

Análisis jerárquico de descomposición y optimización multinivel. Aplicación a la planificación y gestión conjunta de sistemas complejos de recursos hidráulicos superficiales y subterráneos (*)

Por JUAN FRANCISCO FERNANDEZ BONO

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica. Valencia

Este artículo presenta la metodología adecuada para el uso de caudales no utilizados en canales, mediante su vertido en cauces temporales o barrancos (zonas de recarga), infiltración hasta los acuíferos adyacentes y posterior reutilización de dichos caudales mediante bombeo, ya sea de nuevo al canal o directamente al punto de destino, de modo que se consiga utilizar las redes de canales en condiciones de explotación más eficaces, lo que lleva consigo menores necesidades en cuanto a la capacidad de las conducciones, así como una reserva de agua para períodos secos, con las consiguientes ventajas económicas que ello comporta.

La metodología encontrada se ha aplicado al trasvase Ebro-Mijares, a través del cual se ha contrastado con datos numéricos la operatividad del modelo y se han obtenido las conclusiones y recomendaciones.

INTRODUCCION

El tratamiento de la gestión conjunta de recursos hidráulicos tiene sus orígenes en 1962 cuando Maass, Hufschmidt y el resto de su equipo de la Universidad de Harvard, iniciaron con un informe el desarrollo de una nueva metodología para el planeamiento y diseño de sistemas complejos de recursos hidráulicos.

Ello dio lugar al desarrollo de la Ingeniería de sistemas como ciencia y también como arte, para suministrar la necesaria racionalización a las partes importantes de la problemática de los recursos hidráulicos, así como el desarrollo de diversas técnicas para su optimización:

- Programación lineal (entera, paramétrica, mixta).
- Programación no lineal (cuadrática, técnicas de gradiente).
- Programación dinámica.

Ahora bien, el planeamiento y gestión del uso conjunto óptimo de sistemas de recursos hidráulicos a gran escala, requieren esfuerzos en

la modelación y optimización que superan las técnicas comentadas anteriormente y ello debido a la alta dimensionalidad y complejidad (no linealidad) de las ecuaciones de interacción entre variables, lo cual se ha visto superado con la aparición y desarrollo de la herramienta computacional de la descomposición jerárquica y optimización multinivel, en 1877 por Y. Haimes, que viene a solucionar el dilema de tener que recurrir a groseras simplificaciones para resolver el problema.

2. CONCEPTO DE METODO JERARQUICO

El método jerárquico de descomposición y optimización multinivel se basa en la descomposición de sistemas complejos a gran escala y consiguiente optimización de los subsistemas independizados. Ello capacita al analista de sistemas para comprender el comportamiento de los subsistemas en un nivel inferior y transmitir la información obtenida a otros subsistemas en un nivel superior.

La descomposición se consigue introduciendo en el sistema nuevas variables, llamadas *pseu-*

*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán dirigirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de septiembre 1985.

tema y compaginando la adecuación a la realidad con la economía computacional.

Tras este comentario general del contenido de la investigación, pasemos a abordar con más detalle esta nueva aproximación al problema del uso conjunto óptimo canal-acuífero a partir de un modelo de planificación y gestión caracterizado por el establecimiento de una función objetivo matemática y un procedimiento formal de búsqueda, para llegar a encontrar aquellos valores de las variables de decisión que optimizan dicha función objetivo y dando importancia capital a las ecuaciones que representan la esencia física del sistema.

El modelo se ha conceptualizado en los siguientes puntos:

- Misión del canal... Satisfacer las demandas de regadío de N zonas situadas secuencialmente.
- Cada usuario está especializado en el cultivo específico que maximiza sus ingresos netos.
- Cada área dispone al menos de una zona de recarga artificial a un acuífero subyacente, así como de pozos de bombeo para riego alternativo.
- Objetivo primario... Maximización del beneficio de cada usuario.
- Existe un organismo regional que coordina las distintas áreas para la obtención del óptimo global.
- Por ello, el objetivo primario se pospone ante el siguiente objetivo global... Maximización del beneficio neto regional a lo largo de la vida económica de la obra.
- Se discretiza la evolución del sistema mes a mes.
- Modelo determinístico.
- Las cantidades de cosecha producida no afectan al valor medio de mercado.
- El beneficio económico de cada siembra es proporcional al área.
- El período de construcción se sitúa dentro del primer año, para no entrar en la problemática de los intereses intercalares.

Nuestro primer problema es el *establecimiento del conjunto de restricciones físicas del sistema* que deben ser satisfechas y que pasamos a enumerar a continuación:

Límite superior del abastecimiento de agua superficial en cabecera y en cada tramo del canal.

$$q_{0,t} \leq Q_0, \forall t$$

$$q_{0,t} \leq DP_t, \forall t$$

$$q_{i,t} \leq Q_i, \forall i, t$$

Capacidad de bombeo:

$$b_{i,t} \leq B_i, \forall i, t$$

Límite de superficie regable:

$$S_i \leq S_{Max,i}, \forall i$$

$$SB_i \leq SB_{Max,i}, \forall i$$

Restricciones de no negatividad:

$$v_{i,t} \geq 0, \forall i, t \dots b_{i,t} \geq 0, \forall i, t$$

$$B_i \geq 0, \forall i \dots q_{0,t} \geq 0, \forall t$$

$$q_{i,t} \geq 0, \forall i, t \dots \sum S_i \geq 0, \forall i$$

Restricciones de continuidad:

Para el subsistema superficial, la ecuación de estado (tramo i , período t) es, según la figura 1.

$$q_{i+1,t} = q_{i,t} + b_{i,t} - v_{i,t} - \alpha_{i,t} \sum S_i, \forall i, t$$

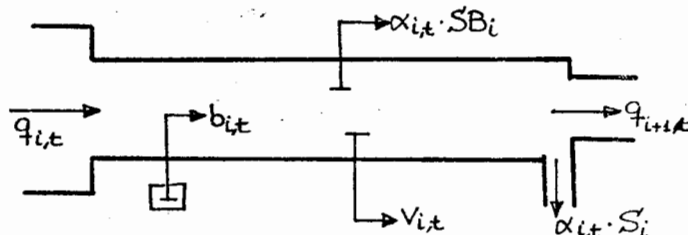


Figura 1.

que indica que el caudal saliente del tramo i (entrante en el $i + 1$) es igual al entrante desde el tramo anterior, más el bombeado al tramo i desde el acuífero subyacente al área S_i , menos el vertido al barranco para recarga del acuífero subyacente, menos el derivado para riego del total de área regable.

