

Diseño óptimo de redes de riego

Tapia, A.*, Manzano, J.M.

Departamento de Ingeniería, Universidad Loyola Andalucía. Avda. de las Universidades s/n 41704 Dos Hermanas (Sevilla, España)

To cite this article: Tapia, A., Manzano, J.M. 2023. Optimal design of irrigation networks. XLIV Jornadas de Automática, 489-494. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.489>

Resumen

En este estudio se presenta un enfoque basado en algoritmos genéticos (AG) para optimizar el diseño de redes de riego por goteo. El objetivo es reducir las inhomogeneidades en los caudales de salida en cada toma de riego, de manera que toda la parcela se riegue lo más parecido posible. Se asume que las tomas de riego y la entrada de agua son conocidas, centrándose en el diseño de la red de tuberías. El AG se utiliza para determinar la configuración óptima de las tuberías, es decir, qué tomas están conectadas entre sí. Para lograr esto, se emplea una estructura de cromosoma en la que cada par de genes representa la conexión entre dos tomas. El algoritmo evolutivo busca maximizar la uniformidad en los caudales de salida y minimizar la longitud total de la tubería. Los resultados demuestran que el enfoque propuesto logra reducir de manera significativa las inhomogeneidades en los caudales de salida, mejorando así la eficiencia del sistema de riego por goteo. Además, se logra una reducción en el coste total del sistema al minimizar la longitud de la tubería utilizada.

Palabras clave: Modelado en agricultura, Diseño óptimo, Redes de riego, Algoritmos genéticos

Optimal design of irrigation networks

Abstract

In this study, we present an approach based on genetic algorithms (GAs) to optimize the design of drip irrigation networks. The objective is to reduce inhomogeneities in the discharge flow rates at each irrigation outlet, so the whole crop is watered similar amounts. We assume that the irrigation outlets and water supply are known, focusing on the design of the pipeline network. The GA is used to determine the optimal configuration of the pipelines, i.e., which outlets are connected to each other. To achieve this, a chromosome-like structure is employed, where each pair of genes represents the connection between two outlets. The evolutionary algorithm seeks to maximize uniformity in the discharge flow rates and minimize the total pipeline length. The results demonstrate that the proposed approach significantly reduces inhomogeneities in the discharge flow rates, thereby improving the efficiency of the drip irrigation system. Additionally, a reduction in the total cost of the system is achieved by minimizing the length of the utilized pipeline.

Keywords: Modeling of agriculture, Optimal design, Irrigation networks, Genetic algorithms

1. Introducción

La distribución eficiente y uniforme del agua es fundamental para el éxito de los sistemas de riego en las prácticas agrícolas. El diseño de redes de riego que minimicen las inhomogeneidades en la distribución del agua y optimicen consideraciones de coste ha sido objeto de una amplia investigación en el campo de la ingeniería agrícola (Saad y Mariño, 2002).

Los sistemas de riego por goteo han demostrado ser una opción eficiente en el uso del agua y han ganado popularidad debido a su capacidad para entregar agua directamente a la zona radicular de las plantas, minimizando las pérdidas por evaporación y lixiviación. Sin embargo, los sistemas de riego por goteo con emisores no compensados a menudo presentan heterogeneidades en los caudales de salida, lo que puede resultar

*Autor para correspondencia: atapia@uloyola.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

en un uso ineficiente del agua y un rendimiento desigual de los cultivos Clemmens (1987). Por otro lado, el uso de goteros autocompensados aumenta significativamente el coste de la instalación.

El diseño óptimo de una red de riego implica determinar la ubicación y configuración de las tuberías, así como las tomas de riego y la entrada de agua. Esto implica resolver un problema de optimización combinatoria complejo, donde se deben considerar múltiples objetivos, como la minimización de las diferencias en los caudales de salida y la reducción de los costes asociados al sistema de riego (Holzapfel et al., 2009).

En los últimos años, los algoritmos genéticos (AG) han demostrado ser una herramienta eficaz para abordar problemas de optimización combinatoria en una variedad de campos, incluido el diseño de redes de riego. Véanse por ejemplo los trabajos de Pazouki (2021) o Reca y Martínez (2006). Los AG se basan en principios de selección natural y evolución, lo que les permite explorar de manera eficiente un espacio de soluciones potenciales y encontrar soluciones óptimas o cercanas a la óptima.

