

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y  
de Montes



Departamento de Agronomía

## TRABAJO PROFESIONAL FIN DE CARRERA

“OPTIMIZACIÓN OPERACIONAL DE REDES DE RIEGO A  
PRESIÓN CON VARIOS PUNTOS DE SUMINISTRO DE  
AGUA. APLICACIÓN A LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE LA  
CR DE PALOS DE LA FRONTERA.”

**Autor:** Irene Fernández García

**Titulación:** Ingeniería Agronómica

**Directores:** Dr. Juan Antonio Rodríguez Díaz  
Dra. M<sup>a</sup> Pilar Montesinos Barrios

Septiembre de 2011



# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y  
de Montes



Departamento de Agronomía

## TRABAJO PROFESIONAL FIN DE CARRERA

“OPTIMIZACIÓN OPERACIONAL DE REDES DE RIEGO A  
PRESIÓN CON VARIOS PUNTOS DE SUMINISTRO DE  
AGUA. APLICACIÓN A LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE LA  
CR DE PALOS DE LA FRONTERA.”

Vº Bº de los directores del T.P.F.C.

Fdo. Dr. D. Juan Antonio Rodríguez Díaz. Fdo. Dra. D<sup>a</sup>. Pilar Montesinos Barrios

El alumno

Fdo. Irene Fernández García

Fecha de lectura: Septiembre de 2011



Dr. D. Juan Antonio Rodríguez Díaz, contratado Ramón y Cajal por la Universidad de Córdoba, Departamento de Agronomía de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes, y Dra. D<sup>a</sup>. Pilar Montesinos Barrios, Profesora Titular de la Universidad de Córdoba, Departamento de Agronomía de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes, directores del Trabajo Profesional Fin de Carrera, "OPTIMIZACIÓN OPERACIONAL DE REDES DE RIEGO A PRESIÓN CON VARIOS PUNTOS DE SUMINISTRO DE AGUA. APLICACIÓN A LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE LA CR DE PALOS DE LA FRONTERA", del que es autor el alumno D<sup>a</sup>. Irene Fernández García para optar al título de Ingeniera Agronómica.

Informan:

Que el referido trabajo tiene carácter de investigación. Y para que conste, firman el presente escrito en Córdoba, a 26 de SEPTIEMBRE de 2011

Fdo. Dr. D. Juan Antonio Rodríguez Díaz

Fdo. Dra. D<sup>a</sup>. Pilar Montesinos Barrios



Dr. D. Juan Antonio Rodríguez Díaz, contratado Ramón y Cajal por la Universidad de Córdoba, Departamento de Agronomía de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes, y Dra. D<sup>a</sup>. Pilar Montesinos Barrios, Profesora Titular de la Universidad de Córdoba, Departamento de Agronomía de la de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes.

Informan:

Que el presente Trabajo Profesional Fin de Carrera "OPTIMIZACIÓN OPERACIONAL DE REDES DE RIEGO A PRESIÓN CON VARIOS PUNTOS DE SUMINISTRO DE AGUA. APLICACIÓN A LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE LA CR DE PALOS DE LA FRONTERA", realizado por D<sup>a</sup>. Irene Fernández García, alumna de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes, Plan 2000, reúne los requisitos necesarios para su defensa.

Y para que conste, firman el presente escrito en Córdoba, a 26 de septiembre de 2011

Fdo. Dr. D. Juan Antonio Rodríguez Díaz

Fdo. Dra. D<sup>a</sup>. Pilar Montesinos Barrios





## **AGRADECIMIENTOS**

A mis directores, Pilar Montesinos y Juan Antonio Rodríguez, por haberme ofrecido la posibilidad de realizar este proyecto, que tanta satisfacción personal me ha dado. Por supuesto, gracias por su dedicación y ayuda, sin la cual la realización de este trabajo habría sido imposible.

A M<sup>a</sup> Teresa Carrillo Cobo y Jorge García, por ayudarme en la resolución de algunas de las dudas que me surgieron durante la realización de este proyecto.

A Fran, gracias por ayudarme en todo momento. Gracias por tus aportaciones... sin ti todavía seguiría imprimiendo este trabajo.

A Puri, por sus buenos consejos.

A mi familia, por su apoyo durante mis años de estudios.

A Luis, gracias por todo.



# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	v
GLOSARIO	vi
<b>1. Introducción y antecedentes</b>	
1.1. Consumo energético en las Comunidades de Regantes	1
1.2. Mejora de la eficiencia energética en las CCRR	4
1.3. Los algoritmos genéticos como método de optimización	7
1.4. Operación energética óptima de redes de distribución de agua de riego con más de un punto de abastecimiento	11
<b>2. Objetivos</b>	
2. Objetivos	13
<b>3. Material y métodos</b>	
3.1. Descripción de la zona de estudio	15
3.1.1. Origen y situación actual	15
3.1.2. Situación geográfica	15
3.1.3. Infraestructuras	16
3.1.4. Distribución de los cultivos	19
3.1.5. Gestión del riego	20
3.1.6. Datos climáticos	20
3.2. Planteamiento del problema	22
3.3. Determinación de las coordenadas adimensionales en redes de riego con más de un punto de suministro	26
3.3.1. Determinación del término $l_{j-i}$ mediante la aplicación del algoritmo de Dijkstra	27
3.4. Configuración de los sectores mediante técnicas de análisis de cluster	28
3.5. Necesidades hídricas de los cultivos	31
3.5.1. Evapotranspiración de referencia y precipitación	31
3.5.2. Características de los cultivos	35
3.5.3. Características del suelo	36
3.5.4. Necesidades de riego	36
3.6. Determinación del calendario óptimo de sectorización	38
3.6.1. Los algoritmos genéticos	38
3.6.2. El algoritmo genético multiobjetivo: NSGA-II	40
3.6.2.1. Desarrollo del algoritmo multiobjetivo	41

3.6.2.2. Funcionamiento del algoritmo	44
<b>4. Resultados y discusión</b>	
4.1. Necesidades hídricas de los cultivos	52
4.2. Determinación de las coordenadas adimensionales $z^*$ y $l^*$ para la red de Palos de la Frontera	54
4.3. Aplicación del proceso de optimización a la red de Palos de la Frontera	58
<b>5. Conclusiones</b>	
5. Conclusiones	75
<b>6. Bibliografía</b>	
6. Bibliografía	77
<b>ANEJOS</b>	
ANEJO I: Superficie (ha) y demanda base (l/s) de cada uno de los hidrantes durante una campaña de riego completa	83
ANEJO II: Distancia en (m) entre cada una de las estaciones de bombeo y los hidrantes respectivos	89
ANEJO III: Cota y coordenadas adimensionales de cada uno de los hidrantes	95
ANEJO IV: Código del algoritmo en MatLab	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 3.1</b> Situación geográfica de la C. R. de Palos de la Frontera	16
<b>Figura 3.2</b> Distribución de los sectores y situación de las balsas de regulación en la C.R. de Palos de la Frontera	17
<b>Figura 3.3</b> Distribución de los cultivos en la C.R. de Palos de la Frontera	19
<b>Figura 3.4</b> Evolución de las temperaturas en la estación meteorológica Las Torres-Tomejil	21
<b>Figura 3.5</b> Promedio mensual de precipitaciones y ETo	22
<b>Figura 3.6</b> Representación general del proceso de obtención del calendario óptimo de operación de sectores en redes de distribución de agua con varios puntos de abastecimiento	25
<b>Figura 3.7</b> Ejemplo de matriz de incidencia	28
<b>Figura 3.8</b> Representación esquemática del procedimiento seguido para la determinación de los posibles sectores	31
<b>Figura 3.9</b> Representación esquemática del procedimiento seguido para la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos	38
<b>Figura 3.10</b> Representación esquemática de un cromosoma	42
<b>Figura 3.11</b> Desarrollo del proceso de cruzamiento	47
<b>Figura 3.12</b> Representación esquemática del proceso de optimización mediante el algoritmo multiobjetivo	50
<b>Figura 4.1</b> Representación esquemática de la red de distribución de Palos de la Frontera	51
<b>Figura 4.2</b> Coordenadas $z^*$ y $l^*$ para todos los hidrantes	56
<b>Figura 4.3</b> Opciones de sectorización propuestas	57
<b>Figura 4.4</b> Sectorización actual de la red de Palos y opción de sectorización para 3 sectores obtenida mediante el algoritmo K-medias	58
<b>Figura 4.5</b> Evolución del algoritmo para las funciones objetivo 1 y 2	60
<b>Figura 4.6</b> Frentes de Pareto de la generación 25	61
<b>Figura 4.7</b> Frentes de Pareto de la generación 50	61
<b>Figura 4.8</b> Frentes de Pareto de la generación 75	61
<b>Figura 4.9</b> Frentes de Pareto de la generación 100	62
<b>Figura 4.10</b> Presión en el hidrante más restrictivo (m) frente al número de hidrantes con presión < 30m	62
<b>Figura 4.11</b> Presión en el hidrante más restrictivo frente al número de hidrantes con $P < 30m$ en la generación 100, con los límites que marcan las mejores soluciones.	66

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 3.1</b> Localización de la estación agroclimática Las Torres-Tomejil (Huelva)	21
<b>Tabla 3.2</b> Evapotranspiración de referencia para los distintos cultivos de la Comunidad	33
<b>Tabla 3.3</b> Precipitación total y efectiva en la C.R. de Palos de la Frontera	34
<b>Tabla 3.4</b> Coeficientes de cultivo, duración de las etapas, profundidad radicular y fecha de siembra de los cultivos	36
<b>Tabla 4.1</b> Promedio mensual de las necesidades de riego de la C.R. de Palos de la Frontera	53
<b>Tabla 4.2</b> Tiempo diario necesario para el riego	54
<b>Tabla 4.3</b> Valores de los parámetros a y b	59
<b>Tabla 4.4</b> Valores mínimo y máximo del coste, número de hidrantes con presión inferior a 30m. y presión en el hidrante más desfavorable	64
<b>Tabla 4.5</b> Soluciones óptimas obtenidas en la generación 100	66
<b>Tabla 4.6</b> Calendario óptimo de operación de sectores y alturas manométricas (m) en las estaciones de bombeo en función del sector que opera para los mejores individuos de la generación 100	68

## **RESUMEN**

Los frecuentes periodos de escasez de agua en el sur de España han propiciado el cambio de los sistemas de transporte y distribución del agua de riego de las redes tradicionales de canales abiertos, normalmente en malas condiciones de mantenimiento, a sistemas de redes a presión en las cuales las pérdidas de agua son prácticamente inexistentes. Sin embargo, aunque los sistemas a presión consiguen una importante reducción en el consumo de agua, pues suministran las dotaciones asignadas de forma muy eficiente, hay que señalar que el gasto energético aumenta considerablemente.

En un mercado energético libre, el recurso energía se ha convertido en un factor determinante en la sostenibilidad de la agricultura de regadío. Por ello, la aplicación de técnicas de optimización para reducir el coste energético en las redes de riego es un asunto de gran interés en la actualidad.

En este trabajo se aborda la mejora de la eficiencia energética de redes de riego a presión con más de un punto de abastecimiento de agua mediante un AG multiobjetivo (NSGA-II). La metodología desarrollada permite obtener un calendario óptimo de operación de sectores, así como el correspondiente régimen de funcionamiento de las estaciones de bombeo que minimiza el consumo energético y satisface la demanda a lo largo de una campaña completa de riego.

**Palabras clave:** Eficiencia, algoritmos genéticos, sectorización

## GLOSARIO

$\alpha$	Índice para los centroides
$\alpha_w$	Centroide del cluster (sector) $w$
$\gamma$	Peso específico del agua (9800 Nm <sup>-3</sup> )
$\delta_{vk}$	Parámetro intermedio calculado durante el proceso de mutación
$\Delta E_m$	Diferencia de alturas piezométricas entre dos nudos de alturas piezométricas fijas de una pseudomalla o camino abierto de tuberías
$\eta$	Rendimiento de la estación de bombeo
$\eta_m$	Índice de distribución para la mutación
$c_{vk}$	Valor de la variable $v$ del individuo $k$ que resulta tras la mutación
<b>CWR</b>	Necesidades hídricas de los cultivos (Crop Water Requirements) (mm mes <sup>-1</sup> )
<b>dist</b>	distancia existente entre el nudo origen y el resto de nudos
<b>DAS</b>	Déficit medio de agua en el suelo antes de regar (mm)
<b>D<sub>s</sub></b>	Número de días del mes $s$
<b>ET</b>	Evapotranspiración (mm mes <sup>-1</sup> )
<b>ET<sub>o</sub></b>	Evapotranspiración de referencia de los cultivos (mm mes <sup>-1</sup> )
<b>Fk</b>	Grupos de individuos de una población formados en base al criterio de dominación y a la distancia de apilamiento
$f_{obj}^{max}$	Valor de la función objetivo del individuo que se sitúa en el extremo superior tras la ordenación.
$f_{obj}^{min}$	Valor de la función objetivo del individuo que se sitúa en el extremo inferior tras la ordenación.
<b>H<sub>b</sub></b>	Altura manométrica (m)
<b>H<sub>d</sub></b>	Nivel del agua en el depósito
<b>hd</b>	Número de hidrantes
<b>H<sub>ej</sub></b>	Altura topográfica del hidrante $j$ respecto a la estación de bombeo
<b>h<sub>f,ti</sub></b>	Pérdida de carga en la tubería $ti$ (m)
<b>H<sub>i</sub></b>	Altura manométrica proporcionada por la estación de bombeo $i$ (m)
<b>H<sub>iws</sub></b>	Presión proporcionada por la estación de bombeo $i$ cuando opera el sector $w$ durante el mes $s$ (m)
<b>H<sub>lti</sub></b>	Pérdidas por rozamiento que ocurren en las tuberías (m)
<b>H<sub>reqj</sub></b>	Presión de servicio necesaria en función del sistema de riego (m)
<b>i</b>	Índice de estaciones de bombeo
<b>I(d<sub>k</sub>)</b>	Distancia existente entre el individuo $k$ y los individuos $k+1$ y $k-1$ considerando una de las funciones objetivo.



<b>I(d<sub>l</sub>)</b>	Individuo que posee el valor mínimo de la función objetivo $m_{obj}$ dentro del frente $Fk$
<b>I(d<sub>n</sub>)</b>	Individuo que posee el valor máximo de la función objetivo $m_{obj}$ dentro del frente $Fk$
<b>I(k+1)<sub>fobj</sub></b>	Valor de la función objetivo $f_{obj}$ para el individuo que se sitúa por encima del individuo $k$ tras la ordenación
<b>I(k-1)<sub>fobj</sub></b>	Valor de la función objetivo $f_{obj}$ para el individuo que se sitúa por debajo del individuo $k$ tras la ordenación
<b>IN</b>	Necesidades de riego diarias (l/ha/día)
<b>IR</b>	Necesidades de riego (mm mes <sup>-1</sup> )
<b>j</b>	Índice de nudos
<b>j<sub>0</sub></b>	Nudo de origen
<b>k</b>	Índice para los individuos
<b>k<sub>c</sub></b>	Coefficiente de cultivo
<b>l<sub>j</sub><sup>*</sup></b>	Coordenada topológica adimensional de longitud y que condiciona $H_{li}$
<b>l<sub>j-i</sub></b>	Distancia existente entre el hidrante $j$ y la estación de bombeo $i$ (m)
<b>l<sub>max-i</sub></b>	Valor máximo resultante de la diferencia entre la distancia de cada uno de los hidrantes a la estación de bombeo $i$ (m)
<b>m</b>	Índice de mallas y pseudomallas
<b>M</b>	Matriz de incidencia
<b>m<sub>obj</sub></b>	Función objetivo
<b>n</b>	Número de generaciones del algoritmo genético
<b>N</b>	Número de estaciones de bombeo
<b>N<sub>c</sub></b>	Número de elementos (hidrantes) del cluster $w$ (sector)
<b>n<sub>it</sub></b>	Índice para la iteración
<b>N<sub>j</sub></b>	Conjunto de tuberías que convergen en el nudo $j$
<b>nk</b>	Individuos que pertenecen al frente $Fk$
<b>N<sub>m</sub></b>	Conjunto de tuberías que componen una malla o pseudomalla
<b>NN</b>	Tamaño de la matriz de incidencia
<b>nq</b>	Conjunto de individuos que dominan a $q$ .
<b>N<sub>s</sub></b>	Número de meses que está en funcionamiento la red de riego
<b>N<sub>sect</sub></b>	Número de sectores que operan durante el mes $s$
<b>n<sub>v</sub></b>	Número de variables de decisión
<b>N<sub>w</sub></b>	Número máximo de sectores que puede operar
<b>P</b>	Precipitación (mm mes <sup>-1</sup> )
<b>path</b>	Nudos recorridos para llegar desde el nudo origen a un nudo final cualquiera
<b>Pe</b>	Precipitación efectiva (mm mes <sup>-1</sup> )

$P_{\text{kWh}}$	Precio del kWh (€)
$p_{vk}$	Valor de la variable $v$ del <i>cromosoma</i> padre seleccionado
$q$	Individuo de la población $Q$
$Q_{dj}$	Demanda en el nudo $j$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_{fc}$	Caudal ficticio continuo ( $\text{l/s/ha}$ )
$q_j$	Demanda base de cada hidrante ( $\text{l/s}$ )
$Q_i$	Caudal proporcionado por la estación de bombeo $i$ ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )
$Q_{iws}$	Caudal bombeado por la estación de bombeo $i$ cuando opera el sector $w$ durante el mes $s$ ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )
$q_{\text{max}}$	Caudal máximo permitido por hidrante ( $\text{l/s/ha}$ )
$QQ$	Conjunto de individuos que conforman una población.
$Q_{ti}$	Caudal circulante en la tubería $ti$ en ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$r_{vk}$	Número aleatorio generado durante el proceso de mutación
$s$	Índice de meses
$S_{\text{cult}}$	Superficie ocupada por cada uno de los cultivos de la comunidad respecto a la superficie total (%)
$S_j$	Superficie de riego asociada a cada hidrante (ha)
$Sq$	Conjunto de individuos que son dominados por $q$
$t$	Número de horas diarias de funcionamiento
$t_d$	Tiempo disponible para el riego (horas)
$ti$	Índice de tuberías
$t_{im}$	Tiempo necesario para el riego (horas)
$t_s$	Número de horas diarias de riego durante el mes $s$ .
$v$	Índice para las variables
$w$	Índice de sectores (cluster)
$x$	Puntos a partir de los cuales se lleva a cabo el intercambio de información entre individuos durante el cruzamiento
$z_j^*$	Coordenada topológica adimensional de cota del hidrante $j$
$z_i$	Cota de la estación de bombeo $i$ (m)
$ z_{\text{max}} - z_i $	Máximo valor resultante de la diferencia entre la cota de cada uno de los hidrantes y la estación de bombeo $i$ (m)
$Z_w$	Vector de propiedades que representa al centroide $\alpha_w$

# **INTRODUCCIÓN**



### 1. Introducción y antecedentes

#### 1.1. Consumo energético en las Comunidades de Regantes

El clima constituye un elemento clave en la agricultura, ya que influye en los rendimientos y/o en la calidad de los productos agrícolas. España se caracteriza por poseer un clima con precipitaciones escasas e irregulares en la mayor parte de su territorio, lo que implica que la aportación de agua de procedencia natural a los cultivos no sea suficiente para satisfacer sus necesidades hídricas. Por ello, el agricultor trata de salvar ese déficit hídrico con la aportación de agua mediante el riego.

Esto explica que aunque España sea el país europeo con mayor superficie semiárida, cuente con más extensión de regadíos dentro de ella. La superficie regada en España es de 3344637 ha, siendo Andalucía la comunidad con mayor superficie de riego (779880 ha). En lo que concierne al consumo de agua en el regadío, la cifra en España es de 20432 hm<sup>3</sup> y en Andalucía de 4425 hm<sup>3</sup> según datos del Plan Nacional de Regadíos (Real Decreto 329/2002).

El regadío en España ha experimentado una evolución desde los sistemas tradicionales de transporte y distribución del agua mediante canales abiertos hacia sistemas de redes a presión. A pesar de que este cambio supone una mejora de la eficiencia en el uso del agua, hay que señalar que el gasto energético aumenta considerablemente (Rodríguez Díaz *et al.*, 2011).

Los sistemas de riego junto con la maquinaria agrícola constituyen casi el 70% del consumo energético del sector agrícola. A pesar de que este sector representa el 3.5% de los consumos energéticos totales en España, se prevé un crecimiento, debido fundamentalmente a la puesta en riego de zonas de secano y a la modernización de los sistemas de riego, que consumen más energía que los tradicionales (IDAE, 2008).

España se encuentra en una situación desfavorable en lo que se refiere al sector energético ya que importa más del 80% de su energía primaria, lo que la coloca en una posición vulnerable ante variaciones en los precios de las materias primas. Además, se

espera que durante los próximos 25 años el consumo energético mundial experimente un crecimiento como consecuencia del aumento de la demanda de energía de los países emergentes, en gran medida, así como de los países industrializados (Plataforma Tecnológica Española de Eficiencia Energética, 2009).

Por otro lado, los recursos energéticos son cada vez más escasos y la velocidad de consumo mayor, con el consiguiente aumento en la producción de gases de efecto invernadero. La sociedad está cada vez más concienciada con las cuestiones medioambientales por lo que la eficiencia energética es uno de los aspectos clave para lograr un consumo sostenible.

El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) ha publicado la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España (E4) desarrollada mediante los Planes de Acción 2005-2007 y 2008-2012 con el fin de lograr un ahorro de 87.9 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep) y disminuir en 238 millones de toneladas las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

En la actualidad el IDAE está aplicando el Plan de Acción 2008-2012 (PAE4+) en el que se recoge que en el año 2004, el 85% del consumo energético del sector agrícola provenía del gasóleo, siendo el consumo de energía eléctrica del 13%, fundamentalmente para agricultura de regadío.

Uno de los objetivos que el PAE4+ contempla para el sector agrícola es conseguir un ahorro de 375 ktep durante el año 2012. Para lograrlo, este Plan de Acción propone para la agricultura de regadío transformar los sistemas de riego por aspersión en sistemas de riego por goteo y llevar a cabo Auditorías Energéticas en las comunidades de regantes con el fin de reducir el consumo energético.

En el documento publicado por el IDAE sobre Ahorro y Eficiencia energética en las Comunidades de Regantes (IDAE, 2008), se describen las características de éstas así como los principales factores que inciden en su consumo energético. Entre los factores que condicionan el consumo cabe citar la procedencia del agua utilizada en el riego

(superficial o subterránea), la localización de la estación de bombeo, la presión necesaria en los hidrantes o la topografía de la zona.

A su vez, este documento propone también distintas medidas centradas en el diseño y manejo de la instalación, en los equipos de bombeo y en la contratación de las tarifas eléctricas para reducir el consumo energético.

Una de las medidas contempladas dentro del diseño y manejo de la instalación consiste en la sectorización de la red de riego. Mediante la sectorización se establecen grupos de hidrantes con cota homogénea de tal manera que la estación de bombeo proporciona el caudal necesario con la presión adecuada. Si no se realiza la sectorización, habrá hidrantes en la red con presión insuficiente mientras que en otros será necesario instalar válvulas reductoras de presión por un exceso de la misma.

Otra de las medidas de ahorro y eficiencia energética en el diseño y manejo de la red consiste en establecer turnos de riego en función de la demanda o de la cota de los hidrantes en el caso de que se trate de comunidades de riego con grandes diferencias de cota entre hidrantes.

La aplicación práctica de las medidas anteriores minimiza el uso de válvulas reductoras de presión y se evita un uso ineficiente de la energía.

En lo que concierne a las medidas de ahorro que afectan a los sistemas de bombeo, el IDAE propone dimensionar los grupos de bombeo para los caudales de funcionamiento habituales en la red. En la mayoría de las comunidades de regantes, los equipos de bombeo están sobredimensionados lo que hace que trabajen por debajo de su punto de funcionamiento óptimo. Otra de las actuaciones que se puede efectuar sobre los sistemas de bombeo consiste en instalar grupos de bombeo en paralelo con dos bombas de velocidad variable, ya que la instalación de variadores de velocidad permite que en los periodos de menor demanda de caudal la potencia absorbida por la bomba sea menor. Por otra parte, la simulación de la red bajo distintas condiciones de demanda permite evaluar su comportamiento en distintos escenarios y así programar el funcionamiento de los grupos de bombeo para que trabajen de forma más eficiente.

Otro aspecto a considerar, desde el punto estrictamente económico, es el tipo de tarifa eléctrica a contratar, ya que se puede reducir el gasto económico si se elige la tarifa que más se adapte a la potencia demandada y al consumo real. La elección de la tarifa suele conllevar una concentración del consumo en los periodos más económicos. La aplicación de esta medida está condicionada por el dimensionamiento de las redes, de modo que sea posible la concentración de la demanda en periodos concretos.

### **1.2. Mejora de la eficiencia energética en las CCRR**

En función de las medidas propuestas por el IDAE para mejorar la eficiencia energética en las Comunidades de Regantes, han sido varios los autores que han desarrollado distintas metodologías para reducir el consumo de energía.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia energética en las estaciones de bombeo, Moreno *et al.* (2007) han desarrollado un método conocido como M.A.E.E.B. (Modelo de Análisis de la Eficiencia Energética en Estaciones de Bombeo) que permite determinar la secuencia de activación de las bombas que minimiza el consumo energético. Este modelo ha sido aplicado en la estación de bombeo de Tarazona de la Mancha (Albacete) llegando a alcanzar un ahorro económico del 16%.

Moraleda *et al.* (2008) realizaron varias auditorías energéticas en Comunidades de Regantes de Castilla-La Mancha en las que plantearon diversas medidas de mejora energética en base a los puntos críticos de consumo energético detectados. Una de las medidas propuestas consistía en optimizar la potencia contratada, ya que según estos autores es más ventajoso sufrir una penalización en determinados meses y aprovechar las bonificaciones durante el resto del año. Por otra parte, analizaron el estado de los grupos de bombeo de los sondeos mediante una aplicación informática desarrollada en MatLab (MatLab ®, R2009a), lo que les permitía decidir si era más ventajoso reparar o sustituir las bombas. Así mismo, emplearon la metodología desarrollada por Moreno *et al.* (2007), para determinar la secuencia de activación de las bombas que permite conseguir mejores rendimientos. También estudiaron la posibilidad de instalar micro-turbinas para aprovechar la pérdida de energía que se produce en las válvulas reductoras



de presión. La aplicación de las medidas anteriores les permitía obtener un ahorro del 18% sobre el gasto energético total.

Con el fin de seguir las recomendaciones propuestas por el IDAE de mejorar la eficiencia energética, Bescós *et al.* (2008) han estudiado tres alternativas de manejo en una zona regable de 4070 has. La primera alternativa consiste en reducir la potencia instalada mediante el aumento del número de horas de riego, lo que conlleva una reducción de los caudales en cabecera. En el segundo escenario se plantea establecer dos o tres turnos de riego en los meses de máximas necesidades para reducir la potencia instalada. La tercera alternativa es parecida a la anterior pero además se reducen las dotaciones aplicadas. Los resultados de este estudio muestran que la primera alternativa no logra reducir el consumo ya que al aumentar el número de horas de riego se utilizan horas punta. Sin embargo, con las otras dos alternativas se consiguen ahorros energéticos que oscilan entre el 1.5% y el 5.8% según la tarifa de riego considerada.

Moreno *et al.* (2010) realizaron un estudio para determinar la eficiencia energética en cuatro Comunidades de Regantes de Castilla-La Mancha, dos de ellas con riego a la demanda y sistema de riego por aspersión y goteo y las otras con turnos para regar, diferenciadas por el sistema de riego, goteo y aspersión. Para ello, han determinado el coste de operación de cada una de las redes de riego para comparar las diferencias existentes entre un manejo de riego a la demanda o por turnos. A su vez, también han estudiado el funcionamiento más apropiado de la estación de bombeo según el manejo que se haga de la red, empleando para ello el modelo MAEEB, desarrollado por los mismos autores. Los resultados obtenidos muestran que si se establecen turnos para regar, el manejo de la red es más propenso a ser ineficiente si no se utilizan las herramientas adecuadas para seleccionar la configuración de la estación de bombeo idónea en función de los hidrantes abiertos. Empleando el modelo MAEEB se resuelve este inconveniente y se consigue aumentar la eficiencia energética entre un 3.5% y un 24.9% si se lleva a cabo un manejo por turnos.

La sectorización de la red de riego que propone el IDAE como medida para mejorar la eficiencia energética ha sido estudiada por otros autores.

Ruiz Canales *et al.* (2008) plantearon la sectorización de la red de la Comunidad de Regantes de Albaterra como medida para reducir el gasto energético. Mediante esta metodología determinaron que sectorizando la red en dos zonas de cota homogénea, además de establecer dos turnos de demanda, se puede lograr un ahorro energético cercano al 12%, lo que supone un ahorro económico del 7.8%.

