

SISTEMA SOPORTE DE DECISIÓN H2O PARA PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DEL USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS A ESCALA DE CUENCA

Guillermo COLLAZOS

Departamento de Ingeniería Hidráulica, Facultad de Ingeniería.

Universidad Nacional de La Plata, Calle 47 nro 200, 1900 - La Plata, Argentina.

Teléfono: +54 (221) 423 6684 - Fax: +54 (221) 423 6684 - Email: gcollazos@ssd-h2o.com.ar

Resumen:

Se presenta el Sistema Soporte de Decisión (SSD) H2O, que sirve para modelar Sistemas de Recursos Hídricos (SRH) complejos, y ayudar a la toma de decisiones en materia de planificación y gestión de recursos hídricos.

El programa consiste en una interfaz de ventanas multi-lenguaje (castellano, portugués, inglés) para construir y caracterizar los SRH; y de varios módulos de cálculo de paso mensual y estado estacionario.

Los módulos de cálculo permiten reproducir la evolución temporal del flujo del agua en la cuenca, manteniendo la integridad de ésta en el análisis y preservando las interrelaciones entre los elementos (por ejemplo entre aguas superficiales y subterráneas). Su empleo resulta de gran utilidad para comparar --de forma sistemática y objetiva-- los efectos de distintas actuaciones antrópicas y/o ante distintos escenarios futuros.

El SSD H2O presenta como características destacadas la potencialidad de los módulos de cálculo, la exportación de resultados a ArcView 3.x, la simplicidad de uso y la facilidad para analizar interactivamente los resultados. Una versión Demo del SSD H2O está disponible en el siguiente URL: <http://www.ssd-h2o.com.ar>.

Palabras claves: sistema soporte de decisión, ssd h2o, recursos hídricos, modelación integrada de cuencas, simulación.

1.- Introducción

Los Sistemas Soporte de Decisión (SSD) son herramientas utilizadas de forma cada vez más rutinaria para ayudar en la toma de decisiones en materia de planificación y gestión del agua en cuencas o Sistemas de Recursos Hídricos (SRH) complejos.

Un SSD combina bases de datos georeferenciadas de los elementos de la cuenca y modelos matemáticos; y permite estudiar y cuantificar el rendimiento del sistema hídrico frente a distintas actuaciones (obras de infraestructura, normas de explotación, etc.) o frente a condiciones futuras hipotéticas (cambios de uso del suelo, cambio climático, etc.), permitiendo responder preguntas del tipo:

¿Qué pasaría si....? en una cuenca hidrográfica

Con un SSD se pueden evaluar muchas alternativas de actuación de forma coherente, y seleccionar una suficientemente satisfactoria, antes de invertir grandes cantidades de dinero y realizar emprendimientos que ambientalmente son difíciles --sino imposibles-- de revertir.

El uso de un SSD responde a la necesidad y a la conveniencia de una gestión integrada de los recursos hídricos a nivel de cuenca fluvial, lo que implica (CEPAL, 2005):

- a) Considerar todos los usos del agua, buscando maximizar los beneficios globales.
- b) Considerar los intereses tanto de los usuarios directos de agua como de la sociedad.
- c) Integrar en la gestión todos los aspectos del agua (cantidad, calidad y tiempo de ocurrencia) que tengan influencia en los usos y usuarios.
- d) Integrar en la gestión las diferentes fases del ciclo hidrológico (normalmente aguas superficiales y subterráneas), preservando sus interrelaciones adecuadamente.
- e) Integrar la gestión a nivel de cuencas, acuíferos o sistemas hídricos interconectados.
- f) Integrar la gestión de la demanda con la gestión de la oferta de agua.

Cada clase de elemento se representa mediante un símbolo o color de línea preestablecido. Primero se han de crear los elementos puntuales: aportaciones hidrológicas, nudos, acuíferos, embalses, retornos y usos; y posteriormente éstos se conectan mediante elementos lineales: tomas, conducciones o líneas auxiliares. El esquema configurado ha de dar continuidad al tránsito de los aportes hidrológicos de aguas arriba hasta el final del sistema (lago, mar, evaporación, etc.) y ser coherente (por ejemplo todo nudo ha de tener al menos un elemento lineal que entre y otro que salga, etc.).

