

# APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS EN LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA DE BARQUISIMETO-CABUDARE

*Jean Carlos Rincón O.*  
*Decanato de Ingeniería Civil*  
*Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado - UCLA, Barquisimeto, Venezuela*  
*jcarlos3012@yahoo.com*

Recibido para evaluación: 31 de Agosto de 2005 / Aceptación: 30 de Septiembre de 2006 / Versión final: 20 de Octubre de 2006

## RESUMEN

Se propone una metodología de optimización de sistemas de abastecimiento de agua a nivel de proyectos de expansión, basada en los principios fundamentales de los Algoritmos Genéticos; para luego ser aplicada al sistema que abastece a Barquisimeto–Cabudare (Venezuela). Para ello, se estructuró el modelo partiendo de la teoría básica, y para proceder a su aplicación se recopiló toda la información requerida, se formularon las alternativas, se definió la función objetivo así como las restricciones, se programó el modelo del sistema empleando el lenguaje de programación Visual Basic 6.0 y finalmente se realizó la corrida del modelo a cinco escenarios alternativos, para su posterior análisis. Se emplea como técnica de optimización la Inteligencia Artificial debido al carácter no lineal de las ecuaciones empleadas. La metodología utilizada, además de seleccionar alternativas empleando como criterio de optimización los costos, involucra el prediseño de las alternativas (diámetros de tubería y potencia requerida de bombas), y el tiempo (año de construcción de las alternativas). Los resultados demuestran la necesidad inmediata de ampliar el sistema para evitar una crisis de suministro de agua en los años venideros.

**PALABRAS CLAVES:** Abastecimiento de Agua, Algoritmos Genéticos, Inteligencia Artificial, Optimización, Toma de Decisiones.

## ABSTRACT

An optimization methodology for the expansion of water supply systems is presented, based upon fundamental principles of Genetic Algorithms. It is applied to study the water supply system of Barquisimeto-Cabudare (Venezuela). Towards that end, the mathematical model is developed from the basic theory, and its application requires that information is compiled, the alternatives are formulated, and that the objective function and constraints are defined. The model is run using Visual Basic 6.0, for five different alternative scenarios. Artificial intelligence is used due to the nonlinear character of the mathematical model. In addition to selecting the least cost alternative, the proposed methodology involves pre-design of alternatives (pipeline diameters, and required power of hydraulic pumps), as well as the optimal timing of the different alternatives. Results indicate the immediate necessity to expand the water supply system to avoid a water supply crisis in the foreseeable future.

**KEY WORDS:** Water Supply, Genetics Algorithms, Artificial Intelligence, Optimization, Make Decisions.

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las ciudades lleva consigo un crecimiento poblacional al cual hay que brindarle los servicios; entre ellos el agua. La escasez de este vital líquido en el mundo y el deterioro de su calidad originado por la contaminación, han hecho que los desequilibrios entre la oferta y la demanda se acentúen cada vez más.

Ante ésta situación la solución es planificar el uso del recurso hídrico, atendiendo diversos factores, generalmente el económico debido a las crisis económicas que muchos países de América Latina y el mundo atraviesan en la actualidad.

Esto es posible mediante la aplicación de técnicas de optimización que ayuden a la toma de decisiones en la gestión de los recursos hidráulicos. Las técnicas que comúnmente se utilizan son de tipo exacto, pero estos poco suelen adaptarse a los problemas de ingeniería por la no linealidad que tienen los problemas que generalmente se presentan, entre otras causas.

Hoy en día, el uso de los metaheurísticos ha ayudado a aliviar este problema, los cuales son métodos aproximados basados en los principios generales de Inteligencia Artificial. Uno de ellos son los Algoritmos Genéticos, que son métodos sistemáticos para la resolución de problemas de búsqueda y optimización que aplican a estos los mismos métodos de la evolución biológica: selección basada en la población, reproducción sexual y mutación.

Para su aplicación se requiere codificar las variables que intervienen en el problema para que puedan manipularse durante el proceso evolutivo. Entre los métodos de codificación se pueden mencionar la codificación binaria y la codificación por medio de números reales.

Un algoritmo genético simple se basa en la generación aleatoria de las cadenas que son posibles soluciones del problema y en la aplicación de cinco operadores principales: *evaluación, selección, crossover o recombinación, elitismo y mutación*.

Durante la evaluación, se decodifica el gen, convirtiéndose en una serie de parámetros de un problema, se halla la solución del problema a partir de esos parámetros, y se le da una puntuación a esa solución

en función de lo cerca que esté de la mejor solución. A esta puntuación se le llama *fitness*.

Una vez evaluado el fitness, se tiene que crear la nueva población teniendo en cuenta que los buenos rasgos de los mejores se transmitan a ésta. Para ello, hay que seleccionar a una serie de individuos encargados de tan ardua tarea.

El *crossover* consiste en el intercambio de material genético entre dos cromosomas. El *crossover* es el principal operador genético, hasta el punto que se puede decir que no es un algoritmo genético si no tiene *crossover*.

En cuanto a la *mutación* es un suceso bastante poco común (sucede aproximadamente una de cada mil repeticiones). En la mayoría de los casos las mutaciones son letales, pero en promedio, contribuyen a la diversidad genética de la especie. En un algoritmo genético tendrán el mismo papel, y la misma frecuencia (muy baja).

Por último, el operador *elitismo* mantiene en cada población el mejor individuo en términos de función de calidad o de función objetivo.

En este trabajo se propone una metodología para la optimización de sistemas de abastecimiento de agua, aplicando la teoría de Algoritmos Genéticos. Dicha metodología se empleó en el sistema que abastece a las ciudades de Barquisimeto-Cabudare, Venezuela. Además de ello se realiza una experimentación del modelo con el fin de conocer los valores de los parámetros por utilizar y el estudio de varios escenarios alternativos para dar solución al problema de abastecimiento de estas ciudades.

## 2. METODOLOGIA DE TRABAJO

### 2.1. Selección de la técnica de optimización

En primer lugar se realizó una comparación entre los métodos exactos y los métodos heurísticos. Los métodos exactos suelen ser muy deficientes en problemas de alta dimensionalidad, además que la mayoría de ellos requieren un carácter lineal de las ecuaciones, situación poco probable en problemas de ingeniería tal como el caso de aplicación que aquí se estudia. En cambio, los métodos heurísticos, a pesar que no garantizan el óptimo global, son mas eficientes y flexibles y a cambio ofrecen soluciones cercanas al óptimo. Por lo tanto fueron descartados los primeros.