Rodríguez Díaz *et al.* (2009) propusieron una metodología basada en la sectorización y la regulación dinámica de la presión en cabecera como medidas para reducir el consumo energético en la Comunidad de Regantes de Fuente Palmera. Para ello, establecieron cuatro estrategias de manejo: una en la cual la presión en cabecera es fija y el riego se organiza según la demanda y otra igual que la anterior pero estableciendo sectores según la elevación de los hidrantes. Las otras dos estrategias se corresponden con una regulación dinámica de la presión en cabecera considerando riego a la demanda por un lado, y sectorización, por otro. Para evaluar cada una de las estrategias, los autores desarrollaron el algoritmo OPTIEN, mediante el cual, a partir de un patrón de demandas al azar obtenido según la probabilidad de hidrante abierto, se lleva a cabo la simulación hidráulica de la red en el programa EPANET (Rossman, 2000), con lo que se determinan los requerimientos de energía para cada escenario. Los resultados de este trabajo muestran que si se sectoriza la red se obtiene una reducción media en el consumo energético del 20%. Si además se combina con una regulación dinámica de la presión en cabecera, el ahorro puede llegar hasta el 30%.

Carrillo Cobo *et al.* (2010), aplicando el concepto de sectorización como medida de reducción del consumo energético, determinaron el calendario óptimo de operación de sectores que minimizaba el consumo energético durante una campaña de riego completa en las Comunidades de Regantes de Fuente Palmera y El Villar. En este caso los sectores se han establecido en función de la elevación de los hidrantes y de la distancia de estos a la estación de bombeo mediante dos coordenadas adimensionales dependientes una de la cota del hidrante y otra de la distancia existente entre el hidrante y la estación de bombeo. Tras obtener las coordenadas de todos los hidrantes, se establecen los posibles sectores mediante técnicas de análisis de cluster. En función de la opción de sectorización establecida, las necesidades de riego teóricas de los cultivos, las prácticas de riego llevadas a cabo en cada comunidad y el caudal máximo permitido

por hidrante, se generan distintos patrones de demanda con los que se lleva a cabo la simulación de las redes en el programa EPANET. Todo este proceso queda incluido dentro del algoritmo WEBSO, que para cada mes, opción de sectorización y sector operando, determina la presión mínima que debe aportar el sistema de bombeo para que todos los hidrantes reciban la presión requerida en función del patrón de demanda y del sector que esté operando. Con estos datos se calculan los requerimientos energéticos a lo largo de toda la campaña, alcanzándose un ahorro para la Comunidad de Regantes de Fuente Palmera del 27% cuando operan 3 sectores mientras que para la Comunidad de Regantes de El Villar el ahorro es del 9% si se establecen dos sectores.

Las distintas metodologías descritas anteriormente han sido diseñadas para redes de riego con una única fuente de abastecimiento, que son las más frecuentes en las zonas regables. Su aplicación a redes con más de un punto de abastecimiento requiere una modificación de los algoritmos de cálculo.

### **1.3. Los algoritmos genéticos como método de optimización**

Los algoritmos genéticos (AG) constituyen una técnica heurística, basada en los mecanismos de evolución y selección natural, que tratan de buscar soluciones a problemas de optimización no lineal (Goldberg, 1989).

Han sido muchos los autores que han recurrido a los algoritmos genéticos como método de optimización tanto en el diseño como en el funcionamiento de redes de distribución de agua urbanas o de riego.

Montesinos *et al.* (1999) desarrollaron un algoritmo genético para determinar el dimensionamiento óptimo de la red de distribución de agua, de modo que el coste sea mínimo para una topología y una condición de carga dadas. El procedimiento propuesto se basa en la operación de dos módulos, uno de optimización mediante la aplicación de un algoritmo genético y otro de simulación hidráulica para evaluar las soluciones resultantes del proceso de optimización. Para evaluar la idoneidad de este método, lo aplicaron a una red de distribución de agua que había sido analizada por otros autores empleando otras metodologías. Los resultados fueron satisfactorios ya que aplicando el

algoritmo genético obtuvieron costes inferiores a los calculados mediante otros métodos.

Dijk *et al.* (2008) estudiaron la eficiencia de un algoritmo genético en el que se introducía una función de penalización ponderada, para obtener el diseño de mínimo coste de una red de riego. La función objetivo que plantearon sólo incluía los costes de inversión de la red, que dependen principalmente del diámetro y la longitud de la tuberías. Para mejorar el proceso de convergencia del algoritmo genético, incluyeron en la función objetivo un factor de penalización que hace aumentar el coste de una posible solución si se incumplen criterios tales como requerimientos mínimos de presión en los nudos o velocidades máximas admisibles en las tuberías. Además ese factor es ponderado pues penaliza más aquellas soluciones en las que el incumplimiento de las condiciones es mayor, al igual que el AG desarrollado por Montesinos *et al.* (1999). La metodología propuesta la aplicaron a tres redes de riego analizadas previamente por otros autores. Para llevar a cabo el proceso de optimización mediante el algoritmo genético desarrollaron un software llamado GANEO y efectuaron la simulación de las redes de distribución en EPANET. Los resultados obtenidos muestran que esta metodología proporciona buenos resultados en un número reducido de generaciones si se compara con los trabajos realizados por otros autores. Por otro lado, la introducción de la función de penalización ponderada hace que la convergencia hacia el óptimo ocurra antes.

Los trabajos anteriores se centran en optimizar el diseño de redes de distribución de agua a presión, concretamente el diámetro de las conducciones. Sin embargo, es cada día más frecuente encontrar redes de distribución diseñadas en condiciones de operación muy diferentes de las actuales, con lo cual estos sistemas suelen operar muy ineficientemente desde el punto de vista energético. En estos casos es imprescindible optimizar el funcionamiento de la red, siendo numerosos los otros autores que han propuesto distintas metodologías para mejorar la eficiencia en la operación.

Elferchichi *et al.* (2009) aplican un algoritmo genético para optimizar la operación de un sistema de riego a la demanda abastecido por cinco depósitos. El modelo desarrollado fue aplicado en la red de “Sinistra Ofanto” (Foggia, Italia), en la

cual el agua llega a través de cinco depósitos que se llenan con el agua procedente del pantano “Capacciotti”. El objetivo de este estudio era determinar el hidrograma de entrada óptimo para cada depósito que permite satisfacer la demanda de los agricultores y evita el vaciado de los depósitos, sin cambiar la programación de riego a la demanda. Para caracterizar la demanda, emplearon datos recogidos durante el periodo crítico de un año de referencia y para llevar a cabo el proceso de optimización, recurrieron a un algoritmo genético con codificación real, en el que se han introducido penalizaciones si se incumplen los niveles de seguridad en los depósitos. Los resultados de este estudio muestran que es posible satisfacer la demanda de los agricultores, respetando los niveles de seguridad en los depósitos y sin necesidad de modificar la programación de riego a la demanda.

Jiménez Bello *et al.* (2010) han propuesto una metodología basada en los algoritmos genéticos, los Sistemas de Información Geográfica y los modelos de simulación hidráulica para buscar una sectorización dinámica que permita reducir el consumo energético. El método desarrollado ha sido aplicado en la Comunidad de Regantes de Senyera (Valencia), que comprende 387 parcelas con una superficie media de 3093 m<sup>2</sup>. Esta comunidad abarca una extensión de 116 ha aunque sólo 77.5 ha se riegan. El funcionamiento actual de la red de riego consiste en agrupar las tomas en seis sectores de forma que todos los sectores tengan un tamaño similar. Mediante el proceso de optimización llevado a cabo, han obtenido una ordenación de las tomas en sectores que permite minimizar el consumo de energía para cada jornada de riego. Los resultados de este trabajo muestran que se pueden conseguir ahorros en el consumo energético que oscilan entre el 15.3% y el 36% a la vez que se garantiza la presión mínima requerida en cada hidrante.

Con el objetivo de diseñar un sistema de control en tiempo real y cercano al óptimo para redes de distribución de agua, Jamieson *et al.* (2007) proponen una metodología que combina el uso de las redes neuronales artificiales y los algoritmos genéticos. Para llevar a cabo su estudio seleccionaron dos redes de distribución de agua de diferente tamaño, una situada en Haifa, Israel (Salomons *et al.*, 2007) y otra situada en Valencia (Martínez *et al.*, 2007). La metodología propuesta por los autores consta de tres módulos principales. En primer lugar se desarrolla la red neuronal artificial, que

permite evaluar las soluciones que se obtienen mediante el proceso de optimización de forma más rápida de lo que se haría usando un simulador hidráulico convencional. Para minimizar el coste de operación de la red de distribución de agua se emplea un algoritmo genético, cuya función objetivo se basa en encontrar el coste de bombeo mínimo. El tercer módulo implica la obtención de patrones de demanda de cada una de las redes, tanto horarios como diarios, con el fin de pronosticar la demanda futura de las redes. Tras el desarrollo de cada uno de los módulos de forma individual, se lleva a cabo su integración. El estudio llevado a cabo muestra que aplicando esta metodología se puede lograr un ahorro energético cercano al 25% en la red de Haifa y próximo al 18% en la red de Valencia.

El coste energético es el gasto más importante de la mayoría de las Comunidades de Regantes. Ese coste energético está determinado principalmente por el funcionamiento de los sistemas de impulsión, de ahí que una programación óptima de los grupos de bombeo mejore la eficiencia en el funcionamiento de las redes de riego.

Moradi-Jalal *et al.* (2004) proponen el uso de un algoritmo genético para determinar el coste mínimo anual de funcionamiento de una red de riego. El objetivo que perseguían los autores era determinar el tipo de bomba, la capacidad y el número de unidades, además de programar la operación del sistema de bombeo. El algoritmo genético planteado por los autores tenía por objeto determinar la combinación óptima de bombas que minimiza el coste anual (tanto los costes de operación como los de mantenimiento) para una demanda dada. Con la aplicación de este método se puede conseguir un importante ahorro energético.

Los algoritmos genéticos han demostrado ser una herramienta eficaz como método de optimización del diseño y la operación de las redes de distribución de agua, lo que explica su extendido uso en este ámbito. Por su propia naturaleza los AG son fácilmente adaptables a las particularidades de cada problema concreto.

### **1.4. Operación energética óptima de redes de distribución de agua de riego con más de un punto de abastecimiento**

La mejora de la eficiencia energética de redes de suministro de agua de riego ha sido estudiada tanto aplicando procedimientos de simulación como aplicando procedimientos de optimización a redes con un único punto de abastecimiento. Así mismo, aunque la eficiencia energética puede buscarse bien modificando la operación de los hidrantes con mayor demanda energética (puntos críticos), bien sectorizando la red, bien incorporando bombas reelevadoras, etc., en este trabajo se pretende mejorar la eficiencia energética de redes de riego a presión con más de un punto de abastecimiento mediante un AG multi-objetivo (NSGA-II) (Deb *et al.*, 2002). De esta forma, se pretende obtener un calendario óptimo de operación de sectores, así como el correspondiente régimen de funcionamiento de las estaciones de bombeo que suponga el mínimo consumo energético y satisfaga la demanda a lo largo de una campaña completa de riego.

La metodología propuesta se aplicará a la red primaria de la CR de Palos de la Frontera, situada en la provincia de Huelva y dedicada principalmente al cultivo de la fresa, para analizar sus posibilidades de reducción del consumo energético. La elección de esta red de distribución de agua está motivada por tratarse de una red real con varios puntos de suministro de agua.





## **OBJETIVOS**



## **2. Objetivos**

El objetivo general de este trabajo es desarrollar una metodología que permita mejorar la eficiencia energética en redes de distribución de agua de riego con varios puntos de abastecimiento mediante sectorización.

Los objetivos específicos son:

- ❖ Determinación de los sectores a partir de las coordenadas topológicas adimensionales.
- ❖ Cálculo del patrón de demanda de la red en función de la distribución de cultivos.
- ❖ Desarrollo de la aplicación informática en MATLAB en la que se implementará el AG multiobjetivo NGSA-II y a la que vinculará el simulador hidráulico EPANET.
- ❖ Aplicación a la red primaria de la CR de Palos de la Frontera.



## **MATERIAL Y MÉTODOS**



### **3. Material y métodos**

#### **3.1. Descripción de la zona de estudio**

##### **3.1.1. Origen y situación actual**

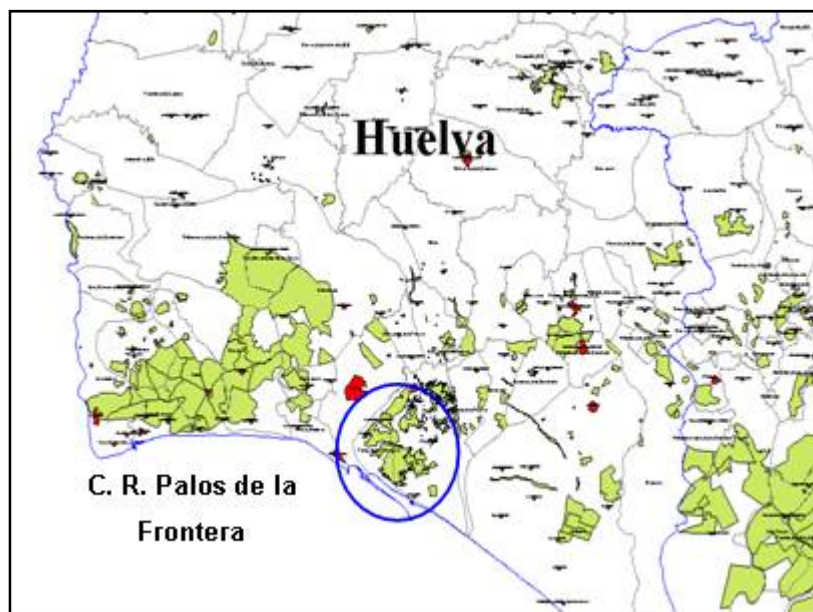
En la zona agrícola de Palos de la Frontera y Moguer los regadíos son recientes y su desarrollo ha estado ligado al auge comercial del cultivo del fresón durante las tres últimas décadas. Durante este período, los agricultores de la zona han utilizado infraestructuras individuales para disponer de una dotación de agua que garantizara la producción.

Para solucionar esta situación de precariedad se crea en 1999 la Comunidad de Regantes de Palos de la Frontera, la cual queda legalmente constituida según resolución del Ministerio de Medio Ambiente con fecha 15/06/2000, emitida por la Comisaría de Aguas de la Confederación Hidrográfica del Guadiana.

Inicialmente se incluye en la declaración el perímetro formado por los sectores I y II, con una superficie regable de 2200 ha. Más tarde, en la campaña 2002-2003 se amplía la comunidad incluyendo la zona conocida como “Las Malvinas” en el sector III. Finalmente queda una superficie regable total de 3343 ha, distribuidas en 227 agrupaciones cuya superficie media es de 13 ha.

##### **3.1.2. Situación geográfica**

La Comunidad de Regantes de Palos de la Frontera se encuentra en la Comarca del Condado, en la provincia de Huelva, junto a la desembocadura del Río Tinto, el cual marca el límite occidental de la comunidad. Se extiende por los municipios de Moguer y principalmente Palos de la Frontera, cuyo Polo Industrial constituye el límite sur de la comunidad. Al norte se encuentra la Comunidad de Regantes “El Fresno”, situada en el Término Municipal de Moguer. Por último, el extremo oriental de la comunidad se sitúa sobre la línea de separación entre las cuencas del Guadiana y Guadalquivir. (Figura 3.1)



**Figura 3.1** Situación geográfica de la C. R. de Palos de la Frontera

### 3.1.3. Infraestructuras

#### - Sistema de captación y distribución del agua

La Comunidad de Regantes de Palos de la Frontera gestiona agua de origen superficial proveniente de la regulación del sistema Chanza-Piedras, de los embalses del Chanza (384 hm<sup>3</sup>) y del Piedras (58 hm<sup>3</sup>). En este punto tiene lugar la captación, desde donde parte la red que conduce el agua hasta las dos balsas de regulación que posee la comunidad.

La capacidad de almacenamiento total de las balsas de regulación es de 341000 m<sup>3</sup>, volumen que garantiza el abastecimiento a toda la superficie regable en época de máximo consumo durante dos días. Para el Sector I existe una balsa de 56000 m<sup>3</sup>, con un dique de 6.85 m de altura máxima, mientras que para los Sectores II y III la balsa tiene una capacidad de almacenamiento de 285000 m<sup>3</sup> con un dique de 9.9 m de altura máxima. En la figura 3.2 se indica la posición de las balsas de almacenamiento dentro de la comunidad.





**Figura 3.2.** Distribución de los sectores y situación de las balsas de regulación en la C.R. de Palos de la Frontera

- Estaciones de bombeo

Junto a las balsas de regulación se encuentran las tres estaciones de bombeo desde las cuales se impulsa el agua a cada sector de riego. Todas ellas disponen de un equipamiento similar: cinco bombas verticales, una de ellas (pequeña) con variador de frecuencia para ajustar el bombeo a la demanda actual en cada momento, y el resto con arrancadores estáticos. De las cinco bombas, hay dos de gran capacidad con las que se suministra el 66% del caudal y otras dos pequeñas que aportan el caudal restante, quedando una quinta bomba grande de reserva.

Los valores de potencia, presión de trabajo y caudal bombeado son diferentes en cada estación. La estación de bombeo del Sector I proporciona un caudal de 1584 L/s a 8.5 kgf/cm<sup>2</sup>. Puesto que el Sector II es el menor en cuanto a superficie se refiere (880 ha), su estación de bombeo suministra el caudal más pequeño, 1056 L/s, a una presión de 4.5 kgf/cm<sup>2</sup>. Para el Sector III se bombea un caudal de 1372 L/s con 5.5 kgf/cm<sup>2</sup> de presión.

La comunidad dispone de un sistema de telecontrol de bombeo, que es el encargado del funcionamiento automático de las estaciones de bombeo y de la transmisión-adquisición de datos a distancia. El núcleo de este sistema es un autómata central que a su vez regula el autómata correspondiente a cada una de las estaciones de bombeo. También se dispone de un SCADA que permite visualizar y controlar el sistema así como obtener los valores de las variables que se controlan (presiones, caudales, etc.).

Como el riego se efectúa a la demanda, el sistema de telecontrol favorece una secuencia de arranque-parada de las bombas que permite mantener la presión a la salida de los filtros. Otra de las ventajas del sistema de telecontrol es que ante imprevistos tales como fallos en el suministro eléctrico por parte de la compañía suministradora, fallos en algún dispositivo electrónico de las bombas (arrancador o variador), presiones anormalmente altas o bajas, bajo nivel en las balsas o caudales anormalmente altos, envía una señal al autómata para que en el caso de que sea necesario, efectúe la parada de las bombas.

### - Estaciones de filtrado

Tras el bombeo se encuentran las estaciones de filtrado, compuestas por filtros de mallas con control de lavado automático, caudal unitario de filtración de 350 m<sup>3</sup>/h, un grado de filtración de 120 µm, y una superficie filtrante de 10000 cm<sup>2</sup>.

### - Casetas de agrupación o unidades de riego.

Cada una de las casetas de agrupación dispone de una llave de mariposa, una ventosa triple efecto, un prefiltro, una válvula reductora y contadores volumétricos correspondientes a las distintas fincas a las que se suministra el agua.

### - Sistema de riego.

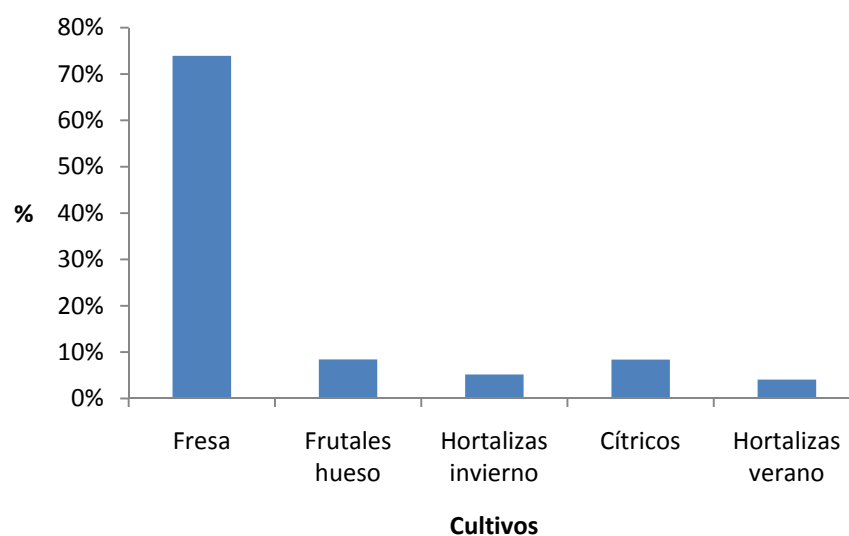
Como el cultivo principal en esta comunidad es la fresa, el sistema de riego es localizado prácticamente en su totalidad. Sin embargo, en determinados momentos de la campaña es necesario aplicar riegos por aspersión, como sucede durante los meses de agosto y septiembre en los que se aplica una cierta cantidad de agua para preparar el

terreno ante la próxima plantación. También se realizan riegos con microaspersores tras la plantación, durante el mes de octubre.

### 3.1.4. Distribución de los cultivos

La Comunidad de Regantes de Palos de la Frontera presenta una superficie dedicada mayoritariamente a la producción de fresa. El cultivo de la fresa se lleva a cabo empleando técnicas de forzado como los túneles y los macrotúneles.

En una menor cuantía existen cítricos, frutales de hueso y hortalizas cultivadas bajo invernadero. La variación interanual de la distribución superficial de cultivos es prácticamente nula desde la creación de esta comunidad. La superficie que ocupa la fresa es de 2173 ha (74%), seguida por los cítricos y los frutales de hueso con 247 ha (8%) cada uno y por las hortalizas de invierno y de verano, con 152 ha (5%) y 120 ha (4%) respectivamente. En la figura 3.3 se pueden ver los porcentajes de superficie de cada uno de los cultivos.



**Figura 3.3.** Distribución de los cultivos en la C.R. de Palos de la Frontera

### 3.1.5. Gestión del riego

Para evitar excesos en el consumo de agua en parcela, la Confederación Hidrográfica del Guadiana asigna una dotación máxima anual de 6000 m<sup>3</sup>/ha, con independencia del tipo de cultivo y la antigüedad del mismo.

La organización del riego es a la demanda. Con las infraestructuras existentes actualmente, todos los comuneros pueden disponer de una dotación de 1.2 L/s/ha a 3 kgf/cm<sup>2</sup> durante las 24 h del día todos los días del año. En la práctica, el uso de las instalaciones por parte de los agricultores se concentra durante la campaña de la fresa, coincidiendo los períodos de máximo consumo con los meses en que la fresa se encuentra en plena producción, de enero a mayo.

Para que la gestión del riego se lleve a cabo adecuadamente, existen en total 10 personas trabajando en la comunidad, todas ellas contratadas a jornada completa. Dos técnicos se encargan de las tareas de manejo del telecontrol, del control del funcionamiento y mantenimiento de las instalaciones y de asesorar al regante. Como personal administrativo hay dos personas contratadas fijas y otras dos temporales. El resto de personal lo forman los operarios encargados de las labores de mantenimiento de las instalaciones de la comunidad.

La facturación realizada en la Comunidad de Regantes de Palos de la Frontera es por volumen de agua, aunque algunos conceptos se facturan de forma mixta, considerando área y volumen. Por otro lado, cada usuario debe tener instalado en su parcela un contador homologado por los servicios técnicos de la Comunidad.

### 3.1.6. Datos climáticos

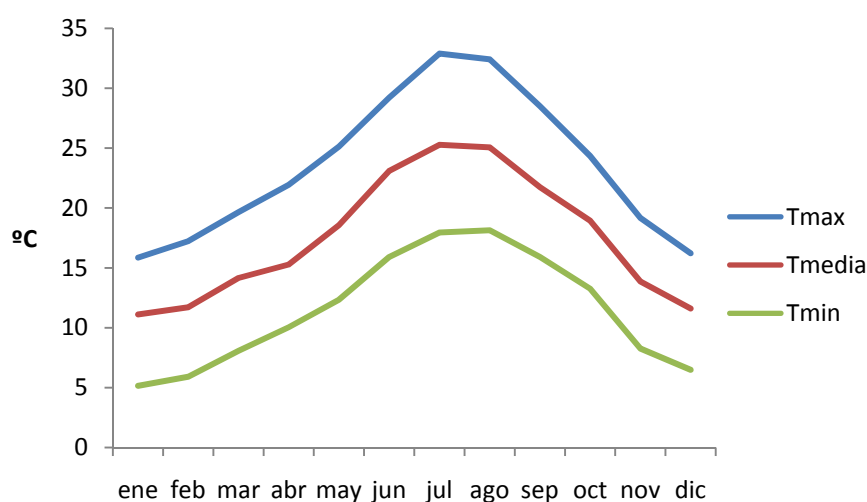
El clima de la zona regable está clasificado como templado cálido con influencias marítimas debidas a su proximidad al litoral. La temperatura media anual ronda los 18°C, bajando hasta los 11°C de media en los meses más fríos hasta alcanzar los 25°C de media durante el verano. Las suaves temperaturas mínimas registradas en los inviernos hacen que en la zona haya una ausencia casi total de heladas durante todo el año. Las precipitaciones son variables, situándose entre los 500 y 700 mm anuales.

Los datos climáticos para este trabajo han sido obtenidos de la red de estaciones agroclimáticas de la Junta de Andalucía, concretamente de la estación agroclimática de Las Torres-Tomejil (Tabla 3.1).

**Tabla 3.1** Localización de la estación agroclimática Las Torres-Tomejil (Huelva)

Coordenadas UTM	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)
<b>X: 162785.0</b>	37° 14' 29"N	06°48'03"W	63.0
<b>Y: 4128508.0</b>			

En la figura 3.4 se muestra la evolución de la temperatura máxima, la media y la mínima de la estación meteorológica Las Torres-Tomejil, durante un periodo de nueve años (2001/2010).



**Figura 3.4** Evolución de las temperaturas en la estación meteorológica Las Torres-Tomejil

Las temperaturas más altas se alcanzan en el mes de julio, con máximas cercanas a los 33°C. La temperatura media alcanzada en este mes está en torno a los 25°C. La temperatura máxima absoluta observada en la serie de años estudiada es de 43.9°C. Respecto a las temperaturas mínimas, enero es el mes más frío con una temperatura media de 11°C. La mínima absoluta de la serie de años estudiada es -3.3°C.

En la figura 3.5 se muestra el promedio mensual de las precipitaciones y la evapotranspiración de referencia que se han registrado en la estación meteorológica Las Torres-Tomejil durante la serie de años estudiada (2001/2010).

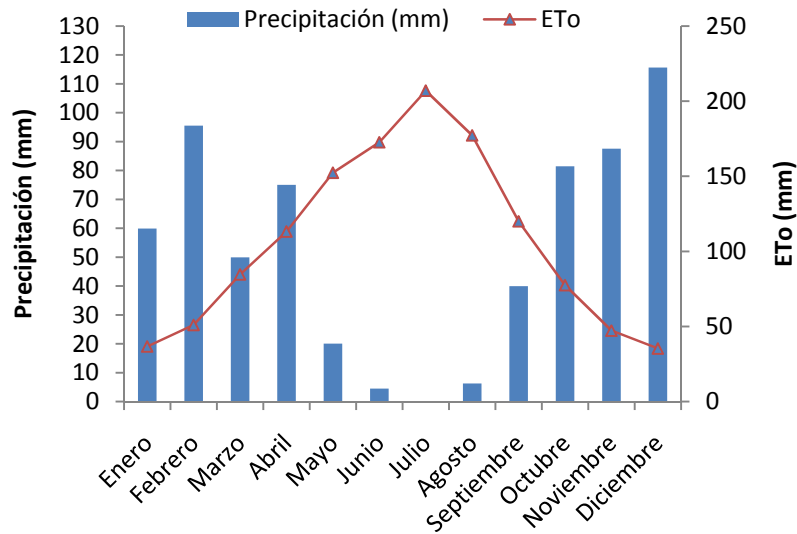


Figura 3.5. Promedio mensual de precipitaciones y ETo

Las precipitaciones se concentran durante el otoño, el invierno y la primavera, siendo prácticamente nulas en el verano. La evapotranspiración de referencia sigue una tendencia creciente hasta alcanzar su máximo en el mes de julio para ir disminuyendo paulatinamente hasta situarse en su valor mínimo en el mes de diciembre.

