

## Gestión del agua doméstica en la Región Metropolitana de Barcelona: Una aproximación participativa, basada en agentes.

Adolfo López Paredes<sup>1</sup>, José Manuel Galán Ordax<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Dr. Ingeniero Industrial, ETSII Valladolid, C/ Paseo del Cauce s/n – 47011 - Valladolid, [adlo@eis.uva.es](mailto:adlo@eis.uva.es)

<sup>2</sup> Ingeniero Industrial, ETSII Valladolid, C/ Paseo del Cauce s/n – 47011 - Valladolid, [josema@eis.uva.es](mailto:josema@eis.uva.es)

### RESUMEN

*En este artículo demostramos mediante un caso real cómo la simulación basada en agentes es una metodología adecuada para mejorar la gestión de sistemas complejos, especialmente aquellos caracterizados por la multiplicidad y heterogeneidad de interrelaciones entre los agentes del sistema. Ilustraremos cómo se construyen estos modelos aplicados a sistemas que integran aspectos físicos, hidrológicos, sociales y económicos, en concreto, reproduciendo y ensayando políticas de gestión de la oferta y de la demanda de agua potable en una región geográfica concreta, la Región Metropolitana de Barcelona. Se explican finalmente cómo afectan la influencia del cambio territorial y el factor climático a los resultados del estudio de diferentes escenarios característicos.*

**Palabras clave:** *Sistemas Multiagente, gestión de agua, procesos de participación.*

### 1. Introducción.

La gestión del agua potable supone la capacidad de comprender las diferentes dimensiones que componen el propio proceso. Para entender el sistema se debe integrar los aspectos físicos, hidrológicos y tecnológicos de la gestión, pero también los aspectos económicos y sociales. Estos aspectos resultan en ocasiones extremadamente difíciles de modelar y comprender, debido a la diversidad de motivaciones y objetivos que tienen cada uno de los individuos e instituciones que participan en el sistema.

Para captar esta dimensión social y económica e integrarla con los otros aspectos de la gestión se ha buscado a través del proyecto FIRMA\* involucrar a todos los participantes (*stakeholders*) que intervienen en el proceso para que aporten su conocimiento al desarrollo de los modelos.

La metodología utilizada para abordar la complejidad derivada de esta multi-integración es el desarrollo de un modelo basado en agentes del consumo de agua potable de la región metropolitana de Barcelona. Los modelos basados en agentes son útiles para comprender el comportamiento de sistemas complejos [1]. La simulación sustituye a las robustas técnicas estadísticas o las computacionales más sofisticadas, dado que en estos sistemas no existe información 'a priori' suficiente.

---

\* FIRMA es el acrónimo de Freshwater Integrated Resource Management with Agents. Corresponde al proyecto número de referencia EVK1-00016 financiado por la CEE

Los modelos basados en agentes tienen sus fundamentos científicos en la inteligencia artificial distribuida. Esta técnica difiere de otras computacionales, como las redes neuronales, o los modelos de series temporales, en que su finalidad no es obtener previsiones con mayor o menor exactitud, para una o varias variables a partir de datos históricos, sino llegar al entendimiento del sistema por medio de la “Ingeniería Inversa”.

En este artículo hacemos una breve introducción al modelado multiagente, metodología utilizada, describimos las características principales implementadas en un modelo de gestión de agua de la Región Metropolitana de Barcelona y comentamos los principales resultados obtenidos.

## **2. Modelado Multiagente.**

Construir modelos es una tarea fundamental para alcanzar la comprensión de los subsistemas que componen la naturaleza. En las ciencias denominadas naturales esta tarea está bastante desarrollada, y los prototipos y bancos de pruebas construidos por los ingenieros son un claro exponente de ello. No sucede lo mismo con las ciencias sociales, pues hasta el desarrollo de las técnicas de inteligencia artificial no existían técnicas que permitieran modelar el comportamiento de sistemas complejos.