La ecuación de estado del subsistema subterráneo nos indica las alturas de bombeo en ca-

da intervalo espacial y temporal:

$$\begin{aligned}
 h_{i,t} = & h_{o,i} - r_{i,t} \left[\delta_i(0) + \sum_{n=1}^{\infty} \delta_i(12n) \right] - \\
 & - r_{i,t-1} \left[\delta_i(1) + \sum_{n=1}^{\infty} \delta_i(13n) \right] - \dots \\
 & \dots - r_{i,t-11} \left[\delta_i(11) + \sum_{n=1}^{\infty} \delta_i(23n) \right] + \\
 & b_{i,t} \left[\delta_i(0) + \sum_{n=1}^{\infty} \delta'_i(12n) \right] + \\
 & + b_{i,t-1} \left[\delta'_i(1) + \sum_{n=1}^{\infty} \delta'_i(13n) \right] + \dots \\
 & \dots + b_{i,t-11} \left[\delta'_i(11) + \sum_{n=1}^{\infty} \delta'_i(23n) \right] + \\
 & + \Delta H_{i,t} - RN_{i,t}
 \end{aligned}$$

donde:

- $h_{i,t}$ es la altura de bombeo en el área i , período t .
- $h_{o,i}$ es idem desde el acuífero en estado estacionario inicial.

El primer bloque de términos negativos representa el ascenso en el nivel freático debido a la secuencia de recargas que tienen lugar en el mismo intervalo de tiempo mensual, dentro de los infinitos periodos anuales que componen la historia del programa periódico de riego del área en cuestión.

$r_{i,t}$ es el caudal de recarga que llega realmente al acuífero en el tramo i .

Los corchetes representan la serie infinita de sumandos correspondientes a los coeficientes de influencia de todos los meses idénticos de cada año, englobados en unos Kernels ficticios.

Las funciones de los Kernels ficticios pueden llegar a expresarse como diferencia de integrales conocidas como funciones pozo o de THEIS, que están tabuladas y a mano de cualquier hidrogeólogo.

$$\delta_i(t) = \int_0^1 \frac{e^{-\frac{\phi}{4} \frac{d_i^2}{T_s} (t-\nu)}}{4\pi T_s (t-\nu)} d\nu, \quad \forall i, \quad$$

$$f_1(n) = \frac{\phi d_i^2}{4T_s An}, \quad f_o(n) = \frac{\phi d_i^2}{4T_s An}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=1}^{\infty} \delta_i(An) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{4\pi T_s} \int_{f_o(n)}^{f_1(n)} \frac{e^{-x}}{X} dX = \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{4\pi T_s} \left\{ \int_{f_o(n)}^{\infty} \frac{e^{-x}}{X} dX - \int_{f_1(n)}^{\infty} \frac{e^{-x}}{X} dX \right\}
 \end{aligned}$$

Una explicación análoga cabe reseñar con el bloque de términos positivos debidos a los bombeos.

El término $\Delta H_{i,t}$ representa la variación del nivel freático debida a la interacción entre acuíferos. Además, a partir de las necesidades de riego, compuestas con la EVT estimada y la precipitación esperada, se obtiene una cantidad que laminada por el terreno originará unos ascensos reales del nivel freático (n.f.) representados por $RN_{i,t}$.

A partir de la velocidad de recarga al n.f. obtenida por Bazaraa, se ha llegado a plantear una ecuación recurrente para la obtención de las recargas al mismo.

Así, los caudales de recarga artificial en las zonas al efecto son:

$$\begin{aligned}
 r_{i,t} = & \left[\frac{D}{D + \bar{K}} \right] r_{i,t-1} + \left[\frac{\bar{K}}{D + \bar{K}} \right] \cdot \\
 & \cdot \left\{ \frac{f(\Theta_L)}{\Theta_L - \Theta_r} [V_{i,t} - V_{i,t-1}] + V_{i,t-1} \right\}
 \end{aligned}$$

$$\text{con: } D = \delta + \frac{\mu_r(\Theta_L)}{S_r} \cdot \frac{V_{i,t}}{\Theta_L - \Theta_r}$$

y la recarga natural, aproximadamente uniformemente repartida en toda la extensión del área de riego:

$$\begin{aligned}
 RN_{i,t} = & \left[\frac{DN}{DN + \bar{K}} \right] RN_{i,t-1} + \left[\frac{\bar{K}}{DN + \bar{K}} \right] \cdot \\
 & \cdot \left\{ \frac{f(\Theta_L)}{\Theta_L - \Theta_r} [IN_{i,t} - IN_{i,t-1}] + IN_{i,t-1} \right\}
 \end{aligned}$$

$$\text{con: } DN = \delta + \mu_r(\Theta_L) \cdot \frac{IN_{i,t}}{\Theta_L - \Theta_r}$$

$$IN_{i,t} = \alpha_{i,t} \frac{\sum S_i}{STOT} - EVT_{i,t} + P_{i,t}, \quad \forall i, t$$

La forma y complejidad de las restricciones físicas obtenidas va a influir decisivamente en la función objetivo a plantear y en la técnica de programación a emplear.

De las diversas líneas de investigación que se proponen en J. Fernandez Bono (1983), vamos a desarrollar aquí la más general, es decir, el caso de «Canal por construir. Obtención de la capacidad óptima de diseño para maximizar el beneficio, con unos topes máximos de terreno de regadío».