Entre los métodos heurísticos se pueden mencionar los algoritmos genéticos, temple simulado y búsqueda tabú, los cuales se adaptan a problemas de expansión.

Basado en las conclusiones del trabajo de Adriana Pulgarín, 2001, se descartó el temple simulado por tener la gran desventaja de trabajar con una única solución en cada iteración lo que lo hace poco práctico en problemas de gran tamaño.

En cuanto a la búsqueda tabú y los algoritmos genéticos, ambos se adaptaban perfectamente al problema de aplicación, si embargo se seleccionó este último por ser la técnica que hasta ahora ha sido más investigada, usada y aplicada en problemas reales y su implementación es mucho más sencilla.

## 2.2. Modelo propuesto para la optimización de sistemas de abastecimiento de agua (proyectos de expansión) basados en la teoría de Algoritmos Genéticos

Para la aplicación del modelo se deben definir las alternativas que serán evaluadas por el modelo, tanto las que ya están construidas como las que están propuestas. Cada alternativa debe estar asociada a una capacidad, que representa el mayor caudal que podría ser conducido por cada aducción. Además debe definirse para cada una la longitud de aducción, el desnivel en la aducción y el tipo de aducción (gravedad o bombeo).

De igual manera, deben definirse el horizonte de planificación, el número de periodos en que será dividido dicho horizonte y las demandas del sistema para cada periodo.

Por último se debe desarrollar la formulación matemática del modelo, en otras palabras, se debe definir la función objetivo y las restricciones. En el caso de estudio la función objetivo sería minimizar costos, y las restricciones se podrían englobar en dos aspectos, una referente a las capacidades y otra a la satisfacción de las demandas.

### 2.2.1. Datos del modelo

- Número de individuos de la población: Número entero positivo que indica la cantidad de cadenas que se generan en cada iteración.

- Número de iteraciones: Número entero positivo que indica la cantidad de poblaciones que se reproducen en el modelo.
- Probabilidad de Cruce: Número entero positivo entre 1 y 100 que indica el porcentaje de la población que será sometido al operador *Cruce*.
- Probabilidad de Elitismo: Número entero positivo entre 1 y 100 que indica el porcentaje de la población que será sometido al operador *Elitismo*.

Nota: La suma de las probabilidades de *Cruce* y *Elitismo* debe ser 100%.

- Porcentaje de Cruce tipo I: Número entero positivo entre 1 y 100 que indica que porcentaje de los individuos que son sometidos al operador cruce se les aplica el cruce tipo I.
- Porcentaje de Cruce tipo II: Número entero positivo entre 1 y 100 que indica que porcentaje de los individuos que son sometidos al operador cruce se les aplica el cruce tipo II.
- Porcentaje de Cruce tipo III: Número entero positivo entre 1 y 100 que indica que porcentaje de los individuos que son sometidos al operador cruce se les aplica el cruce tipo III.

Nota: La suma de los porcentajes de cruce tipo I, tipo II y tipo III deben sumar 100%. Estos cruces serán explicados posteriormente.

### 2.2.2. Codificación

Para realizar la codificación se debe determinar el número de caracteres que se requieren para representar un caudal de la alternativa  $i$  del período  $k$ , y así determinar la longitud de la cadena binaria.

El número de caracteres depende de la precisión que se desee y de la capacidad de cada alternativa. Este número puede ser determinado a través de la ecuación:

$$2^{m_j-1} < (b_j - a_j) * 10^n \leq 2^{m_j} - 1$$

Donde  $m_j$  es el número de caracteres requeridos,  $n$  representa el número de dígitos deseados después del punto decimal y  $(a_j, b_j)$  representa el dominio de la variable, que para el modelo sería entre 0 y la capacidad de cada alternativa.

La longitud de la cadena puede ser calculada por medio de la fórmula:

$$Lc = \sum_{i=1}^{Nalt} NcarA_i \times Nper$$

$Lc$  = Longitud de la cadena

$NcarA_i$  = Número de caracteres requerido por la alternativa  $i$ .

$Nalt$  = Número total de alternativas.

$Nper$  = Número de periodos por considerar en el modelo.

### 2.2.3. Generación de la población inicial

Para cada individuo de la población inicial debe realizarse lo siguiente:

- Generar de manera aleatoria combinaciones de unos y ceros, hasta alcanzar la longitud requerida de la cadena.
- Fraccionar la cadena en  $x$  subcadenas, donde  $x$  representa los periodos considerados en el problema. Ver ejemplo en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Ejemplo: Cadena fraccionada en 3 subcadenas

Periodo 1:																													
0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	
Periodo 2:																													
0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	
Periodo 3:																													
0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

- Las subcadenas deben convertirse en una matriz de  $m \times n$ , donde  $m$  representa al número de alternativas y  $n$  al número de periodos. Ver ejemplo en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Ejemplo: Subcadenas convertidas en matriz de 3x5

Sub-cadenas		PERIODO		
		1	2	3
Alternativa	1	00011	01111	01011
	2	10101	11101	10100
	3	011000	010010	011110
	4	1101011	1101111	1101000
	5	000101	001001	000111

- Generar aleatoriamente un número comprendido entre 1 y el  $(Nper + 1)$  para las alternativas que requieren construcción, con el fin de indicar el período en que deben entrar en funcionamiento y luego proceder a modificar la cadena, es decir, que si el numero generado para la alternativa 1 es el 3, los caracteres de la alternativa 1 para los periodos 1 y 2 sea "00000". En el caso de que el número generado sea mayor al

número de períodos, la alternativa 1 nunca entraría en funcionamiento y todos los caracteres, desde el período 1 hasta el último serían solo 0s. Para continuar con el ejemplo, supongamos que el número obtenido para la alternativa 1 es el 3, para la alternativa 2 es el 4 y para la alternativa 3 es el 3, las subcadenas y la matriz quedaría de la siguiente manera (Tablas 3 y 4):

**Tabla 3.** Ejemplo: Modificación de las subcadenas

Periodo 1:																												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1
Periodo 2:																												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1
Periodo 3:																												
0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1

**Tabla 4.** Ejemplo: Modificación de la matriz

Sub-cadenas	PERIODO			
	1	2	3	
Alternativa	1	00000	00000	01011
	2	00000	00000	00000
	3	000000	0000000	011110
	4	1101011	1101111	1101000
	5	000101	001001	000111

**2.2.4. Decodificación de la matriz**

Es la transformación de la matriz obtenida en una matriz de valores reales, que en este caso representa caudales en m<sup>3</sup>/s. La conversión se realiza por medio de:

$$caudal = a_j + \sum_{i=0}^{N_{car}-1} b_i 2^i \times \left( \frac{b_j - a_j}{2^{m_j} - 1} \right)$$

**2.2.5. Tratamiento de las restricciones**

La probabilidad de producir cadenas que no cumplan con las restricciones impuestas en el modelo es muy alta debido a que es un problema muy restringido, por ello es necesario desarrollar un algoritmo de reparación con el fin de obligar a la cadena al cumplimiento de las restricciones. El algoritmo que se implemente depende de las características del problema.