El usuario puede establecer el idioma de los menús y ventanas en castellano, portugués o inglés, según prefiera. También puede incrustar una imagen en el fondo, y diseñar el SRH respetando la posición geográfica aproximada de los elementos. Los botones de las barras de herramientas permiten la localización rápida de los elementos, su edición y la modificación gráfica de la conectividad del sistema.

Una vez seteados todos los parámetros y los archivos de datos requeridos, se puede ejecutar alguno de los modelos disponibles, que se describen más adelante. Luego de ejecutado algún modelo, se puede visualizar los resultados —en formas de series temporales— de los distintos elementos, en la parte inferior de la ventana de trabajo (Figura 1 anterior). Esto le permite al modelador analizar de forma cómoda los resultados, y efectuar los ajustes correspondientes hasta obtener resultados aceptables y acordes con el funcionamiento pretendido del sistema. Una descripción más completa se encuentra en el Manual de Usuario (Collazos, 2006).

Otra funcionalidad, especialmente útil en sistemas con muchos elementos, es la opción para exportar los resultados de los modelos en coberturas de ArcView 3.x, de forma que utilizando éste software de forma paralela es posible acceder a todas las potencialidades de clasificación y análisis propia de los Sistema de Información Geográfica (SIG).

También se han desarrollado módulos de cálculo --también genéricos-- para realizar la asignación del agua entre usos en competencia y distintas post-evaluaciones del sistema. Estos módulos pueden complementarse con otros modelos hidrológicos y/o estocásticos externos, para abordar problemas más complejos o singulares, tales como: evaluar los beneficios de introducir instrumentos económicos en la gestión del agua, el efecto de la instauración de bancos de agua, el costo-efectividad de medidas de mejora ambiental, el impacto en los usos debido al cambio climático, etc.

3.- Módulos de cálculo

Los módulos (o modelos) actualmente disponibles son de estado estacionario y de paso temporal mensual, aunque podrían adaptarse a intervalos menores. Estos módulos son programas independientes escritos en Fortran, que se ejecutan desde el SSD H2O.

Un modelo es una representación conceptual y simplificada de un SRH real, que preserva sólo las características esenciales del mismo (en nuestro caso las características importantes para la planificación del uso del agua) y desecha otras que no son tan relevantes (Buras, 2001). De modo que aunque un modelo sea más aproximado que otro a la realidad, ésta es siempre más rica y compleja que cualquier modelo que podamos construir. Es importante no perder de vista esta cuestión al momento de interpretar los resultados de los mismos.

3.1- Módulo de simulación por prioridades

Este módulo resuelve la asignación del agua entre los usos y usuarios del sistema en cada mes optimizando una función objetivo lineal, en la cual el peso de dar agua al elemento depende de la prioridad que le haya asignado al mismo el modelador. Normalmente los usos urbanos son los más prioritarios, seguidos por los agrícolas o ambientales. El almacenamiento final de un mes se vuelve en el almacenamiento inicial del mes siguiente, de forma secuencial (mes a mes) se va asignando el agua en todo el período de análisis.

El algoritmo de optimización reemplaza a las reglas explícitas de operación (Loucks, 1996). A partir de la conectividad de los elementos en el esquema (Figura 1) y de las características y parámetros de los mismos, el módulo de cálculo crea una red de flujo conservativa. En cada mes un algoritmo lineal de redes minimiza la función objetivo de la Ecuación 1.

$$FO = \sum_{i=1}^{nUsos} C_i \cdot X_i + \sum_{j=1}^{nCond.Vmin} C_j \cdot X_j + \sum_{k=1}^{nCentrales} C_k \cdot X_k + \sum_{m=1}^{nEmb.} C_m \cdot X_m \quad [1]$$

Sujeta a la ecuación de continuidad y a las restricciones físicas y operativas declaradas. Las variables o incógnitas del problema (X) representan el volumen circulante en el mes por cada elemento del SRH; y las constantes (C) son los pesos, que quedan determinados cuando el modelador establece las prioridades relativas de los elementos.

