

SEMINARIO INTERNACIONAL
LA HIDROINFORMÁTICA EN LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS
CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA, OCTUBRE 1-3 DE 2003

**OPTIMIZACIÓN META-HEURÍSTICA DE UN MODELO HIDROLÓGICO DE SIMULACIÓN
CONTINUA USANDO EL ALGORITMO DE LA COLONIA DE HORMIGAS**

R. E. OLARTE¹, N. OBREGÓN² y F. FRAGALA³

¹ Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Javeriana. (Cra. 7 No. 40 -62, Bogotá, Colombia). E-mail: olartevaldiviesorafaal@yahoo.com

² Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D. Profesor Asociado. Miembro del Grupo de Investigación "Estructuras" y Director de los Grupos de Investigación "Hidrociencias" e "Informática y Métodos Matemáticos Aplicados" de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana (Cra. 7 No. 40 -62, Bogotá, Colombia). Profesor Catedrático Universidad Nacional de Colombia, (Ciudad Universitaria, Cra. 30, Cll. 45, Bogotá, Colombia). E-mail: nobregon@javeriana.edu.co

³ Geólogo, M.Sc. Profesor y miembro de los Grupos de Investigación "Hidrociencias" e "Informática y Métodos Matemáticos Aplicados" de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana (Cra. 7 No. 40 -62, Bogotá, Colombia). E-mail: fragala@javeriana.edu.co

Resumen: Los modelos hidrológicos son herramientas muy importantes para la gestión del agua superficial y se convierten en una importante técnica de apoyo para la toma de decisiones. Sin embargo para utilizar estos modelos es necesario especificar diferentes parámetros que en muchas oportunidades son muy difíciles de estimar. Una posible solución a esta situación consiste en la utilización de algoritmos de optimización matemática en donde las variables a optimizar corresponden a esos parámetros que definen el modelo. Una de las metodologías de optimización que ha aparecido en la escena hidroinformática corresponde al algoritmo de la colonia de hormigas. Este algoritmo pertenece al grupo de algoritmos de optimización meta-heurística que trata de imitar el comportamiento de las colonias de hormigas reales cuando buscan comida. Este algoritmo es aplicado a un modelo de balance hídrico para la sabana de Bogotá, modelo de Thomas o modelo *abcd*, el cual depende de 4 parámetros. Los resultados indican que la utilización de este tipo de algoritmos para la determinación de parámetros de modelos hidrológicos puede convertirse en una herramienta muy importante para las labores hidrológicas.

Palabras Clave: Modelos hidrológicos, gestión, toma de decisiones, hidroinformática, optimización matemática, colonia de hormigas.

INTRODUCCIÓN

Poder predecir los caudales que fluyen de una cuenca por su sistema de drenaje constituye una de las grandes herramientas con que cuenta el hombre para enfrentar problemas tales como abastecimiento de agua, control de inundaciones, dimensionamiento de estructuras hidráulicas, irrigación de cultivos, etc. Esta predicción de caudales se hace, a partir de la

medición directa de la precipitación y de la medición indirecta de la evapotranspiración que haya habido sobre la cuenca, a través de modelos lluvia-escorrentía. Los modelos hidrológicos constituyen así, una herramienta importante en la gestión del agua superficial y por lo tanto, en la hidroinformática.

Pues bien, ocurre que para lograr aplicar con éxito estos modelos, requieren ser calibrados. Es decir, se

deben determinar los parámetros (y las condiciones iniciales) reales de la cuenca. La calibración se realiza empleando alguna técnica de optimización matemática, las cuales según [Falkenauer 1998, p. 11-18], pueden ser de tres clases: los algoritmos precisos, los algoritmos heurísticos y los algoritmos meta-heurísticos. Estos últimos son metodologías que como los heurísticos, emplean reglas derivadas de la experiencia pero que contienen un área de aplicación mucho más extensa. Además, algunos de ellos tienen fuertes bases teóricas para explicar su efectividad. Entre ellos se encuentra la *búsqueda tabú*, el *templado simulado*, los *algoritmos evolutivos* y el más reciente, los *algoritmos de colonias de hormigas* (o *algoritmos ACO*, que quiere decir *ant-colony-optimization*).

El primer algoritmo ACO se empleó en 1991 [Dorigo and Di Caro, 1999, p. 9]. Trata de simular el comportamiento de las colonias de hormigas reales cuando buscan comida. Originalmente fueron propuestos para resolver problemas de optimización combinatoria y entre éstos, el *problema del vendedor viajero* [Dorigo and Di Caro, 1999, p. 8]. Hoy, existen muchas versiones de algoritmos ACO.

