

## Modelado y simulación basada en agentes con SIG para la gestión de agua en espacios metropolitanos\*

José Manuel Galán Ordax<sup>1</sup>, Adolfo López Paredes<sup>2</sup>, Ricardo del Olmo Martínez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Área de Organización de Empresas. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Burgos. Avenida de Cantabria, s/n. Ed.A.; 09006 Burgos. jmgalan@ubu.es

<sup>2</sup> Área de Organización y Gestión de Empresas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Valladolid. Paseo del Cauce, s/n. 47011 Valladolid. adlo@eis.uva.es

<sup>3</sup> Área de Organización de Empresas. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Burgos. Edificio "La Milanera" C/ Villadiego s/n.; 09001 Burgos. rdololmo@ubu.es

### Resumen

*El presente trabajo describe la arquitectura y las principales características de un modelo basado en agentes acoplado con un sistema de información geográfico para la estimación del consumo de agua doméstica en la región metropolitana de Valladolid. El modelo es una adaptación inicial del modelo FIRMABAR basado en agentes y autómatas celulares. En el trabajo se repasan las principales técnicas de estimación de agua doméstica existentes y se argumentan las razones para complementarlas con la metodología basada en agentes acoplada con sistemas de información geográficos*

**Palabras clave:** Simulación, modelado basado en agentes, sistemas de información geográfica, gestión del agua

### 1. Introducción

El agua es uno de los recursos naturales más importantes utilizados por el hombre. Históricamente los procesos de planificación de la gestión de agua partían de la proyección de la población a la que se necesitaban satisfacer, estimando un uso *per cápita* de agua, y simplemente multiplicando una proyección por la otra para obtener una estimación del agua futura. A partir de esa estimación el objetivo de los gestores consistía en identificar aquellas fuentes de oferta disponible en la región para añadirlas apropiadamente a la oferta ya existente.

Hoy en día y sobre todo a partir del surgimiento de restricciones ecológicas, financieras y políticas en las décadas de los 80 y 90, se considera que esta metodología sufre de

---

\* Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en los proyectos de investigación financiados por el Ministerio de Educación y Ciencia con referencias DPI2004-06590 y DPI2005-05676, titulados "Integración empresarial y gestión de la cadena de suministro basada en sistemas multiagente" y "Simulador basado en agentes para la gestión del agua en espacios metropolitanos"

unas importantes carencias. Existe una importante corriente de pensamiento tanto en España (Aguilera Klink *et al.*, 2004; Arrojo Agudo, 2003), como el resto del mundo (Beard, 1995), que considera que el problema de la gestión de agua no es simplemente un problema de inadecuación de la oferta. En la actualidad existe todo el amplio abanico de factores que juegan un influyente e importante papel en la planificación de la gestión de recursos de agua en general y específicamente de las aguas urbanas y de uso doméstico. Como consecuencia de ello surge la necesidad de técnicas y herramientas para captar y tener en cuenta todo ese abanico de factores.

Una de las herramientas que han surgido con el objetivo de incluir los fenómenos sociales y la dimensión humana en los modelos de forma realista es el modelado basado en agentes (Downing *et al.*, 2001).

La mayoría de los modelos con agentes aplicados hasta la fecha en la gestión de recursos están estructurados con dos elementos, los agentes que representan las entidades del sistema a modelar y un autómata celular simple como representación espacial del entorno. La utilización de un autómata, en general, ha limitado las posibilidades de representación de los modelos a una superficie reticular. Esto supone un proceso de abstracción que en determinadas ocasiones puede ser considerado excesivamente restrictivo. Puesto que uno de los objetivos de este tipo de modelado es buscar representaciones más realistas, en la actualidad están surgiendo iniciativas para integrar este tipo de modelos con sistemas de información geográfica (SIG).

