

ACTIVIDADES REALIZADAS Y GRADO DE CONSECUCCIÓN DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS EN LA SEGUNDA ANUALIDAD

En la segunda anualidad se ha trabajado en las tareas I.C y I.D (I.C Simulación de la hidrología de escenarios de cambio climático (CC) en modelos de gestión; y I.D. Incertidumbres en las estimaciones del impacto hidrológico del CC) del Plan de trabajo incluidas en actividad I (Escenarios hidrológicos de CC para modelos de gestión de recursos hídricos). Estas tareas, junto con las desarrolladas en la primera anualidad (I.A. Generación de escenarios hidrológicos de CC para modelos de gestión de recursos hídricos; I.B Simulación del efecto del CC sobre las aguas subterráneas y la relación río-acuífero) completan los trabajos previstos en la citada actividad I. También se han abordado algunas tareas incluidas en las actividades III (Diseño y programación de modelos de gestión hidroeconómicos a escala cuenca y a escala acuífero) y IV (Análisis de resultados del modelo de gestión), actividades que finalizarán en la última anualidad del proyecto de acuerdo con el cronograma previsto. Las principales tareas y objetivos satisfechos en cada una de las tareas realizadas se describen a continuación:

I.C.SIMULACIÓN DE LA HIDROLOGÍA DE ESCENARIOS DE CC EN MODELOS DE GESTIÓN

Se ha alcanzado el objetivo perseguido en esta tarea, **proponer y aplicar metodologías y herramientas adecuadas para simular de forma eficiente las aguas subterráneas** (flujo y transporte) **y la relación río-acuífero en modelos de gestión, con el fin de estudiar alternativas de adaptación al CC** teniendo en cuenta los nuevos escenarios hidrológicos de CC generados para el sistema (escenarios generados en la primera anualidad). Para ello, se ha realizado un análisis crítico (estudiando la idoneidad de las mismas) de las metodologías y herramientas disponibles para integrar de forma eficiente las aguas subterráneas (actividad I.c.1) y se han aplicado dichas metodologías a los casos de estudio seleccionados (I.c.2).

La finalidad de esta actividad (I.c.1) era analizar las ventajas e inconvenientes de las metodologías de simulación de flujo y transporte en modelos de gestión (tanto a escala de cuenca como de acuífero) y las distintas técnicas de integración de las ecuaciones de flujo en dichos modelos de gestión (acoplamiento y funciones de influencia). La integración de la simulación eficiente del flujo subterráneo en modelos de gestión de cuenca complejos requiere el uso de técnicas que difieren de las de modelos clásicos por diferencias finitas, como técnicas de autovalores (ej. D. Pulido-Velazquez et al., 2006; D. Pulido-Velazquez et al., 2007). Sin embargo, en los modelos detallados de gestión de acuíferos sí que se puede recurrir a técnicas clásicas como se puede observar en la herramienta GWM (Ahlfeld et al., 2005) desarrollada para el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). En esta segunda anualidad se han desarrollado investigaciones encaminadas a **estudiar la eficiencia de la formulación por autovalores** (reducir el coste computacional e incrementar sus ventajas para la simulación en modelos de gestión a escala de cuenca) en la resolución de algunos problemas lineales de flujo

subterráneo y relación río-acuífero y **avanzar en** el entendimiento de la misma (en la **interpretación y conceptualización de la formulación**). Parte de estas investigaciones han sido recogidas en **dos publicaciones en revistas de alto impacto** (D. Pulido-Velazquez et al., 2011b en *Advance in Water Resources*; y D. Pulido-Velazquez et al., 2011c en *hydrological Processes*). **Se han alcanzado los objetivos** perseguidos en el desarrollo de esta actividad.

La finalidad de la actividad I.c.2 es, partiendo de la comparativa entre técnicas llevada a cabo en el apartado anterior, desarrollar una **guía** en la que se **indican 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**. Para los casos de estudio seleccionados (Serral-Salinas y La Mancha Oriental) se llevó a cabo una modelación acorde con las sugerencias incluidas en la citada guía. **Se han alcanzado los objetivos** perseguidos en el desarrollo de esta actividad.

I.D. INCERTIDUMBRES EN LAS ESTIMACIONES DEL IMPACTO HIDROLÓGICO DEL CC.