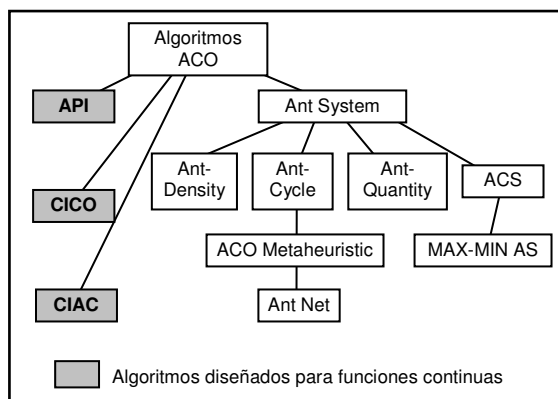


Figura 1. Versiones de algoritmos ACO[†].

No obstante, cuando se trata de aplicar algoritmos ACO a problemas de optimización de funciones continuas, pocas versiones han sido desarrolladas [Dréo and Siarry]. Algunas de éstas son el API, el

[†] Basado en [Dorigo and Di Caro 1999], [Spaulding 1998] [Dréo and Siarry].

CIAC y el CICO, pero tienden a desviarse considerablemente de la concepción original. Por ejemplo, el CICO involucra el empleo de un algoritmo genético. El CIAC establece comunicación directa entre hormigas, lo cual contradice la idea de que la comunicación es sólo indirecta (mediante *feromonas*).

Buscando conservar las ideas originales de los algoritmos ACO, el presente documento tiene por objeto explicar cómo emplear el algoritmo MAX-MIN AS adaptado a problemas de optimización de funciones continuas. Para ello se calibrará el modelo lluvia-escorrentía de Thomas, aplicado a una cuenca en la sabana de Bogotá. [Bowden, Dando and Maier, 2002] muestran un ejemplo de cómo emplear el MAX-MIN AS (ver Figura 1) en funciones continuas en donde cada dimensión de la solución emplea el mismo espacio de búsqueda. Es decir, su problema consiste en minimizar una función de la forma $f(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_p)$, en donde todo espacio de búsqueda para cada x_i está discretizado en 100 estratos. El problema que aquí se resolverá, tiene por reto espacios de búsqueda diferentes que van desde 256 hasta 1024 estratos de acuerdo a cada x_i .

OBJETIVO

Ilustrar cómo calibrar un modelo lluvia-escorrentía mediante el algoritmo MAX-MIN AS adaptado a funciones continuas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente trabajo, se aplicó el algoritmo MAX-MIN AS para la calibración del modelo de Thomas aplicado a la cuenca de Río Frío (Sabana de Bogotá) con caudales mensuales promedios entre 1997 y 1999.

Ya que el algoritmo Ant System (AS) es la base muchos algoritmos ACO y ya que todos ellos están claramente diseñados para el problema del vendedor viajero, a continuación se explicará dicho algoritmo aplicado a dicho problema. Luego se

mencionará las particularidades del algoritmo MAX-MIN AS para ese mismo problema y finalmente se explicará su adaptación a la optimización de funciones continuas en la calibración del modelo.

El problema del vendedor viajero formula la siguiente pregunta: dado un número n de ciudades, qué trayecto se debe seguir para visitarlas todas, pero pasando sólo por una a la vez? Para resolverlo, el algoritmo AS propone los pasos indicados en la Figura 2 (basada en [Dorigo and Di Caro 1999]).