El presente trabajo está organizado como sigue: en la sección 2 se hace una breve introducción a la metodología de simulación basada en agentes y se enumera las razones que la hacen interesante para su uso en el contexto del agua. En el apartado 3 se plantean brevemente las técnicas clásicas de estimación de la demanda disponibles. En el apartado 4 se introduce brevemente las características de los SIG y su utilización con los sistemas de modelado basado en agentes. En la sección 5 se presenta la arquitectura y principales características del prototipo realizado en la Región Metropolitana de Valladolid con VisualGIS y la última sección se resumen las conclusiones del trabajo.

## **2. Modelado basado en agentes**

Las aproximaciones basadas en agentes están siendo fuente de multitud de tecnologías en un amplio rango de áreas de investigación, tanto teóricas como aplicadas. Entre ellas podemos encontrar la ingeniería del software orientada a agentes, arquitecturas de agentes, agentes móviles, instituciones electrónicas o mecanismos de coordinación (Luck *et al.*, 2003).

Simultáneamente al desarrollo de este trabajo, principalmente orientado hacia objetivos industriales y comerciales, está cobrando importancia un cuerpo científico caracterizado por la utilización de las tecnologías de agentes para el modelado y la simulación de sistemas, el modelado basado en agentes.

En los últimos años, esta técnica de modelado ha pasado de ser una aproximación heterodoxa a convertirse en una herramienta de investigación ampliamente reconocida en toda una diversidad de disciplinas científicas como son la Economía (Hernández, 2004), La Política (Johnson, 1999), Antropología (Kohler *et al.*, 2005), Sociología (Gilbert y Troitzsch, 1999), Biología (Walker *et al.*, 2004), Gestión de Recursos o la Ecología (Hare y Deadman, 2004).

Existen varias razones que justifican el uso de esta metodología, la capacidad para captar la heterogeneidad del sistema, la autonomía, la posibilidad de representar de forma explícita el espacio y las interacciones locales, la capacidad para implementar modelos de racionalidad limitada frente a modelos maximizadores, hacer ciencia integrada e interdisciplinaria, incluir procesos de participación en las etapas de modelado y validación, etc. (Galán *et al.*, 2005; Gilbert y Troitzsch, 1999).

Básicamente todas estas ventajas metodológicas giran sobre a una idea común: puesto que la esencia del modelado basado en agentes es el establecimiento de una correspondencia directa entre las entidades (e interacciones) de un sistema y los agentes (y sus interacciones), este tipo de modelado permite una representación computacional más realista e intuitiva de un fenómeno que la mayoría de las técnicas tradicionales de modelado.

### **3. Estimación de la demanda de agua**

Los métodos clásicos de estimación de la demanda de agua comienzan por las técnicas de aproximación *per cápita* y otros coeficientes de uso por unidad, base de las metodologías de proyección, ampliamente utilizadas históricamente y en la actualidad. La mayoría de los sistemas urbanos de agua realizan sus predicciones basadas en extrapolaciones de demanda *per cápita* (Billings y Jones, 1996), normalmente con un refinamiento de ajuste de tendencia. La principal ventaja de esta aproximación es su simplicidad.

Otro interesante conjunto de técnicas son los modelos de uso final. La principal característica de estos modelos se fundamenta en la consideración del agua no como un bien final si no como un medio de proporcionar servicios a los consumidores. Su desarrollo implica la utilización de extensas bases de datos desagregados por servicios de consumo, muy infrecuentes, por lo que pese a su interés su uso todavía no está completamente generalizado.

Otra familia de modelos muy utilizados históricamente son los modelos de extrapolación. Los modelos de extrapolación basados en técnicas de alisamiento hoy en día tienen una importancia residual frente a los modelos ARIMA, más utilizados. El nexo de unión de todos ellos es la consideración de la variable temporal como la variable explicativa representativa del sistema.

