

Modelo de entrega de agua con parámetros heurísticos de ponderación

Abrahán Segundo López Rodríguez

Prof. MSc. Centro de Investigación de Recursos Hídricos (CIDRHI).

Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda. Estado Falcón, Venezuela.

e-mail: abrahamlopez@unefm.edu.ve, abrahamlopez43@gmail.com

RESUMEN

La administración del agua cada día cobra mayor interés a nivel mundial. La utilización de herramientas informáticas permite formular métodos cada vez más complejos para la administración del agua aunque a veces resultan poco prácticos por la carencia de datos y condiciones para su implementación. Por esa razón se ha investigado un modelo de programación lineal para entregas de agua en un sistema complejo mediante coeficientes heurísticos. El modelo propuesto permite optimizar las entregas simultáneas de agua desde un conjunto de fuentes diferentes teniendo en cuenta la variabilidad de su calidad, ubicación espacial y distribución temporal de sus caudales e incorpora la facilidad o dificultad que ofrece el relieve y la disponibilidad energética para la entrega de agua a los centros de demanda.

Palabras clave: programación lineal, abastecimiento de agua, optimización.

Water supply model with heuristic weighing parameters

ABSTRACT

Water management is becoming more interesting every day worldwide. The use of computer tools has allowed the use of complex methods for water management although sometimes they can be impractical due to lack of data and conditions for their implementation. For this reason a linear programming model has been studied for water supply in a complex system by means of heuristic coefficients. The proposed model aims to optimize the simultaneous delivery of water from a set of different sources taking into account the variability of its quality, spatial location and temporal distribution of their flow as well as incorporating the degree of difficulty derived from topographic irregularity and energy availability to deliver water to the consumption centers.

Keywords: linear programming, water supply, optimization.

INTRODUCCIÓN.

La administración del agua es uno de los temas que cada día cobra mayor interés a nivel mundial incluyendo el tema de su distribución espacio temporal y que conlleva a la realización de grandes esfuerzos por parte de los administradores del recurso para realizar las entregas a los diferentes usos que de ella se hacen. La utilización de herramientas informáticas ha permitido la utilización de métodos complejos para la planificación y administración del agua aunque a veces resultan poco prácticos en sistemas con carencia de datos y condiciones para su implementación.

La factibilidad en la entrega de agua desde una o más fuentes de abastecimiento hasta uno o varios puntos de demanda depende de los costos de conducción del caudal requerido. Los costos generales pueden agruparse bajo categorías como: costos relativos al tipo e intensidad del tratamiento para la potabilización y costos asociados a la construcción, operación y mantenimiento de las obras de captación, conducción, almacenamiento y distribución. Otro elemento vital en el planeamiento es el costo de energía necesaria para la conducción y por ello la ubicación relativa de sus componentes es determinante. La ubicación de la planta de tratamiento, las distancias y alturas a vencer y el caudal definen la energía necesaria para la conducción del agua.

La programación lineal es una herramienta útil en la solución de problemas de ingeniería, ya que se puede utilizar para determinar el uso óptimo de los recursos (Ortega et al. 2008). El modelo propuesto, a partir de la programación lineal (PL), permite optimizar las entregas de agua desde un conjunto de fuentes que poseen características diferentes desde el punto de vista de la variabilidad de la calidad del agua, ubicación espacial y distribución temporal de sus caudales, así como la facilidad o dificultad que ofrece el relieve y la disponibilidad energética para su conducción hasta los puntos de demanda, en los que se considera su variación temporal.

FORMULACIÓN DEL MODELO DE ENTREGA

El problema a resolver consiste en distribuir el agua desde un conjunto de fuentes hacia un conjunto de centros de demanda teniendo en cuenta las condiciones señaladas. El primer paso para formular un modelo de PL es construir la función objetivo (FOB) como señala Bueno (1988), donde es necesario desarrollar una medida cuantitativa de la efectividad relativa de cada objetivo propuesto para la toma de decisiones.

López y Berbel (2007) manifiestan que la principal ventaja de la PL es su simplicidad, ya que la información técnica y económica requerida es menos compleja que en otros métodos de programación y los modelos obtenidos son relativamente fáciles de aplicar. Sin embargo, la PL plantea limitaciones a la hora de incluir aspectos dinámicos y de incertidumbre. Jiménez et al. (2007) indican que el problema a resolver puede no ser en principio lineal pero puede convertirse en lineal mediante una serie de adaptaciones.

Para el modelo propuesto se transformaron las restricciones cualitativas en cuantitativas a través de coeficientes heurísticos de comportamiento. Se considera una función objetivo (FOB) que minimiza una especie de “costo” mensual de la entrega de agua potable desde las fuentes disponibles, considerando el tipo de tratamiento para cada fuente y la dificultad relativa para conducir el caudal.

ESQUEMA GENERAL DEL MODELO

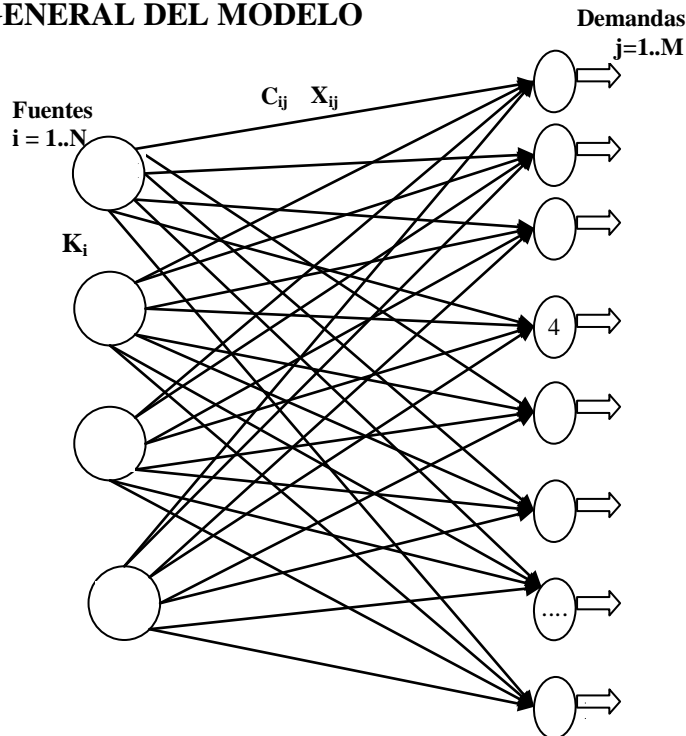


FIGURA 1. Esquema general del modelo.