La *Función objetivo global* establecida es la maximización del beneficio neto regional a lo largo de la vida económica de la obra, o sea:

$$\text{Max BN} = \text{Max} \sum_i^{\infty} \text{BN}_i = \text{Max} \left[\text{BF} - \sum_{p=1}^{\infty} C_p \right]$$

$$\text{BF} = \sum_{n=1}^{\text{V.E.}} (1+r)^{-n} \cdot \sum_{i=1}^N b_i \cdot S_i \quad [1]$$

donde

- BF representa los beneficios obtenidos por el riego de las áreas dadas, que la ecuación (1) expresa como el beneficio acumulado, en pesetas del año primero.
- C_p representa el conjunto de costos asociados al riego, que se indican a continuación.

- Construcción del canal:

$$C_1 = \sum_{i=1}^N (m_1 \cdot Q_i^2 + m_2 \cdot Q_i + m_3) \cdot L_i$$

- Operación y mantenimiento del canal:

$$C_2 = \sum_{n=1}^{\text{VE}} (1+r)^{-n} \cdot \sum_{i=1}^N C_{\text{opc}_i}$$

- Instalación del sistema de bombeo al canal:

$$C_3 = \sum_m (1+r)^{-m} \cdot \sum_{i=1}^N (k_1 \cdot B_i^2 + k_2 \cdot B_i + k_3)$$

- Instalación sistema de bombeo desde el canal a cotas superiores:

$$C_4 = \sum_m (1+r)^{-m} \cdot \sum_{i=1}^N (k'_1 \cdot B_i'^2 + k'_2 \cdot B_i' + k'_3)$$

- Energía de bombeo acuífero-canal:

$$C_5 = \sum_{n=1}^{\text{VE}} (1+r)^{-n} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\sum_{t=1}^{12} h_{i,t} \cdot b_{i,t} \right) \cdot C_e \quad [2]$$

- Energía de bombeo canal-zona regable a cotas superiores.

$$C_6 = \sum_{n=1}^{\text{VE}} (1+r)^{-n} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\sum_{t=1}^{12} \alpha_{i,t} \cdot \text{SB}_i \cdot h'_{i,t} \right) \cdot C_e$$

- Mantenimiento, reparación y vigilancia del sistema de bombeo:

$$C_7 = \sum_{n=1}^{\text{VE}} (1+r)^{-n} \cdot \sum_{i=1}^N C_{\text{mrvi}}$$

- Abastecimiento superficial en cabecera:

$$C_8 = \sum_{n=1}^{\text{VE}} (1+r)^{-n} \cdot \sum_{t=1}^{12} C_{w,t} \cdot q_{o,t}$$

donde:

- (r) es la tasa de interés anual.
- (n) es el número de años.
- $m_{1,2,3}$ son los coeficientes de la función económica que da el costo por unidad de longitud del canal, en función de la capacidad máxima del tramo.
- (VE) es la vida económica de la obra.
- (m) indica los años en que se realiza el gasto de una nueva instalación de bombeo.
- $K, K'_{1,2,3}$ son los coeficientes de la función económica de la capacidad de bombeo.
- (N) es el número total de áreas.

Las distintas funciones costo que aparecen se han establecido como funciones cuadráticas de las variables de decisión correspondientes, ya que las ecuaciones que constituyen la esencia física del sistema son cuadráticas y las imprecisiones inevitables en la toma de datos, determinación de valores medios de variables aleatorias, etc., no aconsejan una complejidad mayor en dichas funciones costo.

En cuanto a las *restricciones de n.f.*, se han propuesto esquemas de funcionamiento basados asimismo en el hallazgo de las restricciones físicas cuadráticas y por ello se ha adaptado la ecuación del n.f. a la de una parábola; así, por ejemplo para el caso de un acuífero costero, el proceso de obtención de los límites citados puede seguirse en la figura 2.

La recarga límite al n.f. será tal que en la línea de pozos costeros se alcance el nivel máximo permitido para evitar el encharcamiento en las raíces de los cultivos.

Siendo R_{Lim} la aportación superficial que da lugar a esa elevación máxima permitida, podremos conocer RNFL0 y por tanto la profundidad mínima en los pozos de observación, PMINO.

En cuanto al límite máximo de explotación del acuífero se entiende cuando en los pozos costeros empiece la salinización. Para que ello no

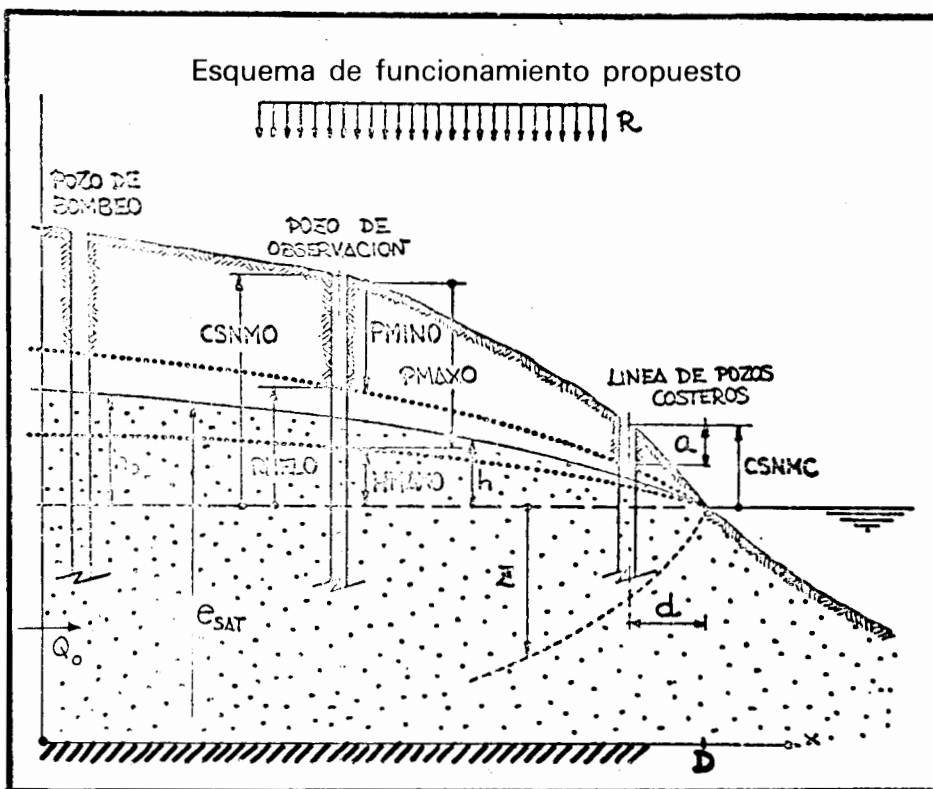
ocurra se toma como tope equivalente a salinización incipiente el que la profundidad de la interfaz se encuentre a 1.15 veces la profundidad media de los pozos costeros.