En este contexto, el presente estudio propone el uso de un algoritmo genético para optimizar el diseño de una red de riego por goteo con emisores no compensados. El objetivo es minimizar las inhomogeneidades en los caudales de salida de cada toma de riego y reducir los costes asociados a la longitud total de la tubería utilizada. A través de la aplicación de un enfoque evolutivo, se busca encontrar la configuración óptima de la red de tuberías que cumpla con los objetivos establecidos.

La estructura del artículo se organiza de la siguiente manera: en la siguiente sección se modela una red genérica, incluyendo las ecuaciones que gobiernan el riego. En la Sección 3 se formula el problema de optimización propuesto. En la Sección 4 se introduce el algoritmo genético diseñado para resolver dicho problema; y en la Sección 6 se muestran los resultados en un caso de estudio simulado. Finalmente, se presentarán las conclusiones y las posibles líneas de investigación futuras.

Notación:

El conjunto de números enteros de a a b se denota \mathbb{I}_a^b . La notación $\|\cdot\|$ indica norma Euclídea. Dados dos vectores, v, w ; (v, w) indica $[v^T, w^T]^T$.

2. Modelado de una red de riego

El objetivo de este trabajo es proponer una formulación óptima para el diseño de redes de regadío. Se considera una red basada en tuberías que conectan una serie de tomas de riego, donde se enganchen las líneas de goteros. El objetivo es obtener la solución óptima sobre la interconexión de dichas tomas; es decir, elegir qué tuberías deben conectar qué tomas.

Considérese una red formada por tuberías, que ha de abastecer un total de N tomas de riego. La ubicación de dichas tomas se asume fija y dada como parte del problema de diseño, mediante las coordenadas (x, y, z) . La superficie del terreno está mapeada por la función $T(x, y)$, la cual también se asume conocida, tal que para cualquier par de coordenadas (x, y) ,

$$z(x, y) = T(x, y). \quad (1)$$

Supongamos que el agua se introduce en la red mediante una bomba, cuya aspiración está conectada a un pozo o reservorio. La Figura 1 muestra un esquema del problema.

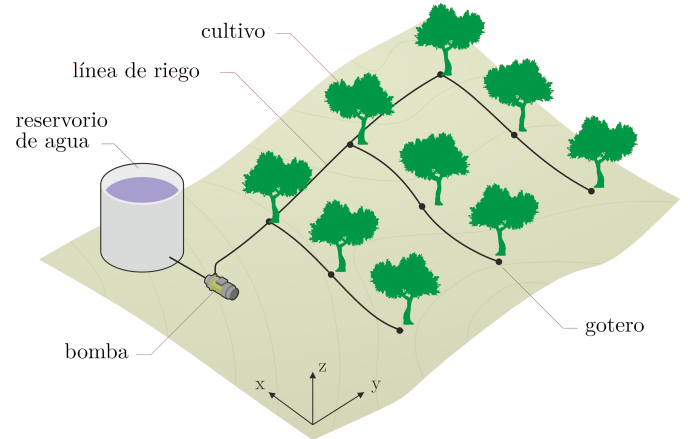


Figura 1: Esquema ilustrativo de la red de riego

La red de riego se modela como un grafo no dirigido G , con nodos \mathcal{N} , y arcos, \mathcal{E} , tal que los nodos representan las tomas de agua,

$$\mathcal{N} = \{n : n_i = (x_i, y_i, T(x_i, y_i)), i \in \mathbb{I}_1^M\}, \quad (2)$$

y cada arco representa una potencial tubería conectando dos nodos. Por tanto, \mathcal{E} contiene un subconjunto M de parejas (i, j) , tal que la toma i y la j están conectadas por una tubería. El conjunto de arcos conectados al nodo i -ésimo se denota \mathcal{E}_i .