El enlace entre cada fuente y cada demanda genera una ruta por lo que el número de rutas será igual a N fuentes por M demandas ($N.M$). A nivel de planificación no se cuenta con detalles de diámetros ni materiales de las tuberías, por tanto se plantea un esquema que aproxima la complejidad del tipo y costo de tratamiento mediante un coeficiente que puede ser variable en diferentes épocas del año, así como las condiciones topográficas para las entregas mediante la proposición de coeficientes de penalización por complejidad del recorrido.

El problema de asignación de recursos según Hernández et al. (2007) se plantea sobre una base metodológica suficientemente avalada por la literatura científica, como es la aplicación de un modelo lineal. Para el problema concreto, en cada intervalo de tiempo t , se propone el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$\text{Función objetivo:} \quad \min Z_t = \sum_{i=1}^N K_{it} \sum_{j=1}^M C_{ij} * B_s * X_{ijt} \quad (1)$$

$$\text{Restricciones de desigualdad:} \quad \sum_{j=1}^M X_{ijt} \leq F_{it} \quad \text{para } i = 1..N \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N X_{ijt} \geq D_{jt} \quad \text{para } j = 1..M \quad (3)$$

$$\text{Restricciones de no negatividad:} \quad X_{ijt} \geq 0 \quad (4)$$

donde:

K_{it} : coeficiente de costo de tratamiento en la fuente i para el tiempo t .

C_{ij} : coeficiente de penalización por recorrido desde la fuente i al centro de demanda j .

B_s : costo por m^3 de agua cruda (costo unitario promedio o costo de referencia).

- X_{ij} : entrega en metros cúbicos en el tiempo t desde la fuente i al nodo de demanda j .
 M : número total de nodos de demanda j .
 N : número total de fuentes.
 F_{it} : disponibilidad de la fuente i en el tiempo t .
 D_{jt} : demanda del nodo j en el tiempo t .
 T : número de tiempos en el análisis.

Como quedó indicado, el problema se resuelve tiempo a tiempo (mes a mes en este caso).

COEFICIENTE DE COSTO DE TRATAMIENTO

Cada fuente requiere de varios procesos para potabilizar sus aguas y la intensidad del proceso varía en función de la calidad de la fuente en el tiempo. En tal sentido, en épocas de lluvia se debe aplicar una mayor intensidad de tratamiento por deterioro de la calidad del agua, sobre todo si la fuente es de agua superficial con alta variación en turbidez y carga orgánica. El modelo contempla un coeficiente K_i que permite identificar el tipo de tratamiento de agua que se requiere y puede además considerar la necesidad de variación de la intensidad de dicho tratamiento por periodos de tiempo.

Como primera aproximación a un coeficiente que pondere el tipo de tratamiento para potabilizar el agua, se puede partir de los criterios de clasificación de las aguas establecidos en las normas venezolanas (Decreto 883 1995), donde se categorizan las aguas para uso y consumo humano en el grupo número 1, y a su vez, se sub-clasifican en tres subgrupos de acuerdo con el tipo de tratamiento recomendado para su potabilización.

Los subgrupos son:

- Aguas tipo 1A. Tratamiento de simple desinfección.
- Aguas tipo 1B. Tratamiento convencional.
- Aguas tipo 1C. Tratamiento convencional más tratamiento especial.

Para cada uno de estos tipos de tratamientos se propone asignar un coeficiente o constante de tratamiento K_i , partiendo de la premisa de que un agua que no requiere tratamiento se acerca más a la condición de potabilidad:

- Aguas tipo 1A: $K_i = 1$
- Aguas tipo 1B: $K_i = 2$
- Aguas tipo 1C: $K_i = 3$.

Mediante muestreo de parámetros físicos, químicos y bacteriológicos del agua de la fuente (i), se verifica el cumplimiento de los requisitos de cada parámetro y se asigna un puntaje de cumplimiento para cada uno. Según el puntaje se asigna el coeficiente representativo de la fuente (K_i). Esto se ha programado mediante lista de chequeo en hoja de cálculo Excel. La variación mensual de este coeficiente de calidad puede estimarse según la intensidad que dicho tratamiento requiere, suponiendo la intensidad proporcional al costo del tratamiento necesario en cada mes, así:

$$K_{it} = K_i + \frac{CIT_t}{\sum_{t=1}^T CIT_t} \quad (5)$$

donde:

- K_{it} : Coeficiente de costo de tratamiento para un tiempo (mes) t .
- K_i : Coeficiente de costo de clasificación de la fuente.

CIT_t : Parámetro de calidad que define la intensidad de tratamiento en el tiempo t (en términos de concentración del parámetro o de costos asociados a esa intensidad)

ANÁLISIS DEL PERFIL TOPOGRÁFICO DE LAS CONDUCCIONES

La investigación cuantitativa del relieve es conocida como “morfometría”. Los análisis morfométricos se iniciaron a mediados del siglo XX por Horton en 1945 y poco a poco la cuantificación se ha ido imponiendo en Geomorfología a pesar de posturas escépticas, como la de Pitty 1971 en cuanto a su utilidad. (Cruz y Tames 1983).

Durante los primeros pasos en la investigación cuantitativa del relieve, en los años treinta, se vio que la simple descripción que aparece en los mapas topográficos resultaba insuficiente. Los primeros ensayos, antes de la aparición de los sistemas de información geográfica (SIG), trataron de hacer una clasificación geométrica del relieve, usando el mapa y el perfil topográfico como documentos de trabajo. Este tipo de trabajos, que tuvieron grandes problemas al olvidar los aspectos genéticos del relieve, están en los fundamentos de toda la Geomorfología Cuantitativa moderna, incluso en los métodos de análisis digital de los SIG. (Cruz y Tames 1983).