Los sistemas multiagente permiten construir modelos de sistemas complejos desde el nivel microscópico. Caracterizando los agentes y las interacciones que tienen lugar entre ellos, emerge el comportamiento global del sistema. Así se construyen modelos endógenos en los que se cierra el bucle de doble influencia: agentes  $\Rightarrow$  sistema y sistema  $\Rightarrow$  agentes [2].

Un sistema multiagente puede definirse como un conjunto de agentes heterogéneos, autónomos, con sus propias metas y objetivos, interaccionando entre sí y con el entorno en base a las capacidades de que disponen [3]. Los modelos basados en agentes se construyen caracterizando el sistema de estudio como un sistema multiagente. El objetivo de estos modelos es reproducir el comportamiento del sistema real objeto de estudio a partir de las decisiones y acciones de los agentes que lo componen. De esta forma se dispone de un laboratorio para ensayar políticas que supongan cambios, bien estructurales, bien coyunturales constituyendo el desarrollo de la tercera vía en la investigación científica: el método generativo [4,5].

La construcción de un modelo basado en agentes es una actividad modular que podría resultar siempre inacabada, pues se pueden introducir nuevos agentes o mejorar o cambiar las capacidades de los existentes, para analizar los cambios resultantes en el sistema.

Para construir un modelo basado en agentes, es necesario comenzar por caracterizar los agentes que participan, seleccionando para ellos los fundamentos teóricos, una arquitectura consistente y un lenguaje de programación.

### **3. Modelo.**

#### **3.1 Descripción del modelo.**

El modelo desarrollado corresponde a la región metropolitana de Barcelona. La información de campo es proporcionada por la Universitat Autònoma de Barcelona y a partir de procesos de participación con los *stakeholders* relevantes en el entorno del problema y es empleada para generar el sistema objeto de estudio desde una aproximación *bottom-up* (de abajo-arriba).

En el modelo intervienen como agentes los siguientes: ciudadanos, municipios, un promotor, el clima, las infraestructuras, las asociaciones de vecinos y consumidores, y la Administración Regional. Cada uno de ellos presenta una arquitectura distinta, en función del papel que desempeña en el sistema, generando una herramienta de simulación donde estén representados todos los agentes que participan en el proceso de gestión de la demanda y la oferta de agua en la región metropolitana de Barcelona.

#### **3.2 Propósito.**

Para cumplir con los objetivos de integración y de mejora de la dirección de recursos de agua potable se ha diseñado un modelo compuesto por diferentes módulos. Dentro de estos módulos encontramos los consumidores, municipios, instituciones, las compañías... La estructura modular tiene la ventaja de permitir desarrollar los distintos submodelos que componen el sistema (sociales, climáticos, económicos...) de forma autónoma y presentando diferentes niveles de desagregación. Cada uno de ellos es un modelo formado por agentes e integrado en una entidad de rango superior que facilita las interacciones mutuas de los participantes del sistema objeto de estudio.

El modelo permite estudiar los efectos de diferentes políticas y estrategias de gestión de agua en la Región Metropolitana de Barcelona. Estas políticas pueden orientarse hacia políticas de oferta y/o de demanda y bajo diferentes condiciones ambientales.

#### **3.3 Dominio.**

El dominio del modelo en principio está restringido al área objeto de estudio: La Región Metropolitana de Barcelona puesto que los parámetros del modelo han sido ajustados a la idiosincrasia propia de la región.

#### **3.3 Estructura.**

El desarrollo modular del modelo se ha llevado a cabo mediante submodelos que interaccionan entre sí y con el usuario si el experimento lo precisa.

La estructura que subyace al modelo es la siguiente:

**Social Module:** Este módulo es el responsable de la gestión y el control de un tipo de agentes (las familias) a lo largo de todo su desarrollo social. En este modelo las familias manifiestan su comportamiento social mediante los procesos de nacimiento, crecimiento, emancipación y muerte. Se implementan las reglas de comportamiento de los agentes, sus preferencias y sistemas de evolución.

