA DE OBJETIVOS AMBIENTALES

Si queremos analizar escenarios plausibles futuros, debemos tener en cuenta que no sólo las condiciones climáticas e hidrológicas pueden variar, sino que también es de esperar **cambios en los usos del suelo y las demandas**, tanto por adaptación al cambio climático como por lo que requieran los nuevos contextos socioeconómicos. La evolución de las demandas no depende sólo de los potenciales escenarios climáticos y de emisión de CO₂, sino también depende de los escenarios socioeconómicos que se contemplen para el futuro. La demanda de agua probablemente cambiará de forma sustancial en el futuro, con implicaciones significativas para la gestión y adaptación al cambio climático.

II.A. EVALUACIÓN DE LAS NECESIDADES DE RIEGO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Los aumentos en la temperatura previstos y los cambios en los patrones de lluvia disminuirán la humedad del suelo, lo que producirá un descenso en el rendimiento de los cultivos y un aumento en la demanda de riego, parcialmente compensando por el incremento de la concentración de CO₂. Estos efectos serán directos en los cultivos de secano e indirectos para los cultivos de regadío, ya sea por el descenso de los niveles piezométricos o del agua almacenada y, por consiguiente en las dotaciones agrícolas. Para valorar el impacto del cambio global (CG) en las demandas agrícolas se han de emplear modelos agronómicos de simulación que nos permitan definir los cambios en el rendimiento de los cultivos y en las necesidades de riego ante los cambios de precipitación, temperatura y concentración de CO₂. Algunos de estos estudios son específicos de la Península Ibérica, como el de Minguez et al. (2004). Sin embargo, estos estudios sólo analizan el impacto sobre un cultivo determinado. En el marco del proyecto SAWARES se ha desarrollado de una metodología para integrar la simulación agronómica en modelos de gestión para desarrollar estrategias de adaptación frente al cambio climático, basada en la calibración de funciones de producción y lixiviado de nitratos (para incorporar la calidad de aguas).

La metodología a usar requiere del análisis espacial y temporal de estas funciones de producción mediante GIS para su modelación a escala regional para un sistema de recursos hídricos. Por ello,

finalmente se ha adoptado una versión GIS del modelo de simulación agronómica y de suelos EPIC. El modelo GEPIC trata cada celda de la malla en que se discretiza la zona de estudio como un emplazamiento en el que aplicar la formulación de EPIC. Las funciones de producción de los cultivos nos permitirán obtener costes de oportunidad generados ante cambios en la gestión del sistema en distintos escenarios de cambio climático. Las funciones de lixiviado de nitratos nos permiten abordar el problema de la contaminación de nitratos en el caso de estudio de la Mancha Oriental mediante un modelo hidro-económico de gestión.

Se han obtenido funciones de producción o rendimiento de cultivos y de lixiviado de nitratos regionalizadas para los principales cultivos del caso de estudio de la Mancha Oriental (trigo, maíz y cebada). Para evaluar si es posible realizar funciones de producción distintas por zonas o si por el contrario una sola función de producción describe adecuadamente toda la zona de estudio se desarrolla un análisis de la varianza multifactorial (ANOVA) y de la covarianza (ANCOVA). Queda pendiente el obtener funciones de rendimiento para ciertos cultivos de la zona que por sus características singulares no son contemplados directamente en GEPIC, mediante el uso directo de EPIC para cada zona de estudio (ej. cebolla, alfalfa).

II.B. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CULTIVOS

Diferentes modelos agronómicos (ej. CropSyst, CERES, EPIC) nos permiten simular el crecimiento y rendimiento de cultivos ante ciertas condiciones. Existe una extensa literatura sobre el desarrollo de funciones de producción de ciertos cultivos en función del agua suministrada y otras variables climáticas y agronómicas.

En el proyecto se ha desarrollado una metodología para el análisis espacial y temporal de estas funciones de producción mediante GIS para su modelación a escala regional para un sistema de recursos hídricos, teniendo como precedente el trabajo de Liu et al. (2007) para el trigo. Se han obtenido funciones de producción o rendimiento de cultivos y de lixiviado de nitratos regionalizadas para los principales cultivos del caso de estudio de la Mancha Oriental (trigo, maíz y cebada). Para evaluar si es posible realizar funciones de producción distintas por zonas o si por el contrario una sola función de producción describe adecuadamente toda la zona de estudio, hemos desarrollado un análisis de la varianza multifactorial (ANOVA) y de la covarianza (ANCOVA). Las funciones de producción de los cultivos nos permitirán obtener costes de oportunidad generados ante cambios en la gestión del sistema en distintos escenarios de cambio climático.

II.C. OBJETIVOS AMBIENTALES DE LA DMA/DHPAS Y CAMBIO CLIMÁTICO

Tanto la DMA (Directiva 2000/60/CE) como la Directiva Hija de Protección de las Aguas Subterráneas (DHPAS; Directiva 2006/118/CE) establecen unos objetivos ambientales a lograr en las masas de agua superficiales y subterráneas para conseguir lo que define como un “buen estado” de las mismas. Para el desarrollo de estudios de adaptación al cambio climático, es importante analizar su integración en modelos de gestión frente al cambio climático y evaluar el impacto del cambio climático sobre el cumplimiento de los mismos.

