

## **ACTIVIDADES REALIZADAS Y GRADO DE CONSECUCCIÓN DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS EN LA PRIMERA ANUALIDAD**

En este documento se incluye primeramente una **descripción muy concisa de las principales actividades** realizadas en el pasado año (las incluidas en el cronograma de la primera anualidad de la propuesta de proyecto) relacionándolas con los **objetivos cubiertos (I)**:

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

Se ha alcanzado el objetivo perseguido en esta tarea: desarrollar una metodología para incorporar la información disponible sobre la posible evolución del clima en la definición de escenarios hidrológicos futuros de los sistemas a estudiar. Para ello, se ha llevado a cabo un **estudio de la información disponible** y se han propuesto una serie de transformaciones que permitan **adaptar** la información inicial a la **escala de análisis** requerida por el sistema ("downscaling").

#### *I.A.1. Revisión y análisis de las estimaciones disponibles sobre cambio climático para España*

La finalidad de esta actividad (actividad I.A.1) era realizar una **revisión y análisis crítico de las estimaciones disponibles sobre cambio climático en España**. Dado que la tarea se integra en la actividad I.A, GENERACIÓN DE ESCENARIOS HIDROLÓGICOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA MODELOS DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS, se desarrolló tratando de **seleccionar, procesar y facilitar el acceso a la información necesaria** (a la **escala espacio-temporal más adecuada**) para su posterior aplicación en la tarea principal de generación de escenarios. **Se ha alcanzado** de manera totalmente satisfactoria **este objetivo final**. Se completó una **revisión de la literatura existente** que permitió identificar la necesidad de analizar la bondad de las calibraciones de los modelos regionales dinámicos. Se realizó un **análisis crítico de estas calibraciones** que ayudó a realizar una selección razonada de las proyecciones a utilizar. Finalmente se elaboraron unos **mapas que sintetizan toda la información necesaria** para corregir las series climáticas/hidrológicas históricas de sistemas **incorporando el efecto del cambio climático**. Estos mapas permitirán agilizar la aplicación de la metodología propuesta a cualquier sistema de recursos hídricos localizado en la península.

#### *I.a.2. Comparación y análisis de metodologías de reescalado ("downscaling")*

La finalidad de esta actividad es **analizar las metodologías existentes para traducir los resultados de modelos climáticos regionales en series temporales hidrológicas** (aportaciones superficiales y recarga a acuíferos, básicamente) **de sistemas**. Para ello se decidió realizar una revisión crítica sobre las técnicas de regionalización y las aplicaciones de las mismas disponibles en la literatura. Esta ha permitido alcanzar el objetivo de **identificar puntos débiles en los que se podría avanzar** en este campo, tanto

en la corrección de series históricas de sistemas de recursos hídricos como en la generación estocástica de series incorporando el efecto del cambio climático. Sobre dichas lagunas se trabaja en diversas actividades incluidas en el proyecto. **Se han alcanzado** de manera totalmente satisfactoria **los objetivos** perseguidos en el desarrollo de esta actividad.

1.a.3. Metodología para generación de series hidrológicas para escenarios de cambio climático en modelos de gestión de recursos hídricos.

En la revisión de metodologías de reescalado previamente realizada (tarea I.A.2) no se encontraron casos en los que las series históricas de variables climáticas e hidrológicas se corrijan, además de con las variaciones en las medias mensuales previstas en la zona para escenarios futuros de cambio climático, con las variaciones en otros estadísticos significativos como la varianza. La finalidad de esta actividad es proponer una **metodología de reescalado** que permita generar series climáticas e hidrológicas para un sistema que sean representativas de posibles escenarios futuros incorporando (a la escala espacial y temporal requerida para su análisis) el cambio predicho en los estadísticos de primer y segundo orden en la zona. **Se han alcanzado** de manera totalmente satisfactoria **los objetivos** perseguidos en el desarrollo de esta actividad. La metodología ha sido descrita en un artículo enviado a la revista **Journal of Hydrology** (D. Pulido et al., en revisión).