**Migratory Module y Territorial Module:** El modelo migratorio presentado en este modelo está basado en los trabajos en autómatas celulares<sup>†</sup> y Sistemas Multiagentes de representación de dinámicas urbanas en *grids* de Benenson [6] y en los trabajos de Schelling [7].

Se trata de una versión adaptada al consumo de agua del modelo de Benenson, de transmisión de cultura fundamentada en el concepto vecindad. En el modelo los agentes se comportan de acuerdo a la información que reciben en tres niveles de organización urbana.

- Nivel individual. Sus propias creencias, preferencias, reglas de actuación, factores de recuerdo, cognitivos...
- Nivel local. Referido a las características del vecindario y los estados de los agentes vecinos (manifestado como efectos imitativos)
- Nivel Global. Se refiere al estado de la región entera. Problemas de situaciones de emergencia globales, sequía...

En términos de simulación urbana, los autómatas celulares están mejor indicados para representar la dispersión entre las unidades espaciales de la infraestructura urbana como las viviendas o las parcelas de tierra. Los Sistemas Multiagente se utilizan en este contexto para simular la población urbana como colectivos de individuos asociados a las viviendas temporalmente, presentando las características de movilidad espacial, la comunicación y el conjunto de comportamientos que implementemos.

**Climate Module:** Es el encargado de recoger los datos de precipitaciones y temperaturas mensuales introducidos de forma exógena al sistema y de proporcionárselos al resto de los elementos del sistema cuando estos los precisen.

**Water Demand Module:** Es el módulo responsable de recoger los deseos de demanda de cada familia y de hallar los consumos reales de cada uno de los agentes consumidores de agua en el modelo para construir la demanda agregada de agua potable.

**Supply Module:** Este módulo colecta la información que le proporciona el módulo climático y el módulo de infraestructuras para construir la oferta de agua de la región.

**Government/Stakeholder Module:** Este módulo sostendrá el resto de agentes o instituciones que toman parte o tienen influencia en el proceso del agua. Aquí nos encontraremos agentes del tipo Municipios, Generalitat, compañías suministradoras de agua... Estos agentes son modelados mediante la estrategia de precios, la política de infraestructuras utilizada o la declaración de situaciones de emergencia.

---

<sup>†</sup> Para una revisión de los trabajos sobre dinámicas urbanas y autómatas celulares consultar [8]

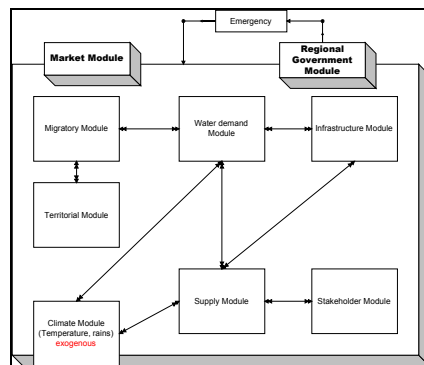


Figura 1: Diagrama general del modelo.

#### 4. Análisis de tres escenarios. Resultados.

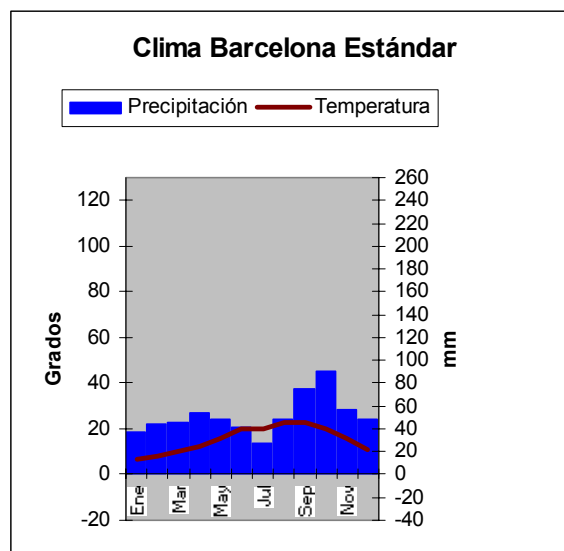


Figura 2: Climograma de Barcelona.