La cuarta familia de metodologías de estimación de la demanda la comprenden los modelos causales o estructurales, fundamentalmente los modelos de regresión multivariante. Esta metodología es la más extendida dentro del mundo científico, aunque no está exenta de problemas. Fundamentalmente los problemas son heredados de las complejas tarifas por bloques y con parte fija y variable que los suministradores de agua utilizan para hacer frente a dominios multiobjetivo como es el agua (Martinez-Espiñeira, 2003).

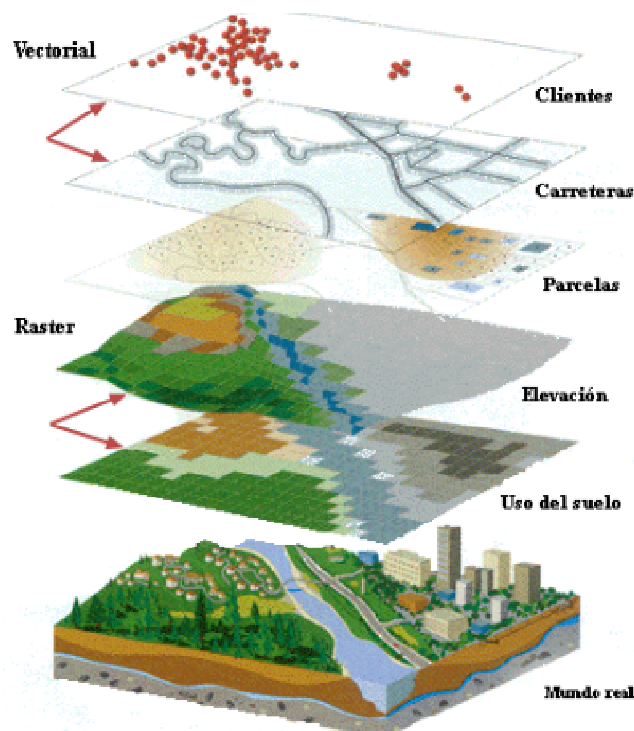
Además de todas estas metodologías clásicas, existen otras más específicas que también se utilizan en la actualidad. Dentro de ellas resalta el uso muy intensivo que se está haciendo de las redes neuronales artificiales para la predicción de la demanda de agua a corto plazo. También se comentan los métodos Delphi como la principal técnica de

predicción basada en la opinión de expertos, muy útiles en contextos con pocos datos históricos o en los que se prevén cambios estructurales poco conocidos en el sistema.

#### 4. Modelado basado en agentes y SIG

Las definiciones de SIG varían con cada libro, pero una de las definiciones más formales (Star y Estes, 1990) lo describe como un sistema de información diseñado para trabajar con datos referenciados por coordenadas espaciales o geográficas. Un SIG se puede conceptualizar como una base de datos computacional consistente en datos ligados a su localización geográfica. Una base de datos de este tipo típicamente está formada a su vez por dos tipos de información. Por un lado están los datos sobre la localización espacial, datos espaciales de los objetos incluidos en la base de datos de estudio, lo que se conoce como la base de datos geográfica. Por otro, el SIG contiene datos sobre la información temática o los atributos de los objetos geográficos incluidos, la base de datos alfanumérica (Clarke, 1999).

En un SIG, los datos que forman la base de datos espacial se representan mediante capas, cada una sobre una temática similar, que representan un determinado aspecto geográfico del entorno bajo estudio (Ver Fig.1). Cada una de estas capas puede contener datos de atributos formando las bases de datos alfanuméricas. Estos datos contienen descripciones sobre cada entidad representada en la capa y suelen ser almacenadas de forma tabular de tal manera que mantengan vínculos con los objetos gráficos.



**Figura 1.** Estructura de capas y estructuras de información de un sistema de información geográfico<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Imagen retocada a partir de original en <http://cier.uchicago.edu/gis/gis.htm> [Fecha de acceso: 28 de abril de 2006]

La información de las capas básicamente se puede almacenar utilizando dos formatos<sup>2</sup>, el formato raster y las estructuras de datos vectoriales.