1.a.4. Aplicación a casos de estudio:

En la propuesta del proyecto se plateaba aplicar la metodología de reescalado (desarrollada en la actividad I.A.3) en un caso de estudio a escala de cuenca y otra a escala de acuífero, aunque finalmente se ha trabajado en un sistema a **escala de cuenca (Cuenca del Serpis) y dos a escala acuífero (Serral Salinas y "La Mancha Oriental")**. **Se han alcanzado** de manera totalmente satisfactoria **los objetivos** perseguidos en el desarrollo de esta actividad. Se trabajó sobre diferentes variables (precipitación, temperatura, humedad, evapotranspiración, etc) y distintas escalas espacio temporales. A escala de cuenca, en el sistema Serpis, se evaluó el impacto del cambio climático en series mensuales de aportaciones y otras variables climáticas (precipitación y temperatura) necesarias para evaluar los nuevos requerimientos de los cultivos mediante CROPWAT (desarrollado por la FAO; <http://www.fao.org/nr/water/>; Clarke et al., 1998). Para el sistema acuífero Serral Salinas se realizó un exhaustivo análisis (bajo 2 escenarios de emisión [A2, A1B], y basado en simulaciones realizadas con numerosos modelos regionales de clima en el marco de los proyectos Europeos PRUDENCE [2004] y ENSEMBLES [2009]) de los posibles efectos producidos por el cambio climático en la recarga diaria de lluvia. La recarga fue evaluada simulando en un modelo agregado lluvia-escorrentía (modelo desarrollado con la herramienta Visual Balan [Samper et al., 1999]) las series futuras de precipitación y temperatura generadas. En el sistema acuífero de la Mancha Oriental se obtuvieron series diarias para alimentar un modelo distribuido de balance continuo SWAT [2007] y un modelo agronómico GEPIC [Liu et al., 2007]. Finalmente, los casos de estudio han permitido extraer conclusiones sobre la aplicabilidad de la metodología a diferentes variables y escalas espacio-temporales. La aplicación realizada en la cuenca del Serpis, ha sido descrita en un artículo enviado a la revista **Journal of Hydrology** (D. Pulido et al., en

revisión). Parte de los trabajos desarrollados en la aplicación a la Mancha Oriental ha sido incluidos en un artículo enviado al congreso internacional EGU, 2011 (M. Pulido-Velazquez et al., 2011).

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

El objetivo de esta tarea es simular los posibles efectos del cambio climático sobre los **acuiferos** seleccionados como **casos de estudio** (“Serral Salinas” y “La Mancha Oriental”), y analizar la relación río acuifero en los mismos. Para ello se partió de **modelos distribuidos de flujo MODFLOW** (McDonald and Harbaugh, 1988) previamente calibrados sobre los que se simularon nuevos escenarios en los que se modificó la recarga (siguiendo la metodología descrita en la actividad I.A) con objeto de valorar el efecto de la reducción en las entradas hidrológicas al acuifero producida por el cambio climático. Para el caso de estudio de “La Mancha Oriental” se ha calibrado un **modelo de transporte de contaminantes** para poder valorar concentraciones de Nitratos. Por último se ha llevado a cabo una modelación más detallada de la zona del acuifero conocida como El Salobral-Los Llanos, con objeto de estudiar una óptima aplicación de fertilizantes para la producción agraria en dicha zona. Parte de estos trabajos fueron incluidos en un artículo en la revista Journal of Hydrology (Salvador et al., 2010). **Se han alcanzado de manera totalmente satisfactoria los objetivos** perseguidos en el desarrollo de esta actividad.

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

La finalidad de esta tarea es **analizar metodologías y herramientas adecuadas para modelar de forma eficiente las aguas subterráneas (flujo y transporte) y la relación río-acuifero** con el fin de simular los efectos de los cambios esperados en la hidrología debida al cambio climático en modelos de gestión a escala de cuenca y de acuifero. Las investigaciones llevadas a cabo en esta primera anualidad para la simulación de flujo subterráneo e interacción río acuifero forman parte de dos ponencias (D. Pulido et al., 2010; D. Pulido et al., 2010b) presentadas en el congreso “IAHR GW Symposium” celebrado en Valencia y un artículo enviado a la revista Advance in Water Resources (D. Pulido et al., enviado 11/01/2010). **Se profundizará en esta actividad a lo largo de la segunda anualidad del proyecto**, donde de acuerdo con el cronograma previsto se planificó una mayor dedicación temporal a la misma.