En la función objetivo preestablecida sólo puntúan los usos, las conducciones que requieren un volumen mínimo, las centrales hidroeléctricas y los embalses. Los embalses se hallan divididos en varias zonas de almacenamiento. De esta forma, si el almacenamiento es bajo el agua sólo es accesible a los usos más prioritarios, mientras que si hay mucha agua almacenada o que entra al sistema, el agua es accesible a todos los usos.

Así, estableciendo las prioridades de elementos que están presentes en la función objetivo y del resto de parámetros, el usuario debe reproducir el funcionamiento observado en la cuenca, proceso que se denomina validar o calibrar el modelo antes de emplearlo.

El modelo permite el análisis del uso conjunto de los recursos superficiales y subterráneos: los acuíferos son representados mediante modelos agregados, simples, pero suficientes para los fines de planificación para los que se emplean los SSD.

3.2- Módulos de evaluación económica (post-simulación)

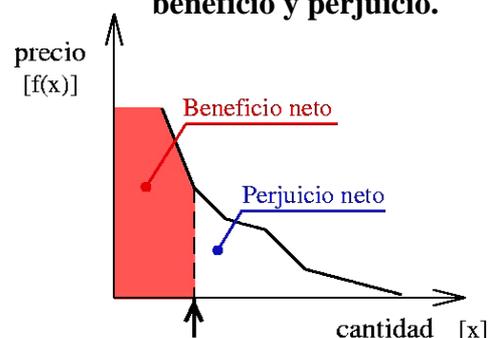
EvalSim y *MEvalSim* son los módulos disponibles para realizar el análisis económico del uso del agua.

El módulo de evaluación *EvalSim* realiza la evaluación económica del resultado de la asignación simulada del agua.

Para ello se debe asociar a los elementos del SRH una función económica que representa los costos o beneficios unitarios (de signo negativo o positivo respectivamente) asociados a la entrega de distintos volúmenes de agua (línea negra en la Figura 2).

Con el módulo de simulación por prioridades antes descrito se establece el volumen asignado cada mes [x] o cantidad. Luego, por integración, se

Figura 2: Función económica, beneficio y perjuicio.



determina el excedente económico o Beneficio Neto (área sombreada en la Figura 2). Si la cantidad suministrada es menor que la cantidad correspondiente a precio (o valor) nulo, existirá de forma asociada un Perjuicio Neto ocasionado por un suministro menor que el deseado.

El excedente económico total o Beneficio Neto total del SRH, correspondiente a una dada simulación, responde a la Ecuación 2:

$$BN = \sum_{t=1}^{nT} \sum_{i=1}^{nElem} \int_0^x f.e.(i,t)(x_{(i,t)}) \cdot dx_{(i,t)} \quad [2]$$

Siendo: nT: número de meses del período simulado.

nElem: la cantidad de elementos del sistema que tienen una función económica.

El módulo *MEvalSim*, de múltiples evaluaciones económicas, utiliza reiteradamente los módulos de simulación y de evaluación. Mediante una metodología original, que consiste en introducir un cambio diferencial de la restricción del sistema que se quiere estudiar (Collazos, 2004 y Collazos et. al., 2004) permite obtener diferentes indicadores económicos marginales:

- el valor marginal del recurso (vmr) en los nudos, que es el indicador más importante.
- el costo marginal de las restricciones físicas u operativas del SRH (caudales mínimos).
- otros indicadores marginales en usos y embalses (volúmenes objetivo o máximos).

Los indicadores se calculan para todo el período de simulación, y en diferentes elementos de la cuenca, permitiendo realizar útiles análisis sobre la escasez del recurso, la forma de combatir dicha escasez, la eficiencia económica de la asignación actual, etc.