Las ventajas que presenta la representación vectorial frente a la representación raster se deben principalmente a la representación matemática más precisa y más compacta de elementos discretos, como por ejemplo la representación de las relaciones topológicas de forma adecuada. Además permite asociar de forma sencilla atributos a elementos gráficos, proceso mucho más complejo en la representación raster.

La representación raster sin embargo tiene también mucha importancia puesto que, pese a la pérdida de resolución, permite representar fenómenos con variación continua en el espacio y por tanto mecánicas y algoritmos mucho más sencillos en problemas de modelado y simulación. De hecho la mayoría de los pocos modelos basados en agentes que incorporan sistemas de información geográficos en los modelos, utilizan este sistema por la relativa sencillez de integración que pueden tener con grids y estructuras matriciales para convertir los modelos a basados en autómatas celulares<sup>3</sup> (CA)

La fase de integración entre sistemas basados en agentes y SIG se puede intentar acometer desde dos perspectivas extremas, desde aproximaciones centradas en SIG o bien desde aproximaciones centradas en el modelado (Maguire, 2005).

Las aproximaciones centradas en los SIG actuales ofrecen importantes ventajas para las tareas de modelado como son la gestión de datos masivos, herramientas para la integración y transformación de datos, perfecta integración con el propio SIG para la visualización y múltiples herramientas de análisis espacial. Sin embargo hoy en día carecen de la flexibilidad y expresividad de las herramientas basadas en el modelado.

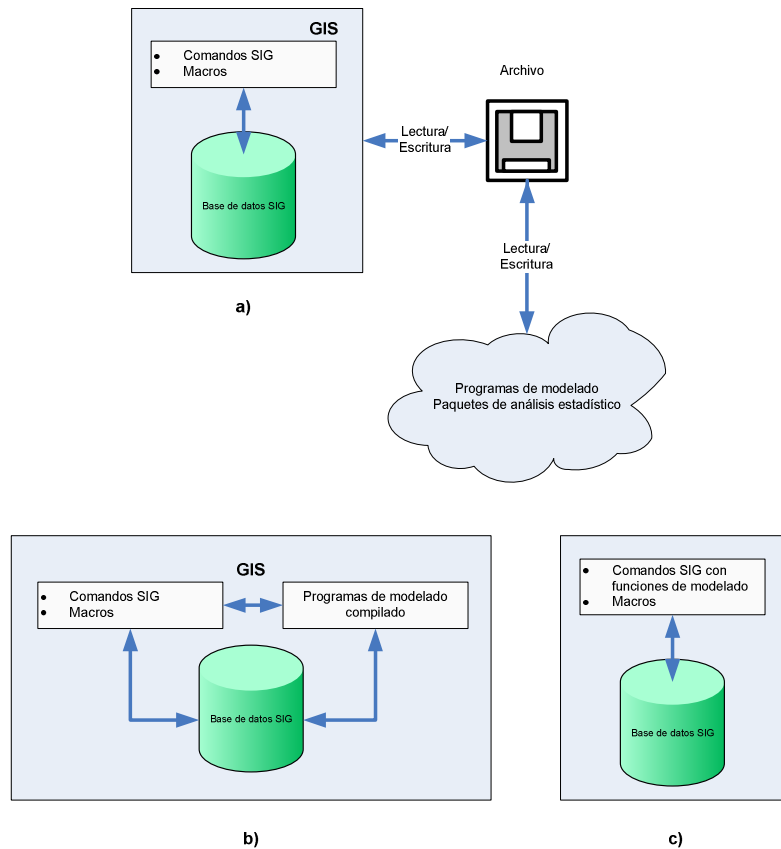
Los sistemas centrados en el modelado, sobretodo en el modelado basado en agentes, como Swarm, Mason o RePast ofrecen también importantes ventajas, son abiertos, de dominio público, muy flexibles para el modelador pero como hemos comentado limitados en el tratamiento de información geográfica.