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

Se ha alcanzado el objetivo perseguido en esta tarea: seleccionar un procedimiento para incorporar los efectos del cambio climático en las necesidades de riego de los cultivos, y su aplicación a un caso de estudio.

##### II.a.1) Revisión/análisis y metodología:

Tal y como se prevé, se ha hecho una revisión de metodologías para la estimación de la ET y necesidades de riego de cultivos para zonas semiáridas, con especial énfasis en los métodos recomendados por la FAO.

Se justifica la selección de una versión distribuida con soporte GIS del modelo agronómico EPIC

(GEPIC; Liu et al., 2009) para los cálculos de necesidades de riego ante cambio climático. El modelo GEPIC tiene una ventaja que lo hace especialmente interesante frente a otros modelos de simulación de sistemas agrícolas. Al igual que cualquier otro, puede estimar el rendimiento del cultivo, el consumo de agua o el balance de fertilizantes en el suelo considerando los factores que influyen en cada ubicación. Sin embargo GEPIC lo hace en una escala espacial flexible, pues eso se decide con el tamaño de las celdas ráster empleadas. Disponiendo de las variables de entrada regionalizadas, GEPIC realiza una simulación por cada celda de la malla, por lo que automáticamente el resultado queda regionalizado o distribuido espacialmente.

La necesidad de simular los efectos del cambio climático en las necesidades hídricas de los cultivos nos obliga a utilizar un modelo de simulación del crecimiento que incluya simulación de la fotosíntesis. Esto nos va a permitir modificar la concentración de CO<sub>2</sub> y evaluar su efecto sobre el rendimiento, por lo que debemos descartar el uso de otras herramientas como CROPWAT.

#### II.a.2) Aplicación a casos de estudio:

Se han modificado las funciones de producción o rendimiento de cultivos para dos cultivos fundamentales caso de estudio de la Mancha Oriental (trigo y maíz), reajustándolas según las condiciones prevista de precipitación, temperatura y concentración de CO<sub>2</sub> para un escenario de cambio climático. En actividades anteriores se generaron series futuras para el periodo 2071-2100 y suponiendo un escenario de emisiones A1B a escala diaria de las variables requeridas (temperatura media, máxima y mínima; humedad media, máxima y mínima, velocidad y dirección media y máxima del viento; precipitación, temperatura, radiación y evapotranspiración) para alimentar el modelo agronómico EPIC-GEPIC. Dichas series fueron obtenidos perturbando las series históricas disponibles para el sistema con base a las predicciones de cambio en media y desviación estándar mensual obtenidas con el modelo climático regional SMHI en el marco del proyecto ENSEMBLES (2008). Se ha empleado el modelo GEPIC calibrado para la zona con el fin de determinar el efecto del cambio climático sobre las funciones de producción y lixiviado de nitratos previamente desarrolladas. 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). Las variables explicadas son el rendimiento de los cultivos y el lixiviado de nitrógeno, mientras que los factores entre los que buscamos diferencias significativas son la altitud (covariante), la estación meteorológica de influencia (factor clima) o el tipo de suelo (factor suelo).

## II.B. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CULTIVOS

### II.B.1. Contraste y análisis:

Se han revisado diversas metodologías para la estimación del rendimiento de los cultivos y la definición de funciones de producción. Esta revisión ha servido para seleccionar el modelo GEPIC como el más apropiado para las necesidades del caso piloto de estudio (Mancha Oriental) y de funciones cuadráticas de producción.

### II.B.2. Desarrollo de la metodología:

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.

### II.B.3. Aplicación a los casos de estudio

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

### II.C.1. y II.C.2. Objetivos de la DMA – DHPAS. Calidad de las aguas subterráneas.

Se ha definido un procedimiento para integrar objetivos ambientales en modelos de gestión frente al cambio climático y evaluar el impacto del cambio climático sobre el cumplimiento de los objetivos de la DMA y Directiva Hija de Protección de las Aguas Subterráneas (DHPAS). 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. El procedimiento general ha sido descrito en un artículo publicado en J. of Hydrology (Peña-Haro et al., 2010) para un caso sintético. Está previsto extender esta metodología a los casos de estudio, considerando los escenarios de cambio climático y de usos de suelo generados.