El valor marginal del recurso (vmr) en el punto *i* para el intervalo *t* es un indicador de la escasez de agua y de la capacidad de pago de los usuarios para reducirla. Se calcula con la Ecuación 3:

$$vm_{(i,t)} = \frac{(BN_m - BN_b)}{\Delta Volumen} \quad [3]$$

Siendo: BN_b: beneficio neto correspondiente al caso base (actual).

BN_m: beneficio neto correspondiente al caso modificado, que se construye agregando al caso base un volumen diferencial de agua en ese nudo *i* y en ese intervalo *t*.

ΔVolumen: volumen diferencial de agua agregado o detrído.

Así, para calcular el valor marginal del recurso en un solo nudo del sistema y para un período de 10 años, se ha de simular y evaluar 120 veces el caso modificado, y una vez el caso base.

4.- Caso de aplicación

Se ha aplicado el módulo de simulación del SSD H2O al estudio de un proyecto en una cuenca compartida por las provincias argentinas de Neuquén, Río Negro y Buenos Aires. Los resultados presentados son preliminares, porque el estudio no se ha finalizado, pero sirven a los efectos de mostrar las capacidades de los programas y los análisis efectuados.

La actuación a estudiar se ubica en la zona sombreada (Figura 3), cerca del río Neuquén.

Figura 3: Ubicación de los ríos del sistema y zona de estudio en el río Neuquén.

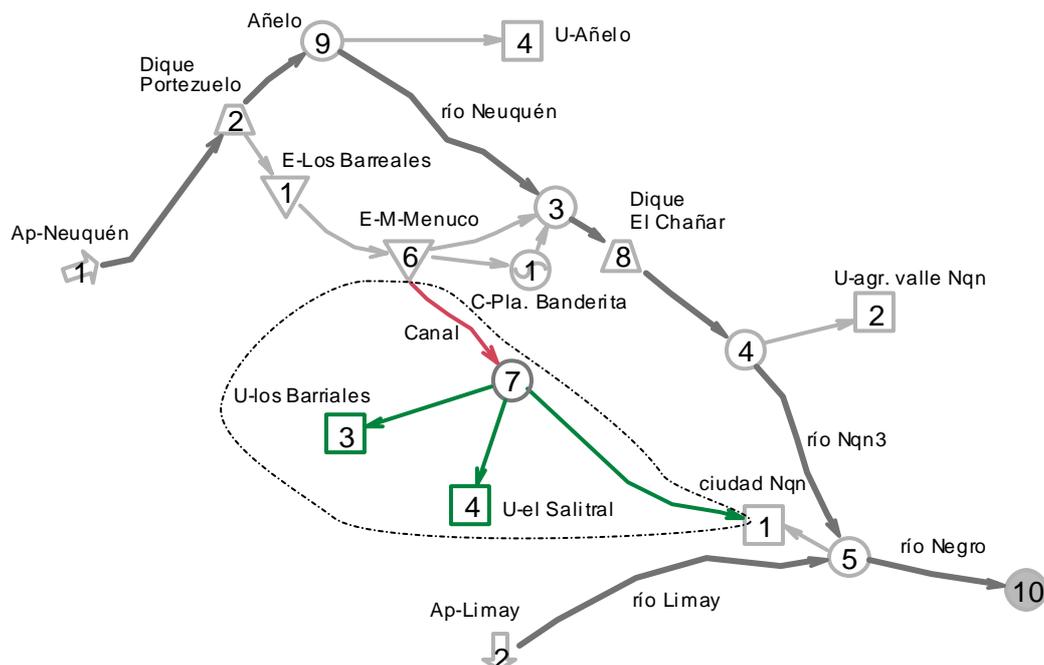


En Argentina, las provincias poseen el dominio del recurso hídrico que fluye por su territorio. Entre 1973 y 1990 el Estado Nacional realizó diversos aprovechamientos hidroeléctricos y de regulación de crecidas en los cursos medios de los ríos Neuquén y Limay, que eran operados por la empresa pública HIDRONOR. En el año 1993 se privatizaron individualmente estas infraestructuras (las presas y centrales hidroeléctricas respectivas), siendo adjudicadas a distintas empresas privadas. Simultáneamente la Autoridad Interjurisdiccional de Cuenca (AIC) recibió atribuciones sobre el manejo de aguas en la mencionada cuenca.