Un coeficiente que caracterice el perfil topográfico de una conducción permite comparar la complejidad de cada trazado seleccionado para una o varias conducciones contribuyendo con la sistematización de la descripción y clasificación de los sistemas, pudiéndose tratar los datos cuantitativamente para resolver diversos problemas.

La caracterización del perfil bajo esta técnica tiene la utilidad adicional de intentar correlacionar los parámetros morfométricos con el funcionamiento hidráulico de las conducciones en su etapa de planificación. En el desarrollo de ingenierías conceptuales y básicas con escasa información esto permite hacer estimaciones y proyecciones para el futuro sistema de conducciones (fuente – centros de consumo).

Para el estudio de la configuración de las conducciones se propone un análisis morfométrico en la trayectoria de la conducción a proyectar. En tal sentido, el recorrido para una trayectoria pre-seleccionada puede caracterizarse preliminarmente por una serie de parámetros tales como los que se incluyen en la tabla 1. La relación entre los parámetros referidos orienta sobre las características de la conducción y permite una conceptualización en cuanto a los aspectos siguientes:

1. Grado de dificultad para conducir el agua desde la fuente hasta la demanda.
2. Operación por gravedad o por bombeo y complejidad del cálculo hidráulico.
3. Presión estática máxima, tipo de material y clases de tubería, según los requerimientos de presión.

COEFICIENTES DE PENALIZACIÓN POR RECORRIDO

El coeficiente de penalización por recorrido (C_{ij}) se propone como una herramienta preliminar para incluir en el modelo de entregas la dificultad topográfica de transportar el caudal requerido hacia los puntos de demanda. Para la definición y estimación de este coeficiente se ensayaron varios métodos cuyos resultados no fueron satisfactorios en todos los casos, sin embargo, se ensayaron tres modalidades para la ecuación heurística general (6) que arrojaron valores ajustados a los criterios de validación establecidos.

Para la estimación del coeficiente se procede de la siguiente manera:

1. Se construye un modelo digital de elevaciones de la zona en estudio.
2. Con el software Global Mapper v.11.0 se trazan los alineamientos desde puntos específicos considerados como fuente y demanda respectivamente.
3. Se obtienen los perfiles topográficos de los alineamientos seleccionados y se exportan como archivos “.xz”, los cuales son cargados en un libro de hojas de cálculo en Excel.
4. Se programa el algoritmo de cada modalidad propuesta.
5. Se grafican los perfiles.
6. Se identifican automáticamente los parámetros morfométricos propuestos en la tabla 1.
7. Se aplican los algoritmos para cada perfil.
8. Se obtienen el valor del coeficiente para cada perfil y para cada algoritmo.
9. Se evalúan los resultados según los criterios de validación de los coeficientes.
10. Se selecciona la modalidad de mejor desempeño para cada perfil según los criterios de validación (ver más adelante) establecidos para el coeficiente.

Para el desarrollo de los coeficientes de penalización por recorrido, se considera que las conducciones siguen trayectorias superficiales ajustándose a la superficie del terreno natural o enterrada a poca profundidad de manera que no representen cambios significativos entre la rasante de la conducción y la del terreno. Una vez aplicado el modelo y el análisis de las entregas, puede surgir la necesidad de modificar la rasante de la conducción para lograr un coeficiente de entrega favorable.

Método heurístico.

La expresión (6) que sigue, surge de la inspección automatizada del trazado topográfico, de las pruebas preliminares realizadas y de la necesidad de que cada coeficiente de entrega cumpla con los criterios de ponderación establecidos. La notación se explica en la tabla 1.

$$C_{ij} = Abs \left[\left[\frac{H_{max}}{F} + \frac{N_{p+}}{N_{pt}} * \frac{H_{prom+}}{F} + \frac{L_{Hmax}}{Lt} \right] - \left[\frac{H_{min}}{F} + \frac{N_{p-}}{N_{pt}} * \frac{H_{prom-}}{F} + \frac{L_{Hmin}}{Lt} \right] + \frac{N_{pc} * 1000}{Lt} + (fac) \right] \quad (6)$$

Si $D > F$ el valor de $fac = D/F$ y si $D < F$ el valor de $fac = F/D$.

TABLA 1.- Parámetros para la caracterización del perfil topográfico

Parámetro	Significado	Parámetro	Significado
F	Cota de la fuente.	N_{pc}	Número puntos de corte a la cota F en el perfil.
D	Cota del punto de demanda.	H_{Prom+}	Cota promedio por encima nivel de la fuente.
H_{min}	Cota mínima en el perfil.	H_{Prom-}	Cota promedio por debajo nivel de la fuente.
H_{max}	Cota máxima en el perfil.	L_{Hmax}	Distancia de la fuente hasta punto cota máxima.
N_{p+}	Número de puntos con cota $\geq F$.	L_{Hmin}	Distancia de la fuente hasta punto cota mínima.
N_{p-}	Número de puntos con cotas $< F$.	L_T	Long. total perfil desde fuente hasta demanda.
N_{pt}	Número total de puntos en perfil.	C_{ij}	Coefficiente de recorrido, siempre $>$ cero.

Esta ecuación se basa en la inspección de los puntos que definen el perfil topográfico del trazado considerando la cota de la fuente (F) como punto básico de referencia. El análisis considera la influencia de los puntos del perfil que se ubican por encima de la cota de referencia (F) a través de la identificación de la cota máxima del perfil (H_{max}) y su relación con respecto a (F), además se considera la posición de la cota promedio de los puntos por encima de la

referencia (H_{prom}^+) ponderada por el número de puntos por encima de la cota de referencia (N_p^+) entre el número de puntos totales en el perfil (N_{pt}) y por último se ubica la longitud del punto de cota máxima (LH_{max}) entre la longitud total (L_t).

Los términos descritos son sumados para cuantificar el efecto del punto de cota máxima (H_{max}), el efecto de la cantidad de puntos ubicados por encima de la cota (F), y la distancia a la cual se ubica la cota máxima (LH_{max}) desde el origen (cota de la fuente F), todo ello pondera un coeficiente hacia un valor mayor que 1, sin embargo, es necesario contrastar el efecto de estos parámetros con respecto a los parámetros similares ubicados por debajo de la cota de referencia del perfil.