### 3.2. Planteamiento del problema

Este trabajo aborda la optimización operacional de redes de distribución de agua considerando un enfoque multiobjetivo. El primer objetivo que se pretende alcanzar es minimizar el consumo energético de las redes de riego con más de un punto de abastecimiento así como satisfacer la demanda durante una campaña completa de riego. La formulación matemática de este objetivo se representa en la siguiente ecuación:

$$F1 = C_E + C_{PD} \quad [3.1]$$

Donde F1 representa la función objetivo 1,  $C_E$  es el coste energético de operación de las estaciones de bombeo y  $C_{PD}$  es el coste de penalización por déficit hídrico. Ambos términos deben normalizarse previamente para poder sumarse, tal como se explicará más adelante.

El coste energético de las estaciones de bombeo ( $C_E$ ) en (€/día) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_E = \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{\eta} \cdot \gamma \cdot Q_i \cdot H_i \cdot t \cdot P_{kWh} \right) \quad [3.2]$$

Siendo:

$i$	índice de estaciones de bombeo
$\eta$	rendimiento de la estación de bombeo $i$
$\gamma$	peso específico del agua ( $9800 \text{ Nm}^{-3}$ )
$Q_i$	caudal proporcionado por la estación de bombeo $i$ ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )
$H_i$	altura manométrica proporcionada por la estación de bombeo $i$ (m)
$t$	número de horas diarias de funcionamiento
$P_{kWh}$	precio del kWh
$N$	número de estaciones de bombeo

La ecuación [3.2] está sujeta al cumplimiento de las ecuaciones de continuidad nodal y de conservación de la energía:

a) Continuidad nodal:

$$\sum_{ti \in (N_j)} \pm Q_{ti} = \pm Q_{dj} \quad \forall_j \quad [3.3]$$

b) Conservación de la energía:

$$\sum_{ti \in (N_m)} h_{f,ti} = \Delta E_m \pm H_b \pm H_d \quad \forall_m \quad [3.4]$$

Siendo:

$ti$	índice de tuberías
$Q_{ti}$	caudal circulante en la tubería $ti$ en ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$N_j$	conjunto de tuberías que convergen en el nudo $j$
$Q_{dj}$	demanda en el nudo $j$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$j$	índice de nudos
$N_m$	conjunto de tuberías que componen una malla o pseudomalla
$h_{f,ti}$	pérdida de carga en la tubería $ti$ (m)
$H_b$	altura manométrica (m)
$H_d$	nivel del agua en el depósito
$\Delta E_m$	diferencia de alturas piezométricas entre dos nudos de alturas piezométricas fijas de una pseudomalla o camino abierto de tuberías. Toma valor cero en el caso de mallas (camino cerrado)
$m$	índice de mallas y pseudomallas

El coste de penalización de déficit hídrico  $C_{PD}$  representa el máximo déficit de agua mensual que se alcanza durante una campaña de riego completa. Este término se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_{PD} = \max [Q_{necesario_s} - Q_{aportado_s}] \quad [3.5]$$

Donde  $Q_{necesario_s}$  representa las necesidades hídricas teóricas de los cultivos durante el mes  $s$  ( $m^3 mes^{-1}$ ) y  $Q_{aportado_s}$  es el caudal aportado realmente con el riego durante el mes  $s$ . El término  $Q_{aportado_s}$  en ( $m^3 mes^{-1}$ ) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{aportado_s} = t \cdot D_s \sum_{i=1}^N Q_i \quad [3.6]$$

Siendo  $D_s$  el número de días del mes  $s$ .

La metodología propuesta en este trabajo para minimizar la ecuación [3.1] se basa en la sectorización de las redes de riego. Para ello, habrá que definir en primer lugar el nivel de sectorización que se va a adoptar y, posteriormente, agrupar los hidrantes en los distintos sectores. Por otro lado, tanto el término de coste energético ( $C_E$ ) como el término de coste de penalización de déficit hídrico ( $C_{PD}$ ) dependen de la altura manométrica proporcionada por las estaciones de bombeo. Por tanto, la obtención del mínimo consumo energético resultará de la combinación del régimen de funcionamiento de las estaciones de bombeo con el calendario óptimo de sectorización anual.

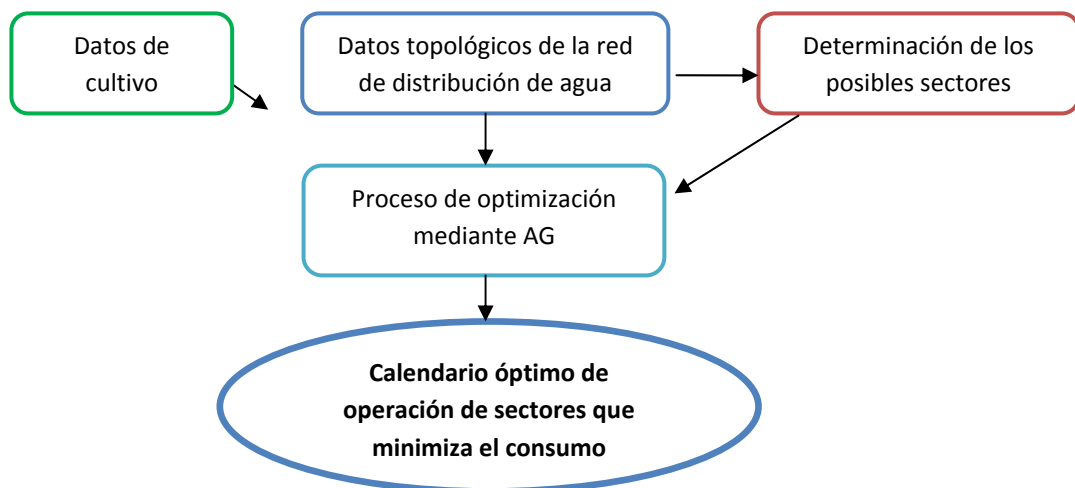


El segundo objetivo considerado en este proceso de optimización es minimizar el déficit de presión en los hidrantes. La representación matemática de este objetivo se muestra en la siguiente expresión:

$$F2 = PF_p + C_{PMF} \quad [3.7]$$

Donde  $F2$  es el valor de la función objetivo 2,  $PF_p$  es la probabilidad de fallo de presión, estimada como el número de hidrantes respecto al total de hidrantes que están aplicando agua que no alcanzan la presión de servicio y  $C_{PMF}$  es el coste de penalización dependiente de la magnitud del déficit de presión. Este coste de penalización hace referencia al grado de incumplimiento de la presión requerida, para lo cual se identifica el hidrante más desfavorable, que es el que tiene la presión más baja. Al igual que en la ecuación [3.1] ambos términos deben normalizarse previamente.

El proceso de optimización de la operación de las redes de distribución de agua se llevará a cabo mediante un AG, concretamente el algoritmo multiobjetivo NSGA-II. Por otra parte, será necesario recurrir al modelo de simulación hidráulica EPANET para poder determinar el valor de las funciones objetivo planteadas anteriormente así como comprobar el cumplimiento de las ecuaciones de conservación de la energía y de continuidad nodal (Figura 3.6).



**Figura 3.6.** Representación general del proceso de obtención del calendario óptimo de operación de sectores en redes de distribución de agua con varios puntos de abastecimiento

### 3.3. Determinación de las coordenadas adimensionales en redes con más de un punto de suministro de agua

La energía que debe proporcionar una estación de bombeo ( $H_i$ ) en (m) para que un determinado hidrante pueda aplicar agua está relacionada con la altura topográfica respecto a la estación de bombeo que tenga ese hidrante ( $H_{ej}$ ), con las pérdidas por rozamiento que ocurren en las tuberías ( $H_{l_{ti}}$ ) y con la presión de servicio necesaria en función del sistema de riego ( $H_{reqj}$ ) (Carrillo *et al.* 2010).

$$H_i = H_{ej} + H_{l_{ti}} + H_{reqj} \quad [3.8]$$

La presión de servicio viene impuesta por el sistema de riego por lo que este término no se puede modificar. Por el contrario, el primer término de la expresión anterior depende de la altura topográfica de cada hidrante mientras que el segundo término depende de la distancia existente entre la estación de bombeo y cada uno de los hidrantes.

Para tratar de caracterizar topológicamente las redes de distribución de agua que dispongan de más de un punto de suministro, se va a aplicar una metodología en la cual se determinan dos coordenadas adimensionales para cada uno de los hidrantes:

$$z_j^* = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{H_{ej} - z_i}{|z_{max} - z_i|}}{N} \quad [3.9]$$

$$l_j^* = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{l_{j-i}}{l_{max-i}}}{N} \quad [3.10]$$

Siendo:

$z_j^*$	Coordenada topológica adimensional de cota del hidrante $j$
$z_i$	Cota de la estación de bombeo $i$ (m).
$ z_{max} - z_i $	Máximo valor resultante de la diferencia entre la cota de cada uno de los hidrantes y la estación de bombeo $i$ (m).

---

$l_j^*$	Coordenada topológica adimensional de longitud y que condiciona $H_{lji}$ .
$l_{j-i}$	Distancia existente entre el hidrante $j$ y la estación de bombeo $i$ (m).
$l_{\max-i}$	Valor máximo resultante de la diferencia entre la distancia de cada uno de los hidrantes a la estación de bombeo $i$ (m).

### 3.3.1. Determinación del término $l_{j-i}$ mediante la aplicación del algoritmo de Dijkstra.

El cálculo del término  $l_{j-i}$  no es una tarea sencilla ya que al existir varias estaciones de bombeo el proceso es más complejo. Para poder determinarlo se ha recurrido a un algoritmo de grafos, concretamente el algoritmo de Dijkstra (Pettie *et al.* 2005), que se emplea para determinar la distancia existente entre un nodo origen y el resto de nodos.

Primeramente, el algoritmo de Dijkstra requiere la construcción de una matriz de incidencia que se compone de dos elementos: los nodos, que en este caso son los nudos de la red de distribución de riego y los arcos, que representan las longitudes de las tuberías que conectan los nudos.

La matriz de incidencia es una matriz cuadrada de tamaño  $NN$ , donde  $NN$  es el número de nudos de la red de distribución de riego. El número de nudos abarca tanto a los nudos de paso como a los hidrantes.

Para formar dicha matriz se enfrentan los nudos de la red disponiéndolos en la primera fila y la primera columna, de tal forma que la intersección entre un nudo de una fila cualquiera con otro nudo de una determinada columna representa la longitud de la tubería que une esos nudos. La diagonal de esta matriz está formada por ceros ya que representa la intersección entre un nudo cualquiera con él mismo. El valor infinito en esta matriz indica que esos dos nudos enfrentados no están unidos (Figura 3.7).

Nudos	1	2	3	n
1	0	Inf.	Inf.	20
2	Inf.	0	10	Inf.
3	Inf.	10	0	Inf.
n	Inf.	Inf.	30	0

**Figura 3.7.** Ejemplo de matriz de incidencia

Una vez construida la matriz de incidencia, se determina la distancia mínima que hay entre cada una de las estaciones de bombeo y los hidrantes. Para poder llevar a cabo este proceso, se utiliza la aplicación informática MatLab, que dispone de la siguiente función:

$$[\text{dist}, \text{path}] = \text{graphshortestpath}(M, j_0) \quad [3.11]$$

donde:

M	matriz de incidencia
$j_0$	nudo de origen
dist	distancia existente entre el nudo origen y el resto de nudos (m)
path	nudos recorridos para llegar desde el nudo origen a un nudo final cualquiera.
Graphshortestpath	distancia mínima (m). Representa el valor de $l_{j-i}$

### 3.4. Configuración de los sectores mediante técnicas de análisis de cluster

Una vez que se han calculado las coordenadas adimensionales de todos los hidrantes, se procede a clasificarlos en grupos homogéneos utilizando técnicas de análisis de cluster. En la actualidad hay una gran variedad de algoritmos de clustering pero en este caso se ha seleccionado el algoritmo K-medias, con el cual se forman

grupos de datos en los cuales no existe ninguna estructura vertical o de dependencia entre ellos (Rodríguez Díaz *et al.*, 2008).

Para medir la similitud entre los elementos que pertenecen a un mismo cluster, o grupo, se puede determinar la distancia que hay entre ellos utilizando distintos conceptos de distancia tales como la distancia euclídea, de Manhattan o de Mahalanobis, etc. (Garre, M. *et al.*, 2007). En este caso se ha optado por la distancia euclídea, que representa la distancia geométrica existente entre dos puntos, como se muestra en la siguiente expresión (Carrillo, 2009):

$$d(j_1, j_2) = \sqrt{(z_{j_1}^* - z_{j_2}^*)^2 + (l_{j_1}^* - l_{j_2}^*)^2} \quad [3.12]$$

Siendo  $j_1$  y  $j_2$  los hidrantes entre los que se va a calcular la distancia,  $z_{j_1}^*$  y  $z_{j_2}^*$  la coordenada topológica adimensional de cota del hidrante  $j_1$  y  $j_2$ , respectivamente y  $l_{j_1}^*$  y  $l_{j_2}^*$  la coordenada topológica adimensional de longitud de los hidrantes  $j_1$  y  $j_2$ .

La función objetivo del algoritmo K-medias es minimizar la varianza intracluster y maximizar la varianza intercluster (Jain, 2000). Por tanto, minimiza la suma de las distancias al cuadrado del conjunto de elementos que están incluidos dentro de un cluster al centroide de ese cluster. La utilización de este algoritmo implica que el número de cluster en los que se van a agrupar los datos debe establecerse de antemano.

El algoritmo K-medias se desarrolla en varias etapas (Maravall, 1993):

### Paso 1

Del conjunto de hidrantes ( $j_1, j_2, \dots, j_{hd}$ ) que se pretenden agrupar, se eligen al azar  $\alpha$  elementos que constituirán los primeros centroides:

$$\alpha_1: Z_1(1); \alpha_2: Z_2(2); \dots \alpha_w: Z_w(w);$$

Siendo  $\alpha_w$  el centroide del cluster (sector)  $w$ ,  $Z_w$  el vector de propiedades que representa al centroide  $\alpha_w$  y  $hd$  el número de hidrantes de la red de distribución. El número encerrado entre paréntesis indica el índice iterativo del algoritmo.

**Paso 2**

Una vez que han sido establecidos los primeros centroides, el conjunto de hidrantes que se van a analizar se agrupan en los cluster atendiendo al criterio de mínima distancia:

$$j \in \alpha_w(n_{it}) \quad \text{if } \text{dist}(j - Z_{ww}(n_{it})) < \text{dist}(j - Z_w(n_{it})) \quad \forall w = 1, 2, \dots, N_w / w \neq ww$$

Siendo  $N_w$  el número de cluster, que en este caso es el número máximo de sectores que puede operar.

**Paso 3**

Cuando los elementos han sido agrupados en su correspondiente cluster, se procede a recalcular los nuevos centroides para minimizar el siguiente índice:

$$J_w = \sum_{j \in \alpha_w(n_{it})} (\text{dist}(j - Z_w(n_{it})))^2 \quad w = 1, 2, \dots, N_w$$

El valor de los nuevos centroides se corresponde con la media aritmética de los elementos que forman el cluster:

$$Z_w(n_{it} + 1) = \frac{1}{N_c(n)} \sum_{j \in \alpha_c(n_{it})} j \quad w = 1, 2, \dots, N_w$$

Siendo  $N_c$  el número de elementos (hidrantes) del cluster  $w$  (sector).

**Paso 4**

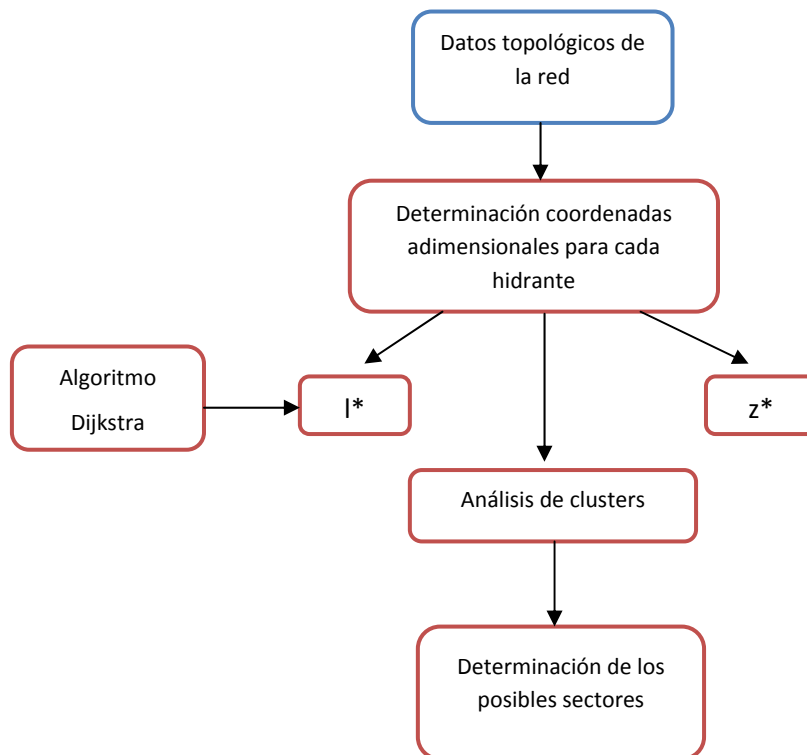
En esta etapa se comprueba si el algoritmo ha alcanzado una posición estable, que ocurre cuando:

$$Z_w(n_{it} + 1) = Z_w(n_{it}) \quad \forall w = 1, 2, \dots, N_w / w \neq ww$$

Cuando se cumple la expresión anterior se da por finalizado el algoritmo. En caso contrario, hay que volver al paso 2, reagrupar los elementos en los cluster y calcular los nuevos centroides hasta que se alcance la estabilidad.

En este trabajo, el algoritmo K-medias será utilizado para agrupar los hidrantes en sectores por lo que en este caso, cada cluster identificará un sector de riego definido por criterios topológicos. El nivel de sectorización que se adopte en una red de riego determinada dependerá del número de hidrantes que configuren la red, ya que las redes con mayor número de hidrantes admiten un nivel de sectorización más alto.

En la figura 3.8 se representa de forma esquemática el procedimiento llevado a cabo para la determinación de los posibles sectores.



**Figura 3.8.** Representación esquemática del procedimiento seguido para la determinación de los posibles sectores

### 3.5. Necesidades hídricas de los cultivos

#### 3.5.1 Evapotranspiración de referencia y precipitación

Para determinar las necesidades hídricas de los cultivos, se requieren datos tales como la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y la precipitación, que se han obtenido de la estación meteorológica Las Torres-Tomejil.

La ETo fue definida por Allen *et al.* (1998) como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que tiene lugar sin restricciones de agua. El significado de la ETo es la capacidad para evaporar que tiene la atmósfera en un lugar y época del año concretas, sin tener en cuenta las características del cultivo ni los factores del suelo. Por tanto, la ETo sólo se ve afectada por factores climáticos.

En el cultivo de la fresa en la Comunidad de Palos de la Frontera se emplean técnicas de forzado como los túneles y los macrotúneles. Según Fernández *et al.* (2010), la evapotranspiración de referencia en el interior de un invernadero es algo inferior a la ETo en el exterior. De hecho, diversos métodos empleados para el cálculo de la ETo en el interior de un invernadero (Hargreaves y Samani 1985; Bonachela *et al.*, 2006), reducen la evapotranspiración de referencia incluyendo en la ecuación de cálculo un parámetro conocido como transmisividad. La transmisividad es la relación que hay entre la radiación solar exterior y la radiación solar en el interior del invernadero y depende del material de cubierta, del tipo de cubierta, etc.

Como el cultivo de la fresa se lleva a cabo casi en su totalidad bajo plástico, la evapotranspiración de referencia que se va a considerar para determinar las necesidades hídricas será el resultado de multiplicar la transmisividad por la ETo estimada mediante la ecuación de Hargreaves con datos de la campaña 2009/2010.

Los datos de transmisividad utilizados para el cálculo de la ETo bajo plástico han sido obtenidos experimentalmente en la zona de estudio (García Morillo *et al.*, 2011). Durante los meses de octubre y noviembre se ha considerado la ETo exterior ya que en este período la fresa se desarrolla al aire libre. Para las hortalizas también se ha usado la transmisividad para el cálculo de la ETo al cultivarse bajo invernadero. Los cítricos y frutales se cultivan al aire libre por lo que el valor de ETo utilizado para el cálculo de los requerimientos hídricos es el que se obtiene en la estación meteorológica (Tabla 3.2).



**Tabla 3.2.** Evapotranspiración de referencia para los distintos cultivos de la Comunidad

	<b>ET<sub>o</sub> (mm/día)</b>		
	Fresa	Hortalizas	Cít. & Fruta.
<b>Enero</b>	0.98	0.98	1.18
<b>Febrero</b>	1.45	1.45	1.75
<b>Marzo</b>	2.26	2.26	2.73
<b>Abril</b>	3.13	3.13	3.77
<b>Mayo</b>	4.05	4.05	4.89
<b>Junio</b>	4.76	4.76	5.75
<b>Julio</b>	5.53	5.53	6.68
<b>Agosto</b>	4.73	4.73	5.72
<b>Septiembre</b>	3.29	3.29	3.97
<b>Octubre</b>	2.50	2.07	2.50
<b>Noviembre</b>	1.58	1.31	1.58
<b>Diciembre</b>	0.95	0.95	1.14

En cuanto a las precipitaciones, se debe considerar que la fresa no aprovecha prácticamente el agua de lluvia. Cuando se realiza la plantación, los caballones quedan cubiertos con un plástico negro para evitar la proliferación de malas hierbas y cuando las plantas alcanzan un determinado tamaño, se instalan los túneles y macrotúneles, lo que explica que no se tengan en cuenta las precipitaciones. Además, la fresa se cultiva sobre suelos muy arenosos, por lo que el agua se infiltra rápidamente y el uso del agua de lluvia por parte de los cultivos es prácticamente nulo.

En el caso de las hortalizas no se han considerado tampoco las precipitaciones al desarrollarse bajo invernadero mientras que para los cítricos y los frutales si se han tenido en cuenta los datos de precipitación registrados en la estación agroclimática (Tabla 3.3).

**Tabla 3.3.** Precipitación total y efectiva en la C.R. de Palos de la Frontera

	<b>Precipitación (mm)<sup>1</sup></b>	<b>Precipitación efectiva (mm)</b>
<b>Enero</b>	65.5	58.6
<b>Febrero</b>	86.7	74.7
<b>Marzo</b>	77.4	67.8
<b>Abril</b>	69.6	61.8
<b>Mayo</b>	20.9	20.2
<b>Junio</b>	6.5	6.4
<b>Julio</b>	0.1	0.1
<b>Agosto</b>	6.2	6.1
<b>Septiembre</b>	30.1	28.7
<b>Octubre</b>	86.7	74.7
<b>Noviembre</b>	81.0	70.5
<b>Diciembre</b>	102.8	85.9

<sup>1</sup> Los datos de precipitación sólo se han considerado para los cítricos y los frutales.

A partir de los datos de precipitación obtenidos de la estación meteorológica, se determina la precipitación efectiva, que es la fracción de precipitación que es aprovechada por los cultivos ya que parte de la precipitación se pierde en forma de escorrentía o percolación. Para calcular la precipitación efectiva en (mm) existen diversos métodos, pero en este caso se ha optado por el método del USDA Soil Conservation Service (NRCS, 2004), que emplea la siguiente expresión:

$$Pe = f(DAS) \cdot [1.25 \cdot P^{0.824} - 2.93] \cdot 10^{0.000955 ET} \quad [3.13]$$

Donde:

Pe precipitación efectiva (mm mes<sup>-1</sup>)

P precipitación (mm mes<sup>-1</sup>)

ET evapotranspiración (mm mes<sup>-1</sup>)

DAS déficit medio de agua en el suelo antes de regar (mm)

El DAS se calcula mediante la siguiente expresión:

$$f(DAS) = 0.53 + 0.0116 \cdot DAS - 8.94 \cdot 10^{-7} \cdot DAS^{-3} \quad [3.14]$$

### 3.5.2. Características de los cultivos

Otros datos necesarios para la determinación de los requerimientos de riego son aquellos relacionados con el cultivo. El parámetro que considera las características de un determinado cultivo en relación con el cultivo de referencia es el coeficiente de cultivo,  $k_c$  (Allen *et al.*, 1998). Este coeficiente representa la relación que existe entre la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia ( $k_c = ET/ET_0$ ).

La evapotranspiración del cultivo no es un valor fijo, pues conforme el cultivo se va desarrollando la superficie de suelo cubierta va siendo mayor a la vez que el cultivo va experimentando un mayor crecimiento foliar. Por tanto, el valor de  $k_c$  variará durante el crecimiento del cultivo, que se divide en cuatro etapas.

- Etapa inicial (I): transcurre desde que se lleva a cabo la plantación hasta que el cultivo cubre el 10% del suelo.
- Etapa de desarrollo del cultivo (II): este periodo transcurre desde que el cultivo cubre el 10% del suelo hasta que alcanza la cobertura completa, que en muchos cultivos coincide con el inicio de la floración.
- Etapa de mediados de temporada (III): este periodo transcurre desde que el cultivo cubre la totalidad del suelo hasta el inicio de la madurez.
- Etapa final (IV): abarca el periodo que transcurre entre el inicio de la madurez y la cosecha o plena senescencia del cultivo.

La fecha de siembra es necesaria a la hora de determinar las necesidades hídricas de los cultivos. Este dato depende de las condiciones climáticas de la zona y de las prácticas locales llevadas a cabo por los agricultores.

La profundidad radicular determina la capacidad que tiene la planta para extraer agua del suelo por lo que también es un parámetro variable en función de la etapa de crecimiento del cultivo.

También se requieren datos tales como el factor de agotamiento crítico, que representa el nivel crítico de humedad en el suelo a partir del cual se produce estrés

hídrico o el factor de respuesta del rendimiento, que expresa la relación que existe entre la reducción del rendimiento y el aumento del déficit de agua.

En la tabla 3.4 se muestran los valores de  $k_c$  para los cultivos existentes en la Comunidad de Regantes de Palos de la Frontera. También se han representado la duración de cada una de las etapas de crecimiento de los cultivos así como la profundidad radicular y la fecha de siembra.

**Tabla 3.4.** Coeficientes de cultivo, duración de las etapas, profundidad radicular y fecha de siembra de los cultivos de la Comunidad.

	$k_c$			Duración etapas				Prof. radicular		D. siembra
	Inicial	Medio	Final	I	II	III	IV	Mínima	Máxima	
Fresa <sup>1</sup>	0.55	0.70	0.90	15	61	59	100	0.30	0.30	288
Frutales <sup>2</sup>	0.60	0.95	0.75	20	70	120	60	1.40	1.40	59
Hortalizas In. <sup>2</sup>	0.40	0.95	0.40	10	30	150	35	1.2	1.2	227
Cítricos <sup>2</sup>	0.65	0.65	0.65	120	90	35	120	1.40	1.40	59
Hortalizas V. <sup>2</sup>	0.70	1.05	0.95	20	30	30	15	0.25	0.60	59

<sup>1</sup> Los datos para la fresa han sido obtenidos de WWF, 2009.

<sup>2</sup> Los datos para estos cultivos han sido obtenidos de la FAO (Allen *et al.*, 1998).

### 3.5.3. Características del suelo

El tipo de suelo es otro dato fundamental para el cálculo de los requerimientos hídricos de los cultivos. Los diferentes tipos de suelo de esta comunidad tienen en común una textura con un alto porcentaje de arena. Por ello, en la determinación de las necesidades de riego de los cultivos se considerarán las características de este tipo de suelo.