4.1- Descripción del sistema

El estudio se centra sobre el río Neuquén, que tiene un régimen fundamentalmente nival, por el deshielo proveniente de la cordillera de los Andes. La Figura 4 muestra el sistema actual (los ríos se ha dibujado el línea más gruesa y oscura) en color gris.

Figura 4: Sistema existente y la futura ampliación (rodeado de línea gruesa).



El Dique Portezuelo Grande (nudo 2), sobre el río Neuquén deriva aproximadamente el 95 % del caudal medio del río hacia el lago artificial de Los Barreales. De éste pasa de forma directa al lago Mari-Menuco, ubicado también en la meseta. De forma que se consigue un salto útil entre éste último lago y el cauce natural del río que se aprovecha en la central hidroeléctrica de Planicie Banderita. Las pérdidas por la evaporación de los lagos alcanzan el 10 % de la aportación natural del río. Aguas abajo, el dique compensador El Chañar (nudo 8) amortigua las variaciones de caudal creadas por el uso hidroeléctrico y las hace compatibles con los usos agrícolas, urbanos y ambientales de aguas abajo. La ciudad de Neuquén y otras ciudades menores cercanas se abastecen actualmente mediante bombes del lecho del río.

La actuación a estudiar (rodeada por una línea de puntos en la Figura 4) es la derivación de aguas del lago o embalse de Mari-Menuco para desarrollar dos nuevas zonas de riego en sendas cuencas endorreicas situadas al sur y para proveer a la ciudad de Neuquén de un agua de más calidad para uso urbano. El área a regar estaría comprendida entre 10000 y 15000 ha de vid y frutales, y la población a abastecer es del orden de 250000 habitantes (aunque con un consumo *per-cápita* altísimo, del orden de 600 l/hab·día).

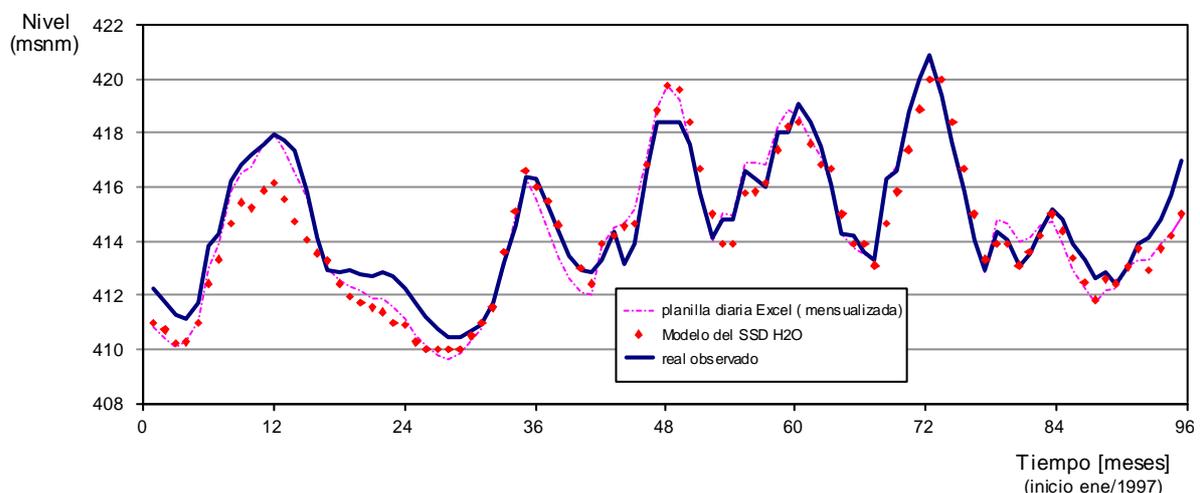
Interesa cuantificar los efectos de estas derivaciones sobre los usos ya instalados: la disminución en la energía generada por la central hidroeléctrica y la pérdida de garantía en los usos del valle del río Neuquén. Dado que el aporte medio anual del río Limay es aproximadamente el doble del río Neuquén, en una primera aproximación se asumió que no habrá afecciones significativas en los usos ubicados sobre el río Negro.