El efecto que sobre los parámetros positivos tienen los puntos relevantes por debajo de la cota de referencia (F) como son: el punto de cota mínima (H_{min}), el número de puntos ubicados por debajo de la cota de referencia (N_p^-) y su promedio (H_{prom}^-) así como la posición de la cota mínima del perfil (LH_{min}), la confrontación de las relaciones positivas y negativas en el perfil, arrojan una posición de dominio de los parámetros positivos o negativos, por otro lado se considera en el coeficiente, el efecto de la sinuosidad del perfil, considerando el número de puntos de cortes que el perfil presenta por cada segmento de 1000 unidades de la longitud total (L_t), se considera este como un factor positivo que incrementa la dificultad del recorrido. Por último el efecto que tiene la ubicación de la cota de la fuente (F) respecto a la cota de demanda (D) denominada como factor (fac), que completa la expresión propuesta basándose en la posición relativa entre la cota de la fuente F y la cota del punto de la demanda D .

De esta ecuación se derivan dos modalidades en su aplicación en función del valor de fac y una tercera retirando el valor absoluto. Estas modalidades, ecuaciones (7), (8) y (9), se ejemplifican y se explican más adelante.

Significado de cada elemento de la ecuación general.

H_{max}/F : Esta relación indica cuántas veces es superior el punto más alto del perfil con respecto a la fuente. En principio da una idea de la altura máxima a vencer y por tanto le confiere una dificultad a la conducción del flujo de agua.

H_{prom+}/F : Tomando como nivel horizontal la cota de la fuente, todos los puntos ubicados por encima de ella representan altura a vencer, por lo que se propone en la fórmula utilizar el promedio de las cotas por encima de la cota de la fuente F dividido entre el nivel F . Para perfiles donde los puntos altos por encima del nivel de la fuente sean pocos, el promedio se acercará a dicho nivel por lo que el impacto será menor que el de un perfil donde existan muchos puntos por encima, de allí la ponderación de este efecto.

L_{Hmax}/L_T : Este factor es una relación de longitudes, partiendo de la fuente se identifica la distancia hasta el punto de cota máxima (L_{Hmax}), y el objetivo del factor es representar cuán lejos o cuán cerca se encuentra el punto de máxima cota desde la fuente. Para un punto cercano a la fuente el factor tiende a cero y para un punto cercano al de demanda el factor tiende a 1. En caso de ser cero indica que el punto de mayor cota es igual a F y si el factor es igual a 1 indica que el punto de cota máxima es igual al punto de entrega del agua. Este factor oscila entre 0 y 1 por lo que se suma en la ecuación en los factores positivos de la misma, de hecho el factor sugiere que para un bombeo cercano a la fuente el valor es menor al que se requiere para bombeo a distancias mayores. Relaciones similares con razonamientos análogos se aplican a los valores por debajo del nivel de la fuente F .

$N_{pc}/L/1000$: El numerador indica el número de veces que el perfil corta puntos de cota igual a F , por cada segmento de 1000 unidades de la longitud total del perfil. Con esto se busca representar la sinuosidad del perfil respecto a su longitud total en relación con la cota de la fuente. Se denomina perfil sinuoso aquel en que la trayectoria del terreno corta dos o más veces la línea horizontal imaginaria de cota igual a la de la fuente.

El parámetro fac (sea D/F o F/D), se considera según la ubicación relativa del punto de demanda respecto al de la fuente, es decir si F es mayor o menor que D y del valor obtenido del coeficiente sin considerar dicho parámetro.

Validación de los coeficientes de entrega.

La aplicación de las modalidades de la ecuación heurística general cumple con los criterios establecidos siguientes:

1. El coeficiente C_{ij} , no debe ser negativo ($C_{ij} > 0$) y por eso se toma el valor absoluto (Abs) del resultado en la aplicación de la expresión general en dos de las modalidades ensayadas.
2. El coeficiente para un perfil cuya entrega sea evidente por gravedad, debe ponderar hacia valores inferiores a aquellos que ponderen entregas para perfiles donde sea necesario utilizar equipos de bombeo.
3. Un perfil perfectamente horizontal requiere de bombeo a fin de vencer la resistencia que opone el conducto al paso del fluido, por tanto su coeficiente será mayor que 1. Es decir, si un perfil predominantemente horizontal requiere de bombeo deberá generar valores del coeficientes mayores que la unidad y nunca menores que ella.
4. Los perfiles sinuosos generan siempre un coeficiente mayor que 1 ya que al aparecer por lo menos una sinuosidad, aparecerá también por lo menos un punto de corte y un H_{max} diferente a la cota de la fuente F .
5. La tercera modalidad no lleva el valor absoluto y se diferencia de la ecuación general de que para perfiles por gravedad da valores negativos y para perfiles sinuosos con $D > F$ y para perfiles no sinuosos donde $D > F$ da valores positivos y siempre mayores que 1 por lo que es aplicable a perfiles $D > F$ donde es necesario bombear.
6. Es importante aclarar que para perfiles sinuosos donde $F > D$ también se requiere bombeo, pero los valores deben ser lógicamente mayores que 1 pero en líneas generales menores que un perfil sinuoso con valores de $D > F$.
7. El resultado de la tercera modalidad de la ecuación utilizando $fac = D/F$ da los mismos valores de la ecuación general, pero para perfiles francos por gravedad dará el mismo valor negativo lo que no es válido para el modelo de entregas. Pero para perfiles sinuosos o bombeo franco dará valores positivos mayores que la unidad.

COEFICIENTES PARA PERFILES REALES SEGÚN MODALIDADES DE LA ECUACIÓN HEURÍSTICA GENERAL

Se presentan varios perfiles reales con diferentes características, se aplican las tres modalidades de la ecuación general (6) con su valor numérico y se selecciona el valor adecuado en cada una. Para ello se muestran las figuras 2,3,4,5,6,7 con los perfiles y el cálculo de las tres modalidades en las tablas 2,3,4,5,6,7, cuyos resultados se analizan más adelante. La fuente está siempre en el extremo izquierdo de los perfiles y la demanda en el extremo derecho.