Vamos a evaluar tres escenarios característicos bajo tres perfiles climáticos diferentes:

- Perfil 1. Duración 10 años. Perfil climático con bajas desviaciones sobre el climograma estándar de Barcelona.
- Perfil 2. Duración 10 años. Perfil climático donde se somete la región a cinco años de sequía y estrés climático y a cinco años de recuperación.
- Perfil 2. Duración 10 años. Perfil climático donde se somete la región a cinco años con alto nivel de precipitaciones y a cinco años de sequía y estrés climático.

##### 4.1 Escenario A.

Escenario de máxima probabilidad. El modelo sugiere un cambio en el modelo territorial donde la población se traslada de la ciudad compacta de alta densidad hacia la periferia, a la

ciudad difusa de baja densidad (Figura 3). Este hecho unido a los cambios de hábitos en las viviendas provoca un aumento en el consumo de agua mayor, en términos relativos, que el aumento de la población. Además se introducen mejoras tecnológicas que conllevan un descenso del 25% de las pérdidas de agua en la red y del 5% en el consumo doméstico.

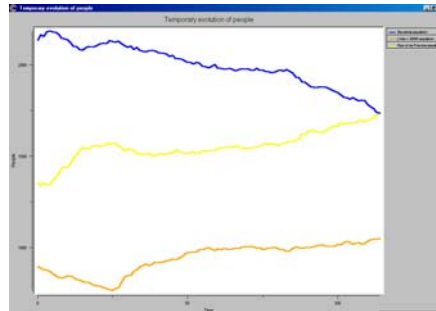


Figura 3: Gráfico de evolución temporal de la población por unidades territoriales

En esta situación, la oferta de agua disponible no es suficiente para la población de la región, a pesar de la introducción de medidas de eficiencia en la distribución y en el consumo doméstico y aunque no existe un incremento apreciable en la población total.

La evolución de la demanda y el consumo del agua son crecientes tanto en las grandes ciudades del extrarradio como en los pequeños municipios de lo que hemos denominado “RMB” (resto de la región metropolitana). Solo en Barcelona la disminución de la población posibilita que se mantenga el nivel del consumo (Figura 4).

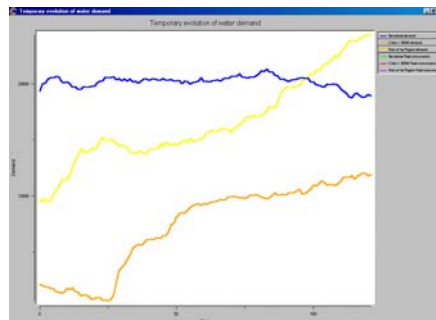


Figura 4: Gráfico de evolución temporal de demanda de agua potable por unidades territoriales

En el periodo de tiempo de la simulación, diez años, no se llega a alcanzar el nivel de emergencia, aunque la tendencia es alarmante. Esto es una medida del tiempo disponible, en condiciones normales, para proyectar y poner en marcha un plan de medidas que eviten situaciones de emergencia sin causar alarma social (Figura 5).

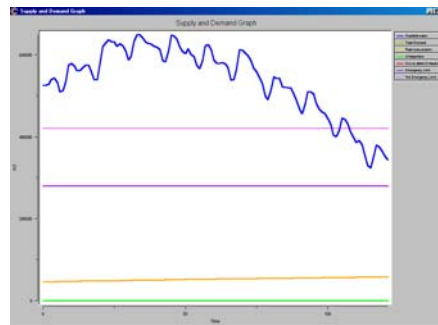


Figura 5: Gráfico de la evolución temporal de oferta y demanda de agua en la Región Metropolitana en el escenario A en el perfil climático 1.