Existe una situación intermedia que ocurre cuando nos enfrentamos a situaciones en las que los sistemas de modelado y SIG ya están creados y resulta muy costosa la reconstrucción integrada de uno sobre otro, en esos casos los sistemas pueden ser acoplados. En este sentido Westervelt (2002) compara diferentes aproximaciones de integración SIG-modelo en términos de fuerza (Ver Fig. 2).

---

<sup>2</sup> También existen los formatos TIN, triangulated irregular network y Quad-Tree structures, pero son mucho menos conocidos (Clarke, 1999)

<sup>3</sup> Mientras que con los software específicos de ABM no resulta complicado generar modelos acoplados con CA, la integración no es directa cuando los datos provienen de un SIG. La razón de este hecho se puede buscar en que tanto los agentes como las celdas de un autómata pueden ser implementados con la misma filosofía basada en el individuo. Esto no ocurre cuando tratamos con un SIG en el que las unidades de información no son propiamente las celdas sino las capas (Box, 2002). Aunque si las capas son raster, identificando celda del SIG con celda del CA la dificultad decrece frente a representaciones vectoriales.



**Figura 2.** Integración de modelos con SIG. a) Integración débil, b) integración moderada, c) integración fuerte. Basado en Yeh (2005)

La integración fuerte se caracteriza por las operaciones simultáneas de múltiples modelos que permiten la comunicación intermodelo durante la ejecución. Normalmente se hace mediante las llamadas a funciones y a interfaces de objetos entre los sistemas. La integración media se caracteriza por la utilización de técnicas como las llamadas a procedimientos remotos o el acceso compartido a bases de datos. La integración débil emplea estructuras de archivos comunes o traductores de archivos. La siguiente tabla muestra las diferencias entre los diferentes tipos de integración:

**Tabla 1.** Comparación de aproximaciones de integración entre SIG y sistemas de modelado. Fuente: (Maguire, 2005; Westervelt, 2002)

	Débil	Media	Fuerte
<b>Tiempo de integración</b>	Rápida	Media	Lenta
<b>Experiencia del programador</b>	Baja	Alta	Media
<b>Velocidad de ejecución</b>	Lenta	Media	Rápida
<b>Capacidad de ejecución simultánea</b>	Baja	Baja	Alta
<b>Depuración</b>	Fácil	Moderada	Difícil

## 5. Prototipo de la Región Metropolitana de Valladolid

El modelo creado para la Región Metropolitana de Valladolid (RMV) está basado en el modelo sobre autómatas celulares creado para la zona Metropolitana de Barcelona (López-Paredes *et al.*, 2005). La adaptación inicial del modelo se realizó mediante la

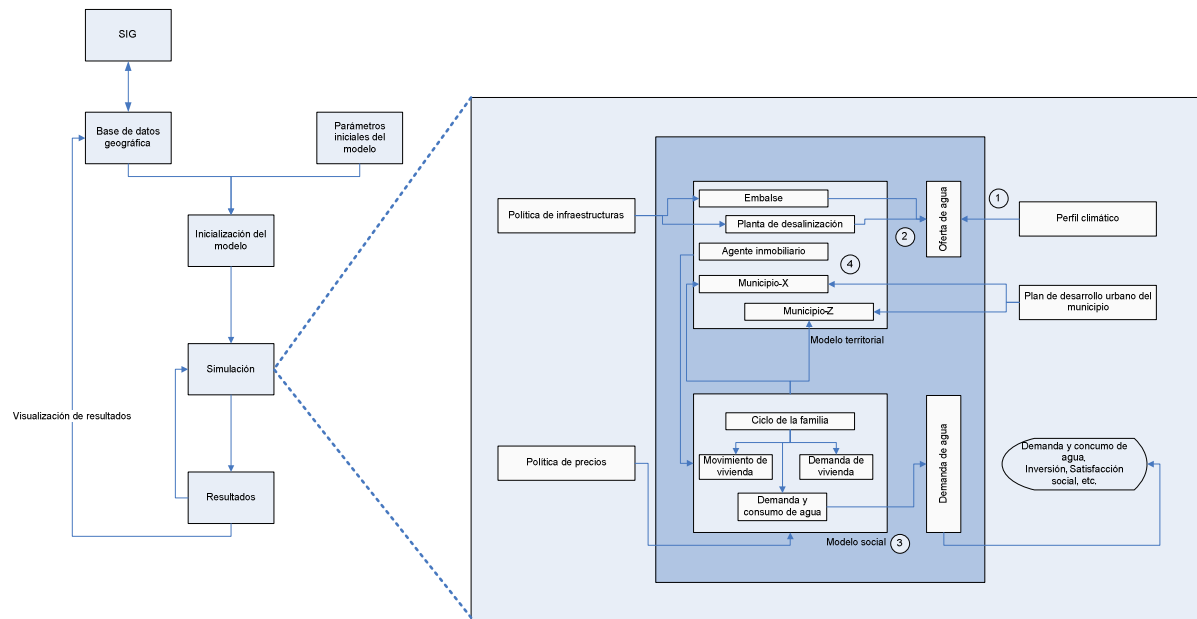
modificación de los parámetros demográficos del modelo para ajustarlos a la nueva zona.