En concreto, nos hemos centrado en el objetivo de la concentración máxima de nitratos en las aguas subterráneas, establecida en 50 mg/l, en cuencas con un uso intensivo de fertilizantes en la agricultura. Para estudiar el cumplimiento de los objetivos de calidad de la DMA-DHPAS en masas de agua subterráneas en riesgo por contaminación difusa procedente de la agricultura, y los efectos que sobre dicho cumplimiento tiene el cambio climático y los cambios en la demanda agrícola, se desarrollaron

funciones que relacionan el agua y fertilizantes aplicados con el lixiviado de nitratos a los acuíferos mediante modelos de simulación agronómica (ej., GIS_EPIC, NLEAP, etc.). La metodología ha sido detallada en 2 artículos: Peña-Haro et al., 2009 para un caso sintético, y Peña-Haro et al., 2011 para el caso Salobral-Los Llanos (acuífero de Mancha Oriental).

II.D. PROYECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

El objetivo es, mediante la aplicación de diferentes técnicas (incorporando procesos de Markov, redes neuronales y autómatas celulares), y haciendo el mejor uso posible de la información histórica de usos del suelo y de las proyecciones globales, diseñar escenarios plausibles de usos del suelo que sean consistentes con los escenarios SRES, y desagregarlos espacialmente a la escala adecuada de trabajo. El autómata celular ayuda a modelar la localización de las diferentes coberturas, mientras que las redes neuronales o regresiones múltiples ayudadas por las cadenas de Markov proyectan las tendencias o probabilidades de esos cambios en cobertura/uso del suelo a futuro. Se propone explorar para ello, entre otras herramientas, el módulo Land Change Modeler (LCM) del software Idrisi. La combinación de las diferentes técnicas produce mapas que caracterizan los escenarios posibles más probables. Para incluir los efectos de los diferentes escenarios de emisiones generados por el IPCC (en principio centrados en el escenario A1B), y por tanto de cambio climático, se parte de las proyecciones de diferentes proyectos europeos. En especial dos de ellos son relevantes para crear los escenarios futuros de la Mancha Oriental: IMAGE4 (horizonte al 2100) y EUruralis (horizonte 2030). Con la información recopilada de las proyecciones de los proyectos europeos, se modificará la matriz de transición que propone la técnica de las cadenas de Markov en el módulo LCM. El resultado será una matriz que incluye los efectos del cambio climático para los diferentes horizontes del escenario A1B propuestos a corto, mediano y largo plazo. Finalmente, combinando la información histórica de las fuerzas motrices y la matriz de transición modificada dentro del módulo Land Change Modeler se producirán mapas del escenario A1B para diferentes horizontes temporales.

En el marco del proyecto, el desarrollo de escenarios futuros de usos del suelo en la Mancha Oriental se ha llevado a cabo mediante uso combinado de tendencias históricas (de imágenes de satélite) y fuerzas motrices, y proyecciones europeas (EuRuralis 2.0⁵) para, usando cadenas de Markov y autómatas celulares, cuantificar tendencias futuras y obtener mapas futuros probabilísticos de usos del suelo (Henríquez Dole, 2012).

III) DISEÑO y PROGRAMACIÓN DE MODELOS DE GESTIÓN (OPTIMIZACIÓN Y SIMULACIÓN) HIDROECONÓMICOS A ESCALA CUENCA Y A ESCALA ACUÍFERO

La toma de decisiones entorno a la planificación de los recursos hídricos depende en gran medida de las condiciones climáticas en el área de influencia del sistema y del adecuado manejo en la operación del sistema hidráulico. Erróneamente hasta el momento se ha asumido que las condiciones climáticas futuras tendrían las mismas características y variabilidad de la condiciones del pasado; por lo tanto, el reto ahora es incorporar en la planificación de los recursos hídricos la incertidumbre del cambio en las condiciones climáticas futuras.

⁴ <http://themasites.pbl.nl/en/themasites/image/index.html>

⁵ <http://www.eururalis.eu/eururalis2.htm>

La gestión de Sistemas de Recursos Hídricos (SRH) frecuentemente implica el planteamiento de múltiples objetivos en conflicto y la toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre. Debido a la diversidad de intereses en los procesos de toma de decisiones, la gestión integrada es la clave del desarrollo sostenible de los recursos hídricos, ya que conlleva evaluar el impacto de una determinada estrategia de gestión teniendo en cuenta consideraciones ambientales, sociales, económicas y políticas entre otras, mediante un proceso participativo de toma de decisiones.