En el perfil 2, se introduce un climograma en el que los primeros cinco años son de sequía y los cinco siguientes muestran unas precipitaciones por encima de lo normal. En las simulaciones se observa respecto al caso anterior que la oferta de agua disponible se reduce rápidamente amenazando situaciones de emergencia al concluir el quinto año (Figura 6). No obstante, el incremento de las precipitaciones durante los últimos cinco años de la simulación podría inducir a considerar innecesarias medidas y planes para asegurar el consumo de agua. Esto sería equivalente a suponer que la sucesión de ciclos de sequía y de precipitaciones abundantes característicos del clima mediterráneo es suficiente para regular y mantener la oferta de agua en niveles suficientes.

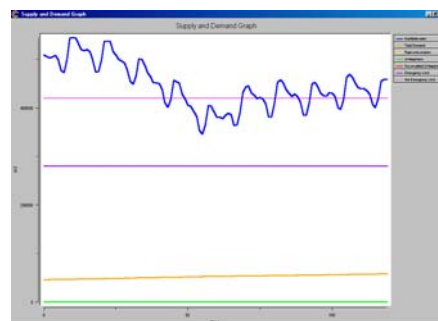


Figura 6: Gráfico de la evolución temporal de oferta y demanda de agua en la Región Metropolitana en el escenario A en el perfil climático 2.

Esta suposición es plenamente errónea. En el perfil climático tres, se permutan los valores de precipitaciones del anterior perfil climático: los últimos cinco años pasan a ser los cinco primeros y viceversa.

En las simulaciones realizadas observamos que se alcanzan máximos en la oferta del agua y durante los primeros años los embalses disponibles completan su capacidad (Figura 7). Sin embargo, los valores de las precipitaciones de los cinco años de sequía que en el anterior perfil no conducían a situaciones de emergencia, en este nuevo escenario y con el nivel alcanzado de cambio del modelo territorial, al final del tercer año de sequía continuada aparece una situación de emergencia y restricciones en el consumo de agua.



Figura 7: Gráfico de la evolución temporal de oferta y demanda de agua en la Región Metropolitana en el escenario A en el perfil climático 3.

#### 4.2 Escenario B.

Escenario conservador. Se observa un cambio en el modelo territorial donde la población se traslada de la ciudad compacta de alta densidad hacia la periferia hacia la ciudad difusa de baja densidad. Este hecho unido a los cambios de hábitos que la vivienda conlleva provoca un aumento en el consumo de agua mayor en términos relativos que el aumento de la población.

Para ilustrar la importancia de las medidas de eficiencia consideradas en el escenario A, en este escenario se prescinde de ellas. Sin las medidas de ahorro en el consumo doméstico y en las redes de distribución, aparecen situaciones de emergencia en los tres perfiles climáticos ya descritos en el escenario A.

Así pues, este escenario pone de manifiesto que las medidas anteriormente señaladas son necesarias para mantener un nivel de satisfacción de la demanda de agua muy alto, independientemente de las condiciones climáticas. Más aún, si el usuario intenta durante la simulación incrementar las dotaciones de infraestructuras para paliar los efectos de las situaciones de emergencia, deberá realizar enormes inversiones en plantas desalinizadoras o nuevos embalses (dígase trasvases) para alcanzar los niveles de satisfacción logrados en el anterior escenario.

#### 4.2 Escenario C.

Escenario poco probable. Igual que en el escenario B, no se contemplan mejoras tecnológicas relevantes que afecten ni al consumo ni a la red. Además, se considera que se detiene la tendencia al cambio del modelo territorial, con lo que se reduce el consumo inducido por la proliferación de las viviendas adosadas y unifamiliares.

En las simulaciones se aprecia que no aparecen situaciones de emergencia. Concluimos que el ahorro que suponen las medidas de eficiencia en distribución y consumo doméstico, si bien son imprescindibles en caso de mantenerse la tendencia al nuevo modelo territorial con la ciudad difusa, podrían demorarse en el tiempo.

En este escenario, solamente un incremento sostenido de la población total recomendaría la puesta en marcha de aquellas medidas, previamente al incremento de las infraestructuras disponibles.