**2.2.6. Predimensionado y estimación de costos**

Se debe estimar el diámetro de tubería para las alternativas que requieren construcción de la aducción, la potencia requerida de las bombas en las alternativas cuya aducción es por bombeo y las potencias necesarias anuales en función de los caudales bombeados en cada período. Generalmente el predimensionado de la tubería se hace por medio de la ecuación de Hazen-Williams para los casos en que la aducción sea por gravedad y la ecuación de Bresse para los casos en que sea por bombeo. El caudal considerado es el mayor valor obtenido de todos los periodos de la alternativa en cuestión. Con los diámetros obtenidos se estiman los costos de construcción de la aducción. Realizado el predimensionado, se estiman los costos totales de la solución encontrada.

En caso que el algoritmo de reparación desarrollado no permita el cumplimiento de todas las restricciones se debe recurrir a la segunda manera de tratar a las cadenas infactibles que es por medio de penalizaciones.

**2.2.7. Evaluación**

El proceso de evaluación debe realizarse una vez que

han sido generadas todas las cadenas de la población actual. A cada cadena se le determina su función de aptitud o el *fitness*. La función de aptitud se calcula normalizando el valor obtenido de la función objetivo y las penalizaciones, es decir, llevándolo a unidades adimensionales entre 0 y 1 y luego sumarlas. Este proceso debe hacerse porque las unidades de la función objetivo no son las mismas que las de las restricciones.

**2.2.8. Selección**

El proceso de selección utilizado es el tipo ruleta, que consiste en asignarle a cada miembro de la población una porción de una ruleta inversamente proporcional al “*fitness*” del individuo, es otras palabras, mientras mejor sea su función de aptitud mayor será la porción de la ruleta que le corresponde.

Se toma un número al azar entre 1 y 100, y el individuo que contenga ese número será seleccionado para ser padre de la siguiente generación. Esto se hace tantas veces hasta alcanzar la cantidad de población que será sustituida.

**2.2.9. Cruce**

En el algoritmo desarrollado en este trabajo se utilizan diversos operadores de cruce adaptados a la representación matricial de las soluciones. En realidad, las tres políticas de cruce implementadas son casos particulares del cruce multipunto. Cada solución hija contiene una parte de las dos matrices padres. Además, las dos soluciones hijas son complementarias. A continuación se describe los pasos realizados.

- Se selecciona al azar 2 números comprendidos entre 1 y la cantidad de población a sustituir, estos números representan a las cadenas que serán padres y formarán dos hijos. Dependiendo del porcentaje de aplicación de cada política el programa debe seleccionar cual de ellas aplicar.
- Se procede a realizar el cruce con el fin de crear los 2 hijos que formarán parte de la siguiente generación.

Este proceso se repite hasta alcanzar la cantidad de población sustituida.

**Política 1.** Cruce por columnas. Para cada pareja de soluciones padres se escoge un número aleatorio entre 1 y  $T$ . Este número,  $v$ , indica por qué línea vertical se parten las matrices padres. Entonces, el primer hijo estará

formado por las columnas  $1, 2, \dots, v$  de la primera matriz padre y las columnas  $v+1, v+2, \dots, T$  de la segunda matriz padre. El segundo hijo estará formado por las columnas  $1, 2, \dots, v$  de la segunda matriz padre y las columnas  $v+1, v+2, \dots, T$  de la primera matriz padre. La Figura 1 ilustra esta política de cruce.

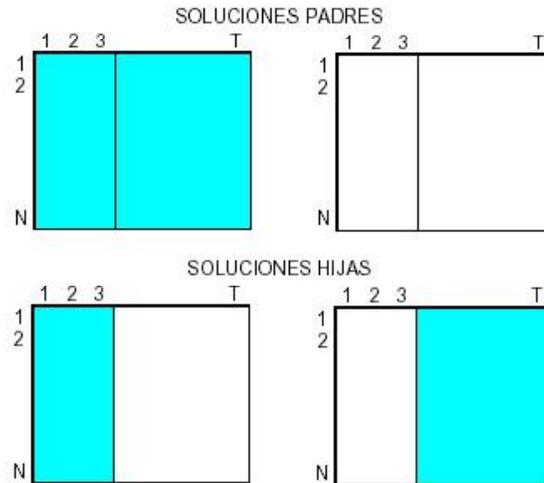


Figura 1. Política de cruce 1

**Política 2.** Cruce por filas. Para cada pareja de soluciones padres se escoge un número aleatorio entre 1 y  $N$ . Este número,  $h$ , indica por qué línea horizontal se parten las matrices padres. Entonces, el primer hijo estará formado por las filas  $1, 2, \dots, h$  de la primera matriz padre y las

filas  $h+1, h+2, \dots, N$  de la segunda matriz padre. Igualmente, el segundo hijo estará formado por las filas  $1, 2, \dots, h$  de la segunda matriz padre y las filas  $h+1, h+2, \dots, N$  de la primera matriz padre. La Figura 2 ilustra esta política de cruce.

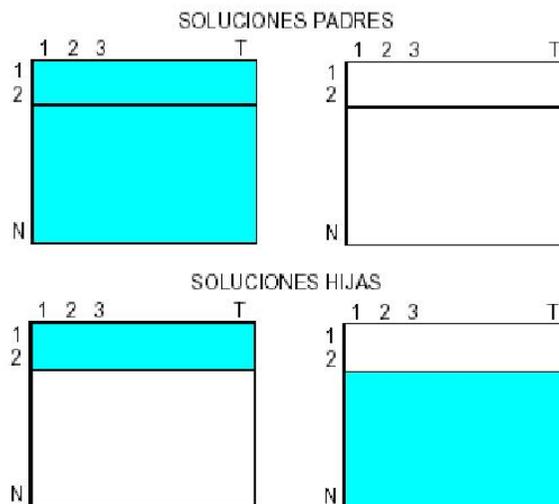


Figura 2. Política de cruce 2.