De esta forma, los Sistemas de Apoyo a la Decisión (SAD) permiten evaluar los impactos generados por diversas políticas o intervenciones de gestión encaminados a la resolución o mitigación de problemas relacionados con la gestión de los recursos hídricos. Los modelos hidroeconómicos permiten además integrar la información económica en el análisis. En este estudio se presenta una metodología para analizar el comportamiento de un sistema de recursos hídricos a escala de cuenca bajo diferentes escenarios hidrológicos y de una política de gestión.

III.A. MODELOS HIDROECONÓMICOS A ESCALA DE CUENCA PARA ANÁLISIS DE IMPACTOS Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Se pretende analizar los efectos del cambio climático sobre la gestión y sostenibilidad de los recursos hídricos, estudiando el impacto económico y ambiental del mismo y las repercusiones sobre las garantías de suministro a las demandas del sistema. Para ello se recurrirá al desarrollo de modelos matemáticos de simulación y optimización, tanto a escala de cuenca como de masa subterránea.

El uso de herramientas para el desarrollo de modelos hidroeconómicos (ej. M. Pulido-Velázquez et al., 2006 y 2008; Harou et al., 2009), como por ejemplo el módulo de simulación hidroeconómico actualmente integrado en el SAD AQUATOOL (Andreu et al., 1996), permite llevar a cabo una evaluación del impacto del cambio climático en sistemas de recursos hídricos para los escenarios hidrológicos generados, teniendo en cuenta la integración eficiente de la componente subterránea y la relación río-acuífero. Se pueden aplicar diversos criterios para analizar los impactos del cambio climático sobre las garantías, vulnerabilidad, y resiliencia del suministro a las demandas del sistema y el impacto económico, tanto en términos de cambios en los costes de operación como en cuanto a los costes de escasez por déficit de suministro.

En el marco de este proyecto se ha trabajado con diversos casos de estudio piloto para el desarrollo de modelos de gestión de la adaptación al cambio climático a escala de cuenca. Así, para la cuenca del río Serpis se desarrolló un modelo de gestión para valorar impactos y políticas de adaptación a largo plazo. Se parte de los resultados de los escenarios de cambio climático generados para Europa en el Proyecto PRUDENCE, con el fin de analizar cambios en la hidrología y repercusiones económicas mediante el empleo de un modelo hidroeconómico. Se usa un modelo de gestión de recursos hídricos mediante el SAD AQUATOOL para reproducir la gestión del sistema en los escenarios futuros y evaluar las garantías y fallos que se producen en las demandas agrícolas, proyectadas en las condiciones futuras de cambio climático. De esta manera pueden conocerse las repercusiones futuras que tendría la disminución de los recursos hídricos en el sistema de explotación. Analizados los datos obtenidos se evalúa el coste de escasez en situación de cambio climático en base a las nuevas condiciones que se puedan presentar. Para ello se modifican las funciones económicas para cada una de las Demandas Agrícolas (UDA's) asumiendo los mismos precios de los cultivos que en la situación actual. Los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta, han permitido estimar el coste de escasez del recurso en las unidades de demanda agrícolas a consecuencia de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos futuros de la cuenca del Serpis, así como el incremento en los costes de explotación, debido a los bombeos

adicionales requeridos para mantener los déficit en las demandas dentro de niveles históricamente razonables.

También se ha desarrollado una metodología desarrollada para el análisis probabilístico de indicadores de rendimiento de un sistema (garantía, resiliencia, vulnerabilidad, sostenibilidad) incorporando redes bayesianas para el tratamiento de la incertidumbre (tesina de Máster de Barbero, 2012). De esta forma, se incorpora el enfoque determinístico mediante la simulación y optimización de procesos de gestión de SRH a escala de cuenca (Aquatool) y el enfoque probabilístico de las redes bayesianas para el tratamiento de la incertidumbre. Para ello se identificaron medidas evaluación del rendimiento de un SRH y de incorporación de la incertidumbre en la gestión/planificación, analizando diversos indicadores de garantía, resiliencia, vulnerabilidad y sostenibilidad. El caso de estudio es la cuenca del Río Júcar, ha sido simulado mediante el módulo SIMGES del SAD AQUATOOL, tanto con series históricas como con series sintéticas generadas estocásticamente (análisis Monte Carlo) para un escenario base y un escenario de aplicación de medidas de gestión. Mediante el uso de redes bayesianas, se realizó el posproceso de los resultados de las simulaciones evaluando probabilísticamente la influencia de la aportación anual previa y el volumen inicial de los embalses de cabecera sobre los estados de satisfacción de las demandas del sistema. De esta forma, se entrega al gestor un modelo con los posibles escenarios hidrológicos previos (aportaciones anuales y volumen final en los embalses de cabecera) y los análisis de indicadores de comportamiento para los escenarios base y de aplicación de medida. A partir de las condiciones observadas del año previo, se conocerán las probabilidades de satisfacción de la demanda en el año de gestión según análisis de serie histórica o bien mediante series sintéticas. Adicionalmente, si en la toma de decisiones se plantea la incorporación de una medida, el gestor podrá tomar decisiones basado en las diferencias probabilísticas resultantes de la introducción o no de dichas medidas y en el cambio del comportamiento de sus indicadores.