Al igual que su modelo predecesor, la estructura principal está formada por dos submodelos acoplados que intercambian información, el modelo territorial y el modelo social (Ver Fig. 3). En este caso se ha mantenido la misma estructura de decisión del modelo territorial, pero reduciendo el nivel de abstracción del modelo original. Aunque se está planificando el desarrollo de un modelo más avanzado sobre entidades vectoriales, en el desarrollo del prototipo la decisión todavía se basa en el concepto de celda, a pesar de que en este caso la abstracción de la superficie reticular espacial se realiza mediante un raster del SIG.

En el modelo, el uso del suelo y el clima determinan el entorno y afectan al comportamiento global del sistema, mientras que la dinámica poblacional modifica el uso del suelo y la demanda total de agua. El submodelo social, está compuesto por la vida del conjunto de familias en el *grid* que representa el territorio importado del SIG. Cada familia se localiza en una vecindad dentro de una unidad de las unidades territoriales representativas. Las familias se comportan e interactúan con el resto de los agentes en el sistema tomando principalmente dos tipos de decisiones respecto al modelo, el movimiento de vivienda y el consumo de agua.

La decisión de movimiento de vivienda de cada familia depende de sus propias preferencias, principalmente el tamaño de la vivienda respecto al comenazar familiar, la clase social predominante en la vecindad y evolución de los precios de la vivienda y se trata de una adaptación del modelo de Benenson (1998) de dinámica urbana.