**Política 3.** Cruce fraccionado para cada columna. Las soluciones hijas se obtienen por bipartición aleatoria de cada columna de las soluciones padres y posterior recombinación de los trozos resultantes de la bipartición. Dada una pareja de soluciones padres, se escoge un número aleatorio,  $c$ , entre 1 y  $N$ . Este número indica por dónde se parte cada columna de las soluciones padres. Por lo tanto, cada columna del primer hijo estará formada

por las fracciones 1, 2, ...,  $c$  de la columna del mismo índice de la primera solución padre y las fracciones  $c+1$ ,  $c+2$ , ...,  $N$  de la columna del mismo índice de la segunda solución padre. Cada columna del segundo hijo estará formada por las fracciones 1, 2, ...,  $c$  de la segunda solución padre y las fracciones  $c+1$ ,  $c+2$ , ...,  $N$  de la primera solución padre. La Figura 3 ilustra esta política de cruce.

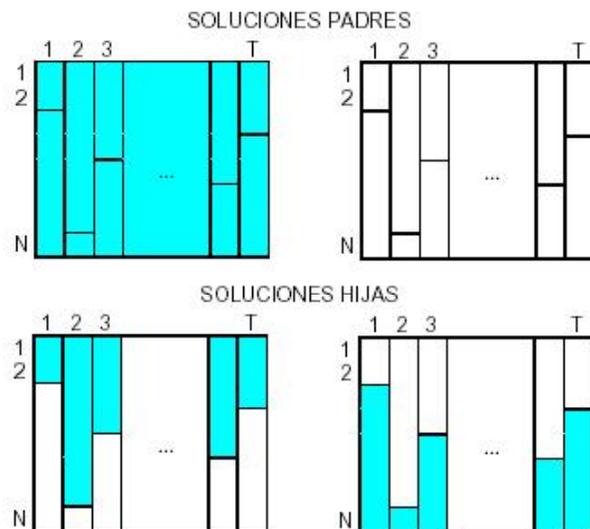


Figura 3. Política de cruce 3

### 2.2.10. Elitismo

Con el porcentaje introducido como dato del problema, y dependiendo de el número de individuos de la población, se determina la cantidad de individuos que pasan directamente a la siguiente población.

## 2.3. Aplicación del modelo al sistema de abastecimiento de agua de Barquisimeto – Cabudare y áreas adyacentes.

### 2.3.1. Actualización de las disponibilidades superficiales de agua

En la actualización se incluyen la cuenca del río Tocuyo donde se encuentra ubicado el embalse Dos Cerritos, las cuencas de los ríos Yacambú y Acarigua donde a corto plazo estará ubicado el embalse Yacambú y a largo plazo el embalse Dos Bocas, respectivamente. La actualización consiste en primer lugar en una evaluación hidrológica y, en segundo lugar, en la operación conjunta de los embalses en estudio.

Para la evaluación hidrológica actualizada, se utilizó la misma metodología de simulación hidrológica mensual utilizada por la antigua Zona 3 del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, (MARNR 1983).

Los modelos hidrológicos utilizados son el SIMULACI, desarrollado en el antiguo Ministerio de Obras Públicas, y el SIHIDME, que fue elaborado en el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables.

La evaluación hidrológica está constituida por dos fases, una de calibración y otra de simulación. La fase de calibración tiene como finalidad determinar los parámetros físicos de ajuste del modelo mensual de simulación, utilizando la información de escorrentías observadas como criterio de ajuste.

Una vez obtenidos los volúmenes simulados en el sitio de presa, se realizó la operación del embalse a fin de determinar cual es el caudal máximo constante que se puede extraer con un porcentaje de falla del 10%. Los resultados se muestran en las Figuras 4, 5 y 6.