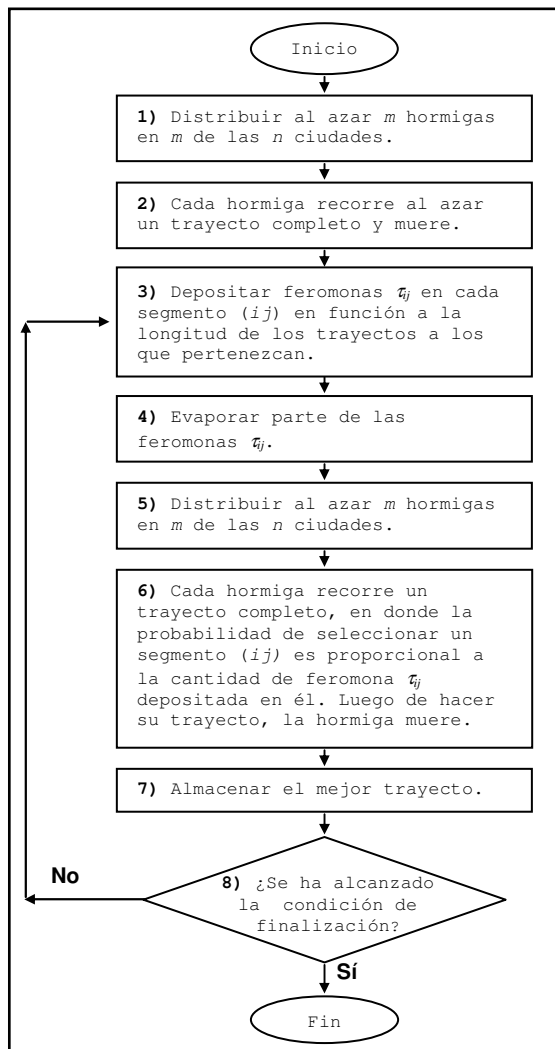


Figura 2. Algoritmo Ant System (AS).

La Figura 3 muestra cómo pueden ser los trayectos de las hormigas sobre la *mall*a de ciudades. Cada trayecto constituye una solución σ al problema y

está compuesto de varios segmentos (i, j) . En la primera iteración, las hormigas escogen su primer camino aleatóreamente, pero en las siguientes iteraciones, en cada nodo i , su próximo segmento (i, j) a escoger dependerá de la cantidad de feromona τ_{ij} que tenga depositada. Así, la probabilidad p_{ij} de que un segmento (i, j) sea seleccionado desde el nodo i es:

$$p_{ij} = \tau_{ij} / \sum_j \tau_{ij} \quad (1)$$

La expresión (2) indica cómo calcular la feromona τ_{ij} para cada segmento (ij) pero aplicando de una vez el efecto de la evaporación (es decir, se combinan los pasos 3 y 4 en uno sólo) [†].

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + 1/g(\sigma) \quad (2)$$

ρ es una fracción positiva que genera el efecto de la evaporación. t es el número de la iteración. $g(\sigma)$ es el valor de la función objetivo empleando la solución σ a la cual pertenece segmento (ij) . En el problema del vendedor viajero, la función objetivo es simplemente la suma de las longitudes L_{ij} de los segmentos (ij) que conforman el trayecto σ .

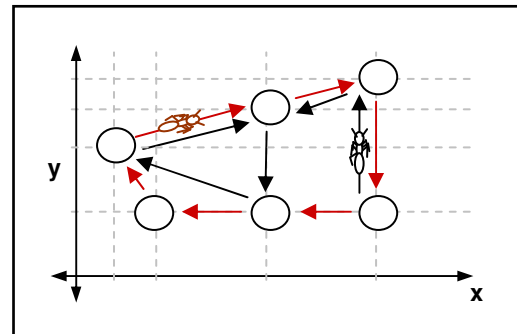


Figura 3. Problema del vendedor viajero mediante AS.

Ahora, el MAX-MIN AS [propuesto por Stützle and Hoos, 1996] presenta las siguientes particularidades: (1) después de cada iteración, sólo el mejor trayecto recibe incremento de feromonas, (2) cada *iterG* iteraciones se refuerza el mejor trayecto global

[†] En [Dorigo and Di Caro 1999], se trabaja con una feromona a_{ij} que tiene en cuenta tanto a τ_{ij} como a un valor heurístico η_{ij} propio del problema. Aquí, dicho valor no se menciona pues no se empleará para la calibración.

encontrado en el algoritmo; (3) los valores de τ_{ij} no deben pasar los límites τ_{max} y τ_{min} . Aunque Stützle y Hoos emplean expresiones matemáticas para calcularlas, aquí sólo se empleó la que define el τ_{max} .

$$\tau_{ij}^{max} = (1/\rho) \cdot (1/g(\sigma)) \quad (3)$$

Para calibrar el modelo de Thomas, se empleó la siguiente función objetivo:

$$F(\theta) = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n [Q_{obs_i} - Q_{sim_i}(\theta)]^2} \quad (4)$$