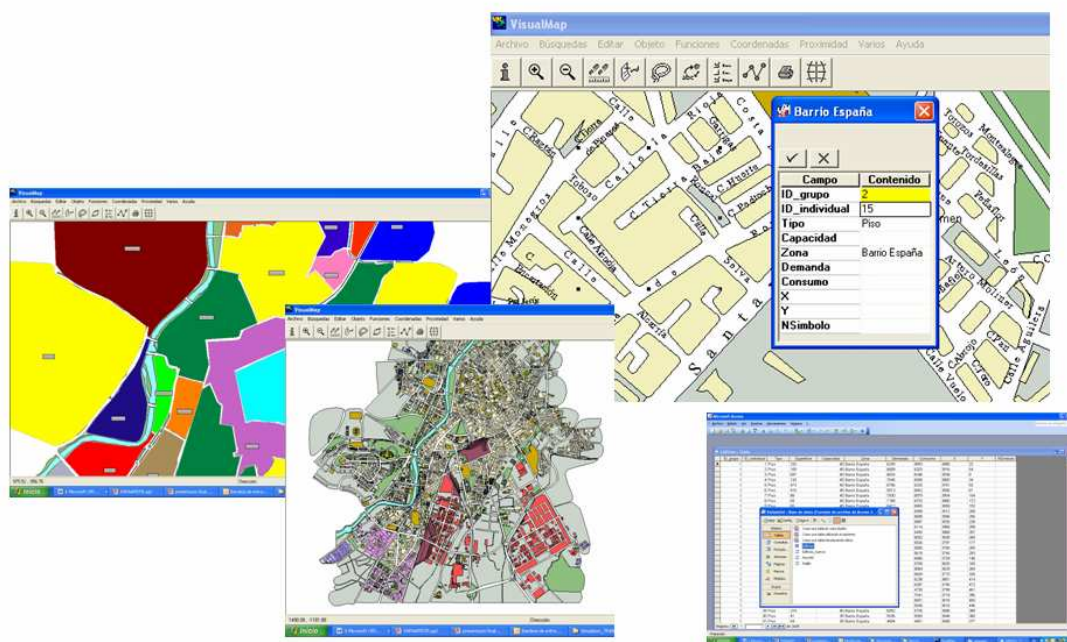
El algoritmo que define el comportamiento de consumo de agua de la familia depende esencialmente en los factores sociales con influencia, esencialmente del precio del agua y del nivel de ingresos, del agua máxima demanda y de la evolución de los embalses en la región. Además, se ve afectado por el tipo de vivienda y sus tecnologías disponibles, la actitud social cuando la región está en épocas de escasez, la clase social y el tamaño de la familia. Finalmente, el consumo de agua se adapta a los hábitos locales mediante un mecanismo de imitación respecto a la vecindad más próxima (López-Paredes *et al.*, 2005).



**Figura 3.** Estructura de ejecución de la simulación

El proceso de implementación se ha llevado en dos etapas, una etapa inicial de traducción de la implementación original apoyándose en las librerías de modelado en agentes Swarm a las librerías de RePast, y una segunda etapa orientada al proceso de integración de la nueva implementación con el SIG. En este modelo el SIG se utiliza como alimentador de datos en el proceso de inicialización de la ejecución y posteriormente como herramienta de visualización de los resultados. Este tipo de integración corresponde principalmente con el proceso de integración débil que se ha comentado en el apartado anterior, en el que las operaciones de intercambio se han realizado mediante una base de datos MS Access configurada como la base de datos alfanumérica del SIG (Fig. 4). Almacena los estados de la simulación y recibe los resultados para la visualización.





**Figura 4.** La representación del modelo y su inicialización se realizan mediante el SIG. La comunicación se lleva a cabo mediante una base de datos alfanumérica en MS Access ligada a la base de datos espacial.

## 6. Conclusiones

En este trabajo se ha mostrado un ejemplo aplicado que revela la importancia de un campo en expansión como es el modelado basado en agentes. Este tipo de aproximación en nuestra opinión constituye un complemento francamente valioso a las técnicas tradicionales de estimación de la demanda de agua, puesto que implica un proceso de modelado más realista e intuitivo al poder capturar parte de la heterogeneidad y complejidad del proceso. Las ventajas de la aproximación se hacen aun más evidentes cuando en la estructura de los modelos, su representación espacial se basa en sistemas de información geográficos.

Se ha presentado la estructura de un modelo, refinamiento de un modelo anterior que sustituye una abstracción basada en autómatas celulares por un SIG en VisualGIS integrado con las librerías. La integración de estos dos tipos de herramientas tiene un enorme potencial tanto para el estudio de los comportamientos como para la elaboración de escenarios y planificación de políticas, no sólo en el dominio del agua sino en el de otros muchos recursos.