4.2- Validación del modelo

La central Planicie Banderita se opera con una regla diaria, que establece límites máximos y mínimos al volumen almacenado (variables con el día del año); y valores máximos y mínimos del caudal erogado aguas abajo. Estas reglas se han establecido para cumplir los múltiples fines de los embalses: disminuir las sequías, proteger contra inundaciones y generar energía. Dentro de dichos límites, la empresa tiene libertad para operar en función de las necesidades del mercado de energía. En sequías excepcionales la AIC indica las sueltas a efectuar.

La validación del modelo resultó especialmente complicada porque hubo que representar de forma aproximada, con un modelo de paso mensual, la operación realizada diariamente; el ajuste conseguido en los últimos 8 años para el nivel del embalse se ve en la Figura 5.

Figura 5: Validación del modelo para el período 1997-2005 con el nivel del embalse.



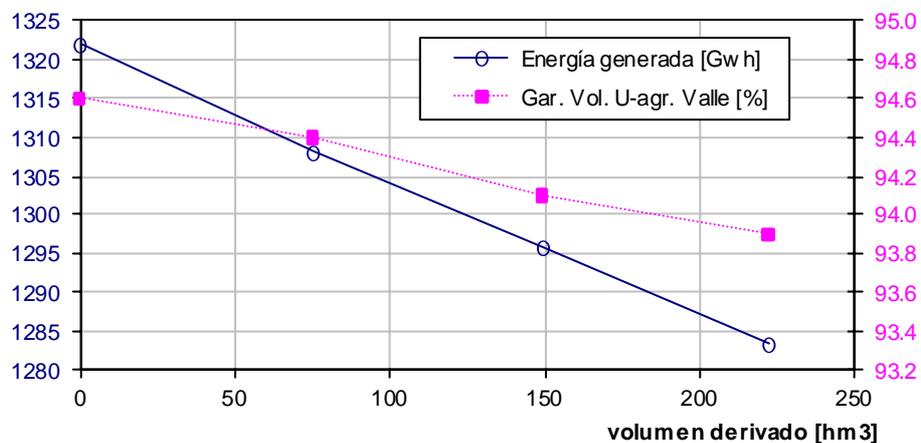
Las diferencias en los ajustes durante los primeros meses están provocadas fundamentalmente por la gestión sin reglas preestablecidas que se efectúa durante las sequías severas; ya que previamente al período representado, en el año 1995, también hubo una sequía importante. Otro indicador del ajuste conseguido, la energía generada anualmente, presenta entre la realidad y el resultado del modelo diferencias medias del $\pm 6\%$ en el período comparado, aunque son algo mayores en los primeros 30 meses del período comparado.

4.3- Resultados

Con el modelo validado se pueden estudiar distintas situaciones hipotéticas y obtener conclusiones útiles. En esta primera etapa se trabajó con las serie de aportaciones históricas de una longitud de 62 años.

En la Figura 6 se presentan los resultados de 4 simulaciones realizadas con un volumen derivado anual correspondiente al 0,0 %; 0,8 %; 1,6 % y 2,3 % respectivamente de la aportación media anual del río Neuquén (de $9500 \text{ hm}^3/\text{año}$).

