

LOS SISTEMAS DE APOYO A LA DECISIÓN EN EL ESTABLECIMIENTO DE RÉGIMENES DE CAUDALES ECOLÓGICOS.

Magdaleno Mas, F.⁽¹⁾; Olaya Ferrero, V.⁽²⁾

Resumen

Los sistemas de apoyo a la decisión (*Decision Support Systems - DSS*) son unas herramientas relativamente novedosas cuya aplicación, en el ámbito de la gestión hídrica, se encuentra aún en sus etapas iniciales. La utilización de estos sistemas en el establecimiento de caudales ecológicos se basa en el uso de los distintos modelos hidrológicos existentes, y en su combinación con modelos ecológicos. A través de ellos se pueden simular distintas condiciones de flujo, así como su influencia sobre diversos indicadores ambientales, como el estado de las poblaciones piscícolas, de la ornitofauna de ribera o de la vegetación riparia. Existen diversos mecanismos para introducir los modelos ecológicos en los sistemas de apoyo a la decisión. El desarrollo de estos sistemas y la necesidad de contar con un *software* específico de apoyo a la gestión de los sistemas fluviales augura una rápida evolución e incorporación de estas técnicas a los procesos de cálculo de caudales ecológicos. En este artículo se pasa revisión a las principales técnicas existentes en este ámbito, así como a las posibilidades futuras de estas herramientas, exponiéndose además las principales aplicaciones y experiencias realizadas hasta la fecha mediante estos procedimientos.

Palabras clave: Sistemas expertos, inteligencia artificial, caudales ambientales, gestión de recursos hídricos.

(1) Área de Ingeniería Ambiental.
Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas.
CEDEX (Ministerio de Fomento)
c/ Alfonso XII, 3-5
28014 Madrid
fernando.magdaleno@cedex.es

(1) Centro Universitario de Plasencia
Avda. Virgen del Puerto, 2
10600 Plasencia
volaya@ya.com

1. INTRODUCCIÓN.

Junto a los criterios de cálculo y decisión más habituales en el ámbito del establecimiento de regímenes de caudales ambientales, están surgiendo también mecanismos de decisión basados en el desarrollo de nuevas tecnologías. Los sistemas de apoyo a la decisión (*Decision Support Systems - DSS*) son unas herramientas relativamente novedosas cuya aplicación, en el campo de la gestión hídrica, se encuentra aún en sus etapas iniciales. Pese a ello, ya están siendo utilizados por diversas instituciones y administraciones en diversos países.

La utilización de estos sistemas en el establecimiento de caudales ecológicos se basa en el uso de los distintos modelos hidrológicos existentes, y en su combinación con modelos ecológicos. A través de ellos se pueden simular distintas condiciones de flujo, así como su influencia sobre diversos indicadores ambientales, como el estado de las poblaciones piscícolas, de la ornitofauna de ribera o de la vegetación riparia. Para simular las interacciones entre unos y otros modelos, es necesario realizar diversas operaciones de pre-procesado, para convertir los valores de caudales calculados en otros parámetros de más fácil conexión con las variables ecológicas, tales como el periodo de sequía, la frecuencia de avenidas extraordinarias o la profundidad de las aguas. También es preciso integrar cartografía informativa de los patrones de uso y tipología de suelos (LAM *et al.*, 1994; YOUNG *et al.*, 2000).

2. PROCEDIMIENTOS.

Existen diversos mecanismos para introducir los modelos ecológicos en los sistemas de apoyo a la decisión. Uno de ellos consiste en la creación de un código para los modelos individuales, basándose en las relaciones matemáticas entre calado, temperatura y otros atributos numéricos. Una segunda opción es escribir cada modelo ecológico como una regla de base, utilizando algoritmos óptimos de decisión en árbol (PEARL, 1988), con procesos *if-then* que acepten valores numéricos, descripciones cualitativas o funciones