El grafo correspondiente al ejemplo anterior se ilustra en la Figura 2, donde p_i y w_i son la presión estática y el caudal regado en el nodo i , respectivamente, y $q_{i,j}$ es el caudal que circula por la tubería que une i con j , si esta existe. El signo positivo indica que el agua fluye de i a j ($q_{i,j} < 0$ si es al revés). Nótese que se ha añadido un vértice adicional, correspondiente a la toma de agua de la red (indicado en línea punteada). Este nodo auxiliar solo se incluye para facilitar el modelado, pero no se considera en \mathcal{E} .

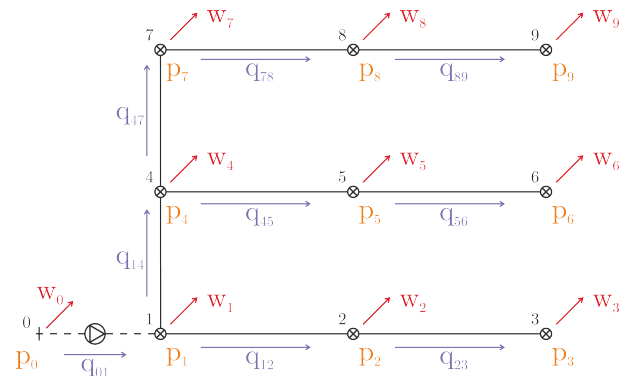


Figura 2: Grafo correspondiente al esquema de la Figura 1

El objetivo formal de este trabajo se recoge por tanto en el siguiente problema:

Problema 1. Dado un conjunto de tomas ubicadas donde se indica en \mathcal{N} , así como la superficie de un terreno dado por T ,

diseñar el conjunto de conexiones entre las tomas, \mathcal{E} , tal que estas cumplan las condiciones de riego requeridas, y se minimice la inhomogeneidad del riego.

A continuación se indican las condiciones que deben tenerse en cuenta en el procedimiento de diseño. Estas son las restricciones que la red debe satisfacer en términos de que el agua se aplique en todos los emisores de manera óptima.

Considerando el esquema propuesto, nótese que diseñar una red con N nodos y M arcos activos requiere determinar $2N + M$ variables. Estas son N valores de presión (o altura equivalente) en las tomas h_i , N caudales en ellas, w_i ; y M caudales en las tuberías, q_{ij} .

Por tanto, hace falta un modelado que proporcione ese mismo número de ecuaciones. Estas se obtienen mediante un balance de masa y de energía en la red, asumiendo conservación de estas a lo largo de la instalación; junto con las ecuaciones apropiadas de *descarga* en las tomas y la ecuación de bombeo de agua en el nodo de entrada. Con un ligero abuso de notación, por la eficiencia de la programación, el flujo de entrada a la red, en el nodo 0, w_0 , se puede modelar como una toma extra con su constante de ajuste adecuada, y que se espera tenga en un valor emitido negativo.

2.1. Conservación de la masa

Bajo la hipótesis de sección constante de las tuberías, así como la de incompresibilidad del agua, el caudal de agua se puede considerar constante a lo largo de cada segmento de tubería. Por tanto, un balance de conservación de volumen puede formularse como uno de masa, obteniendo un flujo neto nulo en cada toma. Esto es, para cada nodo j de la red:

$$\sum_{i \in \mathcal{E}_j} q_{ij} = w_j, \quad j \in \mathbb{I}_1^N \quad (3)$$

2.2. Conservación de la energía

A lo largo de cada segmento de tubería, la conservación de la energía se formula de acuerdo al principio de Bernoulli, que establece que el cambio de presión equivalente, h , en la tubería es:

$$h_j - h_i = h_{\text{fric}}, \quad (i, j) \in \mathcal{E} \quad (4)$$

donde h es la altura equivalente y h_{fric} denota la pérdida de presión por fricción en la tubería. Estas vienen dadas como sigue:

$$h = \frac{p}{\gamma} + z + \frac{1}{2g}v^2, \quad (5)$$

siendo p la presión estática, γ el peso específico del agua, g la aceleración de la gravedad y v la velocidad del fluido.