Conocida la correspondencia entre z y h y mediante expresiones análogas a las anteriores, obtendremos la profundidad máxima a la que debe descender el n.f. en los pozos de observación.

Con ambos límites tenemos la doble desigualdad buscada.

Tras un balance de la complejidad que puede alcanzar el modelo incluso con la ayuda del ordenador, debido fundamentalmente al término (2), que incorpora a la programación la historia de los acuíferos, lo que lleva consigo el manejo de 276 productos cruzados de variables de decisión por área de riego, se encuadra aquél

— Límites de variación del nivel freático.



$$PMINO_i \leq h_{o,i,t} \leq PMAVO_i \quad \forall i, t$$

Figura 2.

$$h_o^2 - h^2 = \frac{2 \cdot Q_o \cdot D + R \cdot D^2}{K(1 + 1/\beta)}$$

$$RNFL = \sqrt{\frac{2 \cdot Q_o \cdot D + R_{Lim} \cdot D^2}{K(1 + 1/\beta)}}$$

$$R_{Lim} = \frac{K(1 + \frac{1}{\beta})(CSNMC - a)^2 - 2 \cdot d \cdot Q_o}{2 \cdot d \cdot D - d^2}$$

$$PMINO = CSNMO - RNFL0$$

$$h = \beta \cdot z$$

$$z_c = \frac{P_{pozos} - CSNMC}{1.15}$$

$$z_{Lim} = \sqrt{\frac{2 \cdot Q_o \cdot D + R_{Lim} \cdot D^2}{K\beta(1 + \beta)}}$$

$$R_{Lim} = \frac{z_c^2 \cdot K \cdot \beta(1 + \beta) - 2 \cdot d \cdot Q_o}{2 \cdot d \cdot D - d^2}$$

$$PMAVO = CSNMO - \beta \cdot z_{Lim}$$

dentro de lo que se ha venido en llamar problema «a gran escala», para el que las técnicas habituales de programación dejan de ser efectivas aisladamente. El *método jerárquico de descomposición y optimización multinivel* viene a solucionar el dilema de tener que recurrir a groseras simplificaciones para resolver el problema.

Así pues, el modelo aquí establecido se formula y resuelve en dos niveles mediante un proceso iterativo (ver figura 3).

El primer nivel comprende N programas de optimización correspondientes a los N usuarios de la región. Cada problema de optimización particular es considerado para cada usuario como la maximización de su beneficio neto (representado por la función Lagrangiano, LG_i), aunque para ejecutar su política óptima, el agricul-

tor necesita información acerca de variables y parámetros que no están exclusivamente bajo su control. Esta información está disponible en el segundo nivel, que la suministra al primer nivel en un proceso iterativo hasta que se consigue el óptimo global.

La metodología propuesta se ha aplicado a un caso real lo suficientemente complejo y centrado en el tema de la planificación y gestión conjunta óptima canal-acuífero dentro de la región valenciana, como es el trasvase Ebro-Mijares.

Es evidente su importancia y adecuación a la presente investigación por cuanto que presenta un canal inconcluso, con lo que permite estudiar si su capacidad es adecuada para abastecer un máximo de zona regable posible, o bien qué área es posible regar con esa capacidad en origen. Se trata, pues, de integrar mediante el uso conjunto este canal proyectado con los acuíferos subyacentes a las zonas de riego (Ebro-Sur, Plana de Vinaroz-Peñíscola, Plana de Torreblanca-Oropesa, Plana de Castellón) con problemas de sobreexplotación por zonas, intrusión salina, nitratos, ...

Con la formulación planteada y los datos obtenidos se ha confeccionado un programa de ordenador que puede utilizarse como base para la optimización de la planificación y gestión conjunta de sistemas canal-acuíferos a gran escala, cuyo organigrama general se presenta en la figura 4. Según la complejidad del tratamiento del sistema, deberán adaptarse las subrutinas existentes o crear nuevas, pero el organigrama propuesto no perderá su eficacia.

En nuestro caso piloto, para que se verifique la optimización subregional se han impuesto unos valores para las pseudovariables de coordinación, que sustituyen a los caudales salientes del área en cuestión, que se tendrán que optimizar globalmente en el segundo nivel de la jerarquía del proceso.

Se inicia con la lectura e impresión de los valores iniciales de las pseudovariables de coordinación (p. de c.) así como las características de cada área consideradas como más razona-