difusas para los atributos. Una tercera vía consiste en re-estructurar las reglas de base y utilizar otros algoritmos de inteligencia artificial, como por ejemplo la aproximación marco-objeto. La primera opción carece en general de flexibilidad suficiente, ya que sólo se pueden introducir valores numéricos y requiere además un código específico para cada modelo. La segunda posibilidad citada permite la introducción de datos cuantitativos y cualitativos, contando así con una mayor flexibilidad; además, las reglas de base contribuyen a este fin, al facilitar la posible modificación de los modelos. En el último caso, el método ofrece aún mayor flexibilidad, ya que estos cambios se pueden realizar sobre clases de atributos, y las reglas de base se dirigen más hacia una programación orientada a objetos y al uso de bases de datos. Muchos de estos sistemas permiten, además, emplear reglas de base fundamentadas tanto en lógica discreta como en lógica difusa (*fuzzy logic*), generalmente en función del grado de incertidumbre de la regla en cuestión. La utilización de la lógica difusa en la modelización de hábitats piscícolas de cara a su utilización en la definición de regímenes de caudales ecológicos es aún una disciplina joven, pero con un enorme potencial en la gestión de los recursos hídricos (fig.1).

Los Sistemas DSS modernos tienden a incluir en su desarrollo ciclos iterativos de consulta a los futuros participantes en su utilización. De esta forma se intentan evitar, en parte, los numerosos problemas que se producían al no incluir la opinión de estos agentes, que se veían obligados a utilizar productos plenamente cerrados no ajustados a los planteamientos reales de este tipo de problemas (UBBELS & VERHALLEN, 1999). Por el contrario, su participación en las fases de análisis, diseño, construcción, comprobación y validación proporciona una buena comunicación entre todos los interesados, dando lugar a DSSs bien adaptados a los requerimientos exactos de los usuarios.

Entre las principales aplicaciones de estos Sistemas en este ámbito, se pueden destacar el apoyo a la modelación hidráulica, los análisis geomorfológicos y la predicción del comportamiento del medio fluvial (beneficios y perjuicios a distintos niveles sobre las poblaciones cercanas). Estas herramientas se vienen usando desde hace décadas en otras disciplinas, pero se puede considerar que su uso es relativamente reciente, como se ha expuesto anteriormente, en la gestión y planificación de los recursos hídricos. En este marco cabe citar los trabajos de OLSON & COURTNEY (1992), FORD & KILLEN (1995), ANDREU *et al.* (1996), REITSMA (1996), FEDRA & JAMIESON (1996) y SILVA & KOK (1996). Ninguno de estos trabajos se circunscribe de forma específica al ámbito del establecimiento de caudales ecológicos, pero sí aportan ejemplos de creación de sistemas para algunas de las componentes básicas de estos caudales. Existen ya, sin embargo, algunas aplicaciones que sí pueden ser consideradas de uso directo en la definición de regímenes de caudales ambientales. Entre éstas, se han tomado por ser especialmente representativas dos: el Modelo SIAM y el Sistema EFDSS.

3. EL MODELO SIAM.

El modelo SIAM (*Systems Impact Assessment Model*) ha sido desarrollado en la última década por el USGS norteamericano. SIAM integra componentes como la cantidad y calidad del agua, los hábitats y la producción piscícola, con el fin de cuantificar el resultado de distintas operaciones de gestión de los recursos hídricos sobre diversos parámetros biológicos (producción de alevines de salmón chinook), físicos (temperatura y microhábitat) y químicos (oxígeno disuelto). Para ello, se utiliza un número importante de modelos de verificación, calibración y validación (BARTHLOW, 1998). SIAM está diseñado para ser utilizado en el contexto de la metodología IFIM. El mecanismo de uso comienza con la aplicación de un modelo de cantidad de agua, MODSIM, para predecir los caudales y volúmenes con que cuenta el sistema fluvial en sus cursos y masas de agua (en concreto, las principales aplicaciones realizadas se llevaron a cabo en el río Klamath, Oregón). MODSIM emplea una estructura jerarquizada para modelizar los caudales a través del sistema, bajo diferentes alternativas de gestión, en especial reglas de operación de embalses, requerimientos de caudales ecológicos y abstracciones para aprovechamientos externos. Los caudales simulados mediante MODSIM pasan entonces a un modelo de calidad de aguas, HEC-5Q, capaz de predecir los valores de los parámetros de calidad de las aguas elegidos a lo largo del río, como por ejemplo la temperatura de las mismas y el oxígeno disuelto. Como es sabido, la producción piscícola depende del micro y macrohábitat acuático, así como del número de adultos reproductores. Pues bien, SIAM utiliza un modelo de producción piscícola, SALMOD, para predecir el número relativo y el peso de anádromos juveniles existentes en el área de estudio. También es capaz de identificar la magnitud relativa de diversas causas de mortalidad en las especies objetivo. En la fig. 2 se ofrecen capturas de las pantallas de inicio de MODSIM en entorno WINDOWS y UNIX.