En agricultura, es común emplear la ecuación de Darcy-Weisbach (Jardim et al., 2022) para modelar la pérdida de presión por fricción, tal que

$$h_{\text{fric}} = \varphi \frac{L}{2gD} v^2 \quad (6)$$

donde φ es un coeficiente de fricción, L es la longitud de la tubería y D es el diámetro de la tubería. Expresando la velocidad en términos de caudal y sustituyendo, la ecuación 4 se puede reescribir tal que

$$h_j - h_i = \frac{8\varphi}{\pi^2 g D^5} L_{i,j} q_{i,j}^2, \quad (i, j) \in \mathcal{E} \quad (7)$$

2.3. Tomas

El caudal en cada emisor es proporcional a la presión equivalente, h , mediante la ecuación (Perea et al., 2013):

$$w_i = k_d \sqrt{h_i} \quad i \in \mathcal{N}, \quad (8)$$

donde k_d es un coeficiente que modela la característica de descarga del emisor.

2.4. Bomba

El segmento auxiliar, encargado de inyectar agua en la red (el nodo 0-1 en el ejemplo de la Figura 2), incluye una ecuación al sistema, basada en la curva de la bomba de agua (Janevska, 2013). Esta se puede escribir comúnmente mediante dos constantes experimentales, h_B y k_B , tal que

$$h_1 - h_0 = h_B - k_B q_{0,1}^2. \quad (9)$$

2.5. Proceso iterativo de resolución

Una vez que las ecuaciones anteriores se han formulado para la red de riego en cuestión, estas se pueden agrupar en formato matricial, de manera que

$$Ax + Bx^{(2)} = b, \quad (10)$$

donde las potencias entre paréntesis indican productos de Hadamard (elemento a elemento), y x es el vector de incógnitas, es decir,

$$x = (p_i, q_{j,k}, w_i), \quad i \in \mathbb{I}_1^N, (j, k) \in \mathcal{E}. \quad (11)$$

Nótese que (10) es una notación compacta, pero estas ecuaciones no son lineales ni cuadráticas. Por tanto, un enfoque numérico en la resolución del problema puede resultar de gran utilidad. A pesar de la eficacia de los métodos basados en gradientes para abordar estos problemas, como el método de Newton-Raphson, su implementación en enfoques de optimización metaheurística, que implican un gran número de evaluaciones, requiere una mayor robustez y simplicidad en la formulación. Por ello, el problema (10) se enfoca usando un proceso iterativo de resolución, basado en actualizar una solución determinada, x_{k+1} , en función de la previa, x_k , dado

$$(A + B)x_{k+1} + Bx_k = b, \quad (12)$$

lo que resulta en la rutina iterativa

$$x_{k+1} = (A + B)^{-1}(b - Bx_k). \quad (13)$$

Esta comienza con una suposición inicial que, con fines de eficiencia, se determina resolviendo la versión linealizada del problema (10). La validación de este algoritmo se discutirá en la Sección 6, mediante su implementación usando un criterio basado en la tolerancia.

3. Formulación del problema

A partir del modelo propuesto, se formula el problema de optimización como la minimización del coeficiente de variación de los caudales de riego de los diferentes goteros de la instalación, κ . Este se define como el cociente entre la desviación estándar (σ) de los caudales y su media (m):

$$\kappa = \frac{\sigma(w)}{m(w)}, \quad w \in \mathbb{R}^N. \quad (14)$$

Además de obtener el grafo con arcos \mathcal{E} que minimiza κ , esto se hace sujeto a las siguientes restricciones:

- Para limitar el espacio de búsqueda a soluciones factibles sobre el terreno, sólo se considerarán tramos de tubería que formen parte de la triangulación de *Delaunay* resultante de la disposición de los goteros
- El grafo correspondiente a la topología del sistema de riego se corresponderá con un árbol, de forma que no existan lazos cerrados

Bajo estas consideraciones, las posibles soluciones del espacio de búsqueda estarán formadas por $N - 1$ arcos. Además, el número de combinaciones posibles que satisfacen dichas restricciones viene dado por la fórmula de Cayley (Shor, 1995), siendo estas $N^{(N-2)}$.