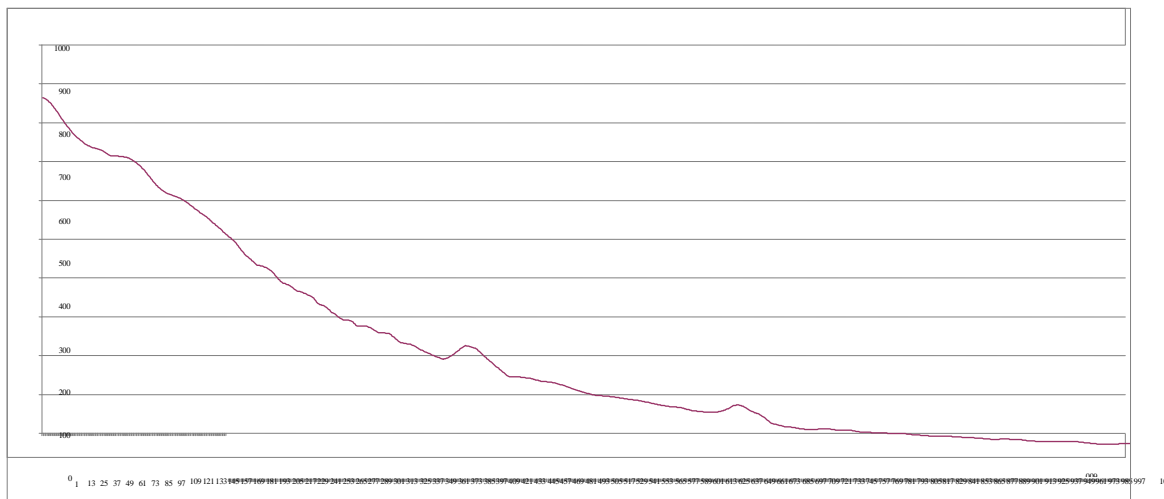


FIGURA 2. Perfil por gravedad con gran desnivel.

TABLA 2. Perfil #1 por gravedad con gran desnivel $F>D$ y $F>$ todo H_i

Modalidad de ecuación	valor C_{ij}	Observaciones
Ecuación general	0.21	valor adecuado
Para perfil sinuoso ($F>D$)	10.51	
Para perfil sinuoso ($D>F$)	-0.21	

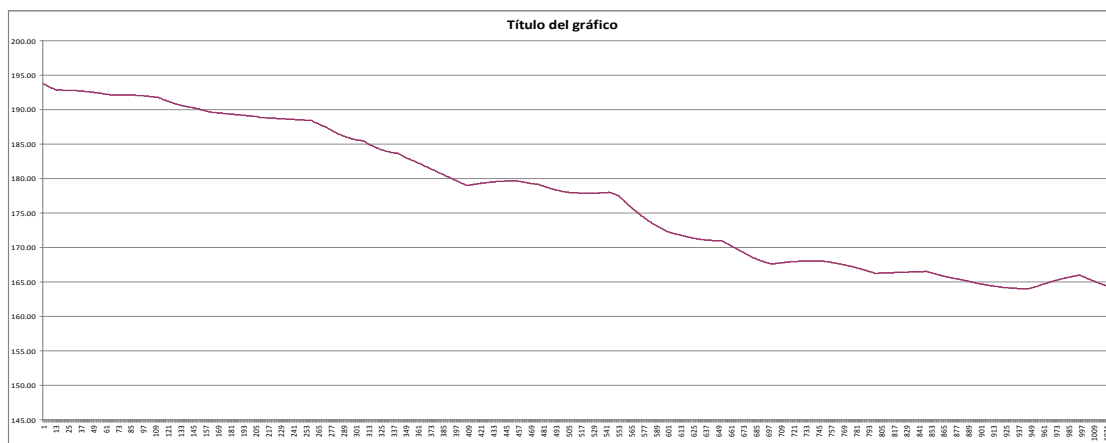


FIGURA 3. Perfil por gravedad con desnivel moderado.

TABLA 3. Perfil #2 por gravedad con desnivel moderado $F>D$ y $F>$ todo H_i

Modalidad de ecuación	valor C_{ij}	Observaciones
Ecuación general	0.41	valor adecuado
Para perfil sinuoso ($F>D$)	0.08	
Para perfil sinuoso ($D>F$)	-0.41	

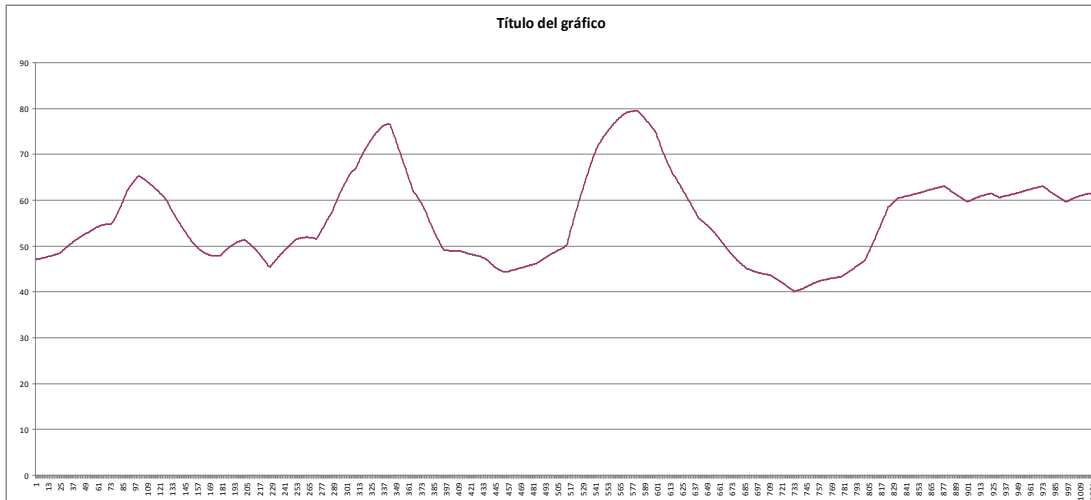


FIGURA 4. Perfil sinuoso con desniveles moderados.