## Referencias

- Aguilera Klink,F.; Arrojo Agudo,P.; Barreira López,A.; Carles Genovés,J. et al. (2004). *El agua en España. Propuestas de futuro*. Ediciones del oriente y del mediterráneo.
- Arrojo Agudo,P. (2003). *El Plan Hidrológico Nacional: una cita frustrada con la historia*. RBA Libros.
- Beard,D. (1995). Intervención ante la Comisión Internacional de Grandes Presas-Durban-Sudáfrica. *Tecnología del Agua*, Vol. 137, pp. 77-78.
- Benenson,I. (1998). Multi-Agent Simulations of Residential Dynamics in the City. *Computing, Environment and Urban Systems*, Vol. 22, No. 1, pp. 25-42.

- Billings,R.B.; Jones,C.V. (1996). *Forecasting Urban Water Demand*. American Water Works Association.
- Box ,P. (2002). Spatial Units as Agents. En *Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling Techniques for Simulating Social and Ecological Processes*. (ed. Gimblett,H.R.), pp. 59-82. Oxford University Press.
- Clarke,K.C. (1999). *Getting started with Geographic Information Systems*. Prentice Hall.
- Downing,T.E.; Moss,S.; Pahl-Wostl,C. (2001). Understanding climate policy using participatory agent-based social simulation. En *Multi-Agent-Based Simulation, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1979*. (ed. Moss,S. y Davidsson,P.), pp. 198-213. Springer-Verlag.
- Galán,J.M.; Santos,J.I.; Izquierdo,S.S.; del Olmo,R.; López-Paredes,A. (2005). Simulating complex adaptive social systems with agents: domestic water management. En *Proceedings of the IV International Workshop on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems*. pp. 79-86. Universidad de León.
- Gilbert,N.; Troitzsch,K.G. (1999). *Simulation for the social scientist*. Open University Press.
- Hare,M.; Deadman,P. (2004). Further towards a taxonomy of agent-based simulation models in environmental management. *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 64, No. 1, pp. 25-40.
- Hernández,C. (2004). Herbert A. Simon, 1916-2001, y el Futuro de la Ciencia Económica. *Revista Europea de Dirección y Economía de la Empresa*, Vol. 13, No. 2, pp. 7-23.
- Johnson,P.E. (1999). Simulation modeling in political science. *The American Behavioral Scientist*, Vol. 42, No. 10, pp. 1509-1530.
- Kohler,T.A.; Gumerman,G.J.; Reynolds,R.G. (2005). Simulating ancient societies. *Scientific American*, Vol. 293, No. 1, pp. 76-84.
- López-Paredes,A.; Saurí,D.; Galán,J.M. (2005). Urban water management with artificial societies of agents: The FIRMABAR simulator. *Simulation*, Vol. 81, No. 3, pp. 189-199.
- Luck,M.; McBurney,P.; Preist,C. (2003). *Agent Technology: Enabling Next Generation Computing. A Roadmap for Agent-Based Computing*. AgentLink.
- Maguire,D.J. (2005). Towards a GIS Platform for Spatial Analysis and Modeling. En *GIS, Spatial Analysis, and Modeling*. (ed. Maguire,D.J., Batty,M., y Goodchild,M.F.), pp. 19-39. ESRI Press.
- Martinez-Espiñeira,R. (2003). Price specification issues under block tariffs: A Spanish case study. *Water Policy*, Vol. 5, No. 3, pp. 237-256.
- Star,J.; Estes,J.E. (1990). *Geographic Information Systems: An Introduction*. Prentice Hall.
- Walker,D.C.; Hill,G.; Smallwood,R.H.; Southgate,J. (2004). Agent-based computational modelling of wounded epithelial cell monolayers. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, Vol. 3, pp. 153-163.
- Westervelt,J.D. (2002). Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling. En *Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling Techniques for Simulating Social and Ecological Processes*. (ed. Gimblett,H.R.), pp. 83-103. Oxford University Press.
- Yeh,A.G.O. (2005). The Integration of Case-Based Reasoning and GIS in a Planning Support System. En *GIS, Spatial Analysis, and Modeling*. (ed. Maguire,D.J., Batty,M., y Goodchild,M.F.), pp. 289-314. ESRI Press.