Todos estos parámetros permiten asimismo llevar a cabo evaluaciones del estado de los ecosistemas acuáticos (BARTHLOW *et al.*, 2003). SIAM lleva a cabo la conexión y combinación de los diferentes modelos, creados sobre escalas espaciales y temporales distintas, con diferentes unidades de entrada y salida, y distintos formatos de archivo. En la fig. 3 se ofrece la interfaz a través de la cual se produce esta

combinación de modelos.

4. EL SISTEMA EFDSS.

EFDSS (*Environmental Flow Decision Support System*) es una herramienta diseñada para ayudar a los gestores de los recursos hídricos a conocer las relaciones existentes entre los regímenes de caudales y las condiciones ambientales de ríos sujetos a regulación. Esta información viene dada por modelos de simulación, pero también se obtiene a través del consejo de expertos, dado que los parámetros que contienen estos modelos deben ser ajustados para cada nueva aplicación del sistema. Principalmente, EFDSS hace uso de modelos hidrológicos (por ejemplo para conocer las cantidades de agua de que se dispone), así como de modelos ecológicos predictivos.

Originalmente, el Sistema fue desarrollado para la cuenca del río Border Rivers (Nueva Gales del Sur, Australia), mientras que los modelos ecológicos son genéricos de la cuenca del sistema Murray-Darling (también en Australia).

Es importante destacar que EFDSS está especialmente asociado a la gestión del río y de sus regímenes de caudales, y que no se consideran por el contrario los efectos del aprovechamiento del suelo sobre las variables hidrológicas. En este sentido, el rango espacial de las aplicaciones de este sistema se encuentra limitado por la extensión del modelo hidrológico utilizado para proporcionar información al mismo.

EFDSS permite comprobar a sus usuarios el impacto de diferentes regímenes sobre distintas características físicas y ecológicas en un abanico de condiciones ribereñas. Cada uno de estos regímenes modelizados pasa a ser un escenario. El sistema recomienda tomar entre 4 y 8 escenarios, aunque no existen realmente limitaciones reales en cuanto al número elegido (YOUNG *et al.*, 1999). El sistema incluye la selección de escenarios naturales, en condiciones de no regularización, y escenarios actuales, bajo las restricciones y aprovechamientos que se den en el río, en el momento concreto analizado.

En el año 2003 surgió, a su vez, una adaptación del sistema EFDSS, como una herramienta de evaluación específicamente dirigida al análisis del río Murray, con el nombre de *Murray Flow Assessment Tool* (MFAT). Esta herramienta supone una mejora del sistema EFDSS, especialmente en cuatro aspectos (YOUNG *et al.*, 2003):

- incluye actualizaciones de cuatro modelos ecológicos, concretamente referidos a ictiofauna autóctona, ornitofauna de ribera, vegetación de zonas húmedas y vegetación asociada a la llanura de inundación, con objeto de introducir los últimos avances en el conocimiento de la ecología fluvial;
- la entrada, almacenamiento y uso de los datos foronómicos se realiza a través de un modelo de simulación concreto (*Murray Simulation Model – MSM/Bigmod*);
- existe una mejora de la interfaz técnica de usuario (TUI), en la que se realiza la comparación e integración de los resultados del modelo (fig.4);
- incluye modificaciones del modelo hidrológico para la llanura de inundación, como por ejemplo la representación de las relaciones áreas-volúmenes.