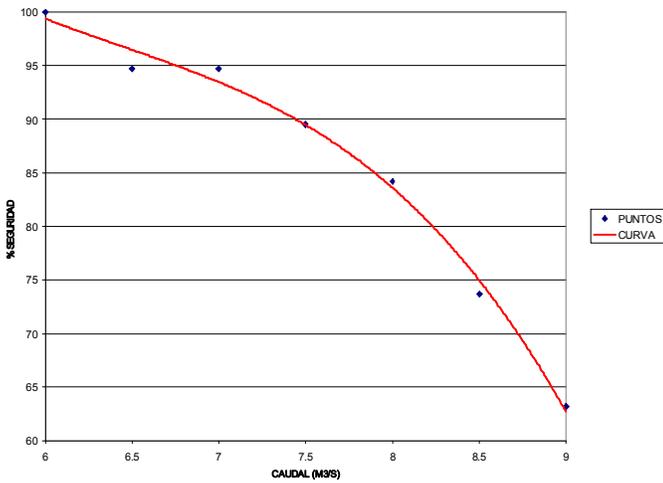


Figura 4. Curva de rendimiento del embalse Dos Cerritos

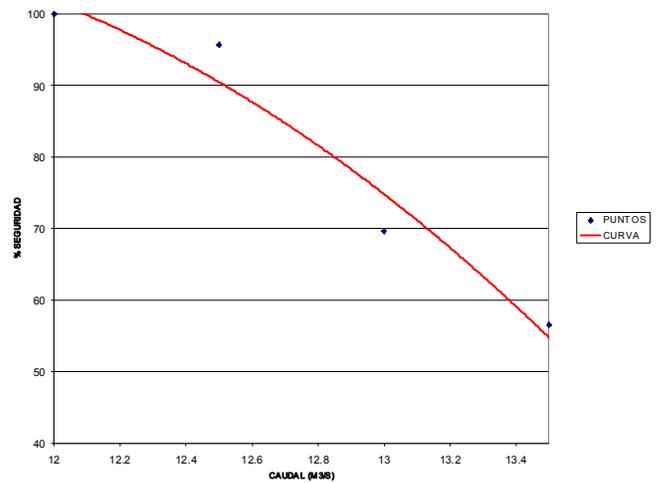


Figura 5. Curva de rendimiento del embalse Yacambú

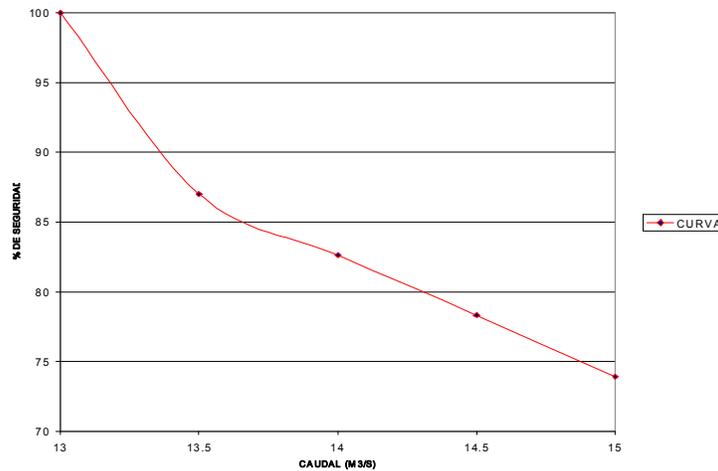


Figura 6. Curva de rendimiento del embalse Dos Bocas

### 2.3.2. Actualización de las demandas urbanas del sistema

Para la actualización de las demandas urbanas del sistema se realizó la proyección de población de los municipios Iribarren, Palavecino, discriminada por parroquias, con base en los resultados del censo 2001 cuya tasa de crecimiento para estos municipios es de 2.4% y 4.2%, respectivamente. El método de proyección empleado es el de regresión geométrica. En cuanto a los municipios Morán y Jiménez se aplicó el método logarítmico, por considerar que es el que mas se ajusta al crecimiento poblacional de estos municipios. Luego las proyecciones obtenidas fueron multiplicadas por factores que corresponden a la cantidad de agua entregada a las ciudades de Barquisimeto, Cabudare, Quibor y El Tocuyo, del total entregado a los respectivos municipios.

### 2.3.3. Estimaciones de costos

Para el presente estudio se consideraron costos de construcción y costos de operación. Los costos de tubería, incluida la colocación, se estimaron empleando los análisis de precios unitarios aplicados en Hidrolara para su Modelo Tarifario, es decir para cada diámetro se obtuvo el costo unitario. Estos puntos fueron graficados y ajustados a una ecuación de 2do. Grado ( $CC=267.17 \times \phi^2 + 19698 \times \phi + 124736$   $\phi > 0$ ), donde  $CC$  son los costos de colocación de tubería (Bs./ml) y  $\phi$  es el diámetro de la tubería en pulgadas. Ver Figura 7.

Para la estimación de los costos de los equipos de bombeo incluida la instalación y casetas, se tomó como referencia el costo del equipo comprado recientemente por Hidrolara

para ser utilizado en la aducción de Dos Cerritos, cuyo costo fue 158800\$ para un motor de 2950 HP de potencia, y según el departamento de Operación y Mantenimiento el costo de electricidad es de 23.54 Bs./Kwh, para la Estación de Dos Cerritos.

Para obtener los costos por construcción de planta de tratamiento se tomó como base los costos actualizados de las plantas existentes en el estado Lara, cuya información fue suministrada por el departamento de costos de Hidrolara. De acuerdo con la capacidad de cada una de las plantas se hizo un ajuste lineal para así obtener la siguiente ecuación  $CPT = 2e10^6 * Q + 3e10^8$  (ver Figura 8).

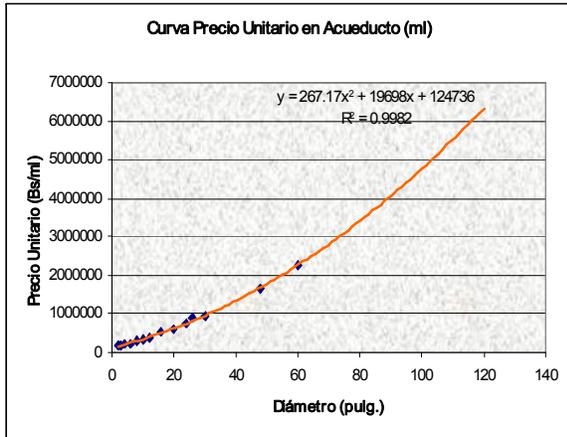


Figura 7. Ajuste de los costos de tubería a ecuación de 2do. Grado

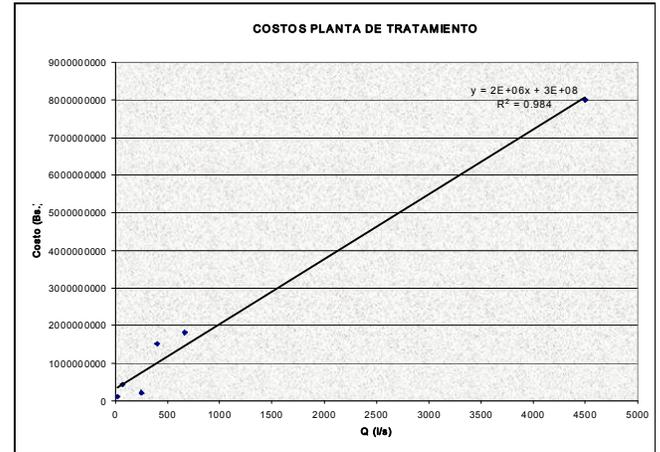


Figura 8. Ajuste lineal de costos de Planta de Tratamiento

### 2.3.4. Alternativas planteadas

Las alternativas consideradas en el modelo se pueden apreciar en la Figura 9.