TABLA 4. Perfil # 3 sinuoso con desniveles moderados y $F < D$ y $F < H_i$

Modalidad de ecuación	valor C_{ij}	Observaciones
Ecuación general	2.70	
Para perfil sinuoso ($F > D$)	2.11	
Para perfil sinuoso ($D > F$)	2.70	valor adecuado

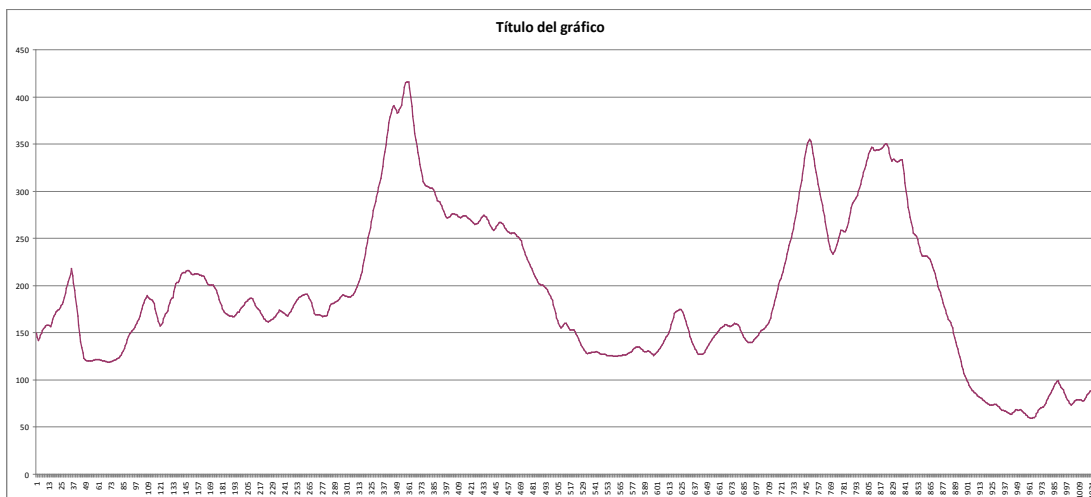


FIGURA 5. Perfil sinuoso con grandes desniveles.

TABLA 5. Perfil # 4 sinuoso con grandes desniveles y $F > D$ y $F < H_i$

Modalidad de ecuación	valor C_{ij}	Observaciones
Ecuación general	3.37	
Para perfil sinuoso ($F > D$)	4.84	valor adecuado
Para perfil sinuoso ($D > F$)	3.37	

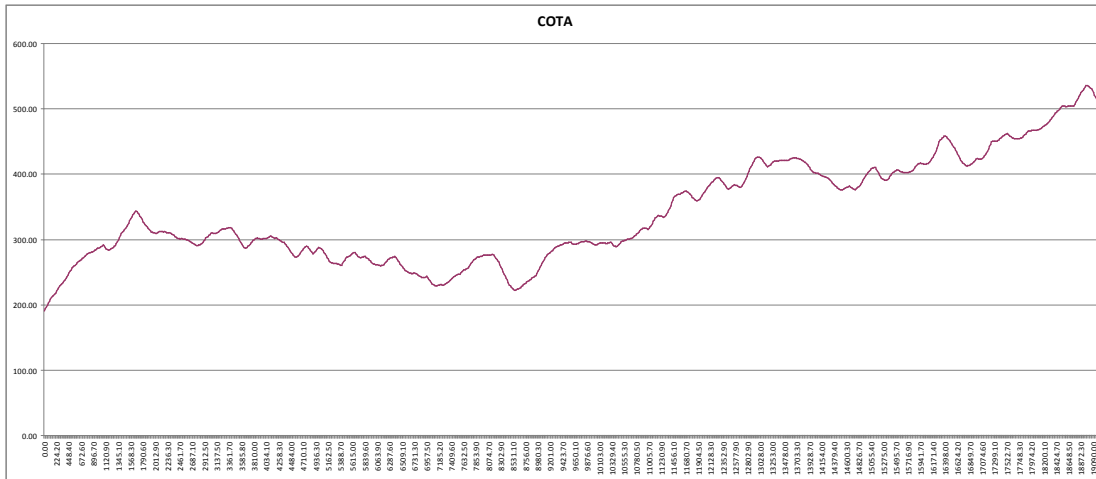


FIGURA 6. Perfil por bombeo franco grandes desniveles.

TABLA 6. Perfil #5 por bombeo franco $F < D$ y $F < \text{todo } H_i$

Modalidad de ecuación	valor C_{ij}	Observaciones
Ecuación general	7.11	valor adecuado
Para perfil sinuoso ($F > D$)	7.30	
Para perfil sinuoso ($D > F$)	7.11	

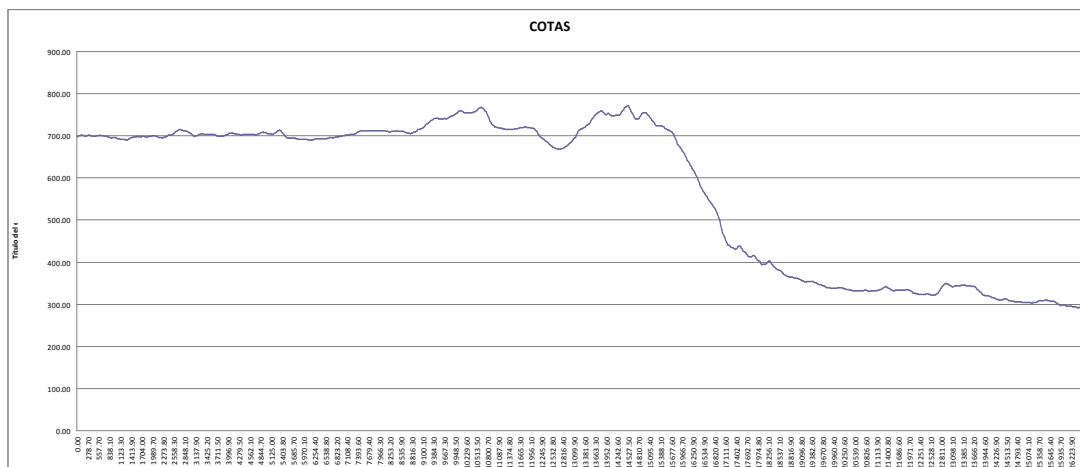


FIGURA 7. Perfil por bombeo franco grandes desniveles.