Para un cultivo con 10 puntos de riego existen 100 millones de combinaciones. Para 50 puntos de riego el número de soluciones se hace inabordable. Esto, sumado a la no-linealidad del problema de fluidos asociado, hace imposible abordar el problema de forma analítica, por lo que se plantea el uso de estrategias de optimización meta-heurísticas, tales como los algoritmos genéticos.

4. Algoritmo evolutivo

Los enfoques evolutivos son una clase de algoritmos de optimización que imitan los principios de la evolución biológica para resolver problemas complejos, y tienen en común la capacidad de explorar un amplio espacio de soluciones potenciales en un período relativamente corto de tiempo, lo que los hace especialmente útiles no solo en campos de la ingeniería, sino también en finanzas (Sharma et al., 2022), medicina (Ghaferi et al., 2015; Remeseiro y Bolon-Canedo, 2019) o transporte (Nozari et al., 2022; Abbasi et al., 2020).

Entre los numerosos métodos evolutivos, los Algoritmos Genéticos (AG) son particularmente relevantes (Katoch et al., 2021). Éstos se basan en el concepto de supervivencia del más apto, donde una población de posibles soluciones (llamadas individuos) pasa por un proceso de selección y reproducción, lo que resulta en la evolución de la población a lo largo de múltiples generaciones.

En este trabajo se propone un AG conocido como $\mu + \lambda$, que se basa en hacer evolucionar una población de tamaño μ mediante una descendencia de tamaño λ . Ambas poblaciones se combinan, formando un *pool* de selección de tamaño $\mu + \lambda$, a partir del cual se selecciona la población de la nueva generación. Dado que los hijos deben competir con sus padres en

la selección, este enfoque aporta elitismo, aumentando la presión de selección y preservando la diversidad. A continuación, se describe en detalle la formulación propuesta de AG para resolver el problema, junto con los diferentes componentes implementados en el AG.

4.1. Representación individual

Los individuos se codifican en una estructura similar a un cromosoma con un número par de genes, que representan la conectividad de la red de riego (ver Fig. 3). Cada par de genes $e_{i,1} - e_{i,2}$ contiene los índices de los dos nodos que una arista i conecta. Dado que el grafo es no dirigido, cada arco se identifica inequívocamente por sus nodos en orden ascendente, $e_{i,1} < e_{i,2}$.

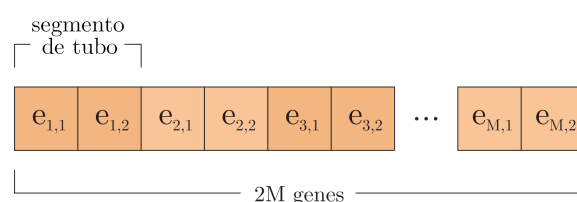


Figura 3: Estructura del cromosoma utilizado para la representación individual. Cada pareja de genes indica la conexión entre dos nodos mediante un tramo de línea de riego

4.2. Función de fitness

Dada la naturaleza arbitraria del terreno, no se puede descartar la posibilidad de que se generen soluciones donde, en ciertos puntos, la presión del agua sea inferior a la presión atmosférica, lo que significaría que en esos goteros entraría aire a la tubería en lugar de salir agua. Así, para eliminar estas soluciones, se ha utilizado la pena de muerte. Esta estrategia consiste en penalizar las soluciones no factibles con un coste infinito, de forma que la propia selección tienda a descartarlas prematuramente en el proceso de evolución.

Así, la función de *fitness* devolverá el coeficiente de variación de los caudales de riego, si la solución es factible, o un valor infinito, si no. Esto es:

$$C(X) = \begin{cases} \kappa & \text{si } w_j > 0, \forall j \in \mathbb{I}_1^N \\ \infty & \text{en otro caso} \end{cases}. \quad (15)$$

4.3. Operadores genéticos

Para mejorar el rendimiento y, al mismo tiempo, minimizar la posibilidad de generar individuos no factibles, se han desarrollado e implementado operadores de generación, mutación y cruce:

- La generación de individuos para la población inicial se basa en la asignación de un peso aleatorio a cada uno de los posibles arcos, y la construcción posterior del árbol mínimo.
- La mutación se basa en añadir aleatoriamente un arco adicional al individuo y eliminando uno de los suyos, de forma que el grafo correspondiente preserve su condición de árbol. Esto se hace identificando el lazo cerrado que se genera al introducir el nuevo arco a un árbol, y eliminando posteriormente uno de los restantes arcos de este lazo.