El objetivo perseguido en esta tarea es **incorporar o valorar algunas incertidumbres asociadas al estudio del impacto del CC en la hidrología de un sistema**. Así, **para** cuantificar **las entradas hidrológicas futuras en un sistema**, se ha propuesto una metodología que persigue **valorar las incertidumbres asociadas a los modelos regionales de clima empleados y poder seleccionar** justificadamente **las características hidrológicas (estadísticas) más representativas** de un determinado escenario climático futuro en un sistema de recursos hídricos. Dicha metodología ha sido aplicada en el estudio de las entradas por recarga en el acuífero Serral Salinas, y se trabaja también en su aplicación al acuífero de la Mancha Oriental. También se ha trabajado en incorporar además 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. En este caso la aplicación se llevó a cabo en la generación de series de aportaciones para el sistema del Río Serpis. Finalmente, también se ha explorado el estudio del **efecto** que las **incertidumbres** asociadas a las **características hidrogeológicas del sistema** acuífero (sistemas acuíferos no modelados de forma determinista) podrían tener en la simulación del estado del acuífero con distintas técnicas de simulación apropiadas para valorar la evolución del acuífero en modelos de gestión (Funciones de Influencia a partir de modelos en Diferencias Finitas y Modelos de Autovalores). Para ello 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. Como casos de estudio se seleccionaron acuíferos sintéticos que permitieron explorar un mayor rango de variabilidad en las características hidrogeológicas. El análisis realizado también será útil para posteriores estudios de estrategias de adaptación en situación de CC en sistemas reales. **Se han alcanzado los objetivos** perseguidos en el desarrollo de esta actividad.

II.D.1. CARACTERIZACIÓN Y PROYECCIÓN DE DEMANDAS EN ESCENARIOS FUTUROS

Los cambios en el uso del suelo tienen un gran impacto en el clima, el ciclo hidrológico y la producción y transporte de contaminantes. Para proyectar futuros escenarios de usos del suelo (2020, 2030, 2050, 2080) se ha propuesto un análisis multitemporal con base en el estudio de las tendencias históricas, y la selección de las fuerzas motrices, tendencias e interacciones, mediante técnicas GIS, combinando autómatas celulares, cadenas de Markov, evaluación multi-critería, redes neuronales y teledetección (que proporciona el mapeo detallado de las zonas de cultivo). Los resultados de su aplicación al caso de estudio de la Mancha Oriental muestran el interés del enfoque. La metodología desarrollada puede ser aplicada en cualquier otra región de Europa para generar escenarios o validar escenarios Eururalis de acuerdo con la tendencia en las fuerzas motrices a escala local. Una parte del trabajo ha sido aceptada para su presentación en el congreso de la International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) que tendrá lugar en Leipzig en julio de 2012. Parte de estos trabajos han sido incluidos en una tesina de master (Henriquez, 2012).

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

A continuación se indican las actividades desarrolladas hasta el momento en esta tarea que finaliza en la tercera anualidad:

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

Para la cuenca del río Serpis se ha desarrollado un modelo de simulación de la gestión clásico (en el que el agua se asigna en función de prioridades y la satisfacción de las demandas es evaluada en función de las garantías en el suministro), que ha sido utilizado para valorar impactos y políticas de adaptación a largo plazo. Parte de estos trabajos han sido incluidos en un artículo publicado en la revista J. of Hydrology (D. Pulido-Velazquez et al., 2011a). Dicho modelo clásico de gestión ha sido modificado para llevar a cabo una valoración hidroeconómica de la gestión y analizar estrategias de adaptación frente al CC desde esta perspectiva. Parte de estos trabajos fueron incluidos en una tesina de master (Lozano, 2011).

Se está trabajando en el desarrollo de un modelo de simulación hidroeconómico del sistema del río Júcar que permitiría evaluar el impacto económico del cambio climático. Se ha desarrollado un análisis probabilístico de indicadores de rendimiento de un sistema (garantía, resiliencia, vulnerabilidad, sostenibilidad) incorporando redes bayesianas para el tratamiento de la incertidumbre y la evaluación del efecto de políticas, como podrían ser por ejemplo políticas de adaptación al cambio climático. Parte de estos trabajos han sido incluidos en una tesina de master (Barbero, 2012). En el Anexo II presenta un avance de los indicadores de rendimiento y el tratamiento mediante redes bayesianas.