Aunque cada vez existen más trabajos que analizan los impactos y las consecuencias que producirá el cambio climático en los recursos hídricos y en sus sistemas de gestión, hay pocos trabajos que aborden la definición de posibles estrategias de adaptación y su análisis posterior. Es por ello que en el presente trabajo se desarrolla una metodología completa para tratar de definir y analizar hidroeconómicamente las estrategias de adaptación al cambio climático en los sistemas de gestión de recursos hídricos y se realiza la aplicación de esta metodología a la cuenca del Júcar. En primer lugar se han obtenido las variables climáticas de todos los Modelos Climáticos Regionales del proyecto ENSEMBLES para la cuenca del Júcar y se han comparado con las series históricas existentes, seleccionando únicamente aquellos modelos que presentan un buen ajuste de las variables históricas. Posteriormente, con las predicciones futuras de estos MCRs se han generado series futuras de las variables climáticas a partir de la perturbación de las series históricas mediante una técnica de reescalado estadístico (M. Pulido-Velázquez, 2011). El siguiente paso es el de ajustar un modelo lluvia-escorrentía pseudo-distribuido con el que obtener las aportaciones de los escenarios a partir de los datos climáticos futuros. A continuación se han estimado las demandas futuras a partir de proyecciones estadísticas de población —para las demandas urbanas— y a partir del cálculo de las demandas netas para los cultivos agrícolas en función de los datos climáticos futuros. Con las aportaciones y las demandas de los escenarios futuros se implementa un modelo de gestión de recursos hídricos (AQUATOOL) que se simula para cada uno de los escenarios propuestos —histórico, de corto plazo (2011-2040), de medio plazo (2041-2070) y de largo plazo (2071-2100)—, obteniendo resultados del sistema para cada uno de ellos. Con estos resultados, y mediante la definición de las funciones económicas de demanda se realiza un análisis hidroeconómico mediante el cual se obtienen los resultados del coste de escasez asociado a los déficits en las demandas.

III. B. MODELOS HIDROECONÓMICOS DE ACUÍFERO PARA ANÁLISIS DE IMPACTOS Y ADAPTACIÓN SOSTENIBLE AL CAMBIO CLIMÁTICO.

Los cambios en los escenarios futuros de clima y usos del suelo alterarán el ciclo hidrológico e impactarán en la calidad y cantidad de los sistemas regionales. Mientras que estos cambios afectan a los recursos superficiales directamente mediante cambios en las principales variables climáticas (temperatura del aire, precipitación y ETP), los recursos subterráneos se relacionan con el cambio climático a través de la relación con los sistemas superficiales (ej. ríos y lagos), pero también de forma indirecta a través de cambios en los procesos de recarga (Jyrkama and Sykes, 2007). Por tanto, la cuantificación de impactos del cambio climático en los recursos subterráneos requiere de una estimación precisa de la recarga subterránea, lo cual es difícil debido a la dependencia de múltiples factores incluyendo la heterogeneidad hidrogeológica y usos del suelo.

Algunas consecuencias esperadas del cambio climático incluye disminución de niveles freáticos y reducción de descarga subterránea, que a la vez provoca una disminución de caudales de base y niveles en lagos con impactos en el suministro de recursos y en los ecosistemas dependientes (Klove et al., 2013). Estos efectos se intensificarán si los bombeos aumentan para satisfacer a una demanda creciente de agua. Predecir el comportamiento de las condiciones de recarga y descarga frente a escenarios futuros de cambio climático y de usos del suelo es esencial para el diseño de estrategias de adaptación.

En este proyecto se han desarrollado modelos hidroeconómicos de gestión de los acuíferos de Mancha Oriental (Molina et al., 2013b) y de Serral-Salinas (Molina et al., 2013a), en el altiplano de Murcia. Se ha actualizado el modelo hidroeconómico de la zona del Salobral-Los Llanos para extenderlo a toda la Mancha Oriental e incorporar los efectos del cambio climático y Serral-Salinas.

IV) ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO DE GESTIÓN

IV.A. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA HIDROLOGÍA EN LOS RESULTADOS DEL CAMBIO GLOBAL

Se ha propuesto un procedimiento en el que, a partir de los resultados a largo plazo de un modelo de gestión del sistema de recursos hídricos se definen unos indicadores que permiten de forma sistemática identificar los problemas del sistema y proponer políticas de adaptación a nivel general (Pulido-Velazquez et al., 2011).

En total se proponen cuatro indicadores, dos de los cuáles — I_s y I_r — han sido seleccionados para identificar qué tipo de problemas pueden aparecer en las condiciones futuras de cambio climático, mientras que los otros dos indicadores — I_w y I_u — se proponen para identificar el origen o la causa de los problemas, y así plantear las posibles estrategias de adaptación a seguir. A continuación se definen estos indicadores:

- *Indicador de satisfacción del sistema (I_s):* Representa la capacidad del sistema para atender sus demandas.

$$I_s = \frac{S}{D};$$

donde S representa volumen total de agua suministrado, y D la demanda total.