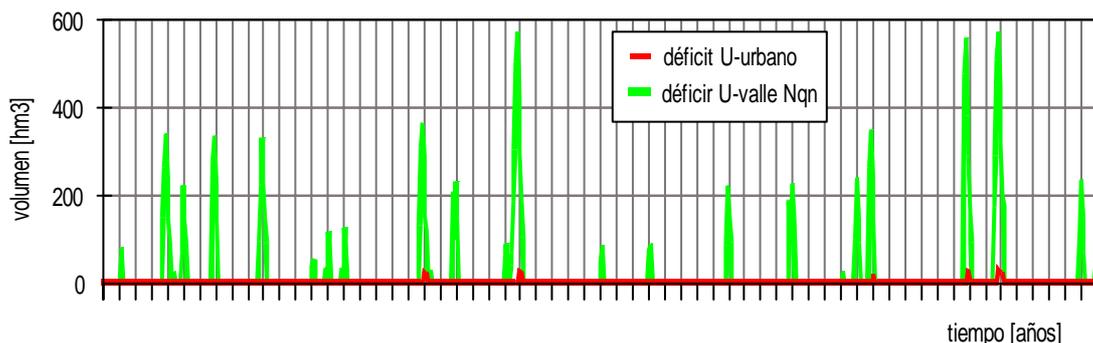
Figura 6: Efectos de distintos valores de volumen derivado del lago Mari-Menuco.



Las pérdidas de energía generada tiene un comportamiento bastante lineal en el rango explorado, correspondiente a un 1 % de pérdida de energía por cada 0,8 % del volumen derivado. Los efectos sobre la garantía volumétrica también se aprecia como poco significativo (-0,6 %).

La Figura 7 presenta la comparación entre los déficit de dos usos con distinta prioridad. Puede apreciarse como el uso agrícola del valle (que agrupa a varias zonas de riego) presenta episodios de escasez con recurrencia de 4 años aproximadamente.

Figura 7: Serie temporal de déficits para la hipótesis de derivar un 2,3 %.



Del análisis efectuado ha surgido como interesante la posibilidad de redefinir las reglas de operación del embalse, ya que se han revelado como demasiado conservadoras en cuanto a la prevención de inundaciones, dando lugar en varios años a sequía operativa.

Si bien el estudio no se ha concluido al momento de finalizar éste trabajo, y por ello no se pueden extraer conclusiones más completas, el caso presentado sirve para exponer la clase de análisis que permite efectuar el SSD H2O y la forma de llevar a cabo estos estudios.

5.- Conclusiones y comentarios finales

Se ha desarrollado una compleja herramienta informática, el Sistema Soporte de Decisión genérico H2O, útil para realizar distintos estudios necesarios al momento de planificar el uso del agua a escala de cuenca. Éste SSD es equivalente en funcionalidades a otros programas con la misma finalidad, se ha probado amplia y sistemáticamente y corresponde al estado del arte en materia de modelación integrada de cuencas y toma de decisiones en base a criterios objetivos.

El SSD H2O se destaca por la potencialidad de los módulos de cálculo de simulación y análisis económico, la posibilidad de exportar los resultados como coberturas de ArcView 3.x, la simplicidad de uso y la facilidad para analizar los resultados, realizar cambios en las condiciones del SRH y volver a ejecutar los modelos.

Se ha presentado un caso de aplicación (aún no finalizado) en la cuenca del río Neuquén compartida entre tres provincias argentinas, en donde se ha utilizado el módulo de simulación por prioridades para determinar la afección sobre los usos ya establecidos de un nuevo emprendimiento de regadío y el cambio del punto de derivación del abastecimiento urbano. El empleo del SSD en esta cuenca ha permitido cuantificar y comparar los efectos sobre otros usuarios de distintos volúmenes derivados. Los módulos de evaluación económica no se han utilizado para este caso, pero podrían brindar información útil sobre la factibilidad económica del emprendimiento y de la recuperación de las cuantiosas inversiones a realizar.