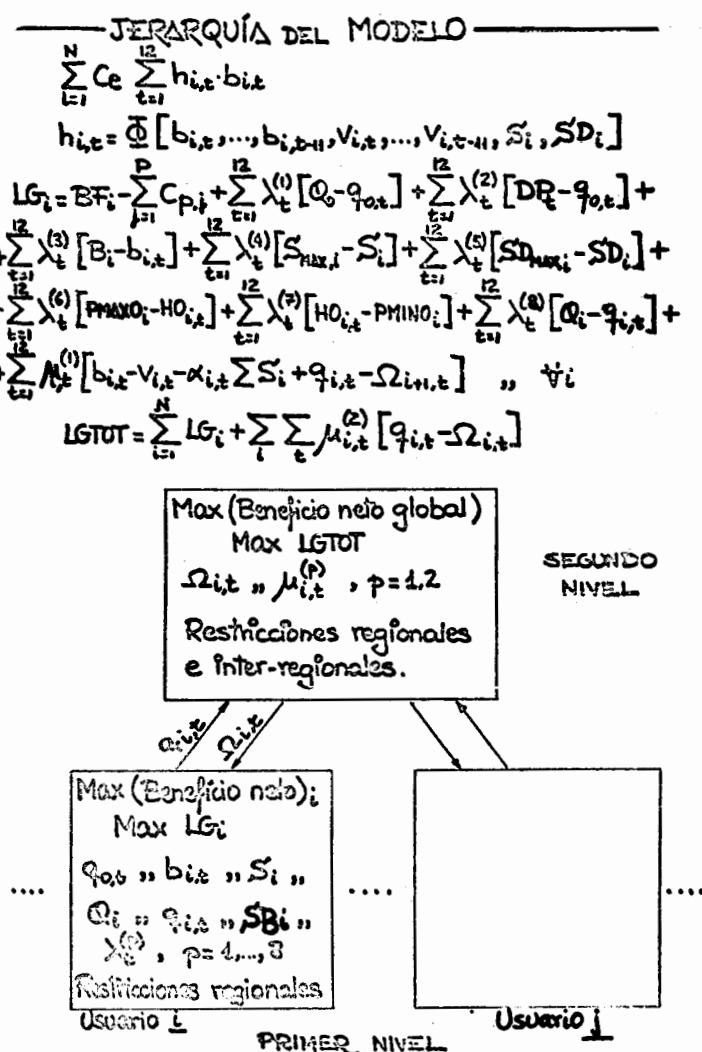


Figura 3.

ORGANIGRAMA GENERAL

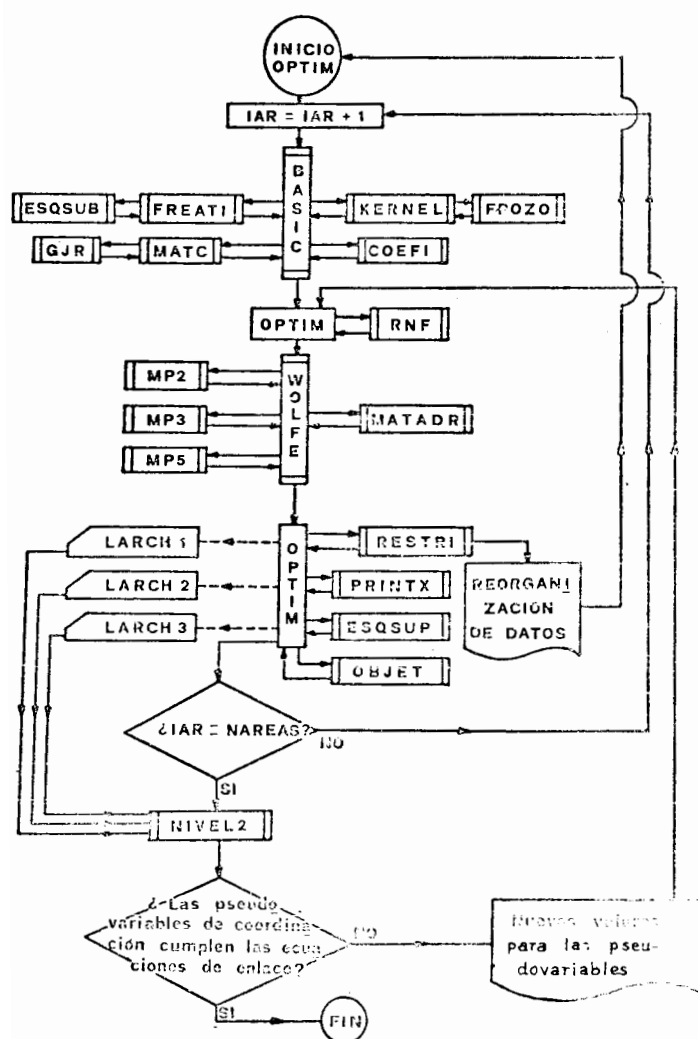


Figura 4.

bles a partir de la información que se ha manejado.

Para determinar los coeficientes de vertido y bombeo se utiliza la subrutina Basic que necesita a su vez las Kernel, Fpozo, Freati y Esqsub. Con la subrutina Matc se organizan los coeficientes de la matriz simétrica de la forma cuadrática de la función objetivo subregional y se devuelve el control al programa principal para la organización de las restricciones de la igualdad y los términos lineales de la función objetivo subregional, adecuadamente para su optimización por el método de Wolfe, del que se han tomado las subrutinas Wolfe, Matadr, Mp2, Mp3 y Mp5.

La subrutina Restri comprueba las restriccio-

nes de desigualdad. Si alguna de ellas es activa, el programa lo indica para permitir su incorporación a las restricciones de igualdad mediante la subrutina RNF.

En este punto los resultados óptimos del área en cuestión se almacenan en un archivo temporal para su utilización por el nivel superior, repitiéndose el ciclo para cada una de las áreas en estudio. Cuando termina el bucle sobre las áreas, tenemos las variables de decisión óptimas subregionales almacenadas en sendos archivos temporales que, tras ser rebobinados, son utilizados por la subrutina Nivel2 cuya misión es obtener en el nivel superior de la jerarquía de decisiones, los valores de las p. de c. que deben satisfacer las ecuaciones de enlace y compararlas con las variables de decisión (caudales salientes) correspondientes al primer nivel, con lo que se inicia un proceso iterativo con nuevas p. de c. hasta que las soluciones del primer nivel ($q_{i,1}$) y las del segundo nivel ($\Omega_{i,1}$) coincidan, con lo que se cumplen las ecuaciones de enlace y el proceso termina obteniendo las secciones adecuadas del canal en cada área y el beneficio neto total.

El programa de ordenador se ha realizado en lenguaje Fortran y se ha desarrollado en el ordenador Univac del Centro de Cálculo de la Universidad Politécnica de Valencia.

La aplicación del método de optimización de Wolfe con los datos del proyecto actual, indica que la *solución óptima* es la de *importación total de recursos hidráulicos con un desarrollo total de las zonas regables*.