- *Indicador de garantías en el sistema (I_r):* Representa la capacidad del sistema para atender sus demandas con una garantía aceptable.

$$I_r = \frac{S_r}{D}$$

donde S_r representa el volumen total de agua suministrado con una garantía igual o mayor que la garantía mínima aceptable.

- *Indicador de recursos sin regulación (I_w):* Se define para evaluar el porcentaje de recursos extraídos del sistema en relación con la demanda total.

$$I_w = \frac{Y}{D}$$

donde Y representa los recursos extraídos en el sistema si no hubiera infraestructuras de regulación superficial, considerando tanto los recursos superficiales como los subterráneos y las interacciones entre ambos.

- *Indicador de aprovechamiento de los recursos (I_u):* Sirve para evaluar el porcentaje de recursos extraídos del sistema utilizado en abastecer a las demandas.

$$I_u = \frac{S}{Y}$$

El valor adoptado por dichos indicadores permite identificar los problemas del sistema y las posibles estrategias de adaptación usando la siguiente tabla:

	Withdrawal use (I _w)	Withdrawal (I _w)	Demand reliability (I _r)					
			High (I _r ⁺)		Intermediate (I _r ^o)		Low (I _r ⁻)	
			Problems	Solutions	Problems	Solutions	Problems	Solutions
<i>Demand satisfaction (I_d)</i>								
High (I _d ⁺)	High (I _w ⁺)	High (I _w ⁺)			2 ⁻	A ⁻	2 ⁺	A ⁻
	Low (I _w ⁻)	Low (I _w ⁻)			2 ⁻ -4 ⁻	A ⁻ -C ⁻	2 ⁺ -4 ⁻	A ⁻ -C ⁻
Intermediate (I _d ^o)	High (I _w ⁺)	High (I _w ⁺)			2 ⁻ -3 ⁻	A ⁻ -B ⁻	2 ⁺ -3 ⁻	A ⁻ -B ⁻
	Low (I _w ⁻)	Low (I _w ⁻)	1 ⁻ -4 ⁻	A ⁻ -C ⁻	1 ⁻ -2 ⁻ -4 ⁻	A ⁻ -C ⁻	1 ⁻ -2 ⁻ -4 ⁻	A ⁻ -C ⁻
Low (I _d ⁻)	High (I _w ⁺)	High (I _w ⁺)	1 ⁻ -3 ⁻	A ⁻ -B ⁻	1 ⁻ -2 ⁻ -3 ⁻	A ⁻ -B ⁻	1 ⁻ -2 ⁻ -3 ⁻	A ⁻ -B ⁻
	High (I _w ⁺)	Low (I _w ⁻)	1 ⁻ -4 ⁻	A ⁻ -C ⁻	1 ⁻ -2 ⁻ -4 ⁻	A ⁻ -C ⁻	1 ⁻ -2 ⁻ -4 ⁻	A ⁻ -C ⁻
	Low (I _w ⁻)	High (I _w ⁺)	1 ⁻ -3 ⁻	A ⁻ -B ⁻	1 ⁻ -2 ⁻ -3 ⁻	A ⁻ -B ⁻	1 ⁻ -2 ⁻ -3 ⁻	A ⁻ -B ⁻
		Low (I _w ⁻)	1 ⁻ -3 ⁻ -4 ⁻	A ⁻ -B ⁻ -C ⁻	1 ⁻ -2 ⁻ -3 ⁻ -4 ⁻	A ⁻ -B ⁻ -C ⁻	1 ⁻ -2 ⁻ -3 ⁻ -4 ⁻	A ⁻ -B ⁻ -C ⁻

+ High = Intermediate - Low

Problem:

1. Vulnerable: water scarcity may produce significant damages.
2. Unreliable: low intensity droughts may lead to water scarcity.
3. Excess of demand with respect to withdrawal (pumping + natural inflows-depletions produced by pumping).
4. Reduced use of withdrawal.

Solution:

- A. Demand management.
- B. Complementary resources are needed (additional pumping, water transfer, water reuse, etc.).
- C. Increase regulation of the system withdrawal (surface structural works, artificial recharge, water reuse, etc.).

Tabla 2. Problemas del sistema y estrategias de adaptación basadas en el valor de los indicadores (Pulido-Velázquez, D., et al., 2011)

A partir de dichos índices se podrá analizar la sensibilidad de las estrategias de adaptación a diversos escenarios climáticos (PRUDENCE, 2004; ENSEMBLES, 2008; etc), a los cambios en la series hidrológicas de aportaciones, a la recarga de los acuíferos o a los parámetros de los modelos de flujo subterráneo y relación río-acuífero.