- El cruce entre dos individuos se basa en generar los dos descendientes como árboles mínimos de un grafo con pesos aleatorios, con la particularidad de que el valor del peso de cada arco se reduce en un factor β por cada uno de los padres en los que aparece. Así, los grafos correspondientes a los hijos tienen una mayor probabilidad de contener arcos de sus progenitores.

5. Ejemplo de aplicación

Para validar el modelo y el algoritmo genético propuestos, se ha generado un caso de ejemplo, basado en una instalación agrícola rectangular, de 60x60 metros, donde se han dispuesto un total de 49 árboles frutales dispuestos en una matriz de 7 filas y 7 columnas. Como solución de referencia se ha propuesto la mostrada en la Figura 4.

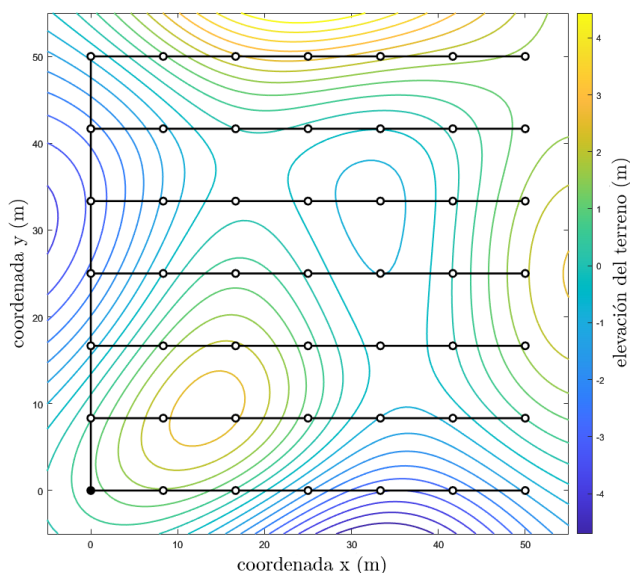


Figura 4: Representación de la solución de referencia. El nodo en negro representa el punto de conexión del sistema de bombeo. Las curvas de nivel indican la altura del terreno

Para los parámetros físicos del problema, se han escogido valores típicos en instalaciones agrícolas de las dimensiones del ejemplo, que se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de la instalación de riego

Parámetro	Valor
K_d	$1.10 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{h m}^{0.5}$
D	8 mm
φ	0.035
h_b	120 m
k_b	$100 \text{ h}^2/\text{m}^5$

Se han utilizado poblaciones μ y λ de 2000 individuos, y se han ejecutado 10 iteraciones del algoritmo genético para cada combinación de probabilidad de mutación y de cruce entre 30 y 70 %, en incrementos de 10 %. En la Tabla 2 se resumen los hiper-parámetros considerados.

Tabla 2: Hiper-parámetros del algoritmo genético

Hiper-parámetro	Valor
λ	2000
μ	2000
Generaciones	100
Selección	Torneo de 3 individuos
Cruce	Operador personalizado $\beta = 0.5$
Mutación	Operador personalizado 1 arco mutado
Probabilidades	$p_{cx} = [0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7]$ $\mu_{cx} = [0,3, 0,40,50,60,7]$
Iteraciones	10

6. Resultados

En primer lugar, tras la ejecución del algoritmo genético para resolver el problema propuesto, se ha analizado la convergencia, obteniéndose que se alcanza correctamente, aproximadamente desde la 80ª generación. En la Figura 5 se ha representado el fitness medio y el más bajo de la población durante las generaciones, para una de las iteraciones correspondientes a probabilidades de cruce y mutación de 70 y 30 %, respectivamente.