Los resultados de la pasada definitiva tras la convergencia entre el primer y segundo niveles (unas cinco iteraciones), se resumen en la figura 5, con un beneficio neto total en pesetas, constantes del año 1, de 116.573 millones de pesetas, sin contar los beneficios netos del área de la Plana de Castellón, que debido a su problemática más compleja no se ha introducido en el proceso de optimización, pero que supondrá unos 100.000 millones más.

Para contrastar la importancia de los parámetros económicos, físicos, ..., incluidos en el proyecto actual, se ha realizado un análisis de

ANÁLISIS JERÁRQUICO DE DESCOMPOSICIÓN Y OPTIMIZACIÓN MULTINIVEL

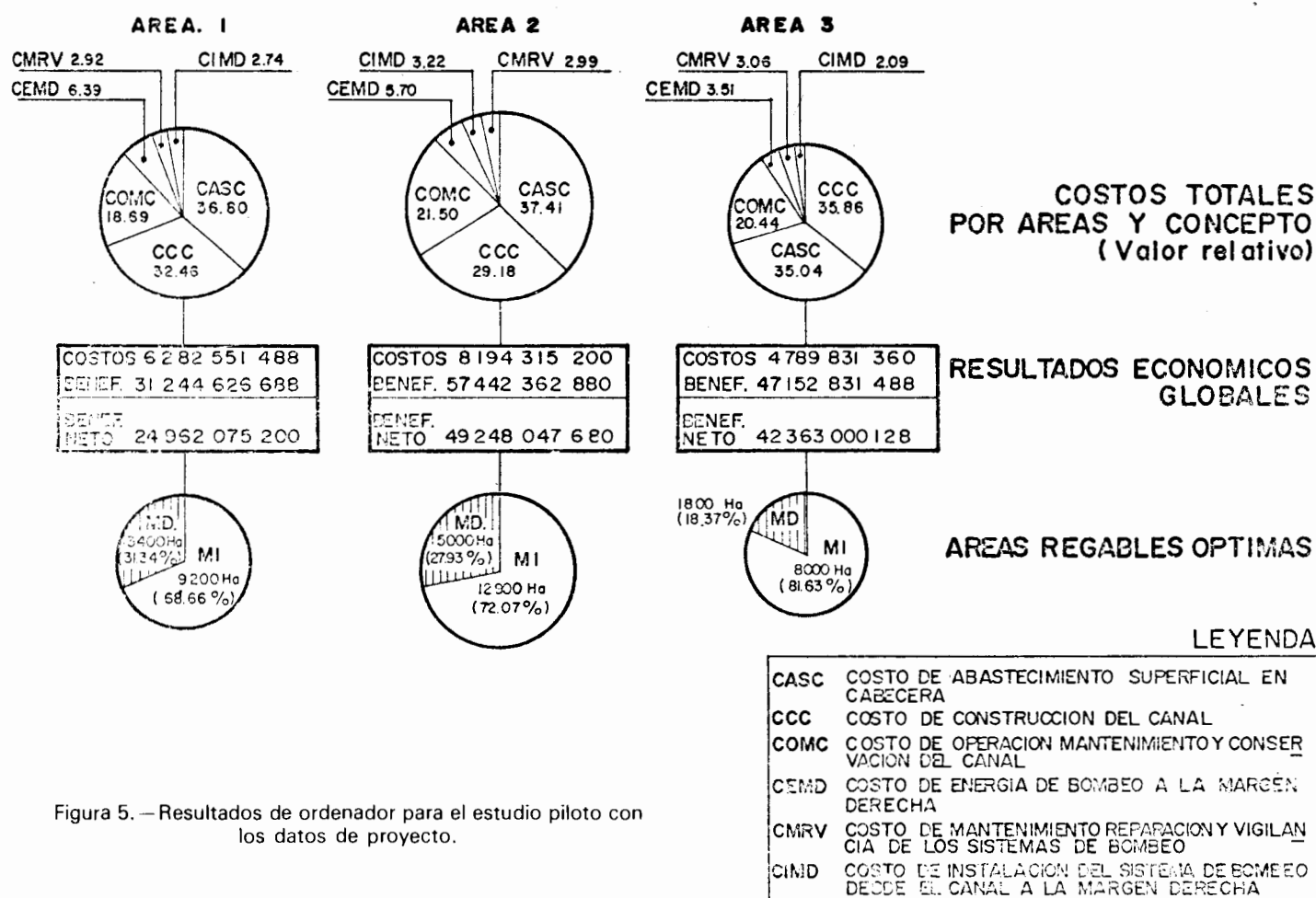


Figura 5. — Resultados de ordenador para el estudio piloto con los datos de proyecto.

sensibilidad de los mismos para la Plana de Vinaroz Peñíscola como zona representativa de la totalidad del estudio piloto, con las siguientes conclusiones:

- La sensibilidad del modelo es acusada frente al coste del abastecimiento superficial en cabecera. Así, para valores superiores a $C_w = 5,0 \text{ pts/m}^3$, lo que supone una tarifa de riego de 8 pts/m^3 , la política óptima pasa a ser de uso conjunto (importación bombeos), lo cual vista la evolución de los precios, es un resultado muy a tener en cuenta a corto plazo.
- La disminución del costo de energía de bombeo al canal, a partir del valor del proyecto actual, $C_e = 4,80 \text{ pts/Kwh.}$, no influye en el cambio de política ya que el aumento de costos que lleva consigo la aparición de bombeos supera a los ahorros que supone aquella disminución.
- El uso conjunto empieza a ser válido pa-

ra desniveles superficiales del terreno n.f., inferiores a los 23 metros., en los pozos de bombeo, pero se trata de políticas peligrosas para las zonas costeras cuyos límites de variación del n.f. tienen un rango muy estrecho.

- Los recursos subterráneos propios favorecen un tipo de política u otra según el caso. Así, para porcentajes de este parámetro con respecto al total de necesidades hídricas de la zona, inferiores al 16 por 100, la política óptima corresponde al uso conjunto con recarga artificial por el peligro de salinización costera, mientras que si el porcentaje es superior al 82 por 100 se impone una política de bombeos ante el peligro de encharcamiento en zonas bajas.
- La tasa de interés anual y la transmisividad son parámetros para los que el modelo presenta una escasa sensibilidad para el rango de valores normales.