### II.C.3. Aplicación a los casos de estudio

Se han establecido objetivos de concentración máxima de nitratos para el caso de estudio de la Mancha Oriental. Para incorporar estos objetivos de calidad en un modelo hidro-económico de la gestión, se han desarrollado matrices de respuesta de concentración de contaminante con el procedimiento descrito en Peña-Haro et al., 2010.

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

### II.D.1. Caracterización y proyección de demandas en escenarios futuros

En el análisis del impacto futuro del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos es tan importante identificar los posibles cambios hidrológicos como las variaciones esperadas en el entorno socioeconómico y las demandas, por lo que podemos hablar de forma más general de escenarios de "cambio global".

Se han revisado los principales proyectos europeos que han abordado el tema de la generación de escenarios de usos de suelo (IMAGE, PRELUDE, ATEAM, EURURALIS), analizando en especial las proyecciones para Europa y España. A continuación se han analizado las proyecciones concretas para la zona de Mancha Oriental.

Se ha realizado también una revisión del estado del arte en la modelación de la asignación espacial de los cambios futuros de usos de suelo, con especial atención en su aplicación a los recursos hídricos. Dichos modelos representan una herramienta de apoyo para el análisis de las causas y consecuencias en la dinámica del uso del suelo. Se trata de plantear un procedimiento que permita calcular los valores futuros de la ocupación del suelo en una región, en consonancia con las consideraciones para la definición de los escenarios de cambio climático SRES. Igualmente se han revisado modelos de asignación espacial de usos del suelo.

Esto ha llevado a la definición de una metodología a implementar en los casos de estudio, basada en el uso de proyecciones futuras y la asignación espacial de acuerdo con las tendencias y variables locales.

## II.D.2. Caracterización económica de un sistema de recursos hídricos

Existe una gran variedad de técnicas recogidas en la literatura para la caracterización económica de las demandas de un sistema de recursos hídricos. La aplicación de la técnica adecuada dependerá de las características y disponibilidad de datos para cada uso. Estas técnicas permiten generar curvas económicas de demanda para su integración en modelos hidro-económicos a escala de cuenca o de acuífero.

En el segundo año de ejecución del proyecto se prevé incorporar la caracterización económica de las demandas de los casos de estudio en modelos hidro-económicos de simulación y optimización (a escala de cuenca y de acuífero). Las demandas se modificarán para considerar escenarios futuros, teniendo en cuenta el efecto del cambio climático pero también posibles nuevos escenarios socioeconómicos que modifiquen las demandas. Para ello habrá que plantear hipótesis sobre evolución de la demanda urbana y la demanda agrícola, lo cual sin duda estará influenciado por el contexto económico y socio-político.

En síntesis, los trabajos desarrollados en el primer año cumplen con los objetivos establecidos en la memoria. Además de revisar y contrastar metodologías existentes, se han desarrollado metodologías y modelos para simulación de escenarios de cambio climático y de cambios de uso del suelo, y su caracterización económica. Esto es un paso necesario para su integración en modelo hidro-económicos de simulación y optimización (a escala de cuenca y de acuífero) durante el segundo y tercer año del proyecto.

### **REFERENCIAS:**

Clarke D., M. Smith, K. El-Askari. 1998. CropWat for Windows 8: User Guide, University of Southampton.

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/>).

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.

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., Delgado, F. Andreu, J. y M. Pulido-Velazquez, 2010a. Modelling conjunctive management of surface and groundwater resources in the "Vega de Granada" system. IAHR GW Symposium. Valencia, Septiembre 2010.

- Pulido-Velazquez, D., Sahuquillo, A. y J. Andreu, 2010b. A conceptual model to simulate hydraulic head evolution in aquifers hydraulically connected with surface water bodies. Valencia, Septiembre 2010.
- Samper, J., Huguet, Ll., 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](http://www.brc.tamus.edu/swat/arcswat.html). Accessed 20 February 2007.