### 3.5.4. Necesidades de riego

Una vez que se dispone de los datos descritos anteriormente, se procede a determinar las necesidades de riego de los cultivos mediante el programa CROPWAT 8.0 (Clarke, 1998). Este programa calcula los requerimientos de riego (IR, Irrigation Requirement) en ( $\text{mm mes}^{-1}$ ) mediante la siguiente expresión:

$$IR = CWR - Pe \quad [3.15]$$

Siendo:

CWR Necesidades hídricas de los cultivos (Crop Water Requirements)  
(mm mes<sup>-1</sup>)

El cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos (mm mes<sup>-1</sup>) se efectúa mediante la ecuación:

$$CWR = (ET_o \cdot k_c \cdot S_{cult}) \quad [3.16]$$

Donde:

ET<sub>o</sub> Evapotranspiración de referencia de los cultivos (mm mes<sup>-1</sup>)  
 k<sub>c</sub> Coeficiente de cultivo  
 S<sub>cult</sub> Superficie ocupada por cada uno de los cultivos de la comunidad respecto a la superficie total (%)

Una vez que se obtienen las necesidades de riego de los cultivos mediante el programa de cálculo, se puede determinar la demanda base en (l/s) de cada hidrante mediante la siguiente expresión:

$$q_j = Q_{fc} \cdot S_j \quad [3.17]$$

Donde:

q<sub>j</sub> demanda base de cada hidrante (l/s)  
 Q<sub>fc</sub> caudal ficticio continuo (l/s/ha)  
 S<sub>j</sub> superficie de riego asociada a cada hidrante (ha)

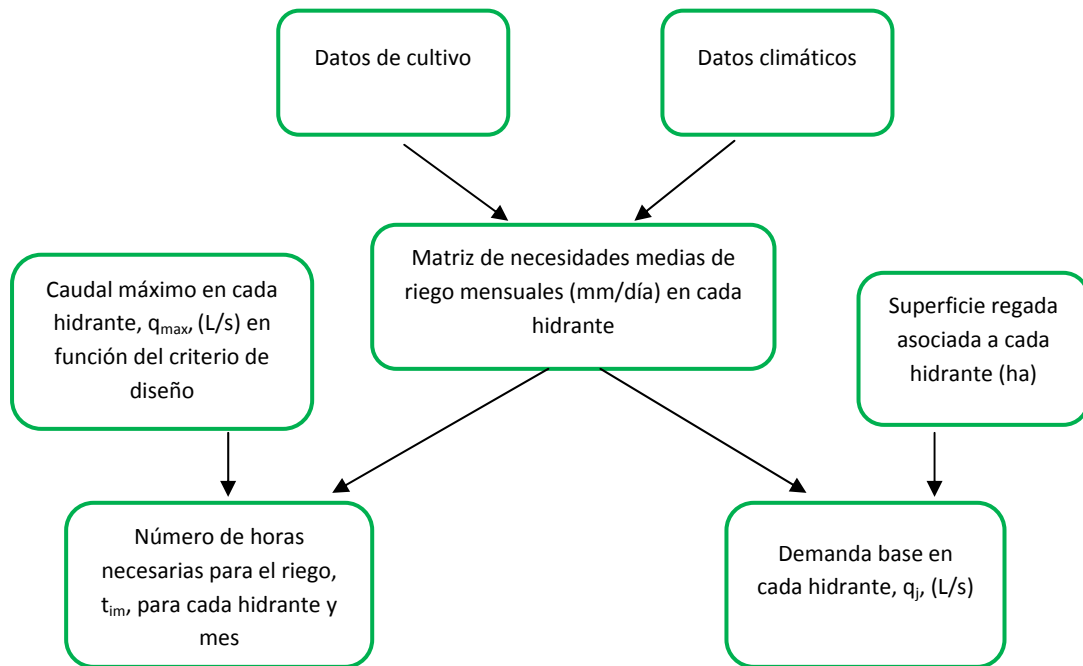
Por otro lado, a partir de las necesidades de riego de los cultivos es posible calcular el tiempo necesario para el riego, t<sub>im</sub> en horas (Carrillo *et al.*, 2010):

$$t_{im} = \frac{1}{3600} \cdot \frac{IN}{q_{max}} \quad [3.18]$$

Donde:

IN                    necesidades de riego diarias (l/ha/día)  
 $q_{\max}$                 caudal máximo permitido por hidrante (l/s/ha)

En la figura 3.9 se representa el procedimiento llevado a cabo para la obtención de las necesidades hídricas de los cultivos.



**Figura 3.9.** Representación esquemática del procedimiento seguido para la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos.

### 3.6. Determinación del calendario óptimo de operación de sectores

#### 3.6.1. Los algoritmos genéticos

Para determinar la operación mensual óptima de varias estaciones de bombeo que suministren agua a un número variable de sectores de riego, se va a aplicar un algoritmo genético multiobjetivo.

Un algoritmo genético es un procedimiento de búsqueda del óptimo de una función basado en los mecanismos de selección y evolución natural. Los algoritmos

genéticos se engloban dentro de los algoritmos evolucionarios y están catalogados como técnicas heurísticas de búsqueda global (Collette and Siarry, 2003).

El desarrollo de un algoritmo genético comienza con la generación de la población inicial, que está constituida por las posibles soluciones al problema de optimización que se plantea. Cada una de las soluciones propuestas constituye un *cromosoma*, que está formado por una cadena de genes donde cada gen representa una variable de decisión. La formación de la población inicial se realiza aleatoriamente.

Tras la generación de la población inicial, se determina la aptitud (*fitness*) de cada *cromosoma*, es decir, con las variables que componen cada *cromosoma* se calcula el valor de la/s función/es objetivo. Posteriormente, se ordenan los *cromosomas* en función de la aptitud y se lleva a cabo la selección, el cruzamiento y la mutación, a semejanza de las poblaciones naturales.

La selección permite que las características de las soluciones que mejor se adaptan al problema de optimización propuesto se transmitan y conserven a lo largo de las generaciones.

En el proceso de selección, se determinan los *cromosomas* que se duplican, los que se mantienen y los que son eliminados. Este procedimiento se lleva a cabo a través del cálculo de la probabilidad de selección, que permite que los individuos con mejor aptitud tengan más probabilidad de ser seleccionados. La probabilidad de selección implica, a su vez, que aquellos individuos que no estén muy bien adaptados pero contengan información útil puedan reproducirse. Una vez que se forma la nueva población, se procede a agrupar los individuos por parejas para efectuar el cruzamiento, que puede realizarse en un único punto o en varios puntos de cruzamiento o combinación. El cruzamiento se efectúa mediante la determinación de la probabilidad de cruzamiento, cuyo valor suele oscilar entre 0.6 y 1 (Golberg, 1989; Galante, 1993; Montesinos *et al.*, 1999).

El siguiente operador que interviene durante el desarrollo del algoritmo es la mutación. La mutación permite obtener nuevas soluciones mediante la modificación de

algunos genes de una determinada solución, con el fin de favorecer la diversidad dentro de la población.

Una vez que se lleva a cabo el proceso de mutación, queda formada la nueva población para ser evaluada. Todo el procedimiento descrito se repite durante las  $n$  generaciones que caractericen al algoritmo.

Un algoritmo genético simple contempla la optimización de una única función objetivo. Sin embargo, en otras ocasiones resulta interesante considerar un enfoque multiobjetivo. En un problema de optimización multiobjetivo, en lugar de obtener una única solución como sucede con los algoritmos genéticos simples, se obtiene un conjunto de soluciones válidas conocidas con el nombre de soluciones óptimas de Pareto. En este caso, la búsqueda de soluciones está condicionada por la aproximación hacia el frente no-dominado óptimo y por la obtención de una distribución uniforme a lo largo del frente (Deb, 2001; Coello *et al.*, 2002).

### 3.6.2. El algoritmo genético multi-objetivo: NSGA-II

Para la obtención del calendario óptimo de operación de sectores que minimice el consumo energético en las redes de distribución de agua se va a emplear el algoritmo multi-objetivo NSGA-II, Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, (Deb *et al.*, 2002). Este algoritmo es una versión mejorada del algoritmo NSGA, non-domination based genetic algorithm, (Srinivas y Deb, 1994) muy utilizado en problemas de optimización pero muy criticado por su complejidad y su carencia de elitismo (Seshadri, 2009). El proceso de optimización del algoritmo NSGA-II se llevará a cabo en la aplicación informática MatLab (Anejo IV).

El desarrollo de este algoritmo comienza con la generación de la población inicial, que se lleva a cabo, como es habitual, de forma aleatoria. Una vez ha sido representada la población inicial, se ordena en frentes en función de la dominación de los individuos. Se considera que un individuo domina a otro si las funciones objetivo del primero no son peores que las del otro y si en al menos una de las funciones objetivo es mejor. Los individuos que no son dominados son situados en el primer frente



mientras que los individuos dominados por el primer frente son asignados al segundo frente y así sucesivamente.

Además de ordenar los individuos en función del frente al que pertenezcan, este algoritmo tiene en cuenta otro parámetro conocido como crowding-distance (distancia de apilamiento). Este parámetro expresa la proximidad que hay entre un individuo concreto y los individuos de alrededor dentro de un mismo frente. Una distancia de apilamiento mayor implica mayor diversidad en la población.

### 3.6.2.1 Desarrollo del algoritmo multiobjetivo

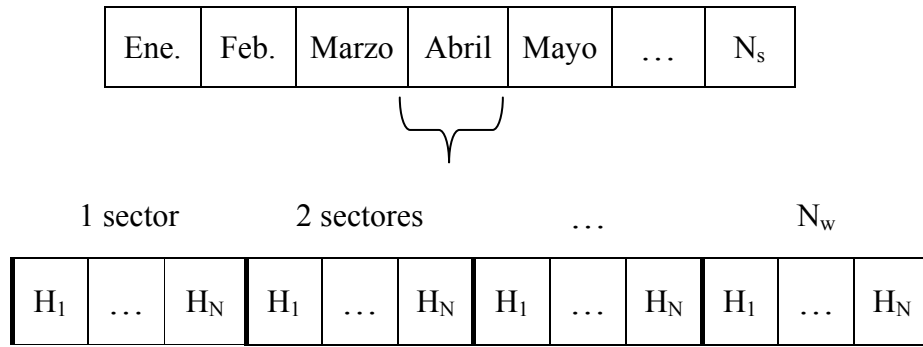
- Generación de la población inicial.

La formación de la población inicial, como se indicó anteriormente, se realiza de forma aleatoria. Cada individuo (*cromosoma*) contiene información de las alturas manométricas de las estaciones de bombeo que configuran las redes de distribución de agua así como el número de sectores que opera en cada mes para una campaña de riego completa. De esta forma, cada *cromosoma* se compone de  $n_v$  variables:

$$n_v = N_w \times N \times N_s \quad [3.19]$$

Donde  $N_w$  es el número máximo de sectores que puede operar,  $N$  es el número de estaciones de bombeo de la red de distribución de agua y  $N_s$  es el número de meses que está en funcionamiento la red de riego.

La distribución de las variables dentro de cada cromosoma se realiza por meses, conteniendo cada mes ( $N_w \times N$ ) variables y dentro de cada mes, las variables se agrupan por sectores, conteniendo cada sector tantas variables como número de estaciones de bombeo ( $N$ ). Esto permite que dentro de un nivel de sectorización determinado, las alturas manométricas en las estaciones de bombeo puedan variar en función del sector que esté operando. En la figura 3.10 se representa de forma esquemática un cromosoma con las variables que lo componen:



**Figura 3.10** Representación esquemática de un *cromosoma*.

El valor que pueden tomar las variables puede ser 0, lo que indica que esa estación de bombeo no se encuentra en funcionamiento, o bien tomar un valor aleatorio dentro del rango definido por el límite mínimo y máximo que se haya fijado a priori para la variable. Para este trabajo se ha recurrido a la codificación real, ya que se evita transformar los valores reales a binarios durante la ejecución del algoritmo y volver a transformarlos a valores reales tras el proceso de optimización (Elferchichi *et al.*, 2009).

- Cálculo del valor de las funciones objetivo para los individuos de la población inicial.

Una vez ha sido generada la población inicial, se lleva a cabo su evaluación, que consiste en determinar el valor que resulta de las funciones objetivo [3.1] y [3.7] para cada individuo.

El término  $C_E$  ( $\text{€ año}^{-1}$ ) de la primera función objetivo, ecuación [3.2], hay que modificarlo para adaptarlo al problema de optimización que se plantea en este trabajo. El término  $C_E$  quedaría así:

$$C_E = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{w=1}^{N_{sect}} \left( \frac{1}{\eta} \cdot \gamma \cdot t_s \cdot P_{kWh} \cdot D_s \cdot \sum_{i=1}^N Q_{iws} \cdot H_{iws} \right) \quad [3.20]$$

Siendo:

- $N_{sect}$  número de sectores que operan durante el mes  $s$
- $t_s$  número de horas diarias de riego durante el mes  $s$ .

$Q_{iws}$	caudal bombeado por la estación de bombeo $i$ cuando opera el sector $w$ durante el mes $s$ ( $m^3s^{-1}$ )
$H_{iws}$	presión proporcionada por la estación de bombeo $i$ cuando opera el sector $w$ durante el mes $s$ (m)

Por otro lado, el término  $C_{PD}$  también tiene que ser modificado para adaptarlo a este problema. Concretamente habría que adecuar la ecuación [3.6] que quedaría así ( $m^3mes^{-1}$ ):

$$Q_{aportado_s} = \sum_{w=1}^{N_{sect}} (t_s \cdot D_s \sum_{i=1}^N Q_{iw}) \quad [3.21]$$

El número de horas diarias de riego durante el mes  $s$  ( $t_s$ ) está relacionado con el tiempo necesario para el riego ( $t_{im}$ ) y con el tiempo disponible para el riego ( $t_d$ ), que viene determinado por el nivel de sectorización que se establezca. De esta manera, un nivel de sectorización elevado implica una reducción en el número de horas disponibles para el riego y viceversa. La determinación del término  $t_s$  se realizará de la siguiente manera: cuando el tiempo necesario para el riego supere al tiempo disponible, el término  $t_s$  coincidirá con el tiempo disponible. Si esto sucede significa que ese nivel de sectorización no permite aplicar las necesidades de riego completas. En caso contrario, es decir, si el tiempo necesario para el riego es inferior al tiempo disponible, el término  $t_s$  coincidirá con el tiempo necesario, lo que conlleva que ese nivel de sectorización permite aplicar los requerimientos de agua en su totalidad.

Respecto a la función objetivo 2, ecuación [3.7], se debe considerar que los cálculos deben realizarse para cada sector que opera dentro del nivel de sectorización que haya sido establecido para un mes concreto. Una vez calculada la F2 para cada uno de los sectores que opera, se elige el valor máximo de la función, que será el valor que tome esta función objetivo para ese mes. El valor anual de la segunda función objetivo será el máximo de los valores mensuales.

Las dos funciones objetivo planteadas, ecuaciones [3.1] y [3.7] están compuestas por términos que poseen distintas unidades. Es por tanto necesario realizar la normalización de cada uno de los términos para poder efectuar la suma correspondiente de cada función objetivo y para que las dos funciones objetivo tengan la misma

importancia y el algoritmo pueda compararlas. La normalización se llevará a cabo en base a la función de distribución uniforme continua (ecuación [3.22]):

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ 1 & x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a} & x \in (a, b) \end{cases} \quad [3.22]$$

Como tanto F1 como F2 están formadas por dos términos, cada término podrá tomar valores entre 0 y 1. De esta forma, el valor mínimo para ambas funciones será 0 y el valor máximo será 2.

Para determinar el valor de las funciones objetivo es necesario llevar a cabo la simulación hidráulica de la red de distribución con el fin de determinar las series de caudales suministradas por cada estación de bombeo, así como las presiones en cada hidrante. El análisis hidráulico se realizará en el software EPANET, que se integrará en la aplicación informática MatLab a través de su biblioteca de enlace dinámico (.DLL).

Para llevar a cabo la simulación hidráulica se requieren los datos topológicos de la red de distribución de agua así como las alturas manométricas de las estaciones de bombeo. También es necesario proporcionar la demanda base de los hidrantes que estén aplicando agua en función del sector que opera. En este caso, se va a asumir que cuando opera un determinado sector todos los hidrantes asociados a ese sector están abiertos y la demanda base de cada uno de ellos ( $q_j$ ) en l/s será:

$$q_j = q_{max} \cdot S_j \quad [3.23]$$

### 3.6.2.2. Funcionamiento del algoritmo

- Ordenación y pre-selección de cromosomas padres

Una vez que se determina el valor de las funciones objetivo para todos los individuos, se procede a su ordenación en base al criterio de dominación. Este proceso de ordenación se lleva a cabo para cada individuo  $q$  de la población  $QQ$ . En primer lugar, se establecen dos grupos, uno ( $Sq$ ) que contiene los individuos que son

dominados por  $q$  y otro ( $nq$ ) que está formado por los individuos que dominan a  $q$ . Si el grupo  $nq$  está vacío significa que  $q$  domina al resto de individuos y, por tanto,  $q$  pertenece al frente número 1. Esto se lleva a cabo para todos los individuos de la población  $QQ$ . Una vez determinados los individuos que pertenecen al frente 1, se procede a establecer los individuos asignados al frente número 2. En este caso, la clasificación se realiza para todos los individuos que pertenezcan al conjunto  $Sq$  (individuos dominados por  $q$ ). El proceso continúa hasta que se completa el número de frentes.

Además de la clasificación de la población en los distintos frentes, se lleva a cabo la determinación de la distancia de apilamiento para cada uno de los individuos. Con este parámetro se pretende determinar la distancia euclídea que hay entre los individuos pertenecientes a un mismo frente.

Para determinar la distancia de apilamiento de los  $nk$  individuos que pertenecen al frente  $F_k$ , se considera una de las funciones objetivo ( $f_{obj}$ ) y se ordenan estos individuos en base al valor resultante de esa función de forma decreciente. Una vez que están ordenados, se le asigna el valor infinito al individuo que tiene el valor mínimo,  $I(d_1)$ , y al que posee el valor máximo,  $I(d_n)$ , de la función objetivo considerada. Para el resto de individuos ( $k$ ) se determina la distancia mediante la siguiente expresión:

Para  $k = 2: nk-1$

$$I(d_k) = \frac{I^{(k+1)}f_{obj} - I^{(k-1)}f_{obj}}{f_{obj}^{max} - f_{obj}^{min}} \quad [3.24]$$

Siendo:

- $I(d_k)$  distancia existente entre el individuo  $k$  y los individuos  $k+1$  y  $k-1$  considerando una de las funciones objetivo.
- $I^{(k+1)}f_{obj}$  Valor de la función objetivo  $f_{obj}$  para el individuo que se sitúa por encima del individuo  $k$  tras la ordenación.
- $I^{(k-1)}f_{obj}$  Valor de la función objetivo  $f_{obj}$  para el individuo que se sitúa por debajo del individuo  $k$  tras la ordenación.

$f_{obj}^{max}$	Valor de la función objetivo del individuo que se sitúa en el extremo superior tras la ordenación.
$f_{obj}^{min}$	Valor de la función objetivo del individuo que se sitúa en el extremo inferior tras la ordenación.

El procedimiento descrito anteriormente se realiza considerando la otra función objetivo y la distancia de apilamiento será la suma de las distancias obtenidas para cada individuo considerando las dos funciones objetivo.

#### - Selección

El proceso de selección se realiza mediante la técnica de torneo binario. Consiste en seleccionar al azar dos individuos de la población inicial y comparar su aptitud. El individuo que tenga mejor aptitud es seleccionado. Es decir, se compara el frente al que pertenece cada individuo y se selecciona aquél que se encuentra en el frente inferior. En el caso de que los dos individuos pertenezcan al mismo frente, se considera el valor de la distancia de apilamiento que se haya obtenido para ambos y se escoge al individuo que posea el valor mayor.

El número de individuos seleccionados para formar la nueva población mediante esta técnica ( *cromosomas* padres) es la mitad de los que forman la población inicial.

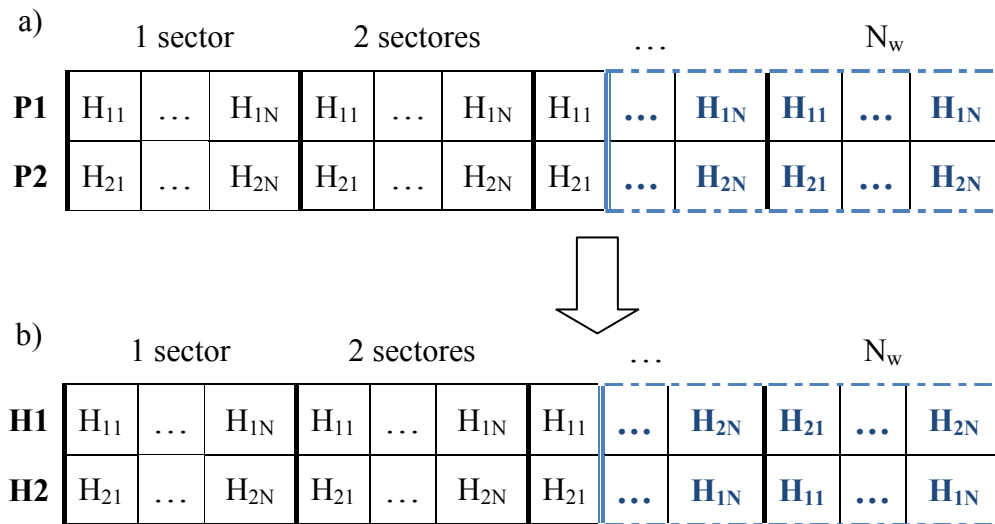
#### - Cruzamiento y mutación

Los individuos seleccionados mediante el procedimiento descrito anteriormente, son sometidos a procesos de cruzamiento y mutación. El algoritmo multiobjetivo NSGA-II considera una probabilidad de cruzamiento de 0.9 y una probabilidad de mutación igual a  $1/n_v$ , siendo  $n_v$  el número de variables de decisión (Seshadri, 2009).

La aplicación de los operadores genéticos de cruzamiento y mutación comienza con la generación de un número aleatorio comprendido entre 0 y 1. Si el número aleatorio resultante es inferior a 0.9 se lleva a cabo el cruzamiento. En caso contrario se produce la mutación.

En este trabajo se ha modificado el NSGA-II realizándose el cruzamiento en varios puntos ya que se ajusta más a las características del problema a resolver así como a las variables que componen los  *cromosomas*. El cruzamiento se inicia con la selección aleatoria de dos individuos de la población formada por los  *cromosomas* padres. Sobre estos dos individuos seleccionados se lleva a cabo el cruzamiento en varios puntos ( $x$ ), que consiste en elegir al azar  $x$  posiciones de la cadena de variables que forman el cromosoma. Cada uno de los  $x$  puntos seleccionados al azar marca la posición a partir de la cual se produce el intercambio de genes (variables) entre los dos individuos.

En este trabajo se propone seleccionar tantos puntos de cruce como número de meses esté operando la red de distribución de agua. De esta manera, por cada mes se genera un número aleatorio que marca la posición a partir de la cual tiene lugar el intercambio de información. De esta forma, si se considera un mes cualquiera, el cruzamiento tendría lugar como aparece en la figura 3.11.



**Figura 3.11** Desarrollo del proceso de cruzamiento: a) Cromosomas padre.  
b) Cromosomas hijo después del cruzamiento

Este procedimiento se repite hasta completar el número de  *cromosomas* hijos.

Como se indicó anteriormente, la mutación se produce si el número aleatorio obtenido es superior a 0.9. Esta técnica selecciona al azar un individuo de la población formada por los  *cromosomas* padres. Las variables que formarán el nuevo  *cromosoma* que resulte tras la mutación irán calculándose de una en una. Primero se genera un

número aleatorio ( $r_{vk}$ ) entre 0 y 1 para cada variable. En función del valor obtenido de ese número aleatorio se determina el parámetro  $\delta_{vk}$ .

$$\text{Si } r_{vk} < 0.5 \quad \delta_{vk} = (2 \cdot r_{vk})^{\frac{1}{\eta_{m+1}}} - 1 \quad [3.25]$$

$$\text{Si } r_{vk} \geq 0.5 \quad \delta_{vk} = 1 - [2 \cdot (1 - r_{vk})]^{\frac{1}{\eta_{m+1}}} \quad [3.26]$$

Siendo  $\eta_m$  el índice de distribución para la mutación, que toma un valor de 20 (Seshadri, 2009).

Tras la obtención del parámetro  $\delta_{vk}$ , se procede a determinar la variable  $v$  del individuo que resultará tras la mutación:

$$c_{vk} = p_{vk} + \delta_{vk} \quad [3.27]$$

Donde:

$c_{vk}$  valor de la variable  $v$  del individuo  $k$  que resulta tras la mutación

$p_{vk}$  valor de la variable  $v$  del *cromosoma* padre seleccionado

El proceso continúa hasta completar todas las variables.

Durante la obtención de las variables de los nuevos individuos mediante el proceso de mutación pueden resultar valores superiores o inferiores a los límites máximos y mínimos fijados para las variables. Si esto ocurre, la variable para el nuevo individuo tomará el valor máximo o mínimo, según sea el caso.

#### - Recombinación y selección

La aplicación de los operadores de selección, cruzamiento y mutación permite generar nuevos individuos. Estos nuevos individuos se incorporan a la población inicial y se vuelve a realizar un proceso de selección para que el número de individuos presentes en una determinada población se mantenga constante. El proceso de selección transcurre siguiendo el criterio de dominación descrito anteriormente. De esta forma se eliminan los individuos peor adaptados.



La población que resulta de la recombinación y la selección experimenta las etapas del algoritmo multiobjetivo que han sido explicadas en apartados anteriores: evaluación de la población, selección, cruzamiento, mutación y recombinación y selección. Este proceso se repite hasta que se completa el número de generaciones que hayan sido consideradas.

En la figura 3.12 se representa de forma esquemática el proceso de optimización llevado a cabo para obtener el calendario óptimo de operación de sectores.

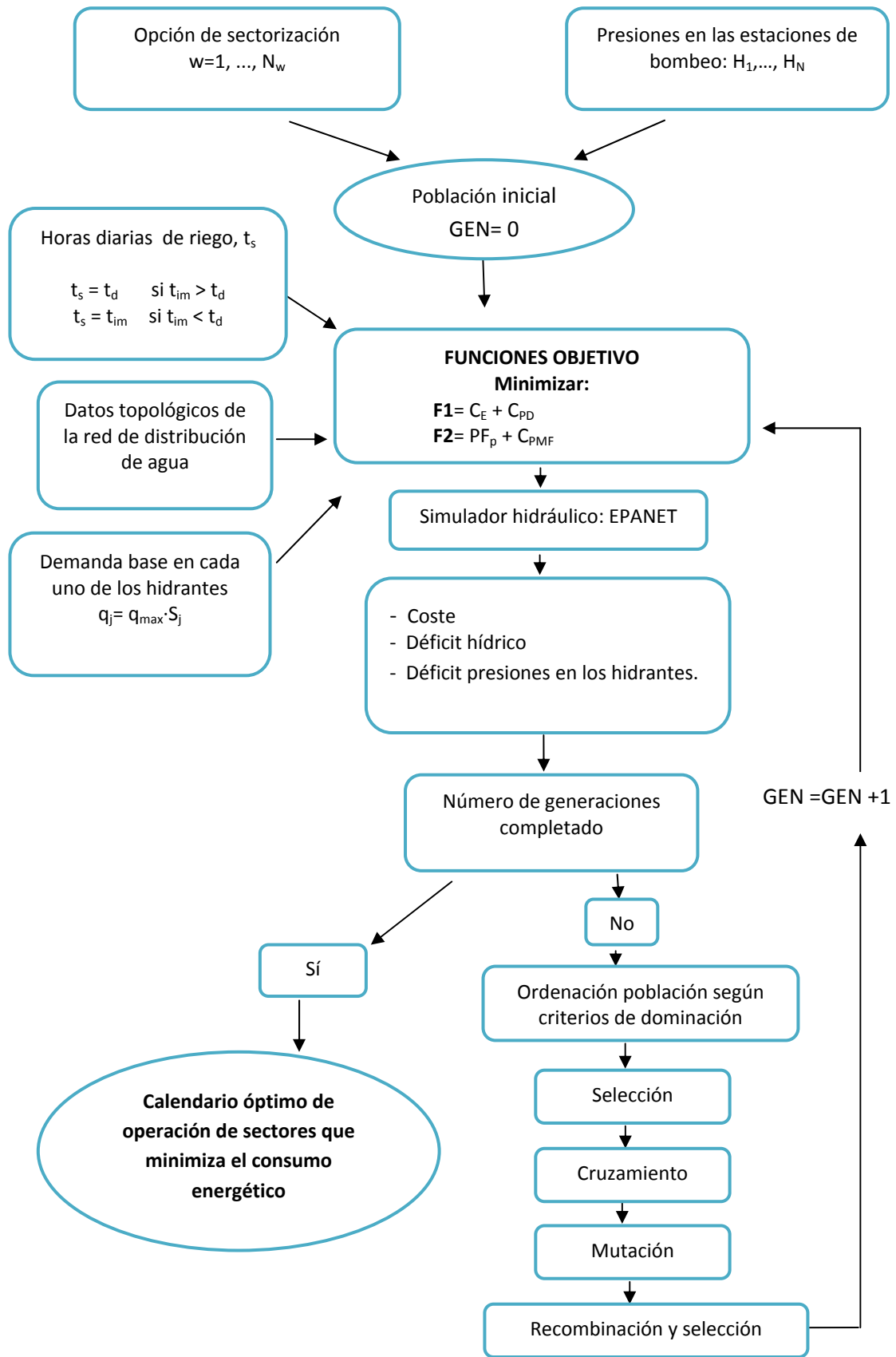


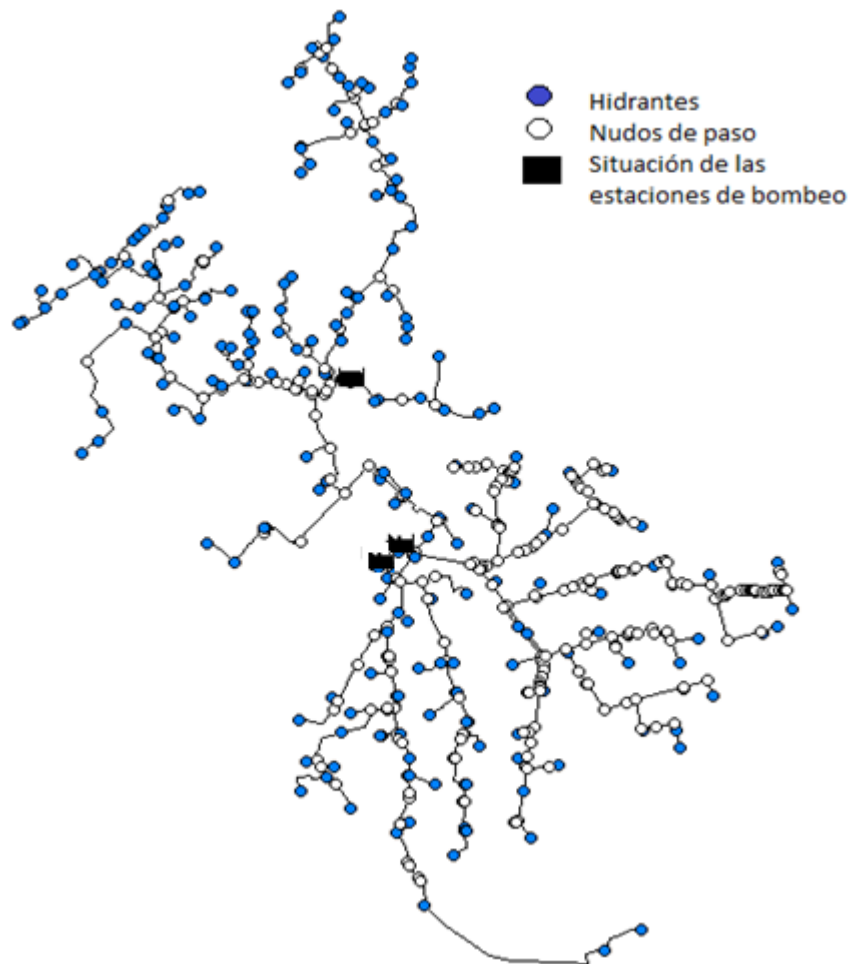
Figura 3.12 Representación esquemática del proceso de optimización mediante el algoritmo multiobjetivo

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**



#### 4. Resultados y discusión

La metodología descrita anteriormente se aplica a la red de riego de la CR de Palos de la Frontera, que dispone de 3 estaciones de bombeo, cuyas alturas manométricas operan entre los 45 y los 85 m según la gestión habitual. La red está formada por 227 hidrantes cuya superficie asociada media es de 13 ha. Cada hidrante está diseñado para aplicar un caudal máximo de 1.2 L/s/ha ( $q_{\max}$ ) a una presión de 30 m. Por otra parte, la red dispone de 513 tuberías que suman una longitud total de 78.69 Km, de PRFV y de PVC, cuyos diámetros oscilan entre los 90 m y los 1200 m. En la figura 4.1 se muestra la configuración de la red de riego de Palos de la Frontera.