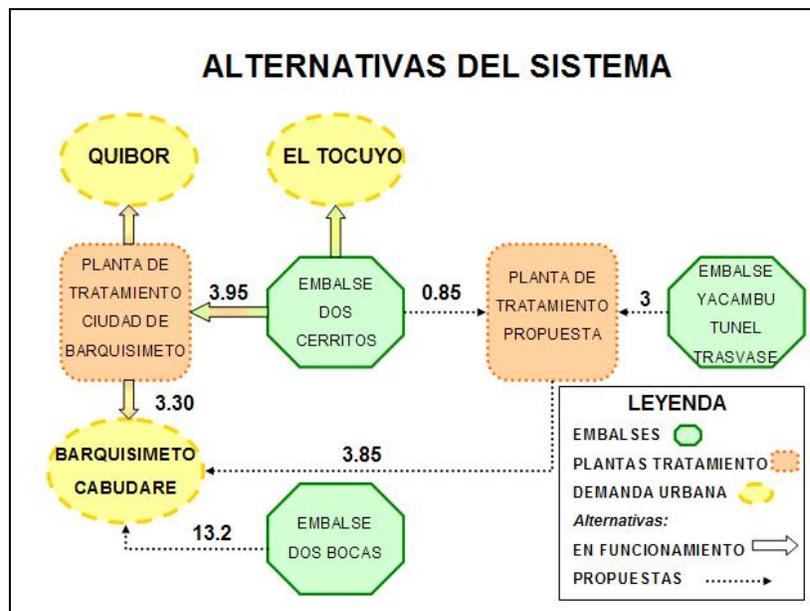


Figura 9. Esquema de las alternativas consideradas en el modelo

**2.3.5. Formulación matemática**

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^4 CC_i + \sum_{i=2}^6 \sum_{k=1}^7 CO_{i,k}$$

Donde:

$$\sum_{i=1}^4 CC_i = \sum_{i=1}^4 267.17 \times \phi_i^2 + 19698 \times \phi_i + 124736 + \sum_{i=2}^4 (158800 \times 2.3 \times 2150) \times \frac{POT_i}{2950} + \sum_{i=3}^4 CPT_i$$

$$\phi_i = \left( \frac{Q_{d_i}}{0.734 \times \left( \frac{\Delta H_i}{L_i} \right)^{0.54}} \right)^{1/2.63} \quad i = 1,3$$

$$\phi_i = 1.15 \times \sqrt{Q_{d_i}} \quad i = 2,4$$

$$Q_{d_i} = \text{Max}(Q_{i,k}) \quad i = 1..4 \quad k = 1..7$$

$$POT_i = \frac{Q_{d_i} \times HT_i \times 1000}{76 \times 0.8} \quad i = 2,4$$

$$HT_i = \Delta H_i + 0.001772 \times \frac{L_i}{\phi^{4.871}} \times Q_{d_i}^{1.852} \times 1.15 \quad i = 2,4$$

$$CPT = 2e10^6 * Q_{d_i} * 1000 + 3e10^8 \quad i = 3,4$$

$$\sum_{i=2}^6 \sum_{k=1}^7 CO_{i,k} = \sum_{i=2}^6 \sum_{k=1}^7 23.54 \times POTVAR_{i,k}$$

$$POTVAR_{i,k} = \frac{Q_{i,k} \times HT_i \times 1000}{76 \times 0.8} \times \frac{8760}{0.7457} \quad i = 2..6 \quad k = 1..7$$

Sujeto a:

$$Q_{5,k} - DU_{TOCUYO_k} \geq 0.1 + DU_{QUIBOR_k} + Q_{6,k} \quad k = 1..7$$

$$Q_{2,k} + Q_{1,k} \geq Q_{3,k} \quad k = 1..7$$

$$Q_{3,k} + Q_{4,k} + (Q_{6,k} - 0.3) + 0.825 \geq DU_{BARQUISIMETO_k} \quad k = 1..7$$

$$(Q_{3,k} + Q_{4,k} + 0.825 + (Q_{6,k} - 0.3) - DU_{BARQUISIMETO_k}) + 0.870 \geq DU_{CABUDARE_k} \quad k = 1..7$$

$CC_i$  : Costos de construcción en Bolívares, alternativa  $i$ .

$CO_{i,k}$  : Costos de operación en Bolívares, alternativa  $i$  en el periodo  $k$

$\phi_i$  : Diámetro de tubería en m. de la alternativa  $i$ .

$POT_i$  : Potencia en HP requerida de la alternativa  $i$ .

$CPT_i$  : Costos de planta de tratamiento en Bs. de la alternativa  $i$ .

$Q_{d_i}$  : Caudal de diseño en m<sup>3</sup>/s de la alternativa  $i$ .

$\Delta H_i$  : Desnivel en m. de la alternativa  $i$ .

$L_i$  : Longitud de la tubería en Km. de la alternativa  $i$ .

$Q_{i,k}$  : Caudal proporcionado por la alternativa  $i$  en el periodo  $k$

$HT_i$  : Suma del Desnivel mas las pérdidas totales en m. de la alternativa  $i$ .

$POTVAR_{i,k}$  : Potencia consumida en Kwh por la alternativa  $i$  en el periodo  $k$

$DU_{TOCUYO_k}$  : Demanda urbana de la población de El Tocuyo en el periodo  $k$

$DU_{QUIBOR_k}$  : Demanda urbana de la población de Quibor en el periodo  $k$

$DU_{BARQUISIMETO_k}$  : Demanda urbana de la población de Barquisimeto en el periodo  $k$

$DU_{CABUDARE_k}$  : Demanda urbana de la población de Cabudare en el periodo  $k$

### 2.3.6. Periodos considerados

**Tabla 5.** Periodos considerados en la aplicación del modelo

Período	Años que comprende	Nro. De años
1	2005	1
2	2006-2008	3
3	2009-2012	4
4	2013-2015	3
5	2016-2018	3
6	2019-2022	4
7	2023-2025	3

### 2.3.7. Automatización del modelo

Levantada toda la información requerida, se procedió a la sistematización del modelo realizándose en el lenguaje de Programación Visual Basic 6.0. En la Figura 10 se puede observar una de las pantallas del modelo.



**Figura 10.** Pantalla del modelo

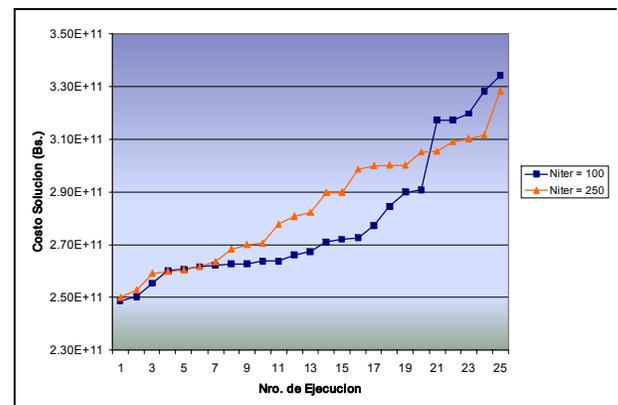
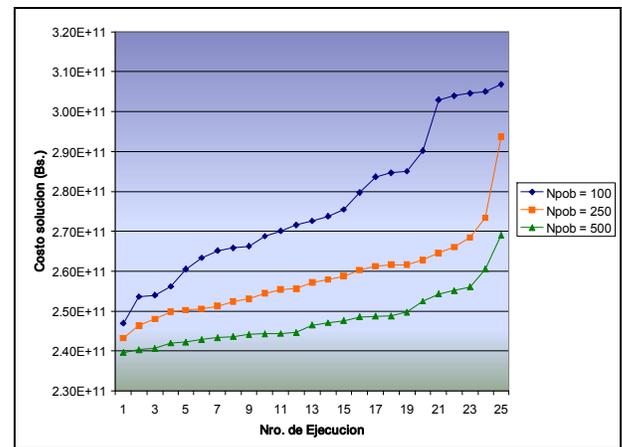
## 3. RESULTADOS