5. CONCLUSIONES.

- i. Los Sistemas de Apoyo a la Decision son ya, en la actualidad, herramientas plenamente utilizables en la definición y establecimiento de regímenes de caudales ambientales.
- ii. La utilización actual de estos sistemas en el establecimiento de caudales ecológicos se basa en el uso de los distintos modelos hidrológicos existentes, y en su combinación con modelos ecológicos. A través de ellos se pueden simular distintas condiciones de flujo, así como su influencia sobre diversos indicadores ambientales, como el estado de las poblaciones piscícolas, de la ornitofauna de ribera o de la vegetación riparia.
- iii. Las aplicaciones realizadas corresponden, hasta la fecha, al ámbito anglosajón, en el que estos sistemas forman parte de amplias estrategias de utilización de este tipo de técnicas en la gestión de los recursos hídricos.
- iv. Entre los sistemas analizados, destacan el Modelo SIAM estadounidense y el sistema EFDSS australiano, si bien es éste último el que más directamente se encuentra enfocado hacia el establecimiento de caudales ambientales.
- v. La introducción de este tipo de sistemas en nuestro país resulta de máxima importancia si se pretende alcanzar los objetivos generales de protección de los ecosistemas fluviales, especialmente tras la entrada en vigor de la nueva Directiva Marco de Aguas.
- vi. La utilización de estas técnicas exige un esfuerzo por parte de técnicos y gestores, pero

también por parte de la comunidad científica, con el fin de obtener productos basados en modelos hidrológicos y ecológicos que tengan en cuenta las particulares condiciones de nuestros medios fluviales.

- vii. El desarrollo de todos estos sistemas y la necesidad de contar con un *software* específico de apoyo a la gestión de los sistemas fluviales augura una rápida evolución e incorporación de estas técnicas a los procesos de cálculo de caudales ecológicos. Además, su utilización facilita en gran medida la integración de nuevas componentes en el proceso de decisión, así como la incorporación de modelos de elevada y creciente complejidad.

6. REFERENCIAS.

ANDREU, J., CAPILLA, J., SANCHÍS, E. 1996. Aquatool, a generalised decision-support system for water resources planning and management. *Journal of Hydrology* 177: 269 - 291.

BARTHOLOW, J. 1998. *SIAM - A System Impact Assessment Model for Riverine Ecosystems*. Chronicle of Instream Flow Activities; USGS, Ft. Collins, CO. Vol 2(2) online at <http://www.fort.usgs.gov/products/software/siam/siam.asp>

BARTHOLOW, J., HEASLEY, J., HANNA, B., SANDELIN, J., FLUG, M., CAMPBELL, S., HENRIKSEN, J., DOUGLAS, A. 2003. *Evaluating water management strategies with the systems impact assessment model: SIAM version 3*. Fort Collins, CO: U.S. Geological Survey. USGS Open-File Report 03-82.

FEDRA, K. & JAMIESON, D.G. 1996. The Waterware Decision Support System for river basin planning: 2. Planning capability. *Journal of Hydrology* 177: 199 - 211.

FORD, D.T. & KILLEN, J.R. 1995. PC-based Decision-support system for Trinity river, Texas. *Journal of Water Resources Planning and Management*.

LAM, D.C.L., MAYFIELD, C.I., SWAYNE, D.A., HOPKINS, K. 1994. A prototype information system for watershed management and planning. *J. Biological Sys.* 2(4): 499–517.

MAGDALENO, F. & MARTÍNEZ, R. 2005. La lógica difusa en la modelización y manejo de ecosistemas acuáticos. *Ingeniería Civil* 138.

OLSON, D.L. & COURTNEY, J.F. 1992. *Decision Support Models and Expert Systems*. MacMillan Publishing Company.

PEARL, J. 1988. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. Morgan-Kaufmann, SanMateo, CA.

REITSMA, R.F. 1996. Structure and support of water resources management and decision making. *Journal of Hydrology* 177: 253 - 268.

SILVA, W & KOK, M. 1996. *Landscape Planning of the river Rhine in the Netherlands; Towards a balance in river management*. RIZA & WL|Delft Hydraulics.

UBBELS, A. & VERHALLEN, A. 2000. *Suitability of decision support tools for collaborative planning processes in water resources management*, RIZA.