IV.B. CONTAMINACIÓN, OBJETIVOS DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL E IMPACTO CLIMÁTICO

Se propone un método basado en el uso de matrices de respuesta para así simular el efecto del cambio climático y de usos del suelo (cambio global) en la contaminación por nitratos de acuíferos, con el acuífero Mancha Oriental como caso de estudio. Con los resultados de una versión GIS del modelo de simulación EPIC (GEPIC) se distinguieron zonas con diferencias estadísticamente significativas de

rendimiento y lixiviado de nitratos. Combinando el análisis estadístico con información del área de cultivos, se definieron las zonas de contaminación para el modelo hidroeconómico. Posteriormente se ha simulado el efecto ambiental y económico de dos posibles políticas para control de la contaminación de nitratos: precios de los fertilizantes y precios del agua, usando un modelo hidroeconómico programado en GAMS (Peña-Haro et al., 2010 y 2011).

IV.C. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS CASOS DE ESTUDIO

Mediante modelos hidroeconómicos, en el marco de este proyecto se han obtenido resultados del impacto económico del cambio climático en los siguientes casos de estudio: acuífero de Serral-Salinas (modelo de redes bayesianas), acuífero del Salobral-Los Llanos /Mancha Oriental (modelo hidroeconómico para el control óptimo de la contaminación por nitratos), y cuenca del río Serpis y cuenca del río Júcar (modelos hidroeconómicos, de simulación en el caso del Serpis, y de simulación y optimización, en el caso de la cuenca del río Júcar). La colaboración con BRGM (Francia) ha permitido añadir un nuevo caso de estudio: impacto del cambio climático en la cuenca del río Orb (Francia) mediante modelo hidroeconómico de optimización. Tras la caracterización coste-eficacia de diferentes medidas de mejora de eficiencias en los usos urbano y agrícola, el modelo selecciona la combinación óptima de medidas para la adaptación a nuevos escenarios de cambio climático y de usos del suelo (Girard et al., en revisión).

IV.D. DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE GESTIÓN SOSTENIBLES y ECONÓMICAMENTE EFICIENTES FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

El uso de la metodología reseñada permite, una vez generados escenarios futuros plausibles de recursos y demandas, e integrados en un modelo hidroeconómico del sistema, generar estrategias óptimas de adaptación tanto a escala acuífero como escala de cuenca, considerando tanto instrumentos orientados a la gestión de la oferta de agua (cambios en la infraestructura del sistema, en las reglas de gestión de los embalses y uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas, etc.) como de gestión de la demanda o usos del suelo (modernización de regadíos, precios del agua que incentiven un uso eficiente, cuotas o impuestos para limitar el uso de fertilizantes en la agricultura, etc.).

En el marco del proyecto SAWARES mediante los modelos hidroeconómicos reseñados se ha procedido al diseño de estrategias de adaptación para los diversos casos de estudio. En el caso de estudio de la cuenca del río Orb se han incluido medidas de aumento de suministro y de gestión de la demanda, incluyendo instrumentos económicos (las medidas se han seleccionado previamente mediante talleres con los grupos de interés). En el caso del Júcar, se han incorporado medidas de: mejora de eficiencia de riegos, instrumentos económicos, cambio de prioridades en la asignación durante sequías, y mercados.

IV.E. INCERTIDUMBRES EN LA ADAPTACIÓN DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS AL CAMBIO CLIMÁTICO

A escala acuífero se ha realizado en un análisis holístico de incertidumbre en la simulación de impactos del cambio climático y de usos del suelo, usando la Mancha Oriental como estudio piloto. Para abordar la incertidumbre en las proyecciones de cambio climático se han empleado diferentes escenarios hidrológicos correspondientes a distintas combinaciones MRC-MCG reescalados, para así analizar la dispersión de los resultados. También se consideran diferentes escenarios de usos del suelo, teniendo en cuenta cambios socioeconómicos y posible retroalimentación de estrategias de adaptación. En cuanto a la incertidumbre en la modelación, se ha tenido en cuenta tanto la incertidumbre en los parámetros (mediante simulación de Monte Carlo estudiamos el impacto de la incertidumbre en la conductividad hidráulica en las concentraciones de nitratos; Peña-Haro et al., 2011), como la propagación de

incertidumbre en el acoplamiento del modelo integral de gestión. La modelación con redes bayesianas en los casos de Serral-Salinas (Molina et al., 2013a) y Mancha-Oriental (Molina et al., 2013b) han permitido incorporar la incertidumbre de forma explícita en el análisis de políticas.