## **5. Conclusiones.**

La primera lectura que obtenemos del escenario A con la herramienta utilizada es la importancia del clima. Las medidas de eficiencia en el consumo doméstico y en la distribución parecen suficientes para garantizar en las múltiples simulaciones realizadas un nivel de satisfacción bastante alto en los ciudadanos en tanto a la cobertura de sus necesidades. No obstante, el último caso pone de manifiesto que ante el cambio del modelo territorial y el aumento de los consumos de agua asociados, sería necesario potenciar las infraestructuras de abastecimiento de agua. Las plantas desalinizadoras serían una alternativa adecuada para incrementar y garantizar un nivel de agua independiente de las precipitaciones.

Del análisis del escenario B se concluye que la necesidad de potenciar las infraestructuras de abastecimiento de agua ha de ir unida a las medidas de eficiencia doméstica para conseguir un nivel aceptable de satisfacción en la población de la región.

A partir del escenario C somos capaces de concluir que ante un inesperado cambio en las tendencias de preferencia urbana que mantenga la situación poblacional actual, no serían necesarias medidas inmediatas y drásticas para mantener los niveles de consumo (salvo en situaciones de estrés climático prolongado). Si bien, si tenemos en cuenta esas tendencias, como hemos hecho en los escenarios anteriores, se convierten en necesarias.

A nivel metodológico el presente artículo demuestra la necesidad y el reto de los ingenieros de organización de emplear nuevas metodologías basadas en la Inteligencia Artificial tanto para el estudio como para el diseño de sistemas complejos mediante un ejemplo aplicado.

Como ya se señalaba en anteriores encuentros [1], se convierte en absolutamente necesario desempeñar el rol de usuarios de las nuevas tecnologías a nuestro alcance, tanto para mejorar el nivel de la investigación aplicada como para lograr desarrollos tecnológicos y de gestión que supongan ventajas competitivas diferenciales para nuestras empresas.

## **Agradecimientos**

Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en el proyecto de investigación financiado por la CICYT con referencia BEC-2001-2108, titulado “La Investigación Socioeconómica desde la Inteligencia Artificial: Modelos Basados en Agentes (Contribuciones en memoria de Herbert Simon)” y en el proyecto FIRMA financiado por el V programa Marco de la Unión Europea con referencia EVK1-CT1999-00016.

## **Referencias**

- [1] López-Paredes A., Hernández C., Pajares J. Aguilera A., (Septiembre 2002) “Sistemas Multiagente en Ingeniería de Organización. Técnicas Computacionales de Simulación de Sistemas Complejos.” *Actas de la II Conferencia de Ingeniería de Organización*. Vigo (España).

- [2] López-Paredes A., (2001) “Análisis e Ingeniería de las Instituciones Económicas. Una metodología Basada en Agentes.” *Servicio de Publicaciones de la Universidad del País Vasco*. Bilbao (España).
- [3] Torsun, I.S., (1995) “Foundations of Intelligent Knowledge Based Systems”. *Academic Press Limited*. London.
- [4] López-Paredes, A., Hernández, C. y Pajares, J., (2001) “Towards a new experimental socioeconomics. Complex behavior in bargaining”. *Journal of Socioeconomics*, vol 30, nº 5.
- [5] Moss, S., (1999) “Relevance, Realism and Rigour: A Third Way for Social and Economic Research”. *Centre for Policy Modelling Technical Report 99-56*.
- [6] Benenson, I., (1998) “Multi-Agent Simulations of Residential Dynamics in the City”. *Computing, Environment and Urban System*, vol 22, nº 1. pp 25-42.
- [7] Schelling, T., (1978) “Micromotives and Macrobehavior”. *W.W. Norton & Company*
- [8] Aguilera A., (2002) “Ciudades como tableros de ajedrez. Introducción al modelado de dinámicas urbanas con autómatas celulares”. *Ediciones COLSAN*. San Luis de Potosí (México)