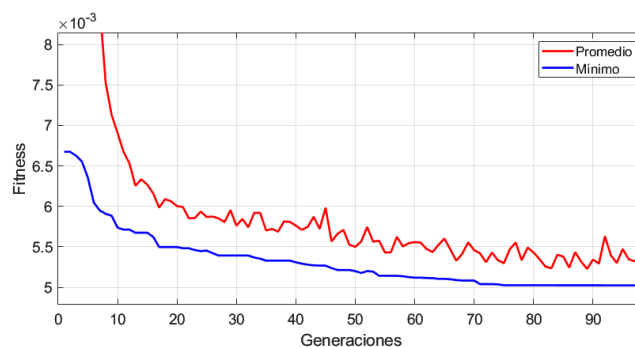


Figura 5: Evolución del fitness promedio (rojo) y el fitness óptimo (azul) de la población durante las generaciones, para una de las iteraciones de la combinación $P_{cx} = 0,70$, $P_{mut} = 0,30$

Si bien los óptimos obtenidos con las diferentes probabilidades de cruce y mutación consideradas han sido similares, se ha apreciado una fuerte correlación entre la probabilidad de mutación y la convergencia, observándose que, a medida que se incrementa este hiper-parámetro, disminuyen tanto la dispersión como el fitness promedio poblacionales. En la Tabla 3 se muestran, a modo de comparativa, algunas características de la solución óptima y de la solución de referencia considerada. Se puede ver cómo la minimización del coeficiente de variación del riego se ha traducido en una reducción muy notable de la diferencia máxima en los caudales de riego aportados por los diferentes goteros, reduciéndose esta métrica en algo más de un 70 %, reduciendo fuertemente la heterogeneidad del mismo y potenciando una mejora de la eficiencia del uso del agua. Así mismo, es interesante notar que esta reducción implica (i) un incremento (15 % aprox.) en la longitud total de tubería, lo que se traduce en un incremento en el coste de la instalación, y (ii) una leve reducción (3 % aprox.) del caudal promedio.

Tabla 3: Métricas comparativas entre la solución de referencia y la óptima

	Referencia (Fig. 6-a)	Óptimo (Fig. 6-b)
Long. de tubo (m)	800.00	917.36
Máx. dif. de riego (L/h)	0.3269	0.0967
Riego promedio (L/h)	4.5443	4.4028
Desv. est. riego (L/h)	0.0963	0.0222

La solución óptima se ha representado en la Figura 6. Es fácil ver cómo la topología de la red de riego persigue reducir las pérdidas por fricción (proporcionales a la longitud de tubería que debe recorrer el agua) correspondientes a los goteros situados a mayor cota, mientras que hace lo contrario con los de menor cota, de forma que los efectos negativos de la topografía del terreno sobre la distribución de caudales tiendan a compensarse.

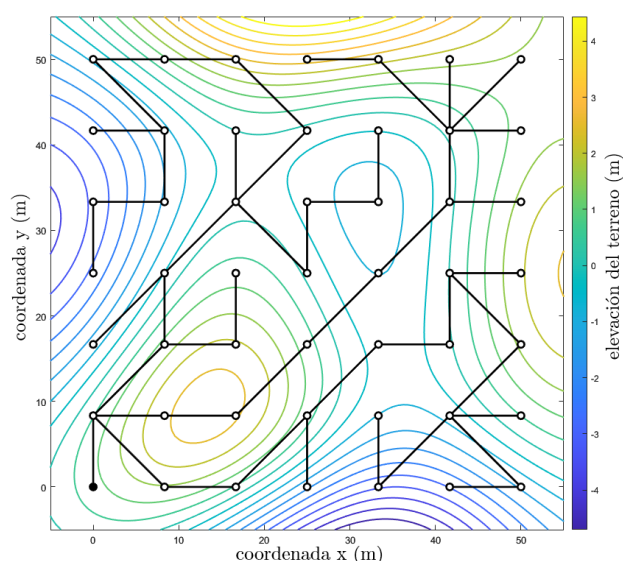


Figura 6: Representación de la solución óptima. El nodo en negro representa el punto de conexión del sistema de bombeo