**Figura 4.1.** Representación esquemática de la red de distribución de Palos de la Frontera.

### 4.1. Necesidades hídricas de los cultivos

Los requerimientos de agua teóricos de los cultivos obtenidos mediante CROPWAT quedan recogidos en la tabla 4.1. A partir de estos resultados se determinan las necesidades de riego anuales para la Comunidad de Regantes de Palos de la Frontera, que están en torno a los 6230 m<sup>3</sup>/ha. Por otro lado, los meses de mayor demanda de riego son mayo y abril, coincidiendo con la etapa en la que la fresa se encuentra en plena producción.

Asimismo, con los datos de la tabla 4.1 se calcula el promedio mensual de la demanda base diaria de cada uno de los hidrantes mediante la ecuación [3.17]. Los valores que toma la demanda base oscilan entre 0.13 y 24.64 L/s según el tamaño de la parcela abastecida. En el Anejo I se recoge el promedio mensual de la demanda base de todos los hidrantes durante una campaña de riego completa.

**Tabla 4.1** Promedio mensual de las necesidades de riego de los cultivos de la C.R. de Palos de la Frontera

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Necesidades teóricas de riego (mm/día)	0.74	1.07	2.05	2.87	4.09	1.50	0.86	1.90	1.69	2.04	0.94	0.66
Necesidades teóricas de riego (mm/mes)	23.08	29.91	63.63	86.16	126.75	44.95	26.58	58.98	50.75	63.31	28.20	20.61
Caudal ficticio continuo (l/s/ha)	0.09	0.12	0.24	0.33	0.47	0.17	0.1	0.22	0.20	0.24	0.11	0.08
Área regada (%)	79	79	91	94	94	94	16	21	95	79	79	79

Una vez que se conocen las necesidades de riego teóricas de los cultivos para cada mes, se puede calcular el tiempo diario necesario para el riego ( $t_{im}$ ) mediante la ecuación [3.18]. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2.** Tiempo diario necesario para el riego

<b>Tiempo diario necesario para el riego, <math>t_{im}</math> (horas)</b>	
<b>Enero</b>	1.72
<b>Febrero</b>	2.47
<b>Marzo</b>	4.75
<b>Abril</b>	6.65
<b>Mayo</b>	9.46
<b>Junio</b>	3.47
<b>Julio</b>	1.98
<b>Agosto</b>	4.40
<b>Septiembre</b>	3.92
<b>Octubre</b>	4.73
<b>Noviembre</b>	2.18
<b>Diciembre</b>	1.54

#### **4.2. Determinación de las coordenadas adimensionales $z^*$ y $l^*$ para la red de Palos de la Frontera**

Previo a la obtención de las coordenadas adimensionales  $z^*$  y  $l^*$ , es preciso calcular la distancia existente entre cada una de las tres estaciones de bombeo y los 227 hidrantes que configuran la red de Palos de la Frontera ( $l_{j-i}$ ), ya que este término es necesario para determinar la coordenada  $l^*$ .

El análisis de los resultados obtenidos tras el cálculo del término  $l_{j-i}$  mediante el algoritmo de Dijkstra muestran que en relación a la estación de bombeo 1, el hidrante más alejado se encuentra a una distancia de 10510 m, mientras que el hidrante que se sitúa más próximo a esta estación de bombeo está a 119 m. Con respecto a la estación de bombeo 2, el hidrante más distante a esta estación se encuentra a 8804 m, situándose a 126 m de distancia el hidrante más próximo. Por último, la distancia máxima resultante entre la estación de bombeo 3 y el resto de hidrantes es de 8809 m, siendo la distancia mínima de 121 m.

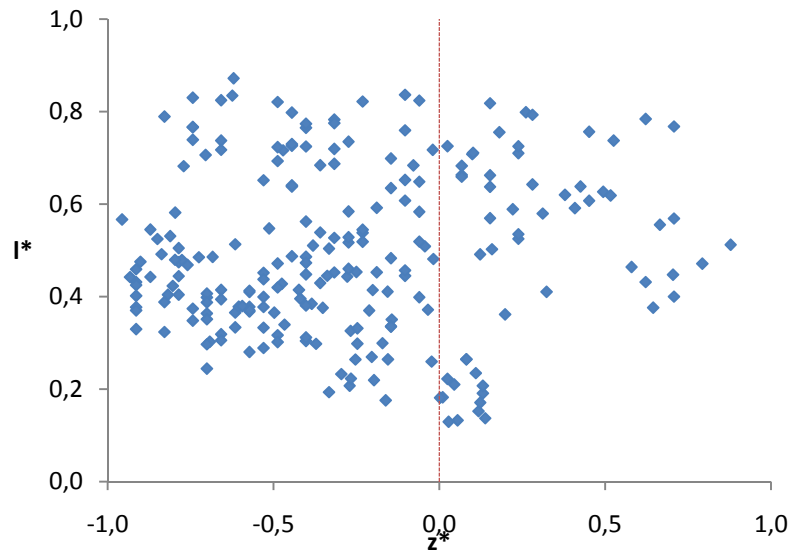


En el anejo II se muestran las distancias obtenidas mediante el algoritmo de Dijkstra en MatLab entre las tres estaciones de bombeo y los 227 hidrantes.

En la Figura 4.2 se representan los valores de las coordenadas adimensionales  $l^*$  y  $z^*$  que se han obtenido para los 227 hidrantes. El valor mínimo que toma la coordenada  $l^*$  es 0.13, mientras que el valor máximo es 0.87. La distribución regular de la coordenada  $l^*$  está relacionada con la distribución prácticamente rectangular de los hidrantes de la red estudiada (Figura 4.2).

En lo que concierne a la coordenada adimensional  $z^*$ , ésta varía entre -0.96 y 0.88, correspondiéndose los valores negativos de esta coordenada con los hidrantes que se encuentran en cotas inferiores a las de las estaciones de bombeo. La cota de cada una de las estaciones de bombeo se sitúa en 25 m para la estación de bombeo 1, 28.36 m para la estación de bombeo 2 y 28.98 m para la estación de bombeo 3. La cota de los hidrantes se sitúa entre 5 m y 48 m, localizándose más del 75% de los hidrantes en cotas inferiores a las de las estaciones de bombeo, lo que se puede observar en la Figura 4.2, en la cual hay un mayor número de puntos en la zona negativa de  $z^*$ . Los hidrantes con valores de  $z^*$  próximos a 0, tanto positivos como negativos, son los que tienen cotas similares a las de las estaciones de bombeo. Asimismo, los hidrantes con valores de  $z^*$  próximos a -1.0 son los que se sitúan en cotas más bajas mientras que los hidrantes con valores de  $z^*$  próximos a 1.0, son los que están localizados en cotas más altas con respecto a las estaciones de bombeo.

En el anejo III se recoge el valor de las coordenadas  $z^*$  y  $l^*$  de cada uno de los hidrantes.

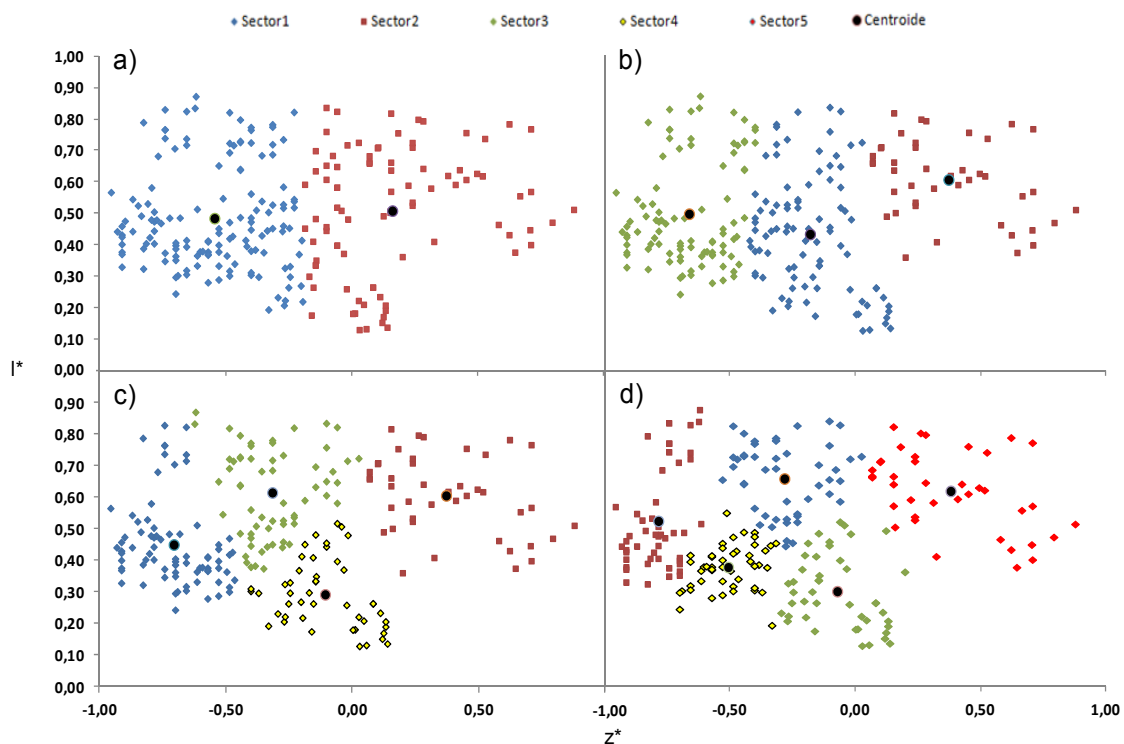


**Figura 4.2** Coordenadas  $z^*$  y  $l^*$  para todos los hidrantes

En función de las coordenadas adimensionales  $l^*$  y  $z^*$  obtenidas para los 227 hidrantes, se pueden establecer grupos homogéneos, es decir, sectores definidos por criterios topológicos, usando técnicas de análisis de clusters. Como el número de cluster debe ser fijado a priori, este algoritmo se aplica para 2, 3, 4 y 5 sectores ya que al tratarse de una red con un importante número de hidrantes, el nivel de sectorización puede ser mayor. Por el contrario, Carrillo *et al.* (2010) proponen 2 y 3 sectores para las dos redes estudiadas, ya que están compuestas por 85 y 47 hidrantes, un número bastante inferior, aunque el nivel de sectorización también depende de la disponibilidad de agua en parcela (tamaño del hidrante).

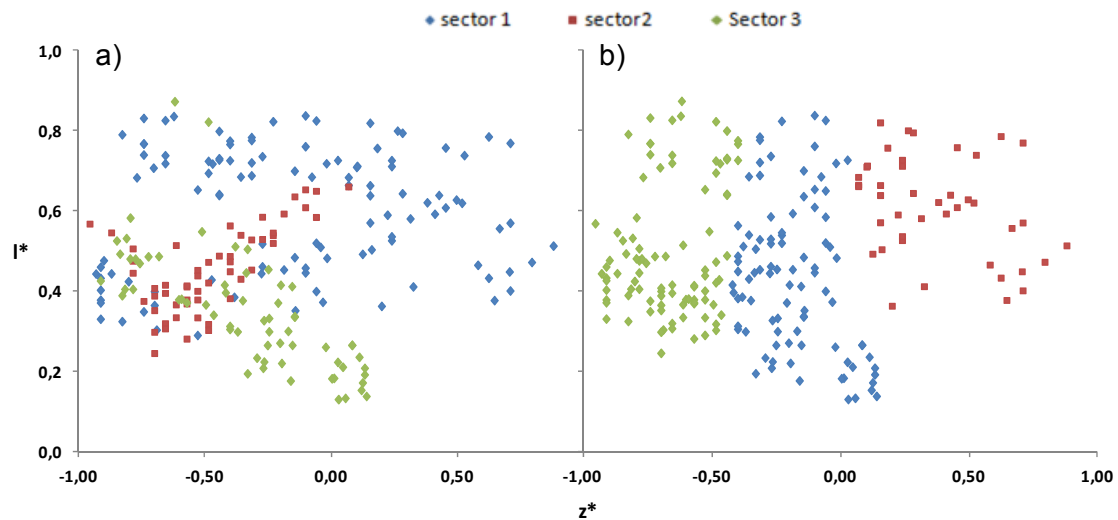
En la figura 4.3 se observa la forma en la cual se han agrupado los hidrantes en los distintos sectores en función de las coordenadas  $z^*$  y  $l^*$ . La Figura 4.3.a representa una opción de sectorización con dos sectores, en la que el primer sector queda con 141 hidrantes y el segundo con 86 hidrantes. La Figura 4.3.b muestra cómo se agrupan los hidrantes para una opción de sectorización de 3 sectores. En este caso, el primer sector quedaría formado por 91 hidrantes, el segundo sector estaría compuesto por 42 hidrantes y el tercer sector abarcaría los 94 hidrantes restantes. La agrupación de los hidrantes en 4 sectores queda representada en la figura 4.3.c. El número de hidrantes que se incluye en cada sector es 77 para el primero, 42 para el segundo, 62 para el tercero y 46 para el cuarto. Por último, la figura 4.3.d refleja la opción de sectorización

con 5 sectores, en la que el primer sector abarca 47 hidrantes, el segundo 49, el tercero 44, el cuarto 47 y el quinto 40.



**Figura 4.3** Opciones de sectorización propuestas: a) 2 sectores, b) 3 sectores, c) 4 sectores y d) 5 sectores.

En la Figura 4.4.a se representa la sectorización actual en la red de distribución de Palos de la Frontera. La red se organiza en tres sectores y como se puede observar los hidrantes que forman parte de cada sector no coinciden con los hidrantes que pertenecen a los sectores que resultan tras la aplicación del algoritmo K-medias para la opción de sectorización de 3 sectores (Figura 4.4.b). El criterio de definición de sectores es meramente práctico, por pertenencia a un grupo de tuberías, sin tener en cuenta las características topológicas del hidrante, que influyen en su comportamiento hidráulico. Conectados a una misma tubería se pueden encontrar hidrantes hidráulicamente muy diferentes. La sectorización aquí propuesta depende de las características topológicas del hidrante, independientemente de la tubería a la que pertenece, ya que con sistemas de telecontrol es posible operar los hidrantes de forma independiente.



**Figura 4.4.** Sectorización actual de la red de Palos (a) y opción de sectorización para 3 sectores obtenida mediante el algoritmo K-medias (b).

### 4.3. Aplicación del proceso de optimización a la red de Palos de la Frontera

El proceso de optimización mediante el algoritmo multiobjetivo NSGA-II modificado se aplica a la red de Palos de la Frontera considerando la plena satisfacción de las necesidades de riego de los cultivos ( $6230 \text{ m}^3/\text{ha}$ ).

Como se indicó anteriormente, el desarrollo del algoritmo comienza con la generación de la población inicial. Cada individuo de la población inicial está formado por 180 variables, resultado de multiplicar el número máximo de sectores que puede operar (5), el número de estaciones de bombeo de la red de distribución de Palos de la Frontera (3) y el número de meses que la red está en funcionamiento (12), ecuación [3.19].

Cada variable representa la altura manométrica que puede proporcionar la estación de bombeo correspondiente y los valores que puede tomar son 0 si no funciona, o bien un número aleatorio comprendido entre 45 m y 85 m por ser el intervalo de operación actual de las estaciones de bombeo de la red estudiada. Además, cada cromosoma contiene de forma indirecta información sobre el número de sectores que puede operar en cada mes. Como cada cromosoma está formado por 180 variables, a cada mes le corresponderán 15 variables ( $180 \text{ variables}/12 \text{ meses}$ ). Esas 15 variables se

asocian en grupos de 3 variables (3 estaciones de bombeo), representando cada grupo un sector. La primera variable de cada serie de tres, representa la altura manométrica en la estación de bombeo 1; la segunda variable de la serie indica la altura manométrica en la estación de bombeo 2 y la tercera variable representa la altura manométrica en la estación de bombeo 3. Cuando todos los valores de una serie determinada son 0, significa que hay un nivel menos de sectorización, y así sucesivamente. De esta forma, para cada mes pueden operar desde uno hasta cinco sectores.

Una vez que se obtiene la población inicial, se determina el valor de las funciones objetivo para cada uno de los individuos (ecuaciones [3.1] y [3.7]). Para calcular el término  $C_E$ , ecuación [3.20], se ha considerado que el rendimiento de los grupos de bombeo ( $\eta$ ) es 0.8 y el precio del kW-h ( $P_{kW-h}$ ) es 0.10 €.

Para llevar a cabo la normalización de los términos que forman las funciones objetivo se han considerado los valores de  $a$  y  $b$  (ecuación [3.22]) que se recogen en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3.** Valores de los parámetros  $a$  y  $b$ , ecuación [3.22]

Término de la ecuación	a	b	Unidades
$C_E$	0	500000	€
$C_{PD}$	0	5% IN mes *	$m^3mes^{-1}$
$C_{PMF}$	0	-30	m

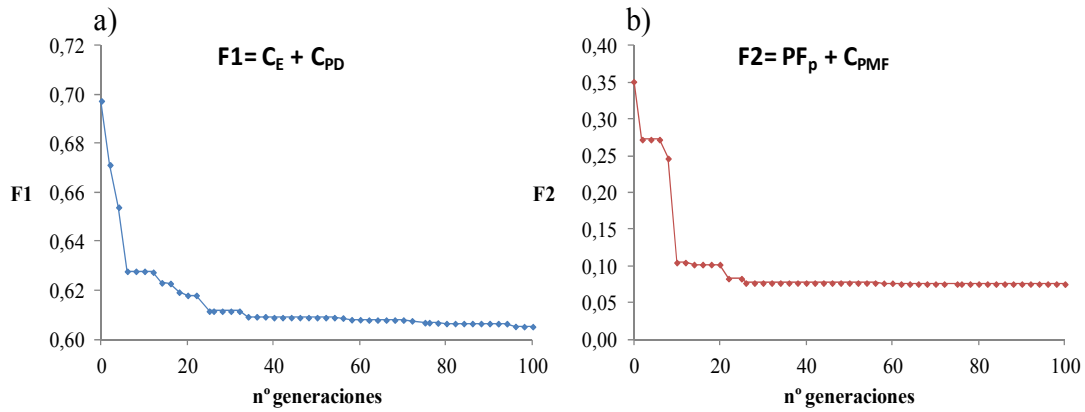
\*El valor de  $b$  se corresponde con el 5% de las necesidades de riego del mes correspondiente

En el desarrollo del proceso de optimización se han considerado los siguientes valores de los parámetros del AG:

- ❖ Número de individuos de la población: 50
- ❖ Número de generaciones realizadas: 100
- ❖ Probabilidad de cruzamiento: 0.9
- ❖ Probabilidad de mutación: 1/180

En la figura 4.5 se representa gráficamente la evolución (valores mínimos por generación) que experimenta el algoritmo durante las 100 generaciones. La figura 4.5.a

muestra la evolución de la función objetivo 1 mientras que la figura 4.5.b representa la evolución de la función objetivo 2.



**Figura 4.5.** Evolución del algoritmo para la función objetivo 1 (a) y la función objetivo 2 (b).

En la figura 4.5.a se observa como la reducción en el valor de  $F1$  es más acusada en las 6 primeras generaciones. En las siguientes generaciones, la reducción en el valor de la  $F1$  es más gradual, experimentando una evolución menor a partir de la generación 34. Las soluciones con déficit hídrico se eliminan en la segunda generación. En lo que respecta a la figura 4.5.b, el algoritmo es capaz de reducir el valor de  $F2$  en 26 generaciones, siendo el valor de esta función objetivo prácticamente constante en el resto de generaciones.

En las figuras 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 se muestran los frentes de Pareto de las generaciones 25, 50, 75 y 100. Al utilizar unidades reales, es necesario descomponer  $F2$  en sus dos sumandos. En las figuras 4.6.a, 4.7.a, 4.8.a y 4.9.a se representa el coste frente al número de hidrantes que no recibe la presión requerida. El número de hidrantes que no recibe la presión requerida se corresponde con el primer sumando de la  $F2$  para cada individuo. En las figuras 4.6.b, 4.7.b, 4.8.b y 4.9.b se representa el coste frente a la presión en el hidrante más desfavorable, que es el segundo término de la  $F2$ .

El análisis de las citadas gráficas revela que conforme el coste va disminuyendo, la presión en el hidrante más restrictivo va siendo inferior.

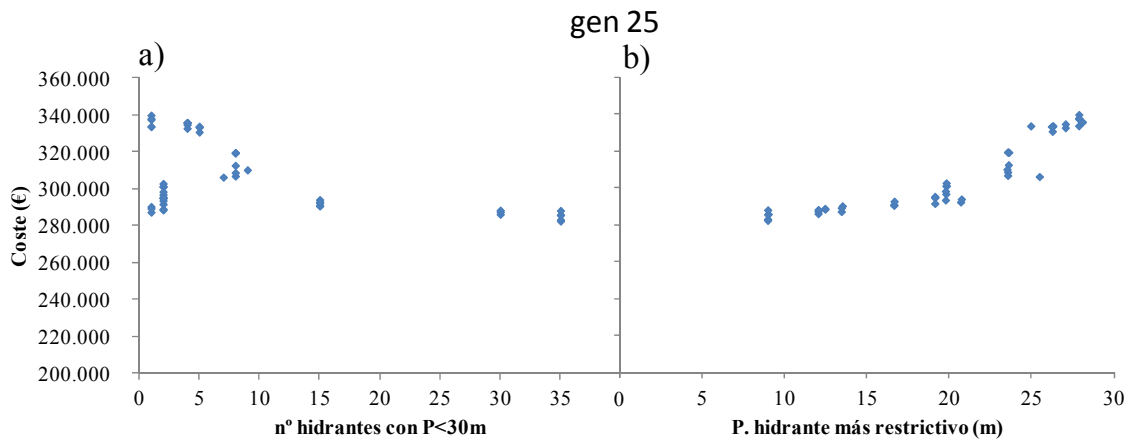


Figura 4.6. Frentes de Pareto de la generación 25: Coste vs. Número de hidrantes con presión inferior a 30 m (a) y Coste vs. Presión en el hidrante más restrictivo (b).

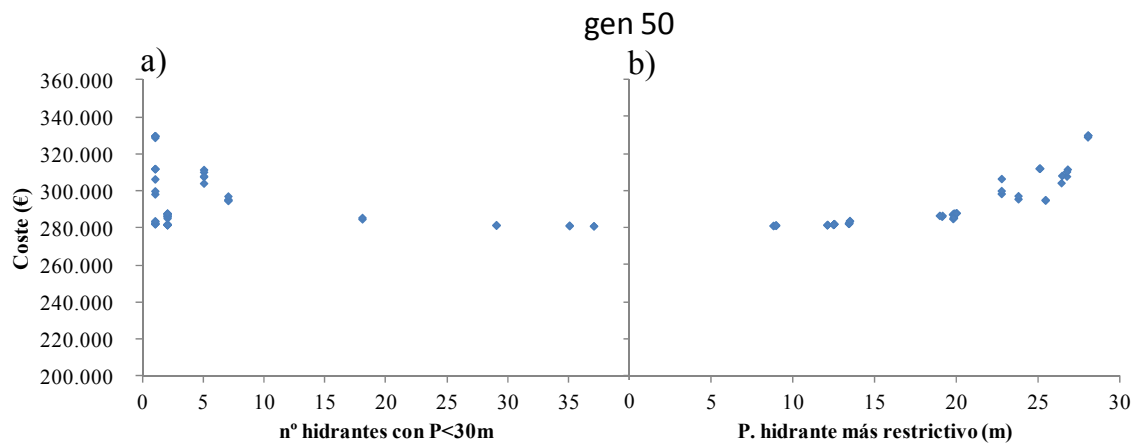


Figura 4.7. Frentes de Pareto de la generación 50: Coste vs. Número de hidrantes con presión inferior a 30 m (a) y Coste vs. Presión en el hidrante más restrictivo (b).