4. SUMARIO Y CONCLUSIONES

Este artículo contribuye al análisis del uso conjunto de sistemas complejos de recursos hidráulicos superficiales y subterráneos. Tras la introducción del concepto de método jerárquico y sus estructuras, se ha desarrollado una investigación de gran actualidad como es el tema de la planificación y gestión conjunta óptima de sistemas canal-acuíferos subyacentes con la finalidad principal de la puesta en riego de un cierto número de Ha., cuya complejidad de manejo por el elevado n.º de variables de decisión se ha resuelto mediante el método jerárquico multinivel.

Con ello, la metodología ha demostrado su aplicabilidad práctica a un caso real ya que el modelo es capaz de proporcionar la serie anual de bombeos, vertidos o caudales importados mes a mes que corresponden a la política óptima, así como las áreas de riego para las que se consigue un mayor beneficio neto total.

Para finalizar, se sugiere como posibles líneas de investigación a partir de las presentes conclusiones, el acoplamiento al modelo presentado para la zona no saturada, de un modelo de flujo subterráneo saturado, con lo que se obtendrá un conocimiento mucho más preciso del n.f. en los diversos puntos de interés, lo cual redundará en una mejor delimitación de las subzonas aseguibles al uso conjunto.

Pueden introducirse nuevas limitaciones para considerar las interrelaciones río-acuífero, con la aparición de la recarga inducida como nueva herramienta de actuación sobre el n.f., o las interrelaciones entre acuíferos, todo ello sin pérdida de eficacia del modelo presentado, si se eligen cuidadosamente las nuevas pseudovariantes de coordinación entre áreas de riego.

Se sugiere también la adaptación de un modelo de calidad de aguas subterráneas, que aportará nuevas limitaciones en cuanto al uso del agua (abastecimientos, regadío,...) y a la conveniencia o no de las recargas artificiales o inducidas y al bombeo, según el grado de contaminación de las aguas y sus destinos.

Las nuevas incorporaciones de distintas líneas de investigación pueden dar lugar a una formulación más compleja de lo que es capaz de manejar el algoritmo de optimización propuesto, y

habrá que acudir a algoritmos que trabajen con funciones objetivo y restricciones más generales; para estos casos, se sugiere la utilización del método de Tolerancia Flexible de Himmelblau, que para la presente investigación se ha descartado ante el algoritmo de Wolfe por las limitaciones de tiempo de ordenador que aquél tenía frente a éste y que es otro parámetro económico importante a valorar cuando varios métodos aparecen como válidos ante un problema determinado.

NOTACION

Area 1: Zona Ebro-Sur (Tarragona).

Area 2: Plana de Vinaroz-Peñíscola (Castellón).

Area 3: Plana de Torreblanca-Oropesa (Castellón).

B_i : Es la capacidad máxima de bombeo, tramo i.

b_i : Es el beneficio obtenido por riego de una unidad del área S_i .

$b_{i,j}$: Es el volumen bombeado desde el pozo del área S_i al tramo j.

$C_{opc,i}$: Es el costo anual de operación y mantenimiento del canal.

C_e : Es el costo unitario de la energía de bombeo.

$C_{mv,i}$: Es el costo anual de mantenimiento, reparación y vigilancia del sistema de bombeo.

$C_{w,i}$: Es el costo unitario del servicio de agua en cabecera del canal.

CSNM: Es la cota sobre el nivel del mar.

DP_i : Es la disponibilidad en cabecera del canal, período i.

d_i : Es la distancia al pozo de bombeo o zona de recarga artificial.

$EVT_{i,j}$: Es la evapotranspiración por unidad de área.

f: Es la relación entre la velocidad del agua y la velocidad total.

$h'_{i,j}$: Es la altura de bombeo canal-cabecera de zona regable.

$IN_{i,j}$: Es la infiltración natural por unidad de área de acuífero.

$\bar{K}$: Es la conductividad hidráulica a saturación natural.

L_i : Es la longitud del tramo i del canal.

$P_{i,j}$: Es la precipitación por unidad de área.

$q_{o,t}$: Es el volumen derivado en cabecera del canal, período t.

$Q_{o,(i)}$: Es la capacidad máxima en cabecera del canal (en tramo i).

$q_{i,t}$: Es el volumen que entra en el tramo i del canal, período t.

$RN_{i,t}$: Es el volumen de recarga natural/u. de área de acuífero.

RNFL: Es la recarga límite al nivel freático.

$S_i, S_{Max,i}, SB_{i,r}, SB_{Max,i}$: Son las áreas de regadío.

S_r : Es el área de influencia para la recarga artificial.

STOT: Es la superficie total de la subregión.

Ts: Es la transmisividad del acuífero.

$v_{i,t}$: Es el volumen vertido a la zona de recarga desde el canal.

$\alpha_{i,t}$: Es el coeficiente de valoración de la demanda.

$\emptyset$: Es la porosidad del suelo.

$\Omega_{i,t}$: Es la pseudovariante de coordinación entre áreas.

μ_r, λ_r : Son los multiplicadores de Lagrange.

δ : Es la altura saturada equivalente a la altura no saturada entre el nivel freático y la superficie del terreno.

μ_r : Es la viscosidad relativa total.

Θ_1 : Es el contenido volumétrico límite de agua (superficie terreno).

Θ_r : Es el contenido vol. residual de agua (superficie del terreno).

REFERENCIAS

1. BAZARAA, A. S. (1979): «Experimental/analytical investigation of the recharge rates to a groundwater table». Ph. D. Dissertation. Colorado State University. Fort Collins, Colorado.
2. FERNANDEZ BONO, J. F. (1983): «Racionalización del aprovechamiento de recursos hidráulicos, haciendo intervenir la recarga de los acuíferos integrados en el sistema y metodología para la modelación de dicha recarga». Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
3. HAIMES, Y. Y. (1977): «Hierarchical analyses of water resources systems». McGraw-Hill inc., Nueva York.
4. HAIMES, Y. Y. & Dreizin, Y. C. (1977): «Manage-

ment of groundwater and surface water via decomposition». Water Resource Research, pp. 69-77.