YOUNG, W.J., CUDDY, S.M., MARSTON, F.M., FARLEY, T.F.N. 1999. *Environmental Flow Decision Support. A Prototype. Volume I: System Description*. CSIRO Land and Water Technical Report 11/99.

YOUNG, W.J., LAM, D.C.L., RESSEL, V., WONG I.W. 2000. Development of an environmental flows decision support system. *Environmental Modelling & Software* 15(2000): 257–265.

YOUNG, W.J., SCOTT, A.C., CUDDY, S.M., RENNIE, B.A. 2003. Murray Flow Assessment Tool: A Technical Description. Client Report for the CRC for Freshwater Ecology. CSIRO Land and Water. [Online]: <http://www.mdbc.gov.au/livingmurray/mfat/downloads/mfattechmanual.pdf>

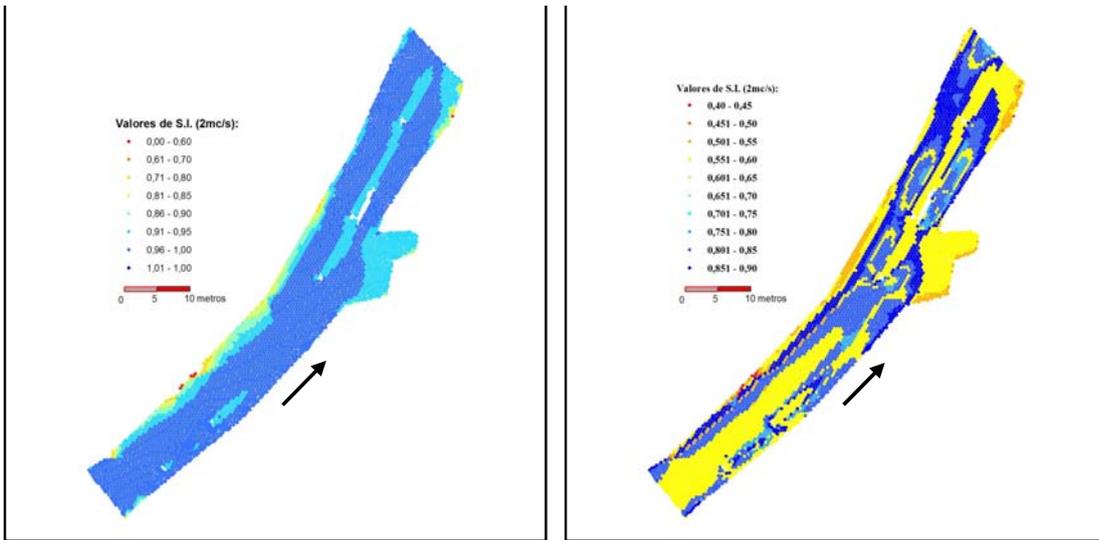


Fig.1.- Mapa de idoneidad de hábitat para la trucha común (*Salmo trutta* m. fario) adulta en el río Lozoya (Madrid), a partir de curvas de preferencia clásicas (izqda.) y funciones de pertenencia asociadas a procesos de lógica difusa (dcha.) (MAGDALENO & MARTÍNEZ, 2005). La utilización de la lógica difusa permite aumentar la precisión del mapa de idoneidad, y considerar un mayor número de variables.