TABLA 7. Perfil # 6 sinuoso con $F > D$

Modalidad de ecuación	Valor C_{ij}	Observaciones
Ecuación general	1.40	
Para perfil sinuoso ($F > D$)	3.35	valor adecuado
Para perfil sinuoso ($D > F$)	1.40	

A partir de los resultados mostrados se pueden realizar las siguientes observaciones:

1. Para perfiles donde la cota de la fuente (F) es mayor que la cota de demanda (D) y todos los puntos entre la fuente y demanda son menores que el de la fuente, tal como en los perfiles #1 y #2, la modalidad que se adapta a los criterios de validación del coeficiente es la siguiente:

$$C_{ij} = Abs \left[\left[\frac{H_{max}}{F} + \frac{N_{p+}}{N_{pt}} * \frac{H_{prom+}}{F} + \frac{L_{Hmax}}{Lt} \right] - \left[\frac{H_{min}}{F} + \frac{N_{p-}}{N_{pt}} * \frac{H_{prom-}}{F} + \frac{L_{Hmin}}{Lt} \right] + \frac{N_{pc} * 1000}{Lt} + \left(\frac{D}{F} \right) \right] \quad (7)$$

2. Para perfiles sinusos donde el valor de la cota de la fuente (F) es mayor que el punto de la demanda (D) y los puntos intermedios entre F y D se ubican por encima y por debajo de la línea horizontal definida por la cota de la fuente, como en los perfiles #4 y #6, se ajusta la modalidad siguiente:

$$C_{ij} = Abs \left[\left[\frac{H_{max}}{F} + \frac{N_{p+}}{N_{pt}} * \frac{H_{prom+}}{F} + \frac{L_{Hmax}}{Lt} \right] - \left[\frac{H_{min}}{F} + \frac{N_{p-}}{N_{pt}} * \frac{H_{prom-}}{F} + \frac{L_{Hmin}}{Lt} \right] + \frac{N_{pc} * 1000}{Lt} + \left(\frac{F}{D} \right) \right] \quad (8)$$

3. Para perfiles sinusos o no donde el valor de la cota de la fuente (F) es menor que la cota del punto de demanda (D), tal como en los perfiles # 3 y # 5, el coeficiente se podrá aproximar según la tercera modalidad:

$$C_{ij} = \left[\left[\frac{H_{max}}{F} + \frac{N_{p+}}{N_{pt}} * \frac{H_{prom+}}{F} + \frac{L_{Hmax}}{Lt} \right] - \left[\frac{H_{min}}{F} + \frac{N_{p-}}{N_{pt}} * \frac{H_{prom-}}{F} + \frac{L_{Hmin}}{Lt} \right] + \frac{N_{pc} * 1000}{Lt} + (fac) \right] \quad (9)$$

EJEMPLO DE APLICACIÓN.

Se considera un sistema de abastecimiento según el esquema mostrado, que cuenta con dos fuentes de abastecimiento M1 y M2 para satisfacer la demanda de un conjunto de tres poblaciones (usuarios N1, N2 y N3). Se conocen los perfiles topográficos que vincularían a las fuentes con las demandas, así como las características de calidad de agua de cada una de las fuentes. Los datos de disponibilidades mínimas mensuales de cada fuente, las demandas máximas mensuales y los coeficientes de calidad y recorrido se muestran en las tablas 8,9,10, y 11. Además de ello se supone un costo de referencia de 1 Bs/m³.

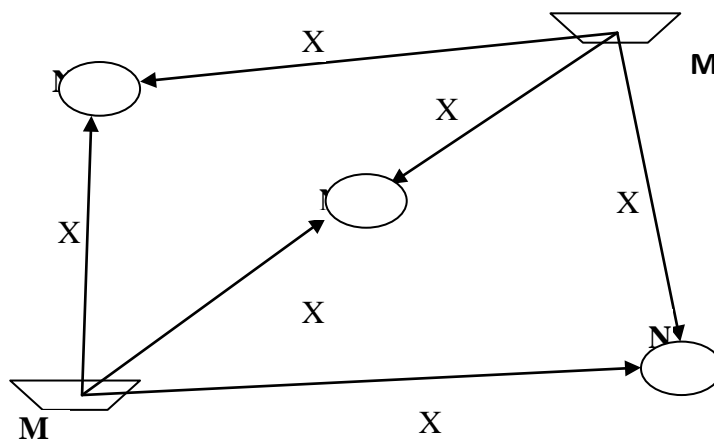


FIGURA 8. Esquema del ejemplo sistema de entregas de agua.

Tabla 8. Rendimientos mínimos de las fuentes en m³/mes

mes	fuelle M1	fuelle M2
Enero	25	20
Febrero	22	20
Marzo	15	18
Abril	12	17
Mayo	15	15
Junio	14	13
Julio	19	12
Agosto	17	17
Septiembre	18	19
Octubre	22	19
Noviembre	24	21
Diciembre	25	22

Tabla 9.- Demandas máximas diarias en los centros de consumo en m³/mes

mes	usuario N1	usuario N2	usuario N3
Enero	11	5	10
Febrero	10	7	14
Marzo	8	9	11
Abril	6	6	9
Mayo	7	5	7
Junio	9	7	10
Julio	10	8	12
Agosto	13	4	14
Septiembre	14	8	11
Octubre	16	6	9
Noviembre	12	4	7
Diciembre	10	3	6

Tabla 10. Coeficientes de costo de tratamiento

Tratamiento	K _{ener}	K _{feb}	K _{marz}	K _{abr}	K _{mav}	K _{jun}	K _{jul}	K _{ago}	K _{sept}	K _{octb}	K _{nov}	K _{dic}
Fuente M1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
Fuente M2	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	3	3

Tabla 11. Coeficientes de penalización por dificultad de recorrido

Ruta M _i - N _j	Perfil	C _{ij}
M1-N1	#1	0,21
M1-N2	#6	3,35
M1-N3	#5	7,11
M2-N1	#4	4,84
M2-N2	#3	2,7
M2-N3	#2	0,41

Resultados.