7. Conclusiones

En este trabajo se ha realizado un acercamiento al problema de la heterogeneidad del riego por goteo en cultivos sobre grandes extensiones de terreno. En primer lugar se ha desarrollado un modelo versátil para el sistema, con una formulación versátil y generalizable para topografías arbitrarias de la red de riego. Asimismo, se ha propuesto un método de resolución lineal iterativo que permite su rápida resolución con poca carga computacional. Este modelo se ha utilizado para formular el problema de optimización asociado a la minimización de la heterogeneidad del riego en los diferentes goteros, y se ha propuesto un algoritmo genético para su resolución. Por último, se ha planteado un caso de ejemplo y se ha validado el potencial

de la metodología propuesta para mejorar los sistemas de riego, demostrándose su capacidad para mejorar la eficiencia del recurso hídrico en estas instalaciones.

Estos resultados constituyen un marco interesante para el desarrollo de estrategias de diseño más avanzadas, que permitan tomar en consideración parámetros adicionales, tales como el dimensionado del equipo de bombeo o su disposición sobre el terreno. Estos aspectos se proponen como líneas de trabajo futuras.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la AEI/M-CeI a través del proyecto METRICA (PID2020-117800GB-I00).

Referencias

Abbasi, M., Rafiee, M., Khosravi, M. R., Jolfaei, A., Menon, V. G., Koushyar, J. M., 2020. An efficient parallel genetic algorithm solution for vehicle routing problem in cloud implementation of the intelligent transportation systems. *Journal of cloud Computing* 9, 1–14.

Clemmens, A., 1987. A statistical analysis of trickle irrigation uniformity. *Transactions of the ASAE* 30 (1), 169–175.

Ghaeri, A., Shoar, S., Naderan, M., Hoseini, S. S., 2015. The applications of genetic algorithms in medicine. *Oman medical journal* 30 (6), 406.

Holzapfel, E. A., Pannunzio, A., Lorite, I., de Oliveira, A. S. S., Farkas, I., et al., 2009. Design and management of irrigation systems. *Chilean journal of agricultural research* 69 (1), 17–25.

Janevska, G., 2013. Mathematical modeling of pump system. In: *Electronic International Interdisciplinary Conference*. No. September 2013. pp. 455–58.

Jardim, A. M. d. R. F., Silva, J. R. I., Silva, M. V. d., Souza, L. S. B. d., Araújo Júnior, G. d. N., Alves, H. K. M. N., Mesquita, M., Souza, P. J. d. O. P. d., Teixeira, A. H. d. C., Silva, T. G. F. d., 2022. Modelling the darcy-weisbach friction factor and the energy gradient of the lateral line. *Irrigation and Drainage* 71 (2), 320–332.

Katoch, S., Chauhan, S. S., Kumar, V., 2021. A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications* 80, 8091–8126.

Nozari, H., Ghahremani-Nahr, J., Szmelter-Jarosz, A., 2022. A multi-stage stochastic inventory management model for transport companies including several different transport modes. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 1–11.

Pazouki, E., 2021. A practical surface irrigation system design based on volume balance model and multi-objective evolutionary optimization algorithms. *Agricultural water management* 248, 106755.

Perea, H., Enciso-Medina, J., Singh, V., Dutta, D., Lesikar, B., 2013. Statistical analysis of non-pressure-compensating and pressure-compensating drip emitters. *Journal of irrigation and drainage engineering* 139 (12), 986–994.

Reca, J., Martínez, J., 2006. Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks. *Water resources research* 42 (5).

Remeseiro, B., Bolon-Canedo, V., 2019. A review of feature selection methods in medical applications. *Computers in biology and medicine* 112, 103375.

Saad, J. C., Mariño, M. A., 2002. Optimum design of microirrigation systems in sloping lands. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 128 (2), 116–124.

Sharma, D. K., Hota, H., Brown, K., Handa, R., 2022. Integration of genetic algorithm with artificial neural network for stock market forecasting. *International Journal of System Assurance Engineering and Management* 13 (Suppl 2), 828–841.

Shor, P. W., 1995. A new proof of Cayley’s formula for counting labeled trees. *Journal of Combinatorial Theory, Series A* 71 (1), 154–158.