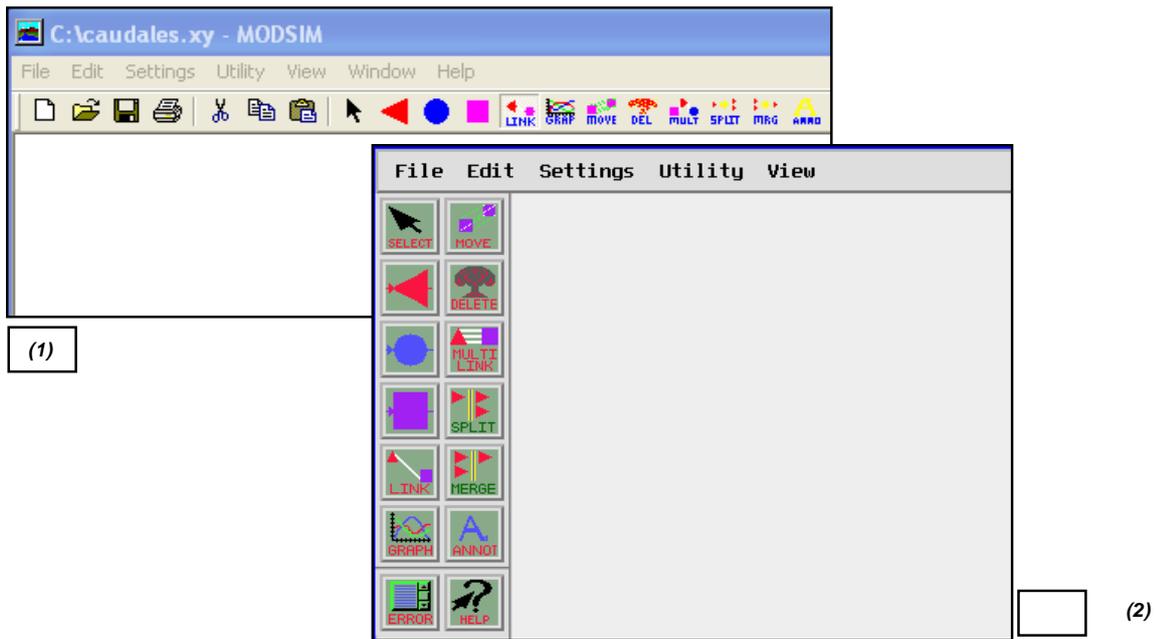


Fig. 2.- Pantalla de inicio del modelo MODSIM en su versión para WINDOWS (1) y UNIX (2).



Fig. 3.- Interfaz del Sistema de Apoyo a la Decisión SIAM.

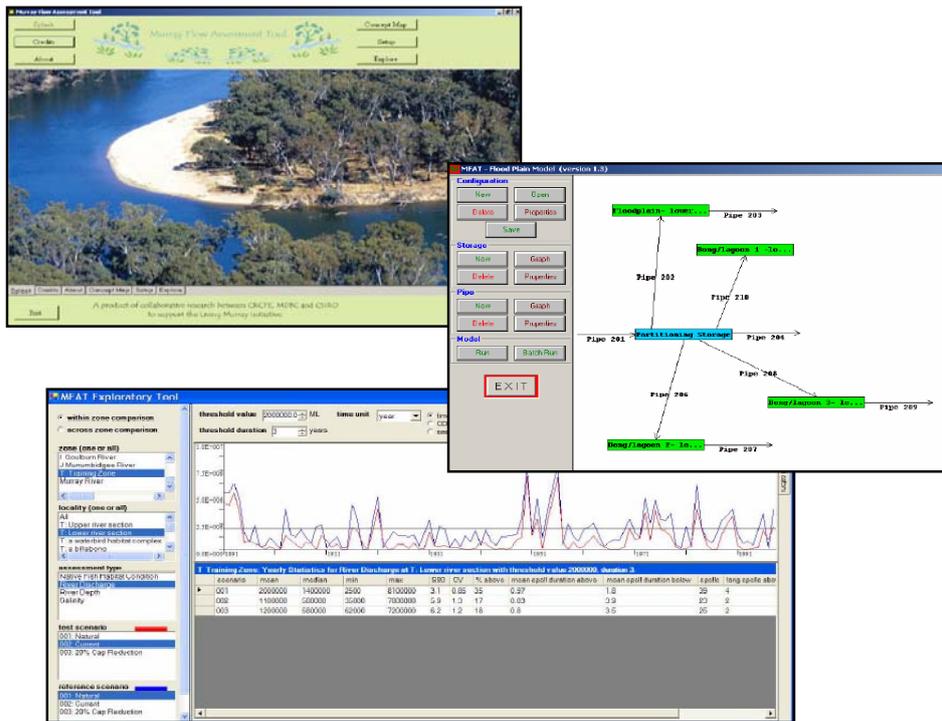


Fig.4.- Ejemplos de algunas capturas de pantalla de DSS MFAT.