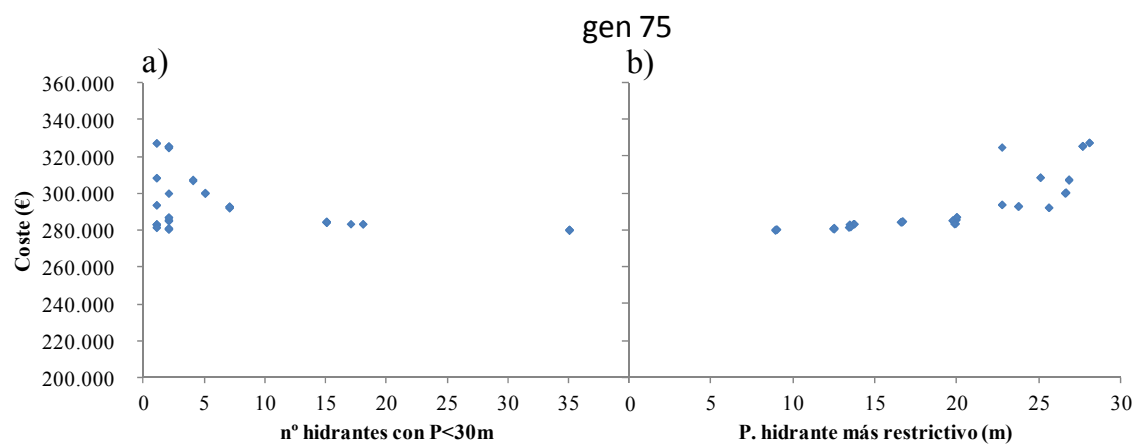
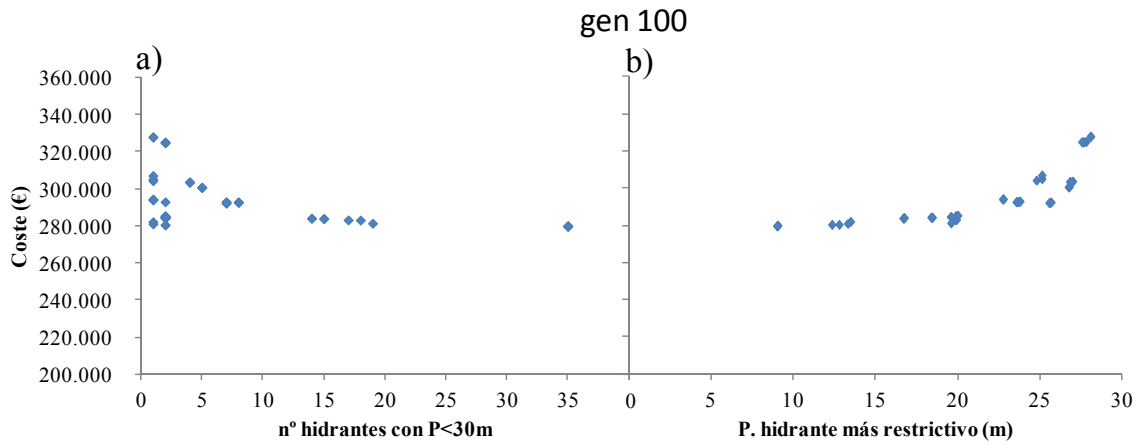
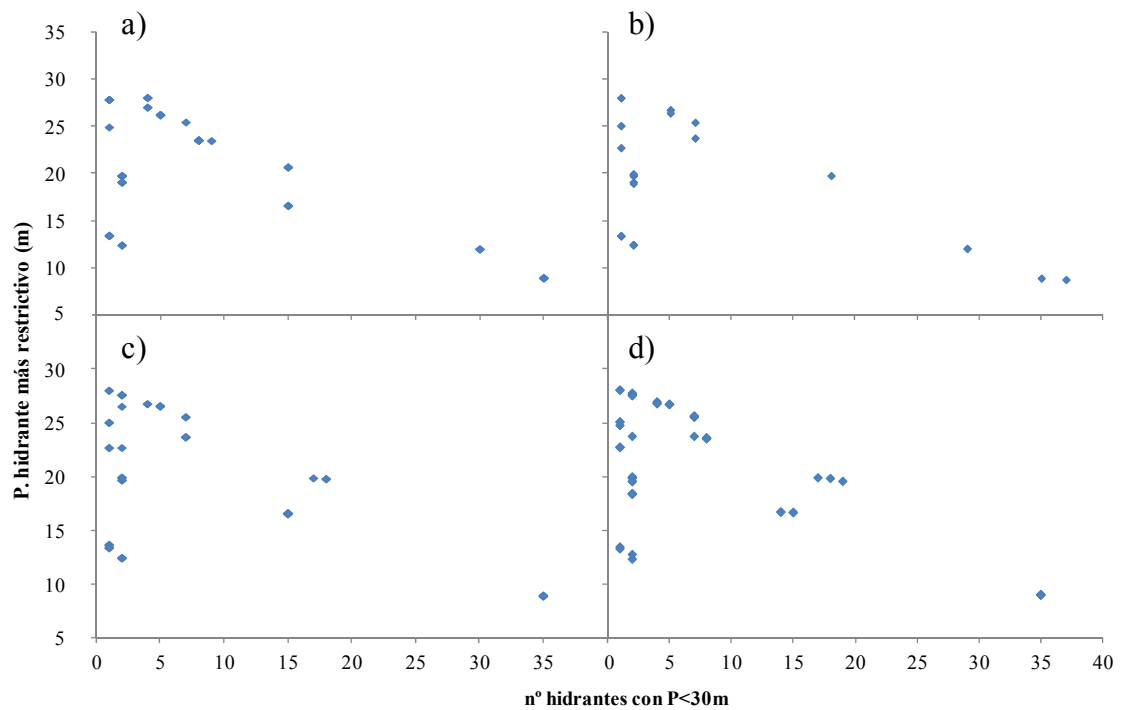


Figura 4.8. Frentes de Pareto de la generación 75: Coste vs. Número de hidrantes con presión inferior a 30 m (a) y Coste vs. Presión en el hidrante más restrictivo (b).



**Figura 4.9.** Frentes de Pareto de la generación 100: Coste vs. Número de hidrantes con presión inferior a 30 m (a) y Coste vs. Presión en el hidrante más restrictivo (b).

En la figura 4.10 se enfrentan los dos sumandos que componen la función objetivo 2 para las generaciones 25 (4.10.a), 50 (4.10.b), 75 (4.10.c) y 100 (4.10.d).



**Figura 4.10.** Presión en el hidrante más restrictivo (m) frente al número de hidrantes con presión < 30m para las generaciones 25 (a), 50 (b), 75 (c) y 100 (d).



En la tabla 4.4 se presenta el valor mínimo y máximo que adquiere el coste, junto con el correspondiente déficit hídrico, en las generaciones 0, 25, 50, 75 y 100. Asimismo, se indica el número de hidrantes que recibe una presión inferior a la requerida y el valor de la presión en el hidrante más restrictivo, es decir, aquél que presenta un déficit de presión mayor, asociados al coste mínimo y máximo. El análisis de los resultados obtenidos en la tabla citada muestra como el coste mínimo evoluciona desde 285562 € en la población de partida hasta alcanzar en la última generación un valor de 279490 €, lo que indica una reducción igual a 6072 € (2%). Además, hay que considerar que el coste mínimo en la población inicial lleva asociado un déficit hídrico en el mes de mayo (mes muy importante en el cultivo de la fresa) de  $1.7 \text{ hm}^3\text{mes}^{-1}$ , lo que supone el 49% de las necesidades de riego para ese mes. Respecto a la evolución del coste máximo a lo largo del proceso de optimización, se parte de un valor máximo en la población de partida de 365312 € hasta obtener un coste de 327781 € en la última generación, por lo que la reducción del coste es de 37531 € (11%). El déficit hídrico correspondiente a los valores máximos del coste es 0 para todas las generaciones.

**Tabla 4.4.** Valores mínimo y máximo del coste, número de hidrantes con presión < 30m y presión en el hidrante más desfavorable en varias generaciones del algoritmo.

Gen.	Coste min, €	Déficit hídrico, m <sup>3</sup> mes <sup>-1</sup> (%)	Hidrantes P< 30m	P. hidrante más desfavorable, m	Coste max, €	Déficit hídrico, m <sup>3</sup> mes <sup>-1</sup> (%)	Hidrantes P< 30m	P. hidrante más desfavorable, m
0	285562	1717105 (49%)	55	8	365312	0	19	21
25	282670	0	35	9	340070	0	1	28
50	281326	0	37	9	330042	0	1	28
75	280310	0	35	9	327767	0	1	28
100	279490	0	35	9	327781	0	1	28

Los costes mínimos y máximos obtenidos en las distintas generaciones llevan asociados el número de hidrantes en los que la presión es inferior a la requerida y cuál es el valor de la presión en el hidrante más restrictivo (Tabla 4.4). Los resultados asociados a los valores mínimos del coste muestran que en la población inicial, el número de hidrantes que no reciben la presión requerida es 55, en las generaciones 25, 75 y 100 el número de hidrantes que no reciben la presión requerida es 35 y en la generación 50 este valor es igual a 37. La presión en el hidrante más restrictivo toma un valor igual a 8 m en la población inicial, siendo igual a 9 m en el resto de generaciones. En lo que concierne a los resultados asociados a los valores máximos del coste, se observa que el número de hidrantes con presión inferior a la requerida en la población inicial es 19, con una presión en el hidrante más desfavorable igual a 21 m. En el resto de generaciones hay un hidrante que recibe una presión de 28 m.

En la tabla 4.4 se puede observar que el coste mínimo que se alcanza en la última generación lleva implícito un elevado número de hidrantes que no reciben la presión de servicio y además, la presión en el hidrante más desfavorable es muy baja (9 m). Si en la última generación se aceptan aquellas soluciones en las que el número de hidrantes con presión inferior a la requerida es como máximo 7 (3% del total de hidrantes) y la presión en el hidrante más desfavorable es mayor o igual a 25 m (figura 4.11), se obtiene un conjunto de soluciones pseudo-óptimas cuyos valores se muestran en la tabla 4.5. Es importante considerar que solventar estos déficits de presión puntual puede resultar más económico que hacer que las estaciones de bombeo trabajen a alturas manométricas mayores. No hay que olvidar que el análisis actual se realiza suponiendo plena satisfacción de necesidades hídricas, lo que no suele ocurrir, así como que todos los hidrantes de un sector operen simultáneamente. Condiciones más realistas de demanda, es decir inferiores a las supuestas, implican menores pérdidas de carga, lo cual puede llevar a que el hidrante que recibe 28m de presión, alcance la presión de servicio de 30 m.

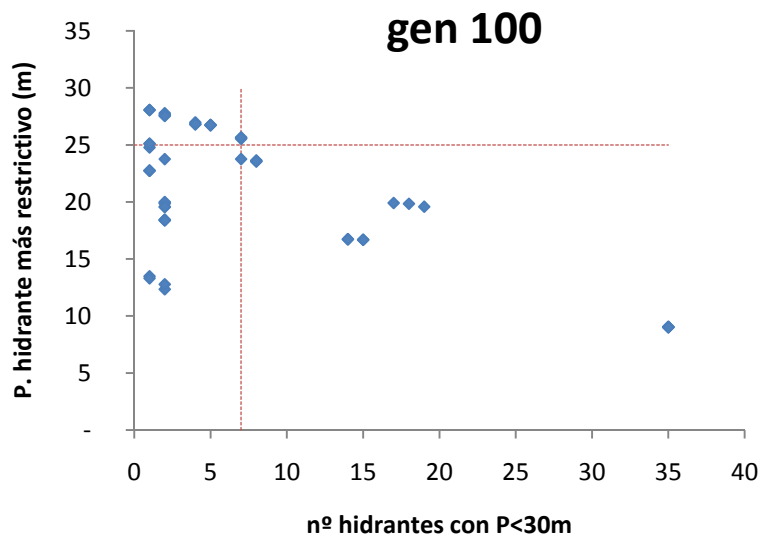


Figura 4.11. Presión en el hidrante más restrictivo frente al número de hidrantes con  $P < 30m$  en la generación 100, con los límites que marcan las mejores soluciones.

Tabla 4.5 Soluciones óptimas obtenidas en la generación 100

Individuo	Consumo Energético (kW-h)	Coste (€)	Hidrantes $P < 30m$	P. hidrante más restrictivo (m)
1	2919616	291962	7	26
2	2921764	292176	7	26
3	2922783	292278	7	26
4	3004433	300443	5	27
5	3004522	300452	5	27
6	3005333	300533	5	27
7	3032492	303249	4	27
8	3033274	303327	4	27
9	3034996	303500	4	27
10	3040859	304086	1	25
11	3048932	304893	1	25
12	3068103	306810	1	25
13	3245072	324507	2	28
14	3247580	324758	2	28
15	3247757	324776	2	28
16	3248317	324832	2	28
17	3275752	327575	1	28
18	3277807	327781	1	28

Del conjunto de individuos representados en la tabla 4.5, si se considera el individuo 1, el coste es de 291962 € con un número de hidrantes que no reciben la presión requerida igual a 7 y una presión en el hidrante más desfavorable de 26 m. Si se compara este resultado con el coste máximo obtenido en la población inicial, en la cual hay 19 hidrantes que no reciben la presión requerida, con una presión en el hidrante más desfavorable igual a 21 m (tabla 4.4), se alcanza un ahorro de 73350 € (20%).

El consumo energético varía entre 2919616 kW-h para el individuo 1 y 3277807 kW-h para el individuo 18. El consumo energético que supone el individuo 1 es superior al obtenido por Rodríguez *et al.* (2011), aunque ellos consideran el agua realmente aplicada en la C.R. de Palos de la Frontera en lugar de las necesidades de riego teóricas de los cultivos, lo que supone un 45% de la demanda considerada en este trabajo.

Cada uno de los individuos representados en la Tabla 4.5, tiene asociado un calendario óptimo de operación de sectores junto con el correspondiente régimen de funcionamiento de las estaciones de bombeo, como se observa en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Calendario óptimo de operación de sectores y alturas manométricas (m) en las estaciones de bombeo en función del sector que opera para los mejores individuos de la generación 100.

INDIVIDUO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	N <sub>sect</sub>																		
E N E R O	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H2	79.3	79.3	79.3	79.2	79.3	79.3	79.5	79.2	79.5	79.1	79.3	79.3	61.3	61.5	61.2	61.6	61.4	61.4
	H3	61.8	61.8	61.8	61.8	61.7	61.8	61.9	61.8	61.9	61.7	61.8	61.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H3	66.2	66.2	66.2	66.2	66.2	66.1	66.1	66.2	66.2	66.1	66.2	66.2	66.1	66.1	65.9	66.0	66.0	66.0
	H1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-
	H2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-
	H3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	78.7	78.7	-	-	-	-	-	-
F E B R E R O	N <sub>sect</sub>																		
	H1	59.6	59.6	59.6	59.6	59.5	59.6	59.5	59.6	59.5	59.6	59.5	59.6	59.5	59.6	59.6	59.6	59.5	57.5
	H2	78.1	78.0	78.1	78.1	78.2	78.1	78.0	78.1	78.1	78.2	78.0	78.1	78.1	78.0	78.3	0.0	0.0	0.0
	H3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	83.0	82.9	83.0	83.0	82.8	83.0
	H1	50.6	50.4	50.6	50.5	50.5	50.5	50.6	50.6	50.4	50.6	50.6	50.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H2	0.0	0.0	0.0	65.1	65.2	65.1	65.3	65.3	65.3	65.2	65.3	65.2	65.2	65.2	65.3	65.3	65.2	65.4
	H3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

INDIVIDUO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	N <sub>sect</sub>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4
<b>M A R Z O</b>	H1	52.4	52.3	52.4	51.8	51.8	52.0	51.8	52.0	51.9	51.9	51.8	77.8	77.9	77.7	77.8	77.7	77.8	
	H2	47.8	47.9	47.8	47.7	47.7	47.8	47.9	47.7	48.0	47.8	47.9	47.9	81.3	81.4	81.3	81.3	81.2	81.3
	H3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H2	58.5	58.5	58.6	58.7	58.5	58.4	58.6	58.6	58.5	58.3	62.8	62.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	63.8	63.9	63.8	63.9	63.9	63.8
	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H2	59.5	59.5	59.6	59.7	59.7	59.6	59.6	59.5	59.6	59.7	60.0	60.0	58.5	58.5	58.6	58.5	58.5	58.5
	H3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	59.6	59.6	59.5	59.6	59.6	59.6
	H3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	<b>N<sub>sect</sub></b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
	<b>A B R I L</b>	H1	52.7	52.7	52.7	52.4	52.4	52.4	52.7	52.4	52.7	52.7	52.7	70.5	70.5	70.6	70.5	70.5	70.3
		H2	54.0	54.1	54.0	54.2	54.2	54.3	53.8	54.2	54.0	53.9	53.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
H3		54.2	54.0	54.2	54.1	54.2	54.2	54.1	54.1	54.1	53.9	54.1	54.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
H1		53.7	53.5	53.7	53.7	53.8	53.8	76.5	76.6	76.6	76.6	76.6	48.0	48.1	47.9	48.2	48.2	48.1	
H2		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	54.1	54.1	54.1	54.4	54.2	
H3		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	55.7	55.8	55.7	55.7	55.6	
H1		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
H2		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
H3		75.0	74.7	75.0	75.1	75.1	75.1	74.8	74.8	74.8	75.0	74.8	75.0	75.0	75.0	75.0	75.1	74.9	75.3

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

INDIVIDUO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	N <sub>sect</sub>																		
M A Y O	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	59.3	59.3	59.2	59.3	59.2	59.2
	H2	59.8	59.7	59.8	60.0	59.9	60.0	60.1	60.0	60.0	60.0	60.1	60.0	53.1	53.1	53.0	53.1	53.1	53.2
	H3	58.7	58.6	58.7	68.2	68.2	68.3	68.2	68.2	68.2	68.1	68.2	68.2	68.0	67.9	67.9	68.1	67.8	68.0
	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	62.8	62.8	62.9	62.8	62.8	68.9
	H3	60.2	60.2	60.2	60.0	59.9	60.0	59.8	59.8	59.8	60.0	59.8	60.0	60.1	60.1	60.2	60.3	60.0	0.0
	N <sub>sect</sub>																		
	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.1	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.3	49.1	0.0	0.0	0.0	0.0
H3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	80.6	80.5	80.5	80.5	80.5	80.5	
J U N I O	H1	77.5	77.5	77.5	77.7	77.7	77.7	77.8	77.8	77.8	77.8	77.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	57.0	57.0	56.9	56.9	57.0	56.8	
	H3	45.5	45.5	45.5	45.5	45.4	45.5	45.7	45.6	45.6	45.6	45.5	51.4	51.4	51.5	51.5	51.3	51.4	
	H1	47.8	47.9	47.9	47.9	47.9	48.0	47.8	47.9	47.9	47.9	47.9	47.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H3	47.2	47.0	47.1	47.1	47.1	47.1	47.1	47.2	47.0	47.2	47.0	47.0	57.1	57.0	57.1	57.1	57.1	57.1
	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6	53.6
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H3	57.4	57.5	57.2	57.4	57.4	57.5	57.5	57.4	57.5	57.4	57.5	57.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
H1	53.8	53.9	53.7	53.8	53.8	53.8	53.8	53.8	54.0	53.8	53.8	53.8	-	-	-	-	-	-	
H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-	
H3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	58.6	58.6	58.6	-	-	-	-	-	-	



INDIVIDUO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	N <sub>sect</sub>	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
<b>J U L I O</b>	H1	78.2	78.2	78.1	78.1	78.1	78.1	78.1	78.2	78.1	78.0	78.1	45.8	45.7	45.8	45.7	45.9	45.8	
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	84.2	84.1	84.2	84.2	84.2	84.2	
	H3	81.0	81.0	81.0	81.0	80.9	81.0	81.2	81.0	81.0	81.0	81.0	81.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H3	57.4	57.3	57.3	57.3	57.3	57.4	57.4	57.4	56.8	57.3	56.9	56.9	57.3	57.1	57.1	57.1	57.0	57.1
	H1	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H2	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H3	53.1	53.2	-	53.1	53.2	52.9	53.2	53.1	53.2	53.1	53.1	53.1	53.2	53.2	53.1	53.1	52.9	53.1
<b>A G O S T O</b>	N <sub>sect</sub>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	51.8	51.8	51.8	51.7	51.9	51.8
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H3	53.6	53.6	53.6	53.8	53.8	53.8	53.8	53.8	53.8	53.7	53.7	53.7	53.8	53.6	53.5	53.6	53.6	53.6
	H1	58.2	58.2	58.2	58.5	58.5	58.6	58.4	58.5	58.4	58.4	58.3	58.4	58.5	58.2	58.3	58.3	58.5	58.5
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60.9	61.0	60.9	60.6	60.7
	H2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
H3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

INDIVIDUO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	N <sub>sect</sub>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3
S E P T I E M B R E	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	H2	63.9	64.0	63.9	63.9	63.9	63.9	64.0	63.9	64.1	64.0	64.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	H3	56.1	56.4	56.1	56.5	56.5	56.3	56.4	56.5	56.4	56.5	56.4	56.6	49.3	49.4	49.2	49.3	49.2	
	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	H2	0.0	69.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	69.7	69.6	0.0	69.7	69.6	69.6	69.8	69.7	69.5	69.8
	H3	67.4	0.0	67.6	67.5	67.5	67.5	67.4	67.5	0.0	67.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H1	49.9	49.4	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9	49.6	49.6	49.5	49.5	49.3	49.3	49.4	49.4	49.2	49.3
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H3	50.1	50.1	50.0	50.1	50.1	50.1	50.1	50.1	50.0	50.0	50.0	50.0	69.1	69.1	69.2	69.1	69.1	69.1
O C T U B R E	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-	
	H2	59.3	59.3	59.3	59.1	59.1	59.2	59.1	59.2	59.1	59.2	59.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	H3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	67.8	67.7	67.8	67.8	67.8	67.8	
	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	71.5	71.4	71.4	71.3	71.4	71.5	71.5	71.5
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H3	46.7	46.8	46.7	55.6	55.6	55.7	55.5	55.4	55.4	55.5	55.4	55.6	55.5	55.6	55.5	55.5	55.6	55.6
	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	50.2	50.1	50.4	50.4	50.1	50.2	50.4	50.2	50.2	50.2	50.2	50.2	50.2	50.2
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H3	61.4	61.4	61.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
I N D I V I D U O	H1	49.9	50.0	50.0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	H3	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	H1	50.4	50.4	50.5	50.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	H3	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	N <sub>sect</sub>	5	5	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

INDIVIDUO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	N <sub>sect</sub>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<b>N O V I E M B R E</b>	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	H2	52.9	52.9	52.8	52.8	52.8	52.8	52.8	52.8	52.9	52.8	53.1	78.4	78.4	78.4	78.5	78.5	78.4	
	H3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	H1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	53.1	0.0	53.0	0.0	53.1	53.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	53.6	0.0	53.6	0.0	53.6	53.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H3	56.4	63.3	56.4	56.7	56.7	56.7	56.8	56.7	56.8	56.7	63.4	56.7	56.8	56.8	56.7	56.6	56.7	56.7
	H1	55.1	55.0	55.1	55.1	55.1	55.1	54.9	55.1	54.9	55.1	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	54.9	55.0
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.1	60.0	60.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
H1	50.7	50.6	50.7	50.6	50.6	50.5	50.6	50.6	50.7	50.7	50.7	50.7	50.7	50.7	50.8	50.7	50.8	50.8	
H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
H3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
<b>D I C I E M B R E</b>	N <sub>sect</sub>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	H1	54.1	54.1	54.1	53.9	53.8	53.9	54.1	53.9	54.0	54.1	54.1	54.1	58.9	58.7	58.6	58.9	58.8	58.8
	H2	53.3	53.4	53.3	53.2	53.2	53.2	53.1	53.2	53.3	53.2	53.2	53.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H3	55.6	55.6	55.6	55.7	55.7	55.7	55.7	55.7	55.7	55.7	55.7	55.8	70.7	70.7	70.6	70.6	70.7	70.6
	H1	58.9	59.0	59.0	58.9	59.0	58.9	59.0	59.0	58.9	59.0	59.0	58.8	59.0	59.0	58.8	58.9	58.9	59.0
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H3	48.5	48.6	48.5	48.3	48.3	48.2	48.7	48.6	48.6	48.6	48.6	61.0	61.1	61.0	61.0	61.0	61.1	61.1
	H1	46.8	46.9	46.8	46.8	46.8	46.7	46.8	46.8	46.8	46.9	46.8	46.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	H2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	54.9	54.9	54.8	54.7	54.8	54.9
H3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

En lo que se refiere al calendario de operación de sectores, se puede observar en la Tabla 4.6 que para los meses de febrero, abril, mayo, noviembre y diciembre, todos los individuos representados mantienen el mismo número de sectores. Para el mes de febrero se proponen 2 sectores, 4 sectores en noviembre y 3 sectores en diciembre. Para los meses de abril y mayo se plantean 3 y 2 sectores, respectivamente, ya que un nivel de sectorización superior para ambos meses implica una reducción en el tiempo disponible para el riego y no permite satisfacer plenamente las necesidades hídricas de los cultivos. Para el resto de meses, se obtiene que los sectores propuestos son: 2 ó 3 en enero, julio y agosto, 3 ó 4 en marzo y septiembre, 4 ó 5 en junio y 3 ó 5 en octubre. Por tanto, los resultados relativos al calendario de operación de sectores obtenidos mediante el proceso de optimización muestran que el nivel de sectorización con 3 sectores es la opción mensual más frecuente.

Respecto a las alturas manométricas en las estaciones de bombeo, se observan soluciones en las cuales las tres estaciones de bombeo están en funcionamiento y otras en las que se proponen combinaciones de estaciones de bombeo funcionando con otras que están en parada. El rango de alturas manométricas propuestas se sitúa entre los 45.4m y los 84.2 m considerando el año completo. Si se presta atención a cada uno de los meses, el rango de alturas manométricas se sitúa entre 61.2 – 79.5 m para el mes de enero, 50.1 – 83.0 m para febrero, 47.7 – 81.4 m en marzo, 47.9 – 76.8 m para abril, 53.0 -68.9 m para mayo, 45.4 - 80.6 m para junio, 52.9 – 84.2 m para julio, 51.7 – 61.0 para agosto, 49.2 - 69.8 m en septiembre, 46.7 – 71.5 m en octubre, 50.5 – 78.5 m en noviembre y 46.7 – 70.7 m en diciembre.

## **CONCLUSIONES**



## **5. Conclusiones**

La mejora de la eficiencia energética en redes de distribución de agua conlleva la disminución del consumo energético de los grupos de bombeo. Para lograrlo, en trabajos previos se aplicaron tanto procedimientos de simulación como técnicas de optimización en redes de distribución de agua. No obstante, dichos trabajos consideraban únicamente redes con un único punto de abastecimiento. Sin embargo, para obtener una mejora de la eficiencia energética en redes de riego con más de un punto de suministro de agua son necesarias nuevas metodologías de cálculo.

Para ello, en este trabajo se ha propuesto la utilización del AG multiobjetivo NSGA-II, adaptándolo al problema planteado.

Para llevar a cabo el proceso de optimización se requieren, además de información sobre las necesidades hídricas teóricas de los cultivos, datos topológicos de la red de riego. De esta forma, se ha desarrollado una metodología que permite caracterizar topológicamente las redes de riego con varios puntos de suministro mediante la determinación de dos coordenadas adimensionales que dependen de la relación entre la cota de los hidrantes, la cota de las estaciones de bombeo y de la distancia de los hidrantes a las estaciones de bombeo. Posteriormente, mediante técnicas de análisis de cluster se han agrupado los hidrantes en sectores, definidos en función de la topología de la red mediante las coordenadas adimensionales, ya que condiciona el funcionamiento hidráulico de la misma.

El desarrollo del AG multiobjetivo ha permitido obtener un conjunto de soluciones óptimas que contienen información sobre el número de sectores que debe operar cada mes, así como el régimen de funcionamiento de las estaciones de bombeo para minimizar el consumo energético anual y, por tanto, su coste, a la vez que se satisfacen las necesidades hídricas de los cultivos y se cumplen los criterios de presión requerida en los hidrantes durante una campaña de riego completa.

El proceso de optimización aplicado a la red ejemplo (Palos de la Frontera) ha finalizado con una reducción en el coste energético de 37531 € (11%), satisfaciendo plenamente las necesidades hídricas de los cultivos y obteniendo un único hidrante con

presión igual a 28 m. Si se relajan las restricciones del problema, se podrían admitir aquellas soluciones en las que como máximo hay siete hidrantes con presión no inferior a 25 m, lo que implicaría una reducción en el coste energético de 73350 € (20%).

Los valores de coste energético que se han obtenido mediante el proceso de optimización están ligados a la satisfacción plena de las necesidades hídricas de los cultivos, lo que no sucede en la mayoría de las CCRR, que suelen disponer de una dotación máxima anual. Si se considerase la cantidad de agua realmente aplicada en lugar de las necesidades hídricas teóricas de los cultivos, se podría obtener una reducción en el coste energético aún mayor.

Este tipo de gestión de la operación de sistemas de distribución de agua complejos, es sólo válida en redes que dispongan de sistemas de telecontrol desde las estaciones de bombeo a cada hidrante. La dificultad de la puesta a punto de esos sistemas queda suficientemente justificada con los posibles ahorros por una gestión energética eficiente del sistema.

Las soluciones que proporcionan los algoritmos de optimización son una herramienta de apoyo a la toma de decisiones. No todos los factores que afectan a la gestión de una red pueden formularse matemáticamente para incluirlos en un algoritmo de optimización. Por ello, es el gestor quien debe estudiar la opción más adecuada para la comunidad de regantes, teniendo en cuenta los posibles incrementos de gastos para ciertos hidrantes de modo que los costes energéticos finales de cada agricultor sean menores, lo que permitirá un incremento de sus beneficios a igualdad de otras condiciones.