REFERENCIAS

- Ahlfeld D.P., Barlow P.M., Mulligan A.E., 2005. GWM—A ground-water management process for the U.S. Geological Survey modular ground-water model (MODFLOW-2000): U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1072, p 124
- Álvar Escrivà I Bou, 2012. Análisis hidroeconómico de la adaptación al cambio climático en sistemas de gestión de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del Júcar. Tesis de Máster (UPV).
- ENSEMBLES PROJECT, 2009. European Commission's 6th Framework Integrated Project from 2004-2009 (through the contract GOCE-CT-2003-505539) under the Thematic Sub-Priority "Global Change and Ecosystems" (web site <http://ensembles-eu.metoffice.com/>).
- Girard, C., Rinaudo JD., Pulido-Velazquez, M., Caballero, Y., *en revisión en Env. Modelling and Software*. Selecting global change adaptation measures through a least-cost river basin optimisation model: insights from interdisciplinary modelling.
- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J.J., Kupfersberger, H., Kværner, J., Muotka, T., Mykrä, H., Preda, E., Rossi, P., Uvo, C.B., Velasco, E., Pulido-Velázquez, M., 2013. Climate Change Impacts on Groundwater and Dependent Ecosystems. *J. of Hydrology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.037>
- Liu, J., Williams, J.R., Zehnder, A.J.B., Hong, Y. (2007). GEPIC-modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale. *Agricultural Systems* 94 (2), 478–493.
- McDonald, M.G., Harbough, A.W. (1988). A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model. US Geological Survey Technical Manual of Water Resources Investigation, Book 6, US Geological Survey, Reston, Va, 586 pp.
- Monte, V., 2012. Generación de escenarios sintéticos futuros de hidrología superficial incorporando cambio climático. Aplicación a la cuenca alta del río Serpis. Tesis de Máster en el programa DIHMA de la UPV.
- Molina, J.L., García-Aróstegui, J.L., Bromley, J. and Benavente, J. 2011. Integrated Assessment of the European WFD. Implementation in Extremely Overexploited Aquifers Through Participatory Modelling. *Water Resour Manage*. DOI 10.1007/s11269-011-9859-1. Accepted: 3 June 2011.
- Molina, J.L., Pulido-Velazquez, D., García-Aróstegui, J.L., Pulido-Velazquez, M., 2013a. Dynamic Bayesian Networks as a Decision Support Tool for assessing Climate Change impacts on highly stressed groundwater systems. *J. of Hydrology*, 479, 113-129.
- Molina, J.L., Pulido-Velazquez, M., Llopis-Albert, C., D., Peña-Haro, S., 2013b. Stochastic hydro-economic model for groundwater quality management using Bayesian networks. *Water Science and Technology*, 6(3), 579-586.
- Peña-Haro, S., Pulido-Velazquez, M., Llopis-Albert, C., 2011. Stochastic hydro-economic modeling for optimal management of agricultural groundwater nitrate pollution under hydraulic conductivity uncertainty. *Environmental Modelling & Software* 26 (2011) 999-1008.
- Peña-Haro, S., Llopis-Albert, C., Pulido-Velazquez, M., Pulido-Velazquez, D. 2010. Fertilizer standards for controlling groundwater nitrate pollution from agriculture: El Salobral-Los Llanos case study, Spain. *Journal of hydrology*. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.08.006.
- PRUDENCE PROJECT, 2004. Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for defining European

- climate change risks and effects. The Prudence Projects by the EU through contract EVK2-CT2001-00132 (web site <http://prudence.dmi.dk/>).
- Pulido-Velázquez, D., J.L. García-Aróstegui, J.L. Molina, M. Pulido-Velázquez, 2014. Assessment of future groundwater recharge in semi-arid regions under climate change scenarios (Serral-Salinas aquifer, SE Spain). Could increased rainfall variability increase the recharge rate? *Hydrol. Process*; DOI: 10.1002/hyp.10191.
- Pulido-Velazquez, D., Garrote, L., Andreu, J., Martin-Carrasco, FJ, Iglesias, A. 2011a. A methodology to diagnose the effect of climate change and to identify adaptive strategies to reduce its impacts in conjunctive-use systems at basin scale. *Journal of Hydrology* 405: 110–122 doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.014.
- Pulido-Velazquez, D., Llopis-Albert, C., Peña-Haro, S., Pulido-Velazquez, M., 2011b. Efficient conceptual model for simulating the effect of aquifer heterogeneity on natural groundwater discharge to rivers. *Advances in Water Resources* 34 (2011) 1377–1389.
- Pulido-Velazquez D, Sahuquillo A, Andreu J, 2012. A conceptual–numerical model to simulate hydraulic head in aquifers that are hydraulically connected to surface water bodies. *Hydrological Processes*. (2011). Published online in Wiley Online Library. wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/hyp.8214.
- Pulido-Velazquez, D., A. Sahuquillo, J. Andreu, and M. Pulido-Velazquez, 2007. An efficient conceptual model to simulate surface water body-aquifer interaction in conjunctive use management models. *Water Resour. Res.*, 43, W07407, doi:10.1029/2006WR005064.
- Pulido-Velazquez, D., A. Sahuquillo and J. Andreu, 2006. A two-step explicit solution of the Boussinesq equation for efficient simulation of unconfined aquifers in conjunctive-use models, *Water Resour. Res.*, 42, WR05423, doi:10.1029/2005WR004473.
- Pulido-Velazquez, D., J.L. García-Aróstegui, J.-L. Molina, M. Pulido-Velazquez, 2014. Assessment of future groundwater recharge in semi-arid regions under climate change scenarios (Serral-Salinas aquifer, SE Spain). Could increased rainfall variability increase the recharge rate?. *Hydrological Processes*, DOI:10.1002/hyp.10191
- Pulido-Velazquez, M., Alvarez-Mendiola, E., and Andreu, J., 2013. Design of Efficient Water Pricing Policies Integrating Basinwide Resource Opportunity Costs. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 139(5): 583-592.
- Pulido-Velázquez, M., Sahuquillo, A., Ochoa, J.C., and Pulido-Velázquez, D., 2005. Modeling of stream-aquifer interaction: the embedded multireservoir model. *J. of Hydrology*, 313(3-4), 166-181.
- Samper, J., Huguet, L.I., Ares, J. y García Vera, M.A. 1999. Manual del usuario del programa VISUAL BALAN v.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. Publicación Técnica de ENRESA nº 5/99, Madrid. 205 pp.
- SWAT, 2007. Soil and Water Assessment Tool: ArcSWAT. College Station, Tex.: Texas A&M University. Available at: www.brc.tamus.edu/swat/arcsWat.html. Accessed 20 February 2007.