σ es la solución compuesta de seis valores así: $\sigma = [a \ b \ c \ d \ Sw_0 \ Sg_0]$. La definición de estos parámetros y la explicación de la expresión $Q_{sim}(\sigma)$ se pueden ver mejor textos de hidrología como [SERRANO, 1997]. El espacio de búsqueda para cada parámetro σ_i debe ser discretizado en $b(i)$ estratos de acuerdo a la precisión π que se desee obtener. Así, para el caso de la cuenca de Río Frío, dichos espacios fueron los siguientes:

| σ_i | a | b [mm] | c | d | Sw0 [mm] | Sg0 [mm] |
|------------|-------|-----------|-------|-------|-------------|-------------|
| Min | 0,800 | 10 | 0,001 | 0,01 | 0 | 0 |
| Max | 1,000 | 350 | 0,900 | 1,000 | 500 | 500 |
| π | 0,001 | 1 | 0,001 | 0,001 | 1 | 1 |
| b | 256 | 512 | 10 | 1024 | 512 | 512 |

Cada σ_i es un punto en donde j indica el estrato al que pertenece, e i , el parámetro que representa. A diferencia del vendedor viajero, no todos los posibles nodos serán empleados, sino uno por cada parámetro. En el problema, se emplearon los siguientes parámetros: $m = 50$; $\rho = 0,95$; $iterG = 10$; $\tau_{min} = 0,1$; # de iteraciones = 300.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La función objetivo (4) logró después de 300 iteraciones reducirse hasta 2,66 mm (ver Figura 4) obteniéndose la calibración de la Figura 3.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados son satisfactorios si se tiene en cuenta que pueden haber imprecisiones en las mediciones de campo o el modelo no es en realidad el más apropiado para la cuenca. No obstante, se

invita aquí a hacer más estudio sobre los parámetros que se deban emplear en el algoritmo (m , n , τ_{min} , $iterG$, # de iteraciones). También se invita a hacer un análisis sobre la verdadera necesidad de emplear algoritmos ACO menos tradicionales como el API.

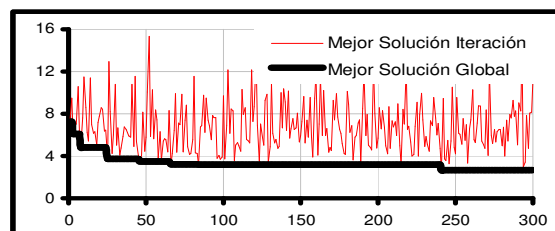


Figura 4. Convergencia hacia la solución óptima.

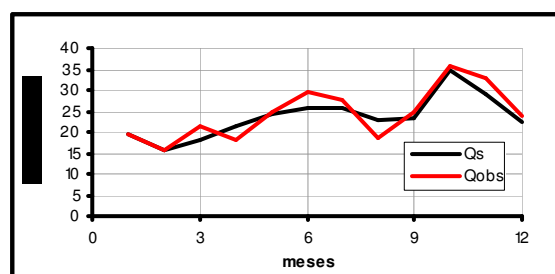


Figura 5. Caudales simulados vs. observados.

BIBLIOGRAFÍA

- BOWDEN, G.J., DANDY, G.C. and MAIER, H.R. Ant colony optimisation of a general regression neural network for forecasting water quality. *Hydroinformatics 2002*. En: FALCONER, LIN, HARRIS and WILSON. *Proceedings of the 5th International Conference on Hydroinformatics, Cardiff*. Volumen 1.
- DORIGO, M. and Di Caro, G. The Ant Colony Metaheuristic. En: *New Ideas in Optimization*. Corne, D., Dorigo, M., and Glover, F. Mc-GrawHill, 1999.
- DRÉO J. and SIARRY, P. A New Ant Colony Algorithm Using the Heterarchical Concept Aimed at Optimization of Multimínima Continuous Functions [en línea]. Francia. [citado 15-Jul-2003]. Disponible en: <http://noihan.free.fr/IMG/pdf/ants2002.dreo.pdf>
- FALKENAUER, Emanuel. *Genetic algorithms and grouping problems*. Chichester, Reino Unido : John Wiley & Sons, 1998. 220 p. ISBN 0-471-97150-2
- SERRANO, Sergio E. *Hydrology for engineers, geologists and environmental professionals*. Lexington, Kentucky : HydroScience, 1997. ISBN 0-9655643-9-8.
- SPAULDING, Kent A. *Natural Metaphoric Optimization Algorithms* (en línea). Report. University of Texas : 1998. [citado 15-Jul-2003]. Disponible en: <http://www.cs.utexas.edu/users/lin/papers/spaulding.ps>
- STÜTZLE T. and HOOS, H. *Improving the Ant System: A Detailed Report on the MAX-MIN Ant System* [online]. Revised version. [1996] Alemania. [citado 15-Jul-2003]. Disponible en: <http://citeseer.nj.nec.com/>