La tabla 12 muestra los resultados del modelo para corridas mes por mes con el algoritmo de PL programado en Matlab R 2009a. Se han repetido las demandas en las columnas de la derecha.

Tabla 12.- Resultados ordenados en entregas por fuente

Corrida	Entrega /mes	fuente 1			fuente 2			FOB (Bs/mes)	demandas		
		X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃		N1	N2	N3
1	Enero	11	0	0	0	5	10	39,82	11	5	10
2	Febrero	10	1	0	0	6	14	54,78	10	7	14
3	Marzo	8	2	0	0	7	11	63,58	8	9	11
4	Abril	6	6	0	0	0	9	53,79	6	6	9
5	Mayo	7	5	0	0	0	7	26,83	7	5	7
6	Junio	9	5	0	0	2	10	47,14	9	7	10
7	Julio	10	8	0	0	0	12	38,74	10	8	12
8	Agosto	13	4	0	0	0	14	27,61	13	4	14
9	Septiembre	14	0	0	0	8	11	58,10	14	8	11
10	Octubre	16	0	0	0	6	9	46,50	16	6	9
11	Noviembre	12	4	0	0	0	7	40,45	12	4	7
12	Diciembre	10	3	0	0	0	6	31,68	10	3	6

Análisis de los resultados.

Los resultados obtenidos son compatibles con lo expresado por el modelo, lo cual se puede evidenciar en situaciones como las siguientes:

1. Para cada mes analizado, se evidencia que la demanda del usuario 1 siempre es satisfecha a partir de la fuente 1 por el recorrido M1-N1 y es lógico porque dicho recorrido según el coeficiente C_{11} es por gravedad y los coeficientes de tratamiento K_1 aunque son favorables parece que favorecieran en mayor medida el hecho de un bajo coeficiente C_{ij} .
2. Para cada mes analizado, el usuario 3 recibe todo el abasto de la fuente 2 por la ruta M2-N3, fundamentalmente por la misma razón del análisis anterior y básicamente es que el coeficiente C_{23} es el segundo menor coeficiente y representa a una conducción que puede darse por gravedad según el perfil topográfico analizado.
3. El usuario 2 recibe aportes tanto de la fuente 1 como de la fuente 2, se puede notar que aunque el coeficiente topográfico es menor en la ruta M2-N2, el mayor número de aportes los recibe de la fuente 1 en vez de la fuente 2, por lo que acá se demuestra que no es suficiente que la topografía sea favorable para la entrega, sino que la calidad de la fuente juega papel importante ya que los valores de K_1 son menores o iguales que las fluctuaciones que presenta K_2 a lo largo del periodo analizado.
4. Se comprueba que el costo mínimo de la solución para la entrega de agua se da en el mes de mayo y que en el modelo, si se introduce un costo promedio o de referencia (B_s) para el metro cúbico de agua cruda, los resultados indicarían una tendencia aproximada de los costos mínimos a causar para la entrega óptima del recurso, lo que permite delinear el programa de explotación de las fuentes y de operación del sistema de esta manera.

CONCLUSIONES

El modelo planteado reproduce las tendencias lógicas de entregas simultáneas en un sistema multi-fuente con múltiples demandas, lo que permite optimizar las entregas bajo el esquema de coeficientes heurísticos evaluados.

Las características cualitativas de facilidad o dificultad que opone el relieve del trazado de la ruta de las entregas, pueden expresarse cuantitativamente a través de las expresiones y coeficientes heurísticos propuestos y reproducen un comportamiento adecuado del modelo.

El modelo es aplicable a la solución del problema de asignación de las entregas de agua a nivel de planificación y explotación simultánea de varias fuentes de abastecimiento de manera óptima.

No se requieren datos precisos de costos para poder indicar la tendencia adecuada en la explotación de las fuentes y sienta las bases para la elaboración de un esquema básico de operación del sistema.

REFERENCIAS.

- Bueno, G.** (1988). Introducción a la programación lineal y al análisis de sensibilidad. 1ª ed., Editorial Trillas. México, D.F.
- Cruz, J. y Tames, P.** (1983). “Morfometría”. Departamento de Geomorfología y Geotécnica. Facultad de Ciencias. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias Naturales. Facultad de Ciencias Químicas de San Sebastián. Universidad del País Vasco.
- Decreto 883** (1995).” Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos”. Gaceta Oficial Nro. 5021. Extraordinario del 18 de diciembre de 1995. República de Venezuela.
- Jiménez, M.A.; Martínez, F.; Arviza, J.; Manzano, J.** (2007). “Herramientas para el diseño agronómico y la gestión de subunidades de riego localizado en una comunidad de regantes” XXV Congreso Nacional de Riegos, Pamplona. España. Mayo 15-17.
- Hernández, F.; Mocholi, M.; Sala, R.** (2007). “Modelo para la gestión óptima de la oferta de agua en un área territorial”. XIV Jornadas de ASEPUMA y II Encuentro Internacional Facultad de Economía. Universitat de Valencia. España. pp. 3 – 5.
- López, M. J. y Berbel, J.** (2007) “Una revisión de metodologías de estimación de la demanda del agua de riego.” Departamento de Economía, Sociología y Política Agrarias. Universidad de Córdoba.
- Ortega, D.; Mejía, E.; Palacios, E.; Rendón, L.** (2008). “Aplicación de la programación lineal para la determinación de planes óptimos de cultivos en los distritos de riego”. En: Pérez, S.L. et al. (editores). La ingeniería agrícola: motor del desarrollo de la agricultura mexicana. Universidad Autónoma Chapingo. México. pp. 574-586.