TESIS DOCTORALES relacionadas con el proyecto:

Doctor: Eduardo Álvarez Mendiola. *Directores:* Manuel Pulido Velázquez, Joaquín Andreu Álvarez. Diseño de una política eficiente de precios del agua integrando costes de oportunidad

del recurso a escala de cuenca. Aplicación a la Directiva Marco europea del Agua. *Calificación:* sobresaliente "cum laude". *Organismo:* UPV. *Año:* 2011.

Doctor: Salvador Peña Haro. *Directores:* Manuel Pulido Velázquez, David Pulido Velázquez. *Título:* Hydro-economic modelling framework for optimal management of groundwater nitrate pollution from agriculture. *Calificación:* sobresaliente "cum laude". *Organismo:* UPV. *Año:* 2010.

Doctor: Dr. Jose Luis Molina. *Directores:* Jose Luis García Aróstegui, José Benavente. *Título:* Análisis integrado y estrategias de gestión de acuíferos en zonas semiáridas. Caso del Altiplano (Murcia, España). *Calificación:* sobresaliente "cum laude". *Organismo:* Universidad de Granada. *Año:* 2009

[Nota: esta última tesis es anterior al inicio del proyecto, pero se considera importante y relacionada con el contenido del mismo, ya que contiene el modelo hidroeconómico sobre el que se ha trabajado en uno de los casos de estudio; JL Molina y JL García Aróstegui son integrantes del subproyecto IGME]

TESINAS DE MASTER relacionadas con el proyecto:

2012

A. Escribá Bou. Tesina: *Análisis hidroeconómico de la adaptación al cambio climático en la gestión de sistemas de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del Júcar* (sept. de 2012; codirectores: M. Pulido, D. Pulido). Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, UPV.

V. Monte Hernández. Tesina: *Generación de escenarios sintéticos futuros de hidrología superficial incorporando cambio climático. Aplicación a la cuenca alta del río Serpis* (enero de 2012; codirectores: R. García-Bartual, M. Pulido, D. Pulido). Máster en Ing. Hidráulica y Medio Ambiente, UPV.

L. Henríquez Esaú. Tesina: *Escenarios futuros de Uso de Suelo para el Análisis del Efecto del Cambio Global en los Recursos Hídricos aplicado al Acuífero de Mancha Oriental* (enero de 2012; Director: M. Pulido). Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, UPV.

A. M. Barbero García. Tesina: *Redes Bayesianas para el análisis integrado de la gestión de sistemas de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del río Júcar* (abril de 2012; Directores: M. Pulido, Jose Luis Molina). Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, UPV.

A. Marín Benlloch. Tesina: *Obtención de curvas de producción y lixiviado mediante el modelo distribuido GEPIC en escenarios de cambio climático* (marzo de 2012; director: A. García Prats). Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, UPV.

C. Girard. *Trabajo de Investigación: Modelo de optimización hidro-económica para la determinación del programa de medidas de menor coste en la implementación de la Directiva Marco del Agua. Aplicación a la gestión cuantitativa de recursos hídricos en la cuenca del río Orb* (Francia). (Sept. de 2012; Directores: M. Pulido, J.D. Rinaudo).

Rocío Cerezuela. Tesina: *Evaluación de la recarga y de los efectos potenciales del cambio climático en el Sector Occidental de la Sierra de las Nieves* (Málaga). Septiembre de 2012; codirectores: S. Martos y D. Pulido. Máster Geología Aplicada a la Obra Civil y los Recursos Hídricos(GEORHID), UGR.

2011

X. Lozano Gómez. Tesina: *Modelo hidroeconómico para el análisis del impacto de cambio climático. Aplicación a la cuenca del río Serpis* (enero de 2011; codirectores: M. Pulido, D. Pulido). Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, UPV.