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

Se han desarrollado modelos de simulación y de gestión de los acuíferos de La Mancha Oriental y Serral Salinas. En Mancha Oriental se ha desarrollado un modelo hidroeconómico de

la zona del Salobral los Llanos en el que se trata de identificar la aplicación óptima de fertilizantes para maximizar la producción sin superar las concentraciones admisibles de nitratos. Parte de estos trabajos han sido incorporados en un artículo en la revista J. of Hydrology (Peña-Haro et al., 2010). El trabajo ha sido completado con la incorporación de incertidumbres en aspectos como: conductividad hidráulica, patrones de cultivo/ usos del suelo, estrategias de aplicación de fertilizantes, rendimiento de los cultivos, precio de fertilizantes y precio de los cultivos. La metodología desarrollada, basada en la integración del modelo hidro-económico con un análisis probabilístico de Monte Carlo, ha sido previamente desarrollada para un caso sintético, y publicada en Environmental Modelling and Software (Peña-Haro et al., 2011). El trabajo de análisis de incertidumbres en el acuífero Salobral-Los Llanos ha sido enviado a la revista Environmental Modelling and Software (Llopis et al., 2012). En Serral Salinas se ha desarrollado un modelo de gestión basado en redes bayesianas en el que se incorporan aspectos económicos para servir de apoyo a la toma de decisiones. Parte de estos trabajos han sido incorporados en un artículo publicado en Water Resources Management (Molina et al., 2011). Se trabaja actualmente en la incorporación del cambio climático en dicho modelo, lo que se espera finalizar y publicar en la tercera anualidad.

IV) ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO DE GESTIÓN

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

Se describen las tareas llevadas a cabo hasta el momento. Los principales resultados serán obtenidos en el último año del proyecto, de acuerdo con el cronograma previsto.

IV.A.1. Resultados para distintos escenarios. Sensibilidad de los modelos a la hidrología.

Para el acuífero Serral Salinas, se han analizado los impactos (valorados mediante simulación con un modelo de flujo MODFLOW [McDonald and Harbaugh, 1988]) **y la sensibilidad de las simulaciones a diversos escenarios de emisiones** climáticos (A2 y A1B), **incluyendo para cada escenario la incertidumbre debida al uso de diferentes Modelos Regionales de Clima (MRCs). Se han alcanzado los objetivos** perseguidos en el desarrollo de esta actividad para este caso de estudio. Un trabajo análogo se está desarrollando en el acuífero de la Mancha Oriental con la particularidad de incorporar la variabilidad espacial de los efectos producidos por el CC. Los resultados serán descritos en el próximo informe. **A escala de cuenca, en el sistema del Río Serpis, se está evaluando la sensibilidad del modelo de gestión de la cuenca (con el modelo desarrollado en la actividad III) a la incertidumbre en las entradas hidrológicas (tanto a la incertidumbre debida a los escenarios de emisiones futuras como a los modelos regionales de clima y la aleatoriedad de las series para una misma situación climática). Para ello se analizan los resultados obtenidos para las múltiples series sintéticas de aportaciones generadas en la actividad I.D con la regla de operación actualmente aplicadas en el sistema, valorando el efecto de las incertidumbres asociadas a un determinado escenario hidrológico.** Los resultados serán descritos en detalle en la próxima anualidad.

IV.A.2. Influencia de la incertidumbre hidrológica/hidrogeológica en las políticas de adaptación

A escala de cuenca, en el sistema del Río Serpis, se pretende valorar la influencia de las

incertidumbres en las entradas hidrológicas (tanto las debidas a los escenarios de emisiones futuras como a los modelos regionales de clima y la aleatoriedad de las series **para** una misma situación climática) en los resultados obtenidos con el modelo de gestión de la cuenca (con el modelo desarrollado en la actividad III) al operar el sistema bajo **distintas políticas de adaptación** a escenarios futuros. Los resultados serán descritos en el próximo informe.

Para el acuífero Serral Salinas, se pretende valorar la **influencia** que puede tener **en la toma de decisiones la incertidumbre** en las entradas hidrológicas asociada a los escenarios de emisiones futuras (A2 y A1B), y los Modelos Regionales de Clima a emplear (MRCs). Para ello se analizarán los resultados obtenidos con un Sistema Soporte a la Decisión basado en Redes Bayesianas (desarrollado para valorar la gestión en el acuífero) para las múltiples series sintéticas de aportaciones generadas en la actividad I.D. Los resultados obtenidos al finalizar estos trabajos serán descritos en detalle en la próxima anualidad.

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

En relación con esta tarea se han desarrollado 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. Se ha escogido como caso de estudio el acuífero de la Mancha Oriental. Aunque inicialmente se trabajó con la zona del Salobral-Los Llanos, el análisis del lixiviado de nitratos por la fertilización de cultivos se ha extendido a todo el ámbito de la Mancha Oriental, lo que permite extender el modelo hidroeconómico (tarea III.B) a todo el dominio del acuífero. 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. Se está trabajando en el análisis del impacto del cambio climático en estos resultados, trabajo que se espera concluir en la tercera anualidad del proyecto.

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
- 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/>).
- 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.
- Montes, 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.
- 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-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, 2011c. 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.
- 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.