### 3.1. Experimentación

El objetivo principal de una experimentación es visualizar el efecto de los diversos parámetros en el comportamiento del Algoritmo Genético; por comodidad se utiliza un número pequeño de generaciones en cada corrida, esto implica que en las ejecuciones del algoritmo difícilmente se halle la solución óptima, pero se tendrá una guía de cuáles deben ser los valores de los parámetros para el Algoritmo Genético que mejor se adapte al problema planteado.

### 3.1.1. Casos de experimentación

- Número de individuos Vs. Número de iteraciones.



**Figuras 11 y 12.** Caso de Experimentación: Nro. de Individuos Vs. Nro. de iteraciones

De acuerdo con lo observado en las Figuras 11 y 12 se concluye que es más adecuado enfocar el trabajo al uso de un mayor tamaño de la población y a un número menor

de iteraciones, ya que a mayor número de población la mejor solución encontrada por el algoritmo genético es menor, esto se debe a que la variabilidad de la población aumenta.

- Selección por Ruleta Vs. Elitismo

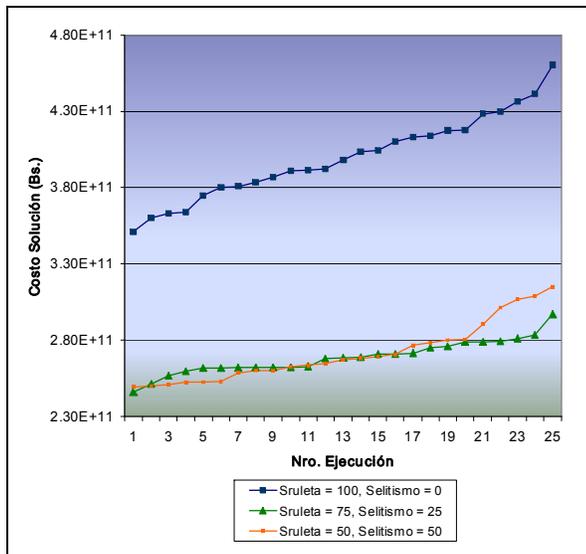


Figura 13. Caso de experimentación: Selección por Ruleta Vs. Elitismo

Observando los resultados obtenidos en la Figura 13 se puede afirmar que la presencia del operador *Elitismo* es muy importante a fin de encontrar mejores soluciones. Al comparar los costos obtenidos en el caso donde el porcentaje de *Elitismo* es cero con los otros dos se observa que éstos son mayores y en gran diferencia.

- Cruce tipo I Vs. Cruce tipo II Vs. Cruce tipo III.

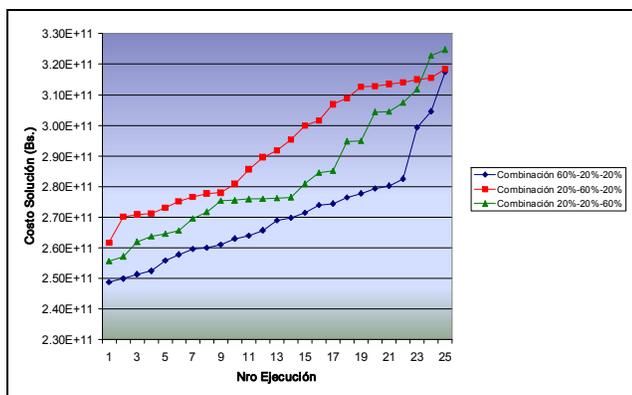


Figura 14. Caso de experimentación: Cruce tipo I Vs. Cruce tipo II Vs. Cruce tipo III

De la Figura 14 se puede deducir que la combinación ideal de cruces para el modelo implementado es aquella donde el cruce tipo I (por columnas) es mayor que los otros dos tipos de cruce. Esto se debe a que cuando opera este cruce, si los padres son cadenas factibles; los hijos serán también cadenas factibles ya que lo que se está combinando son soluciones por períodos, y en términos del algoritmo genético; la información genética se estaría manteniendo de una población a otra porque no haría falta el uso del algoritmo de reparación.

### 3.2. Algoritmo definitivo

Con base en los resultados obtenidos en la experimentación se fijaron los valores de los parámetros del algoritmo. En la Tabla 6 se muestran los valores utilizados.

Tabla 6. Valores definitivos de los parámetros del Algoritmo Genético.

PARAMETROS
<i>Npob</i> = 1000
<i>Ne</i> = 10
<i>Niter</i> = 50
<i>Sruleta</i> = 80
<i>Selitismo</i> = 20
<b><i>Cruce1</i> = 60</b>
<b><i>Cruce2</i> = 20</b>
<b><i>Cruce3</i> = 20</b>

### 3.3. Estudio de escenarios alternativos

#### 3.3.1. Escenario 1

En este escenario se usó las proyecciones de población calculadas, una dotación de 350 l/p/d, el uso de los factores de actualización de costos en la función objetivo y todas las alternativas planteadas. En la Tabla 7 se pueden observar los resultados obtenidos.

- Para este primer escenario se tiene que el sistema actual fallaría en el año 2009, es decir que ya no estaría en capacidad de satisfacer las demandas requeridas.
- El modelo arroja que para el año 2009, la aducción proveniente desde el embalse Yacambú debe estar construida.
- Una vez que Yacambú entra en funcionamiento, el modelo indica que éste debe trabajar a capacidad, es decir, 3 m<sup>3</sup>/s. Esto es lógico, ya que es un sistema

cuyo funcionamiento es por gravedad, y no habría costos de equipos de bombeo ni de operación.