En general, el empleo de un SSD en el análisis de una cuenca interjurisdiccional (ya sea interprovincial o internacional) facilita el arribar a acuerdos y previene la aparición de conflictos hídricos. Su uso permite que la negociación se dé en un ámbito de racionalidad técnica, y que las cuestiones a acordar puedan dividirse en varios asuntos menores, sujetos a acuerdos parciales y sucesivos que facilitan la negociación. Evidentemente el primer acuerdo a alcanzar es ponerse de acuerdo sobre las entradas hidrológicas o recursos totales de la cuenca. Luego, empleando los mismos criterios en distintos sectores de la cuenca (independientemente de la jurisdicción en la que se encuentren) se suele establecer cuotas de reparto de recurso o condiciones mínimas a cumplir en los puntos de cruce de frontera. Especialmente se ha de velar por proteger a los usuarios de aguas abajo de las decisiones hechas por los usos y usuarios de aguas arribas, los cuales tienen una posición asimétricamente privilegiada.

Es una satisfacción poner a consideración y disposición de los colegas de la comunidad científica esta poderosa herramienta, imprescindible para una adecuada gestión integral del recurso hídrico a escala de cuenca. Una versión Demo del SSD H2O está disponible en el siguiente URL: <http://www.ssd-h2o.com.ar>.

Agradecimientos

Se agradecen los datos obtenidos de las webs de CAMESA, Subsecretaría de Recursos Hídricos de Argentina, los datos suministrados por la UEP Mari-Menuco (Neuquén).

Referencias bibliográficas

- ACRES (1998). "User's Manual ARSP Acres Reservoir Simulation Package". *ACRES International Ltd.* <http://www.acres.com/company/water/arsp.htm>.
- Alexandre y Porto (2000). Alexandre, N. R. y Porto, R. L.: "O sistema ModSimLS: um modelo de rede de fluxo para simulação de bacias hidrográficas". *J. of Water Resources Planning and Management*. 126, nro. 2, pp. 85-97.
- Andreu et. al. (1996). Andreu, J., Capilla Roma, J. y Sanchis, E.: "AQUATOOL, a generalized Decision Support System for water-resources planning and management". *Journal of Hydrology*, 177:269–291.
- Buras, N. (2001). "Water Resources, unresolved issues". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 25(1):353.
- CEPAL (2005) Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Miguel Solanes y Andrei Jouravlev), *Integrando economía, legislación y administración en la gestión del agua y sus servicios en América Latina y el Caribe*, Santiago de Chile, octubre del 2005.
- Cheng et. al. (1998). Chung, F. I., Archer, M. C. y Devries, J. J.: "Network flow algorithm applied to California aqueduct simulation". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 115(2):131–147.
- Collazos (2004). Collazos, G.: "Sistema Soporte de Decisión para evaluación y optimización económica de Sistemas de Recursos Hídricos"; *Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia; septiembre de 2004. ISBN: 0-542-13628-7.*
- Collazos et. al. (2004). Collazos G., Andreu, J. y Solera, A.: "Metodología y Herramientas para el Análisis Económico de Sistemas de Recursos Hídricos", *XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Sao Pedro, Brasil; octubre de 2004.*
- Collazos (2006). Collazos, G.: "Manual del Usuario del SSD H2O", *Universidad Nacional de La Plata, Argentina.* <http://www.ssd-h2o.com.ar>
- DHI (2001). "MIKE BASIN 2001, Guía y Tutoría para su uso". <http://www.dhisoftware.com/mikebasin>
- Labadie (1994). Labadie, J. W.: "MODSIM: Interactive river basin network flow model". *Technical report, Department of Civil Engineering, Colorado State University.* <http://129.82.224.229/concepts/moddoc.html>.
- Loucks (1996). Loucks, Daniel P.: "Surface Water Resources System" en *Water Resources Handbook*. McGraw-Hill. ISBN 0-07-041150-6.
- Martin (1983). Martin, Q. W.: "Optimal operation of multiple reservoir system". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 106(1):58–74.
- Raskin et al (2001). Raskin, P., Sieber, J. y Huber-Lee, A.: "User Guide for WEAP 21". *Stockholm Environment Institute.*
- VUT (2001). "REALM User's Manual (Version W1.4h)". *Victoria University of Technology and Department of Natural Resources and Environment.*