## **BIBLIOGRAFÍA**

## 6. Bibliografía

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M.; (1998). **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements.** *Food and Agricultural Organization of the United Nation. Roma.*
- Bescós Capuj, M.; Cameo Moreno, D.; Castillo López, R.; Citoler Herbera, J.; Santafé Laplaza, L.J.; (2008). **Alternativas para la reducción de costes energéticos en el diseño de redes de riego a presión mediante bombeo directo.** *XXVI Congreso Nacional de Riegos. Huesca 24-26 de Junio de 2008.*
- BOE. 2002. **Real Decreto 329/2002, de 5 de abril, por el que se aprueba el Plan Nacional de Regadíos.**
- Bonachela, S.; González, A.M.; Fernández, M.D.; (2006). **Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data.** *Irrigation Science. 25(1):53–62*
- Carrillo, M.T.; (2009). **Uso racional del agua y la energía en la comunidad de regantes de FP.** *Trabajo Profesional Fin de Carrera. Universidad de Córdoba.*
- Carrillo Cobo, M.T.; Rodríguez Díaz, J.A.; Montesinos, P.; López Luque, R.; Camacho Poyato, E.; (2010). **Low energy consumption seasonal calendar for sectoring operation in pressurized irrigation networks.** *Irrigation Science. 29 (2). pp. 157-169*
- Clarke, D.; (1998). **CropWat for windows: user guide.** *FAO, Italy*
- Coello, C. A.; Veldhuizen, D. V.; Lamont, G.; (2002). **Evolutionary Algorithms for solving multiobjective problems.** *Kluwer Academic Publishers – GENA Series.*
- Collette, Y.; Siarry, P.; (2003). **Multiobjective Optimization: Principles and Case Studies.** *Springer.*

- Deb, K.; (2001), **Multiobjective Optimization using Evolutionary Algorithms, Series in Systems and Optimization.** *John Wiley and Sons. New York (USA).*
- Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T.; (2002). **A Fast Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II.** *IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2): 182 – 197.*
- Dijk, M.v.; Vuuren, S.J.v.; Zyl. J.E.v.; (2008). **Optimising water distribution systems using a weighted penalty in a genetic algorithm.** *Water SA Vol. 34.*
- Elferchihi, A.; Gharsallah, O.; Nouiri, I.; Lebdi, F., Lamaddalena, N.; (2009). **The genetic algorithm approach for identifying the optimal operation of a multi-reservoirs on-demand irrigation system.** *Biosystems Engineering N° 102, 334-344 p.*
- Fernández, M.D.; Bonachela, S.; Orgaz, F.; Thompson, R.; López, J.C.; Granados, M.R.; Gallardo, M.; Fereres, E.; (2010). **Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate.** *Irrigation Science. 28 (6). pp: 497-509.*
- Galante, M.; (1993) **Un Algoritmo Genético Simple para la Optimización de Estructuras Planas Articuladas.** *Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 9(2). 179-199.*
- García, J.; Montesinos, P.; Rodríguez, J.A.; Camacho, E.; Hess, T.; (2011). **Reducing the hydrological impact of imported strawberries. Huelva (Spain).** *Artículo no publicado. (Sept. 2011).*
- Garre, M.; Cuadrado, J.J.; Sicilia, M.A.; Rodríguez, D.; Rejas, R.; (2007). **Comparación de diferentes algoritmos de clustering en la estimación de coste en el desarrollo de software.** *Revista Española de Innovación, Calidad e Ingeniería del Software, Vol.3, No.1.*

- Goldberg, D.E.; (1989). **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**. Reading, MA, USA: Addison-Wesley.
- Hargreaves, G.H.; Samani. Z.A.; (1985). **Reference crop evapotranspiration from temperature**. *Appl Eng Agric* 1(2):96–99
- IDAE. (2007). **Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España 2004-2012**. Plan de Acción 2008-2012. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid.
- IDAE. 2008) **Ahorro y eficiencia energética en las Comunidades de Regantes**. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid.
- Jain, A.K.; (2000). **Statistical pattern recognition: a review**. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 22:4–38
- Jamieson D. G.; Shamir U.; Martinez F.; Franchini M.; (2007). **Conceptual design of a generic, real-time, near-optimal control system for water distribution networks**. *J. Hydroinformatics* 9 (1), 3–14.
- Jiménez Bello, M.A.; Martínez Alzamora, F.; Bou Soler, V.; Bartolí Ayala, H.J.; (2010). **Methodology for grouping intakes of pressurised irrigation networks into sectors to minimise energy consumption**. *Biosystems Engineering* 96(1): 99-109
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (VV. AA.); (2009). **Manual de buenas prácticas de riego. Propuestas de WWF para un uso eficiente del agua en la agricultura**. Ed. WWF. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Maravall, D.; (1993). **Reconocimiento de Formas y Visión Artificial**. RAMA. Madrid, (ES).
- Martínez F.; Hernández J.; Alonso J.M.; Rao Z.; Alvisi S.; (2007). **Optimizing the operation of the Valencia wáter distribution network**. *J. Hydroinformatics* 9 (1), 3–14.

- Montesinos, P.; García-Guzmán, A.; Ayuso, J.L.; (1999). **Water distribution network optimization using a modified genetic algorithm**. *Water Resour. Res.* 35, 3467-3473.
- Moraleda D.A.; Moreno M.A.; Córcoles J.I.; Cuesta A.; Tarjuelo J.M.; (2008). **Medidas de mejoras energéticas en las instalaciones de Comunidades de Regantes de Castilla-La Mancha**. *XXVI Congreso Nacional de Riegos. Huesca 24-26 de Junio de 2008*.
- Moreno, M.A.; Carrión, P.A.; Planells, P.; Ortega, J.F.; Tarjuelo, J.M.; (2007). **Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations**. *Biosystems engineering*. N° 98. 479-486 p.
- Moradi-Jalal, M.; Rodin, S. I.; Mariño, M. A.; (2004). **Use of genetic algorithm in optimization of irrigation pumping stations**. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(5), 357–365.
- Moreno, M.A.; Córcoles, J.I.; Tarjuelo, J.M.; Ortega, J.F.; (2010). **Energy efficiency of pressurised irrigation networks managed on-demand and under a rotation schedule**. *Biosystems engineering*. N° 107, 349-363 p.
- NRCS. (2004). **Estimation of direct runoff from storm rainfall**. *Part 630 Hydrology. National Engineering Handbook. Chapter 10 Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. (210-VI-NEH, July 2004)*.
- Pettie, S.; Ramachandran, V.; (2005). **A shortest path algorithm for real-weighted undirected graphs**. *SIAM J. Comput.*, 34:1398-1431.
- Plataforma Tecnológica Española de Eficiencia Energética; (2009). **Documento de Visión de la Eficiencia Energética en España**. *Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid (ES)*.
- Rodríguez Díaz, J.A.; Camacho Poyato, E.; López Luque, R.; Pérez Urrestarazu, L.; (2008). **Benchmarking and multivariate data analysis techniques for**

**improving the efficiency of irrigation districts: an application in Spain.** *Agric Syst* 96:250–259

Rodríguez Díaz, J.A.; López Luque, R.; Carrillo Cobo, M.T.; Montesinos, P.; Camacho Poyato, E.; (2009). **Exploring energy saving scenarios for on-demand pressurised irrigation networks.** *Biosystems engineering* N° 104. 552-561 p.

Rodríguez Díaz, J.A.; Camacho Poyato, E.; Blanco Pérez, M.; (2011). **Evaluation of Water and Energy Use in Pressurized Irrigation Networks in Southern Spain.** DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000338.

Rossman, L.A.; (2000). **EPANET 2. Users manual.** *US Environmental Protection Agency (EPA), USA*

Ruiz Canales, A.; Abadía Sánchez, R.; Rocamora Osorio, M.C.; Cámara Zapata, J.M.; Puerto Molina, H.; Andreu Rodríguez, J.; Vera Morales, J.; Melián Navarro, A.; (2007). **Indicadores de gestión energética en Comunidades de regantes.** *XXV Congreso Nacional de Riegos. Pamplona 15-17 de Mayo de 2007.*

Salomons E.; Goryashko A.; Shamir U.; Rao Z.; Alvisi S.; (2007). **Optimizing the operation of the Haifa-A water-distribution network.** *J. Hydroinformatics* 9 (1), 3–14.

Seshadri, A.; (2009). **A fast elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II** *MatLab. The MathWorks Inc. (USA).*

Srinivas, N.; Deb, K.; (1994). **Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms.** *Evolutionary Computation*, 2(3):221 - 248.



## **ANEJOS**





**ANEJO I. Superficie (ha) y demanda base (l/s) de cada uno de los hidrantes durante una campaña de riego completa.**

Hidrante	S <sub>i</sub> (ha)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
13	11.12	0.96	1.37	2.64	3.69	5.26	1.93	1.10	2.45	2.18	2.63	1.21	0.86
17	3.81	0.33	0.47	0.90	1.27	1.80	0.66	0.38	0.84	0.75	0.90	0.41	0.29
20	6.94	0.60	0.86	1.65	2.31	3.29	1.20	0.69	1.53	1.36	1.64	0.76	0.53
24	4.74	0.41	0.59	1.13	1.57	2.24	0.82	0.47	1.04	0.93	1.12	0.52	0.36
25	9.59	0.83	1.19	2.28	3.19	4.54	1.66	0.95	2.11	1.88	2.27	1.04	0.74
28	11.68	1.01	1.44	2.77	3.88	5.53	2.02	1.16	2.57	2.29	2.76	1.27	0.90
33	19.62	1.69	2.43	4.66	6.52	9.28	3.40	1.95	4.32	3.84	4.64	2.13	1.51
102	6.03	0.52	0.75	1.43	2.00	2.85	1.05	0.60	1.33	1.18	1.43	0.66	0.46
16	9.45	0.81	1.17	2.25	3.14	4.47	1.64	0.94	2.08	1.85	2.23	1.03	0.73
27	3.17	0.27	0.39	0.75	1.05	1.50	0.55	0.31	0.70	0.62	0.75	0.34	0.24
104	6.94	0.60	0.86	1.65	2.31	3.28	1.20	0.69	1.53	1.36	1.64	0.75	0.53
105	6.33	0.55	0.78	1.50	2.10	2.99	1.10	0.63	1.39	1.24	1.50	0.69	0.49
106	8.43	0.73	1.04	2.00	2.80	3.99	1.46	0.84	1.86	1.65	1.99	0.92	0.65
108	4.36	0.38	0.54	1.04	1.45	2.06	0.76	0.43	0.96	0.85	1.03	0.47	0.34
109	7.18	0.62	0.89	1.71	2.39	3.40	1.24	0.71	1.58	1.41	1.70	0.78	0.55
111	13.47	1.16	1.67	3.20	4.48	6.38	2.34	1.34	2.97	2.64	3.18	1.47	1.04
123	8.03	0.69	0.99	1.91	2.67	3.80	1.39	0.80	1.77	1.57	1.90	0.87	0.62
114	5.06	0.44	0.63	1.20	1.68	2.40	0.88	0.50	1.12	0.99	1.20	0.55	0.39
116	5.02	0.43	0.62	1.19	1.67	2.37	0.87	0.50	1.10	0.98	1.19	0.55	0.39
117	5.15	0.44	0.64	1.22	1.71	2.44	0.89	0.51	1.13	1.01	1.22	0.56	0.40
118	8.04	0.69	0.99	1.91	2.67	3.80	1.39	0.80	1.77	1.57	1.90	0.87	0.62
119	14.50	1.25	1.79	3.44	4.82	6.86	2.51	1.44	3.19	2.84	3.43	1.58	1.12
121	17.84	1.54	2.21	4.24	5.93	8.44	3.09	1.77	3.93	3.49	4.22	1.94	1.37
122	3.63	0.31	0.45	0.86	1.21	1.72	0.63	0.36	0.80	0.71	0.86	0.39	0.28
124	12.36	1.06	1.53	2.94	4.11	5.85	2.14	1.23	2.72	2.42	2.92	1.34	0.95
127	7.86	0.68	0.97	1.87	2.61	3.72	1.36	0.78	1.73	1.54	1.86	0.86	0.61
126	8.68	0.75	1.07	2.06	2.88	4.11	1.50	0.86	1.91	1.70	2.05	0.94	0.67
130	6.98	0.60	0.86	1.66	2.32	3.30	1.21	0.69	1.54	1.37	1.65	0.76	0.54
131	13.72	1.18	1.70	3.26	4.56	6.49	2.38	1.36	3.02	2.69	3.24	1.49	1.06
132	9.16	0.79	1.13	2.18	3.04	4.33	1.59	0.91	2.02	1.79	2.16	1.00	0.70
133	10.02	0.86	1.24	2.38	3.33	4.74	1.74	0.99	2.21	1.96	2.37	1.09	0.77
179	10.37	0.89	1.28	2.46	3.45	4.91	1.80	1.03	2.28	2.03	2.45	1.13	0.80
181	6.28	0.54	0.78	1.49	2.09	2.97	1.09	0.62	1.38	1.23	1.49	0.68	0.48
180	10.76	0.93	1.33	2.56	3.58	5.09	1.87	1.07	2.37	2.11	2.54	1.17	0.83
183	7.83	0.67	0.97	1.86	2.60	3.71	1.36	0.78	1.72	1.53	1.85	0.85	0.60
185	8.41	0.72	1.04	2.00	2.80	3.98	1.46	0.83	1.85	1.65	1.99	0.91	0.65
186	13.77	1.19	1.70	3.27	4.58	6.52	2.39	1.37	3.03	2.70	3.26	1.50	1.06
187	6.07	0.52	0.75	1.44	2.02	2.87	1.05	0.60	1.34	1.19	1.43	0.66	0.47
188	52.07	4.49	6.44	12.37	17.31	24.64	9.03	5.17	11.47	10.20	12.31	5.67	4.01
73	4.79	0.41	0.59	1.14	1.59	2.27	0.83	0.48	1.06	0.94	1.13	0.52	0.37
76	7.51	0.65	0.93	1.78	2.49	3.55	1.30	0.74	1.65	1.47	1.77	0.82	0.58
75	2.55	0.22	0.32	0.61	0.85	1.21	0.44	0.25	0.56	0.50	0.60	0.28	0.20
77	1.70	0.15	0.21	0.40	0.57	0.81	0.30	0.17	0.38	0.33	0.40	0.19	0.13

**ANEJO I**

<b>Hidrante</b>	<b>S<sub>i</sub> (ha)</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
78	2.79	0.24	0.35	0.66	0.93	1.32	0.48	0.28	0.61	0.55	0.66	0.30	0.21
79	5.49	0.47	0.68	1.30	1.82	2.60	0.95	0.54	1.21	1.07	1.30	0.60	0.42
80	4.56	0.39	0.56	1.08	1.51	2.16	0.79	0.45	1.00	0.89	1.08	0.50	0.35
82	12.13	1.05	1.50	2.88	4.03	5.74	2.10	1.20	2.67	2.37	2.87	1.32	0.93
83	12.02	1.04	1.49	2.86	4.00	5.69	2.08	1.19	2.65	2.35	2.84	1.31	0.93
84	4.97	0.43	0.61	1.18	1.65	2.35	0.86	0.49	1.09	0.97	1.17	0.54	0.38
85	2.70	0.23	0.33	0.64	0.90	1.28	0.47	0.27	0.59	0.53	0.64	0.29	0.21
87	3.34	0.29	0.41	0.79	1.11	1.58	0.58	0.33	0.74	0.65	0.79	0.36	0.26
89	6.91	0.60	0.85	1.64	2.30	3.27	1.20	0.69	1.52	1.35	1.63	0.75	0.53
90	3.51	0.30	0.43	0.83	1.17	1.66	0.61	0.35	0.77	0.69	0.83	0.38	0.27
91	8.31	0.72	1.03	1.97	2.76	3.93	1.44	0.82	1.83	1.63	1.96	0.90	0.64
92	4.96	0.43	0.61	1.18	1.65	2.35	0.86	0.49	1.09	0.97	1.17	0.54	0.38
94	9.58	0.83	1.18	2.28	3.18	4.53	1.66	0.95	2.11	1.88	2.26	1.04	0.74
95	6.27	0.54	0.77	1.49	2.08	2.97	1.09	0.62	1.38	1.23	1.48	0.68	0.48
96	5.10	0.44	0.63	1.21	1.69	2.41	0.88	0.51	1.12	1.00	1.20	0.55	0.39
97	10.60	0.91	1.31	2.52	3.52	5.02	1.84	1.05	2.33	2.08	2.51	1.15	0.82
98	6.67	0.57	0.82	1.58	2.22	3.16	1.16	0.66	1.47	1.31	1.58	0.73	0.51
99	8.47	0.73	1.05	2.01	2.81	4.01	1.47	0.84	1.86	1.66	2.00	0.92	0.65
100	9.12	0.79	1.13	2.17	3.03	4.32	1.58	0.91	2.01	1.79	2.16	0.99	0.70
70	6.80	0.59	0.84	1.61	2.26	3.22	1.18	0.67	1.50	1.33	1.61	0.74	0.52
UR65	4.91	0.42	0.61	1.17	1.63	2.32	0.85	0.49	1.08	0.96	1.16	0.53	0.38
71	4.41	0.38	0.55	1.05	1.47	2.09	0.77	0.44	0.97	0.86	1.04	0.48	0.34
72	10.96	0.94	1.35	2.60	3.64	5.18	1.90	1.09	2.41	2.15	2.59	1.19	0.84
68	7.93	0.68	0.98	1.88	2.64	3.75	1.38	0.79	1.75	1.55	1.88	0.86	0.61
69	8.01	0.69	0.99	1.90	2.66	3.79	1.39	0.80	1.76	1.57	1.89	0.87	0.62
45	7.96	0.69	0.98	1.89	2.65	3.77	1.38	0.79	1.75	1.56	1.88	0.87	0.61
49	10.09	0.87	1.25	2.40	3.35	4.78	1.75	1.00	2.22	1.98	2.39	1.10	0.78
52	12.12	1.04	1.50	2.88	4.03	5.73	2.10	1.20	2.67	2.37	2.86	1.32	0.93
56	10.18	0.88	1.26	2.42	3.38	4.82	1.76	1.01	2.24	1.99	2.41	1.11	0.78
41	10.03	0.86	1.24	2.38	3.34	4.75	1.74	1.00	2.21	1.96	2.37	1.09	0.77
36	20.10	1.73	2.49	4.77	6.68	9.51	3.49	1.99	4.43	3.94	4.75	2.19	1.55
37	47.80	4.12	5.91	11.35	15.89	22.62	8.29	4.74	10.53	9.36	11.30	5.20	3.68
57	19.56	1.69	2.42	4.65	6.50	9.25	3.39	1.94	4.31	3.83	4.62	2.13	1.51
60	9.02	0.78	1.12	2.14	3.00	4.27	1.56	0.90	1.99	1.77	2.13	0.98	0.69
63	34.89	3.01	4.31	8.29	11.60	16.51	6.05	3.46	7.68	6.83	8.25	3.80	2.69
65	7.20	0.62	0.89	1.71	2.39	3.41	1.25	0.71	1.58	1.41	1.70	0.78	0.55
66	10.83	0.93	1.34	2.57	3.60	5.12	1.88	1.07	2.38	2.12	2.56	1.18	0.83
161	11.75	1.01	1.45	2.79	3.91	5.56	2.04	1.17	2.59	2.30	2.78	1.28	0.90
165	7.92	0.68	0.98	1.88	2.63	3.75	1.37	0.79	1.74	1.55	1.87	0.86	0.61
164	7.35	0.63	0.91	1.75	2.44	3.48	1.27	0.73	1.62	1.44	1.74	0.80	0.57
166	10.32	0.89	1.28	2.45	3.43	4.89	1.79	1.02	2.27	2.02	2.44	1.12	0.79
167	4.41	0.38	0.55	1.05	1.47	2.09	0.77	0.44	0.97	0.86	1.04	0.48	0.34
169	12.11	1.04	1.50	2.88	4.03	5.73	2.10	1.20	2.67	2.37	2.86	1.32	0.93
176	11.16	0.96	1.38	2.65	3.71	5.28	1.94	1.11	2.46	2.19	2.64	1.21	0.86
177	6.95	0.60	0.86	1.65	2.31	3.29	1.20	0.69	1.53	1.36	1.64	0.76	0.53

ANEJO I

Hidrante	S <sub>i</sub> (ha)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
178	6.69	0.58	0.83	1.59	2.22	3.16	1.16	0.66	1.47	1.31	1.58	0.73	0.51
173	14.48	1.25	1.79	3.44	4.81	6.85	2.51	1.44	3.19	2.84	3.42	1.58	1.11
174	30.10	2.59	3.72	7.15	10.01	14.24	5.22	2.99	6.63	5.89	7.11	3.27	2.32
148	6.61	0.57	0.82	1.57	2.20	3.13	1.15	0.66	1.46	1.29	1.56	0.72	0.51
150	10.89	0.94	1.35	2.59	3.62	5.15	1.89	1.08	2.40	2.13	2.57	1.19	0.84
151	8.95	0.77	1.11	2.13	2.97	4.23	1.55	0.89	1.97	1.75	2.12	0.97	0.69
152	11.09	0.96	1.37	2.63	3.69	5.25	1.92	1.10	2.44	2.17	2.62	1.21	0.85
153	8.42	0.73	1.04	2.00	2.80	3.99	1.46	0.84	1.86	1.65	1.99	0.92	0.65
144	9.00	0.78	1.11	2.14	2.99	4.26	1.56	0.89	1.98	1.76	2.13	0.98	0.69
143	11.78	1.01	1.46	2.80	3.91	5.57	2.04	1.17	2.59	2.31	2.78	1.28	0.91
138	5.74	0.49	0.71	1.36	1.91	2.72	1.00	0.57	1.26	1.12	1.36	0.62	0.44
139	16.60	1.43	2.05	3.94	5.52	7.86	2.88	1.65	3.66	3.25	3.92	1.81	1.28
140	4.44	0.38	0.55	1.05	1.48	2.10	0.77	0.44	0.98	0.87	1.05	0.48	0.34
136	8.44	0.73	1.04	2.01	2.81	3.99	1.46	0.84	1.86	1.65	2.00	0.92	0.65
135	12.24	1.05	1.51	2.91	4.07	5.79	2.12	1.21	2.70	2.40	2.89	1.33	0.94
134	21.82	1.88	2.70	5.18	7.25	10.33	3.78	2.17	4.81	4.27	5.16	2.37	1.68
155	6.46	0.56	0.80	1.54	2.15	3.06	1.12	0.64	1.42	1.27	1.53	0.70	0.50
156	10.30	0.89	1.27	2.45	3.42	4.87	1.79	1.02	2.27	2.02	2.43	1.12	0.79
157	5.49	0.47	0.68	1.31	1.83	2.60	0.95	0.55	1.21	1.08	1.30	0.60	0.42
158	13.82	1.19	1.71	3.28	4.60	6.54	2.40	1.37	3.04	2.71	3.27	1.50	1.06
159	10.86	0.94	1.34	2.58	3.61	5.14	1.88	1.08	2.39	2.13	2.57	1.18	0.84
C1223	12.15	1.05	1.50	2.89	4.04	5.75	2.11	1.21	2.67	2.38	2.87	1.32	0.93
C1178	13.66	1.18	1.69	3.25	4.54	6.46	2.37	1.36	3.01	2.67	3.23	1.49	1.05
C1081	8.41	0.72	1.04	2.00	2.79	3.98	1.46	0.83	1.85	1.65	1.99	0.91	0.65
C1175	4.38	0.38	0.54	1.04	1.45	2.07	0.76	0.43	0.96	0.86	1.03	0.48	0.34
C1172	9.57	0.82	1.18	2.27	3.18	4.53	1.66	0.95	2.11	1.87	2.26	1.04	0.74
C1173	10.68	0.92	1.32	2.54	3.55	5.05	1.85	1.06	2.35	2.09	2.52	1.16	0.82
J1389	7.30	0.63	0.90	1.73	2.43	3.46	1.27	0.72	1.61	1.43	1.73	0.79	0.56
C1274	15.80	1.36	1.95	3.75	5.25	7.48	2.74	1.57	3.48	3.09	3.74	1.72	1.22
C1143	9.68	0.83	1.20	2.30	3.22	4.58	1.68	0.96	2.13	1.89	2.29	1.05	0.74
C1087	7.28	0.63	0.90	1.73	2.42	3.45	1.26	0.72	1.60	1.43	1.72	0.79	0.56
C1089	13.29	1.14	1.64	3.16	4.42	6.29	2.30	1.32	2.93	2.60	3.14	1.45	1.02
C1228	11.88	1.02	1.47	2.82	3.95	5.62	2.06	1.18	2.62	2.33	2.81	1.29	0.91
C1131	8.76	0.76	1.08	2.08	2.91	4.15	1.52	0.87	1.93	1.72	2.07	0.95	0.67
C1112	16.48	1.42	2.04	3.92	5.48	7.80	2.86	1.64	3.63	3.23	3.90	1.79	1.27
C1141	12.07	1.04	1.49	2.87	4.01	5.71	2.09	1.20	2.66	2.36	2.85	1.31	0.93
C1284	12.64	1.09	1.56	3.00	4.20	5.98	2.19	1.25	2.78	2.47	2.99	1.38	0.97
C1165	12.55	1.08	1.55	2.98	4.17	5.94	2.18	1.25	2.76	2.46	2.97	1.37	0.97
C1278	19.01	1.64	2.35	4.52	6.32	9.00	3.30	1.89	4.19	3.72	4.49	2.07	1.46
C1083	9.14	0.79	1.13	2.17	3.04	4.33	1.59	0.91	2.01	1.79	2.16	0.99	0.70
C1134	5.72	0.49	0.71	1.36	1.90	2.70	0.99	0.57	1.26	1.12	1.35	0.62	0.44
C1163	8.84	0.76	1.09	2.10	2.94	4.18	1.53	0.88	1.95	1.73	2.09	0.96	0.68
C1302	12.48	1.08	1.54	2.97	4.15	5.91	2.16	1.24	2.75	2.44	2.95	1.36	0.96
C1114	10.68	0.92	1.32	2.54	3.55	5.06	1.85	1.06	2.35	2.09	2.53	1.16	0.82
C1139	15.62	1.35	1.93	3.71	5.19	7.39	2.71	1.55	3.44	3.06	3.69	1.70	1.20

ANEJO I

Hidrante	S <sub>i</sub> (ha)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
C1138	7.88	0.68	0.97	1.87	2.62	3.73	1.37	0.78	1.74	1.54	1.86	0.86	0.61
C1267	12.79	1.10	1.58	3.04	4.25	6.05	2.22	1.27	2.82	2.50	3.02	1.39	0.98
C1304	10.58	0.91	1.31	2.51	3.52	5.00	1.83	1.05	2.33	2.07	2.50	1.15	0.81
C1230	48.95	4.22	6.05	11.63	16.27	23.16	8.49	4.86	10.78	9.58	11.57	5.33	3.77
C1234	12.74	1.10	1.57	3.03	4.23	6.03	2.21	1.26	2.80	2.49	3.01	1.39	0.98
C1180	7.18	0.62	0.89	1.71	2.39	3.40	1.25	0.71	1.58	1.41	1.70	0.78	0.55
C1182	5.62	0.48	0.70	1.34	1.87	2.66	0.97	0.56	1.24	1.10	1.33	0.61	0.43
C1317	15.01	1.29	1.86	3.57	4.99	7.10	2.60	1.49	3.30	2.94	3.55	1.63	1.15
C1184	12.27	1.06	1.52	2.92	4.08	5.81	2.13	1.22	2.70	2.40	2.90	1.34	0.94
C1110	32.17	2.77	3.98	7.64	10.69	15.22	5.58	3.19	7.08	6.30	7.60	3.50	2.48
C1108	12.10	1.04	1.50	2.88	4.02	5.73	2.10	1.20	2.67	2.37	2.86	1.32	0.93
C1327	7.70	0.66	0.95	1.83	2.56	3.64	1.33	0.76	1.70	1.51	1.82	0.84	0.59
C1049	9.07	0.78	1.12	2.15	3.02	4.29	1.57	0.90	2.00	1.78	2.14	0.99	0.70
C1260	2.47	0.21	0.31	0.59	0.82	1.17	0.43	0.25	0.54	0.48	0.58	0.27	0.19
C1116	8.98	0.77	1.11	2.13	2.98	4.25	1.56	0.89	1.98	1.76	2.12	0.98	0.69
C1091	12.10	1.04	1.50	2.88	4.02	5.73	2.10	1.20	2.67	2.37	2.86	1.32	0.93
C1118	6.24	0.54	0.77	1.48	2.07	2.95	1.08	0.62	1.37	1.22	1.47	0.68	0.48
C1157	10.41	0.90	1.29	2.47	3.46	4.93	1.81	1.03	2.29	2.04	2.46	1.13	0.80
C1215	7.81	0.67	0.97	1.86	2.60	3.70	1.35	0.78	1.72	1.53	1.85	0.85	0.60
C1155	10.55	0.91	1.30	2.51	3.51	4.99	1.83	1.05	2.32	2.07	2.49	1.15	0.81
C1254	12.94	1.11	1.60	3.07	4.30	6.12	2.24	1.28	2.85	2.53	3.06	1.41	1.00
C1232	14.71	1.27	1.82	3.49	4.89	6.96	2.55	1.46	3.24	2.88	3.48	1.60	1.13
C1306	11.77	1.01	1.46	2.80	3.91	5.57	2.04	1.17	2.59	2.30	2.78	1.28	0.91
C1169	14.04	1.21	1.74	3.34	4.67	6.65	2.44	1.39	3.09	2.75	3.32	1.53	1.08
C1308	14.31	1.23	1.77	3.40	4.76	6.77	2.48	1.42	3.15	2.80	3.38	1.56	1.10
C1262	20.76	1.79	2.57	4.93	6.90	9.82	3.60	2.06	4.57	4.06	4.91	2.26	1.60
C1167	27.79	2.39	3.44	6.60	9.24	13.15	4.82	2.76	6.12	5.44	6.57	3.02	2.14
C1236	7.66	0.66	0.95	1.82	2.55	3.63	1.33	0.76	1.69	1.50	1.81	0.83	0.59
C1257	16.56	1.43	2.05	3.93	5.51	7.84	2.87	1.64	3.65	3.24	3.92	1.80	1.27
C1258	20.41	1.76	2.52	4.85	6.78	9.66	3.54	2.02	4.49	4.00	4.82	2.22	1.57
C1106	6.47	0.56	0.80	1.54	2.15	3.06	1.12	0.64	1.43	1.27	1.53	0.70	0.50
C1127	6.86	0.59	0.85	1.63	2.28	3.25	1.19	0.68	1.51	1.34	1.62	0.75	0.53
C1221	18.31	1.58	2.26	4.35	6.09	8.66	3.17	1.82	4.03	3.58	4.33	1.99	1.41
UR59	29.03	2.50	3.59	6.90	9.65	13.74	5.03	2.88	6.39	5.68	6.86	3.16	2.23
C1160	12.09	1.04	1.50	2.87	4.02	5.72	2.10	1.20	2.66	2.37	2.86	1.32	0.93
UR61	10.77	0.93	1.33	2.56	3.58	5.10	1.87	1.07	2.37	2.11	2.55	1.17	0.83
C1148	15.91	1.37	1.97	3.78	5.29	7.53	2.76	1.58	3.50	3.12	3.76	1.73	1.22
J1122	17.40	1.50	2.15	4.13	5.78	8.23	3.02	1.73	3.83	3.41	4.11	1.89	1.34
C1120	19.60	1.69	2.42	4.66	6.51	9.27	3.40	1.94	4.32	3.84	4.63	2.13	1.51
C1241	6.42	0.55	0.79	1.53	2.13	3.04	1.11	0.64	1.41	1.26	1.52	0.70	0.49
C2	27.30	2.35	3.38	6.48	9.07	12.92	4.73	2.71	6.01	5.34	6.45	2.97	2.10
C1	17.59	1.52	2.18	4.18	5.85	8.33	3.05	1.75	3.87	3.44	4.16	1.91	1.35
C25	9.61	0.83	1.19	2.28	3.19	4.55	1.67	0.95	2.12	1.88	2.27	1.05	0.74
C24	8.59	0.74	1.06	2.04	2.86	4.07	1.49	0.85	1.89	1.68	2.03	0.93	0.66
C23	10.13	0.87	1.25	2.41	3.37	4.80	1.76	1.01	2.23	1.98	2.40	1.10	0.78