5. HALL, W. A. & DRACUP, J. A. (1970): «Ingeniería de sistemas en recursos hidráulicos». C.E.C.S.A. México.
6. KÜNZI, H. P., TZSCHACH, H. G. & ZEHNDER, C. A. (1971): «Numerical methods of mathematical optimization». Academic Press. N. York.
7. MASS y al. (1962): «Design of water resource systems». Harvard University Press. Cambridge, Mass.
8. MARCO, J. B. y FERNANDEZ BONO, J. F. (1981): «Infraestructura hidráulica y energética de la Comunidad Valenciana». PREVASA, Valencia.
9. MESAROVIC, M. D.; MACKO, D. & TAKAHARA, Y. (1970): «Theory of Hierarchical, multilevel, Systems». Academic Press. N. York.
10. SATHAYE, J. & HALL, W. A. (1976): «Acueduct optimization with intermediate storage». Journal of the Irrigation and Drainage Division, pp. 248-264.
11. SATHAYE, J. & HALL, W. A. (1976): «Optimization of design capacity of an acueduct». Journal of the Irrigation and Drainage Division, pp. 295-305.
12. YU, W. & HAIMES, Y. Y. (1974): «Multilevel optimization for conjunctive use of groundwater and surface water». Water Resource Research, pp. 625-636.

Juan Francisco Fernández Bono



Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, título obtenido en 1983 en la Universidad Politécnica de Valencia. En la actualidad es profesor adjunto interino de «Hidráulica e Hidrología (Laboratorio)» desde 1983 en dicha Universidad. Ha realizado diversos estudios y proyectos en las áreas de la Planificación Hidráulica y la Ordenación del Territorio.

En el ámbito científico fue becado por la Caja de Ahorros y Monte de Piedad de Valencia para la realización de su Tesis Doctoral y ayudante de investigación en el convenio de investigación con el Centro de Estudios de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, sobre modelación de calidad de aguas subterráneas. Ha publicado artículos científicos en diversas revistas nacionales y ha preparado tres libros para la docencia.

dov variables de coordinación. Cada subsistema puede entonces ser independientemente optimizado con la técnica más adecuada a la forma matemática del modelo resultante, en la fase que se denomina «primer nivel».

Los subsistemas son nuevamente acoplados mediante las pseudovariables, que se manipulan en uno o más niveles superiores para conseguir la solución óptima del sistema global.

La independencia entre subsistemas puede conseguirse relajando una o más condiciones necesarias para la optimidad y satisfaciéndolas en un nivel superior.

3. APLICACIONES DEL ANÁLISIS JERÁRQUICO AL USO CONJUNTO DE RECURSOS HIDRAULICOS SUPERFICIALES Y SUBTERRANEOS

Como acabamos de indicar, el análisis por descomposición y optimización multinivel proporciona un camino más realista para resolver problemas complejos a gran escala. Los trabajos de Y. Halmes (1977 y posteriores) fundamentalmente, en el campo de los sistemas de recursos hidráulicos avalan su importancia como técnica de técnicas, es decir, como método de organización de las técnicas de optimización existentes más adecuadas para tratar los subsistemas de los distintos niveles jerárquicos del problema global.

En este sentido se ha llevado a cabo recientemente en la Universidad Politécnica de Valencia, por J. Fernández Bono (1983), una investigación en el tema del uso conjunto óptimo de recursos hidráulicos superficiales y subterráneos en un sistema a gran escala, en la que el análisis jerárquico tiene un papel fundamental para poder abordar el problema sin apartarse de su esencia física y con notable economía computacional.

Veamos pues, como aplicación práctica del método jerárquico al uso conjunto de recursos hidráulicos superficiales y subterráneos, el desarrollo de la citada investigación.

Su objetivo estriba en incorporar el uso conjunto a la optimización del diseño y gestión de canales, con objeto de mejorar la utilización de los mismos y de sus elementos de regulación.

Se presenta una metodología adecuada para incorporar las aguas subterráneas subyacentes, incrementadas en su caso por los vertidos de sobrantes invernales no utilizados directamente, formando un sistema de uso conjunto con los recursos directamente utilizables del canal, de modo que los acuíferos se utilizan como elementos de regulación adicionales.

Los recursos vertidos al acuífero a través de cauces temporales o barrancos (zonas de recarga), son laminados por la zona no saturada, espacial y temporalmente, así como, conjuntamente con los retornos de riego y los recursos subterráneos propios, son de nuevo laminados por los acuíferos, antes de su reutilización.

Esto conlleva menores necesidades en cuanto a la capacidad de las conducciones y una reserva de agua para períodos secos, con las consiguientes ventajas económicas.

El tema de la optimización de canales ha sido tratado fundamentalmente por Warren Hall (1961, 1965, 1970, 1976) utilizando exclusivamente el sistema superficial. El método clásico y lógico es, tal y como Hall demuestra, la programación dinámica.

Ahora bien, al producirse una laminación espacial y temporal, la programación dinámica va multiplicado el número de variables de estado por lo que su uso deja de ser viable.

Planteado el problema de un modo realista teniendo en cuenta la laminación tanto en la zona saturada, a través de la metodología de las funciones Kernel y de la zona no saturada, a través de un método original basado en las ecuaciones de A. Bazaraa (1979), nos lleva a un problema de optimización de naturaleza intrínsecamente cuadrática y elevada dimensionalidad, pero por fortuna distribuido secuencialmente a lo largo de la traza del canal.

Esto permite el empleo de la técnica de descomposición multinivel en una sucesión de problemas cuadráticos de dimensionalidad mucho menor, que pueden ser optimizados fácilmente por el algoritmo de Wolfe (1971).

Se consigue de este modo liberar el problema de la dimensionalidad en que se incurre al multiplicar el número de zonas regables en conexión, respondiendo a la esencia física del sistema.