- De acuerdo con los resultados ofrecidos por el modelo, de entrar Yacambú en funcionamiento, para el 2025

que es el horizonte de planificación considerado, ni la aducción de Dos Bocas ni la paralela al embalse Dos Cerritos son necesarias, esto se debe a que esta alternativas son mas costosas que Yacambú y para ese año el sistema aún no estaría en déficit.

**Tabla 7.** Resultados obtenidos. Escenario 1

ALTERNATIVAS	AÑO	Caudales requeridos (m <sup>3</sup> /s)							Diámetro (pulg)	Potencia (HP)
		PER. 1	PER. 2	PER. 3	PER. 4	PER. 5	PER. 6	PER. 7		
1. Aducción Túnel Trasvase Yacambú - Planta de tratamiento propuesta	2009	0	0	3	3	3	2.71	2.806	72	---
2. Aducción Paralela Embalse Dos Cerritos - Planta de tratamiento propuesta	---	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3. Aducción Planta de tratamiento propuesta - Demanda Urbana Barquisimeto - Cabudare	2009	0	0	2.881	2.968	2.881	2.706	2.706	48	---
4. Aducción Embalse Dos Bocas - Demanda Urbana Barquisimeto - Cabudare	---	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5. Aducción existente Embalse Dos Cerritos - Planta de Tratamiento Ciudad de Barquisimeto	2005	3.574	3.825	1.442	1.818	2.069	2.884	3.386	---	---
6. Aducción Planta de Tratamiento Ciudad de Barquisimeto - Demanda Urbana Barquisimeto - Cabudare	2005	2.986	3.248	0.786	1.152	1.414	2.148	2.671	---	---

### 3.3.2. Escenario 2

Debido a la posibilidad de que toda el agua producida por Yacambú sea destinada al riego, se incluyó un escenario donde no se tomara en cuenta a este embalse. En este caso se trabajó con las mismas proyecciones de población y para una dotación de 350 l/p/d. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 8.

Comparando los resultados obtenidos con los del escenario 1, se observa que de igual manera, para esta dotación el sistema estaría en déficit para el 2009, lo que implica el uso de nuevas alternativas.

Entre la aducción paralela de Dos Cerritos y la de Dos Bocas, el modelo selecciona la de Dos Bocas; que a pesar de ser mas costosa, con ella se garantiza el suministro de agua potable hasta el horizonte de planificación junto con la aducción existente.

En conclusión, si esta fuese el crecimiento de población para los próximos años y la dotación fuese en promedio de 350 l/p/d, bien sea con la construcción de la aducción proveniente de Yacambú o con la Aducción de Dos Bocas, el sistema podría satisfacer los requerimientos de la población hasta el 2025.

**Tabla 8.** Resultados obtenidos. Escenario 2

ALTERNATIVAS	AÑO	Caudales requeridos (m <sup>3</sup> /s)							Diámetro (pulg)	Potencia (HP)
		PER. 1	PER. 2	PER. 3	PER. 4	PER. 5	PER. 6	PER. 7		
1. Aducción Paralela Embalse Dos Cerritos - Planta de tratamiento propuesta	---	0	0	0	0	0	0	0	0	---
2. Aducción Planta de tratamiento propuesta - Demanda Urbana Barquisimeto - Cabudare	---	0	0	0	0	0	0	0	0	---
3. Aducción Embalse Dos Bocas - Demanda Urbana Barquisimeto - Cabudare	2009	0	0	1.109	1.713	1.512	1.915	2.117	66	10362
4. Aducción existente Embalse Dos Cerritos - Planta de Tratamiento Ciudad de Barquisimeto	2005	3.574	3.825	3.01	2.696	3.323	3.574	3.95	---	---
5. Aducción Planta de Tratamiento Ciudad de Barquisimeto - Demanda Urbana Barquisimeto - Cabudare	2005	2.986	3.248	2.357	2.043	2.671	2.881	3.3	---	---

#### 4. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una metodología novedosa basada en los algoritmos genéticos para la toma de decisiones aplicada a la selección de proyectos de expansión de sistemas de abastecimiento de agua, la cual es fácilmente programable, y con resultados confiables.

A través de ésta metodología, las alternativas posibles para dar solución al problema no requieren estar definidas completamente sino que el modelo las genera internamente, lo que hace que el problema sea de gran dimensionalidad y en cuyo caso resultan efectivos los algoritmos genéticos.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la aplicación del método al sistema de abastecimiento de Barquisimeto-Cabudare se concluye que es necesaria la ampliación inmediata del sistema si se quiere satisfacer los requerimientos de la población y no entrar en una crisis que conlleve a un racionamiento de agua. La solución más económica a corto plazo es la puesta en funcionamiento de la aducción proveniente de Yacambú, ya que el modelo toma en cuenta solo los costos que faltan por realizar. Evidentemente los costos de la aducción de Dos Bocas es mayor debido a que aún no se ha construido la presa ni las obras importantes. Pero el hecho de que toda el agua de Yacambú sea destinada al riego está latente, razón por la cual hay que pensar en otras alternativas. Se observa que la más viable es Dos Bocas de acuerdo a los resultados del modelo.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- Arocha, S., 1997. Abastecimientos de agua. Teoría y diseño. Ediciones Vega.
- Arroyo, J., 2000. Modelos y algoritmos para la explotación de la generación de sistemas eléctricos centralizados y competitivos mediante algoritmos genéticos y programación lineal entera mixta. Trabajo de Grado. Universidad de Castilla. Ciudad real.
- Azpurua, P., 1975. Recursos hidráulicos y desarrollo. Editorial Tecnos.
- Dirección General de Planificación y Desarrollo. 1976. Modelo matemático de optimización de recursos hidráulicos.
- Grupo Aguas de Valencia, 1999. Estudio del servicio Hidrolara C.A. Tomo I.

- Jaramillo P., Smith R. y Andreú J., 1999. Uso de algoritmos genéticos en la planificación de la electrificación rural considerando pequeños desarrollos hidroeléctricos. Universidad Nacional de Colombia
- Merelo, J. Informática evolutiva: Algoritmos genéticos. URL: <http://geneura.ugr.es/~jmerelo>
- Pulgarin, A., 2001. Aplicación de herramientas de inteligencia computacional en la planificación de recursos. Universidad Nacional de Colombia
- Smith, R., 2000. Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre. Segunda Edición. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.
- Valencia, D., 1982. Optimización y simulación en sistemas de recursos hidráulicos. CIDIAT.