**ANEJO I**

<b>Hidrante</b>	<b>S<sub>i</sub> (ha)</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
C44	13.03	1.12	1.61	3.10	4.33	6.17	2.26	1.29	2.87	2.55	3.08	1.42	1.00
C4	20.05	1.73	2.48	4.76	6.67	9.49	3.48	1.99	4.42	3.93	4.74	2.18	1.54
C26	12.67	1.09	1.57	3.01	4.21	6.00	2.20	1.26	2.79	2.48	2.99	1.38	0.98
C5	26.36	2.27	3.26	6.26	8.76	12.47	4.57	2.62	5.80	5.16	6.23	2.87	2.03
C7	15.54	1.34	1.92	3.69	5.16	7.35	2.69	1.54	3.42	3.04	3.67	1.69	1.20
C6	15.27	1.32	1.89	3.63	5.08	7.23	2.65	1.52	3.36	2.99	3.61	1.66	1.18
C27	7.68	0.66	0.95	1.82	2.55	3.63	1.33	0.76	1.69	1.50	1.81	0.84	0.59
C28	21.51	1.85	2.66	5.11	7.15	10.18	3.73	2.13	4.74	4.21	5.08	2.34	1.66
C8	15.83	1.36	1.96	3.76	5.26	7.49	2.75	1.57	3.49	3.10	3.74	1.72	1.22
C9	24.05	2.07	2.97	5.71	7.99	11.38	4.17	2.39	5.30	4.71	5.68	2.62	1.85
C29	22.61	1.95	2.80	5.37	7.51	10.70	3.92	2.24	4.98	4.43	5.34	2.46	1.74
C45	40.97	3.53	5.07	9.73	13.62	19.39	7.10	4.06	9.02	8.02	9.68	4.46	3.15
C46	11.98	1.03	1.48	2.85	3.98	5.67	2.08	1.19	2.64	2.35	2.83	1.30	0.92
C10	9.17	0.79	1.13	2.18	3.05	4.34	1.59	0.91	2.02	1.80	2.17	1.00	0.71
C11	27.47	2.37	3.40	6.53	9.13	13.00	4.76	2.73	6.05	5.38	6.49	2.99	2.11
C30	14.39	1.24	1.78	3.42	4.78	6.81	2.49	1.43	3.17	2.82	3.40	1.57	1.11
C31	12.06	1.04	1.49	2.87	4.01	5.71	2.09	1.20	2.66	2.36	2.85	1.31	0.93
C32	9.53	0.82	1.18	2.26	3.17	4.51	1.65	0.95	2.10	1.87	2.25	1.04	0.73
C12	9.03	0.78	1.12	2.14	3.00	4.27	1.57	0.90	1.99	1.77	2.13	0.98	0.69
C34	22.99	1.98	2.84	5.46	7.64	10.88	3.99	2.28	5.06	4.50	5.43	2.50	1.77
C33	37.32	3.22	4.61	8.87	12.40	17.66	6.47	3.70	8.22	7.31	8.82	4.06	2.87
C14	32.54	2.80	4.02	7.73	10.82	15.40	5.64	3.23	7.16	6.37	7.69	3.54	2.50
C13	34.90	3.01	4.32	8.29	11.60	16.51	6.05	3.46	7.68	6.83	8.25	3.80	2.69
C47	10.68	0.92	1.32	2.54	3.55	5.05	1.85	1.06	2.35	2.09	2.52	1.16	0.82
C20	28.63	2.47	3.54	6.80	9.52	13.55	4.96	2.84	6.31	5.61	6.77	3.12	2.20
C37	11.27	0.97	1.39	2.68	3.75	5.34	1.96	1.12	2.48	2.21	2.66	1.23	0.87
C36	20.03	1.73	2.48	4.76	6.66	9.48	3.47	1.99	4.41	3.92	4.74	2.18	1.54
C21	13.07	1.13	1.62	3.10	4.34	6.18	2.27	1.30	2.88	2.56	3.09	1.42	1.01
C35	21.47	1.85	2.65	5.10	7.14	10.16	3.72	2.13	4.73	4.20	5.07	2.34	1.65
C16	9.59	0.83	1.19	2.28	3.19	4.54	1.66	0.95	2.11	1.88	2.27	1.04	0.74
C48	22.93	1.98	2.84	5.45	7.62	10.85	3.98	2.28	5.05	4.49	5.42	2.49	1.76
C19	10.38	0.89	1.28	2.47	3.45	4.91	1.80	1.03	2.29	2.03	2.45	1.13	0.80
C54	21.59	1.86	2.67	5.13	7.18	10.22	3.74	2.14	4.75	4.23	5.10	2.35	1.66
C40	31.41	2.71	3.88	7.46	10.44	14.87	5.45	3.12	6.92	6.15	7.43	3.42	2.42
C18	5.67	0.49	0.70	1.35	1.89	2.68	0.98	0.56	1.25	1.11	1.34	0.62	0.44
C17	17.74	1.53	2.19	4.22	5.90	8.40	3.08	1.76	3.91	3.47	4.19	1.93	1.37
C49	16.17	1.39	2.00	3.84	5.38	7.65	2.80	1.60	3.56	3.17	3.82	1.76	1.24
C22	19.94	1.72	2.47	4.74	6.63	9.44	3.46	1.98	4.39	3.90	4.71	2.17	1.53
C3	14.85	1.28	1.84	3.53	4.94	7.03	2.58	1.47	3.27	2.91	3.51	1.62	1.14
C15	20.28	1.75	2.51	4.82	6.74	9.60	3.52	2.01	4.47	3.97	4.79	2.21	1.56
C38	16.54	1.43	2.05	3.93	5.50	7.83	2.87	1.64	3.64	3.24	3.91	1.80	1.27
C51	26.29	2.27	3.25	6.25	8.74	12.44	4.56	2.61	5.79	5.15	6.21	2.86	2.02
C50	35.02	3.02	4.33	8.32	11.64	16.57	6.07	3.48	7.71	6.86	8.28	3.81	2.70
C39	12.02	1.04	1.49	2.85	3.99	5.69	2.08	1.19	2.65	2.35	2.84	1.31	0.92
C52	21.37	1.84	2.64	5.08	7.10	10.11	3.71	2.12	4.71	4.18	5.05	2.33	1.65

## ANEJO I

---

<b>Hidrante</b>	<b>S<sub>i</sub> (ha)</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
C53	28.42	2.45	3.51	6.75	9.45	13.45	4.93	2.82	6.26	5.56	6.72	3.09	2.19
C41	15.09	1.30	1.87	3.59	5.02	7.14	2.62	1.50	3.32	2.96	3.57	1.64	1.16
C43	15.29	1.32	1.89	3.63	5.08	7.24	2.65	1.52	3.37	2.99	3.61	1.66	1.18
C42	26.27	2.26	3.25	6.24	8.73	12.43	4.56	2.61	5.78	5.14	6.21	2.86	2.02

**ANEJO II. Distancia en (m) entre cada una de las estaciones de bombeo y los hidrantes respectivos, obtenida mediante el algoritmo de Dijkstra.**

ID hidrante	Estaciones de bombeo		
	1	S29	J1105
13	954.04	4410.56	4405.52
17	1078.21	4534.73	4529.69
20	1274.86	4731.38	4726.34
24	1584.53	5041.05	5036.01
25	1688.16	5144.68	5139.64
28	1993.73	5450.25	5445.21
33	2380.21	5836.73	5831.69
36	2454.3	5910.82	5905.78
37	2303.33	5759.85	5754.81
41	2869.17	6325.69	6320.65
45	3048.99	6505.51	6500.47
49	3337.82	6794.34	6789.3
52	3400.8	6857.32	6852.28
56	3731.86	7188.38	7183.34
57	2547.56	6004.08	5999.04
60	3070.71	6527.23	6522.19
63	4262.92	7719.44	7714.4
65	4699.09	8155.61	8150.57
66	4914.5	8371.02	8365.98
68	3499.69	6956.21	6951.17
69	3739.26	7195.78	7190.74
70	3547.33	7003.85	6998.81
71	3921.29	7377.81	7372.77
72	4158.36	7614.88	7609.84
73	3506.1	6962.62	6957.58
75	3633.91	7090.43	7085.39
76	3529.08	6985.6	6980.56
77	3934.69	7391.21	7386.17
78	4069.92	7526.44	7521.4
79	3916.85	7373.37	7368.33
80	4235.83	7692.35	7687.31
82	4244.95	7701.47	7696.43
83	4328.45	7784.97	7779.93
84	4407.24	7863.76	7858.72
85	4689.32	8145.84	8140.8
87	4852.72	8309.24	8304.2
89	5218.05	8674.57	8669.53
90	5352.9	8809.42	8804.38
91	4140.54	7597.06	7592.02
92	4298.76	7755.28	7750.24
94	4703.4	8159.92	8154.88
95	4359.77	7816.29	7811.25
96	4768.71	8225.23	8220.19
97	4993.47	8449.99	8444.95
98	5242.93	8699.45	8694.41



99	5294.72	8751.24	8746.2
<b>Estaciones de bombeo</b>			
<b>ID hidrante</b>	<b>1</b>	<b>S29</b>	<b>J1105</b>
100	5337.63	8794.15	8789.11
102	1507.27	4963.79	4958.75
104	1546.99	5003.51	4998.47
105	1692.49	5149.01	5143.97
106	1779.22	5235.74	5230.7
108	2064.24	5520.76	5515.72
109	2048.43	5504.95	5499.91
111	382.61	3839.13	3834.09
114	806.82	4263.34	4258.3
116	1144.26	4600.78	4595.74
117	1278.06	4734.58	4729.54
118	1585.43	5041.95	5036.91
119	1731.95	5188.47	5183.43
121	1028.15	4484.67	4479.63
122	933.7	4390.22	4385.18
123	831.42	4287.94	4282.9
124	1067.77	4524.29	4519.25
126	1291.68	4748.2	4743.16
127	1385.92	4842.44	4837.4
130	1886.53	5343.05	5338.01
131	2141.01	5597.53	5592.49
132	2244.75	5701.27	5696.23
133	2399.34	5855.86	5850.82
134	1952.65	5409.17	5404.13
135	2333.29	5789.81	5784.77
136	2736.3	6192.82	6187.78
138	2963.49	6420.01	6414.97
139	3219.01	6675.53	6670.49
140	2863.85	6320.37	6315.33
143	3325.03	6781.55	6776.51
144	3506.97	6963.49	6958.45
148	3963.44	7419.96	7414.92
150	4176.97	7633.49	7628.45
151	4431.41	7887.93	7882.89
152	4608.71	8065.23	8060.19
153	4715.55	8172.07	8167.03
155	4020.38	7476.9	7471.86
156	4430.02	7886.54	7881.5
157	4446.05	7902.57	7897.53
158	4638.62	8095.14	8090.1
159	4781.09	8237.61	8232.57
161	4312.84	7769.36	7764.32
164	4315.47	7771.99	7766.95
165	4243.47	7699.99	7694.95
166	4181.59	7638.11	7633.07
167	4317.04	7773.56	7768.52
169	4597.59	8054.11	8049.07

<b>ID hidrante</b>	<b>ID hidrante</b>	<b>ID hidrante</b>	<b>ID hidrante</b>
173	5000.05	8456.57	8451.53
<b>Estaciones de bombeo</b>			
174	5183.03	8639.55	8634.51
176	4951.09	8407.61	8402.57
177	4865.24	8321.76	8316.72
178	5237	8693.52	8688.48
179	118.52	3772.9	3767.86
180	440.88	4095.26	4090.22
181	496.09	4150.47	4145.43
183	873.65	4528.03	4522.99
185	1570.21	5224.59	5219.55
186	1167.83	4822.21	4817.17
187	1545.15	5199.53	5194.49
188	1703.1	5357.48	5352.44
16	1819.7	5276.22	5271.18
27	1851.42	5307.94	5302.9
C1	5551.13	1859.07	1860.75
C2	5210.28	1518.22	1519.9
C3	4876.59	1184.53	1186.21
C4	5410.32	1718.26	1719.94
C5	6026.58	2334.52	2336.2
C6	6460.07	2768.01	2769.69
C7	6598.99	2906.93	2908.61
C8	5569.41	1877.35	1879.03
C9	5706.87	2014.81	2016.49
C10	6773.42	3081.36	3083.04
C11	7126.63	3434.57	3436.25
C12	8259.39	4567.33	4569.01
C13	8673.86	4981.8	4983.48
C14	8509.51	4817.45	4819.13
C15	5367.37	1675.31	1676.99
C16	5448.42	1756.36	1758.04
C17	8032.83	4340.77	4342.45
C18	7836.09	4144.03	4145.71
C19	6419.26	2727.2	2728.88
C20	6806.71	3114.65	3116.33
C21	7509.62	3817.56	3819.24
C22	8039.44	4347.38	4349.06
C23	6146.79	2454.73	2456.41
C24	6118.34	2426.28	2427.96
C25	5871.46	2179.4	2181.08
C26	5702.66	2010.6	2012.28
C27	6386.99	2694.93	2696.61
C28	6813.25	3121.19	3122.87
C29	6118.61	2426.55	2428.23
C30	7611.88	3919.82	3921.5
C31	7671.87	3979.81	3981.49
C32	8113.14	4421.08	4422.76
C33	8740.08	5048.02	5049.7

<b>ID hidrante</b>	<b>ID hidrante</b>	<b>ID hidrante</b>	<b>ID hidrante</b>
<b>C34</b>	8640.08	4948.02	4949.7
<b>Estaciones de bombeo</b>			
<b>C35</b>	7521.12	3829.06	3830.74
<b>C36</b>	7136.22	3444.16	3445.84
<b>C37</b>	6675.31	2983.25	2984.93
<b>C38</b>	6085.91	2393.85	2395.53
<b>C39</b>	6739.51	3047.45	3049.13
<b>C40</b>	7430.12	3738.06	3739.74
<b>C41</b>	7302.02	3609.96	3611.64
<b>C42</b>	7879.12	4187.06	4188.74
<b>C43</b>	7674.65	3982.59	3984.27
<b>C44</b>	6511.05	2818.99	2820.67
<b>C45</b>	6319.25	2627.19	2628.87
<b>C46</b>	7004.51	3312.45	3314.13
<b>C47</b>	6445.92	2753.86	2755.54
<b>C48</b>	6005.39	2313.33	2315.01
<b>C49</b>	7618.35	3926.29	3927.97
<b>C50</b>	6208.86	2516.8	2518.48
<b>C51</b>	6269.84	2577.78	2579.46
<b>C52</b>	7019.09	3327.03	3328.71
<b>C53</b>	7380.47	3688.41	3690.09
<b>C54</b>	6991.65	3299.59	3301.27
<b>C1049</b>	5225.02	1832.12	1827.08
<b>C1081</b>	4029.93	637.03	631.99
<b>C1083</b>	5429.19	2036.29	2031.25
<b>C1087</b>	5168.22	1775.32	1770.28
<b>C1089</b>	5840.7	2447.8	2442.76
<b>C1091</b>	6154.74	2761.84	2756.8
<b>C1106</b>	10509.58	7116.68	7111.64
<b>C1108</b>	2359.48	1539.34	1534.3
<b>C1110</b>	2998.72	1486.04	1481
<b>C1112</b>	4854.65	1461.75	1456.71
<b>C1114</b>	6217.88	2824.98	2819.94
<b>C1116</b>	5913.51	2520.61	2515.57
<b>C1118</b>	6755.29	3362.39	3357.35
<b>C1120</b>	3437.63	3691.53	3686.49
<b>J1122</b>	3780.56	4034.46	4029.42
<b>C1127</b>	1581.76	2275.68	2270.64
<b>C1131</b>	4348.43	955.53	950.49
<b>C1134</b>	5478.56	2085.66	2080.62
<b>C1138</b>	6613.16	3220.26	3215.22
<b>C1139</b>	6250.85	2857.95	2852.91
<b>C1141</b>	4435.3	1042.4	1037.36
<b>C1143</b>	4810.95	1418.05	1413.01
<b>C1148</b>	2941.67	3195.57	3190.53
<b>C1155</b>	7334.66	3941.76	3936.72
<b>C1157</b>	6856.84	3463.94	3458.9
<b>C1160</b>	1408.81	2905.23	2900.19
<b>C1163</b>	5890.96	2498.06	2493.02

<b>C1165</b>	5181.05	1788.15	1783.11
<b>Estaciones de bombeo</b>			
<b>ID hidrante</b>	<b>ID hidrante</b>	<b>ID hidrante</b>	<b>ID hidrante</b>
<b>C1167</b>	6537.19	3144.29	3139.25
<b>C1169</b>	5926.78	2533.88	2528.84
<b>C1172</b>	4324.08	931.18	926.14
<b>C1173</b>	4469.58	1076.68	1071.64
<b>C1175</b>	4195.88	802.98	797.94
<b>C1178</b>	3626.8	233.9	228.86
<b>C1180</b>	3219.98	667.96	662.92
<b>C1182</b>	3498.43	946.41	941.37
<b>C1184</b>	2740.38	1249.62	1244.58
<b>C1215</b>	6859.25	3466.35	3461.31
<b>C1221</b>	1698.63	2392.55	2387.51
<b>C1223</b>	3790.49	125.69	120.65
<b>C1228</b>	6155.52	2762.62	2757.58
<b>C1230</b>	7489.61	4096.71	4091.67
<b>C1232</b>	7278.07	3885.17	3880.13
<b>C1234</b>	3352.11	411.21	406.17
<b>C1236</b>	6915.54	3522.64	3517.6
<b>C1241</b>	7809.14	4416.24	4411.2
<b>C1254</b>	6972.63	3579.73	3574.69
<b>C1257</b>	6911.44	3518.54	3513.5
<b>C1258</b>	10035.9	6643	6637.96
<b>C1260</b>	5554.74	2161.84	2156.8
<b>C1262</b>	6253.44	2860.54	2855.5
<b>C1267</b>	7082.9	3690	3684.96
<b>C1274</b>	4853.24	1460.34	1455.3
<b>C1278</b>	5170.73	1777.83	1772.79
<b>C1284</b>	4904.99	1512.09	1507.05
<b>C1302</b>	5836.69	2443.79	2438.75
<b>C1304</b>	7145.34	3752.44	3747.4
<b>C1306</b>	5794.05	2401.15	2396.11
<b>C1308</b>	6074.46	2681.56	2676.52
<b>C1317</b>	2659.92	1147.24	1142.2
<b>C1327</b>	5296.31	1903.41	1898.37
<b>J1389</b>	4559.54	1166.64	1161.6
<b>UR61</b>	2952.27	3206.17	3201.13
<b>UR65</b>	3930.72	7387.24	7382.2
<b>UR59</b>	1413.81	2910.23	2905.19



## ANEJO III. Cota y coordenadas adimensionales de cada uno de los hidrantes.

ID hidrante	Cota	$z_j^*$	$l_j^*$
13	11	-0.70	0.36
17	6	-0.91	0.38
20	11	-0.70	0.40
24	6	-0.91	0.43
25	7	-0.87	0.44
28	6.3	-0.90	0.48
33	21	-0.27	0.52
36	33	0.24	0.53
37	26.4	-0.04	0.51
41	31	0.15	0.57
45	32.61	0.22	0.59
49	36.3	0.38	0.62
52	39	0.49	0.63
56	31	0.15	0.66
57	33	0.24	0.54
60	37	0.41	0.59
63	20	-0.32	0.72
65	10	-0.74	0.77
66	8	-0.83	0.79
68	31	0.15	0.64
69	29	0.07	0.66
70	34	0.28	0.64
71	29	0.07	0.68
72	29.75	0.10	0.71
73	17	-0.44	0.64
75	15	-0.53	0.65
76	17	-0.44	0.64
77	19	-0.36	0.68
78	24	-0.15	0.70
79	9.36	-0.77	0.68
80	16.38	-0.47	0.72
82	12	-0.66	0.72
83	17	-0.44	0.73
84	21	-0.27	0.73
85	18	-0.40	0.77
87	20	-0.32	0.78
89	22	-0.23	0.82
90	25	-0.10	0.84
91	10.91	-0.70	0.71
92	16	-0.49	0.72
94	10	-0.74	0.77
95	17	-0.44	0.73
96	18	-0.40	0.77
97	17	-0.44	0.80
98	12	-0.66	0.82
99	10	-0.74	0.83
100	12.79	-0.62	0.83
102	8.59	-0.80	0.42

**ANEJO III**

<b>ID hidrante</b>	<b>Cota</b>	<b><math>z_j^*</math></b>	<b><math>I_j^*</math></b>
104	16.29	-0.47	0.43
105	20.91	-0.28	0.44
106	23	-0.19	0.45
108	24	-0.15	0.48
109	27	-0.02	0.48
111	11.2	-0.69	0.30
114	10	-0.74	0.35
116	18.4	-0.38	0.38
117	26	-0.06	0.40
118	42	0.62	0.43
119	43.93	0.70	0.45
121	26.61	-0.03	0.37
122	32.07	0.20	0.36
123	24.06	-0.14	0.35
124	42.53	0.64	0.38
126	44	0.71	0.40
127	35	0.32	0.41
130	41	0.58	0.46
131	30.3	0.12	0.49
132	31.14	0.16	0.50
133	26	-0.06	0.52
134	46	0.79	0.47
135	48	0.88	0.51
136	43	0.66	0.56
138	34.73	0.31	0.58
139	38	0.45	0.61
140	44	0.71	0.57
143	39.52	0.52	0.62
144	37.39	0.43	0.64
148	20	-0.32	0.69
150	33	0.24	0.71
151	39.74	0.53	0.74
152	38	0.45	0.76
153	44	0.71	0.77
155	16	-0.49	0.69
156	12	-0.66	0.74
157	10	-0.74	0.74
158	25	-0.10	0.76
159	20	-0.32	0.78
161	18	-0.40	0.72
164	33	0.24	0.73
165	26.95	-0.02	0.72
166	29.81	0.10	0.71
167	28	0.02	0.73
169	31.66	0.18	0.76
173	33.54	0.26	0.80
174	31	0.15	0.82
176	34	0.28	0.79
177	42	0.62	0.78
178	26	-0.06	0.82

**ANEJO III**

<b>ID hidrante</b>	<b>Cota</b>	<b><math>z_j^*</math></b>	<b><math>I_j^*</math></b>
179	15	-0.53	0.29
180	8	-0.83	0.32
181	6	-0.91	0.33
183	6	-0.91	0.37
185	25	-0.10	0.45
186	6	-0.91	0.40
187	5.57	-0.93	0.44
188	6	-0.91	0.46
16	25	-0.10	0.46
27	21	-0.27	0.46
C1	16	-0.49	0.32
C2	14	-0.57	0.28
C3	11	-0.70	0.24
C4	16	-0.49	0.30
C5	14	-0.57	0.37
C6	12	-0.66	0.41
C7	19	-0.36	0.43
C8	12	-0.66	0.32
C9	13	-0.62	0.33
C10	18	-0.40	0.45
C11	18	-0.40	0.49
C12	25	-0.10	0.61
C13	25	-0.10	0.65
C14	24	-0.15	0.63
C15	11	-0.70	0.30
C16	12	-0.66	0.31
C17	26	-0.06	0.58
C18	18	-0.40	0.56
C19	14	-0.57	0.41
C20	15	-0.53	0.45
C21	20	-0.32	0.53
C22	21	-0.27	0.58
C23	18	-0.40	0.38
C24	15	-0.53	0.38
C25	11	-0.70	0.35
C26	15	-0.53	0.33
C27	11	-0.70	0.41
C28	20	-0.32	0.45
C29	14	-0.57	0.38
C30	22	-0.23	0.54
C31	22	-0.23	0.54
C32	23	-0.19	0.59
C33	29	0.07	0.66
C34	26	-0.06	0.65
C35	21	-0.27	0.53
C36	17	-0.44	0.49
C37	15	-0.53	0.44
C38	10	-0.74	0.37
C39	9	-0.79	0.44
C40	22	-0.23	0.52



ANEJO III

ID hidrante	Cota	$z_j^*$	$I_j^*$
C41	9	-0.79	0.50
C42	5	-0.96	0.57
C43	7	-0.87	0.54
C44	16	-0.49	0.42
C45	15	-0.53	0.40
C46	18	-0.40	0.47
C47	14	-0.57	0.41
C48	13	-0.62	0.37
C49	19	-0.36	0.54
C50	11	-0.70	0.39
C51	12	-0.66	0.39
C52	9	-0.79	0.47
C53	13	-0.62	0.51
C54	16	-0.49	0.47
C1049	18	-0.40	0.30
C1081	23.63	-0.16	0.18
C1083	21.15	-0.27	0.33
C1087	18.71	-0.37	0.30
C1089	14	-0.57	0.37
C1091	9	-0.79	0.40
C1106	12.88	-0.62	0.87
C1108	30.5	0.13	0.19
C1110	30.5	0.13	0.21
C1112	23.79	-0.15	0.26
C1114	23.76	-0.16	0.41
C1116	13.25	-0.60	0.38
C1118	9.63	-0.76	0.47
C1120	8	-0.83	0.39
J1122	6	-0.91	0.43
C1127	28	0.02	0.22
C1131	28.47	0.04	0.21
C1134	21.63	-0.25	0.33
C1138	21.56	-0.25	0.45
C1139	22.71	-0.20	0.41
C1141	22.8	-0.20	0.22
C1143	26.88	-0.02	0.26
C1148	24	-0.15	0.34
C1155	8.4	-0.81	0.53
C1157	9.23	-0.78	0.48
C1160	29.33	0.08	0.26
C1163	19.18	-0.35	0.38
C1165	23.4	-0.17	0.30
C1167	19.5	-0.34	0.45
C1169	13.5	-0.59	0.38
C1172	21.08	-0.27	0.21
C1173	21.17	-0.27	0.22
C1175	19.63	-0.33	0.19
C1178	28.71	0.06	0.13
C1180	30.19	0.12	0.15
C1182	27.66	0.01	0.18

**ANEJO III**

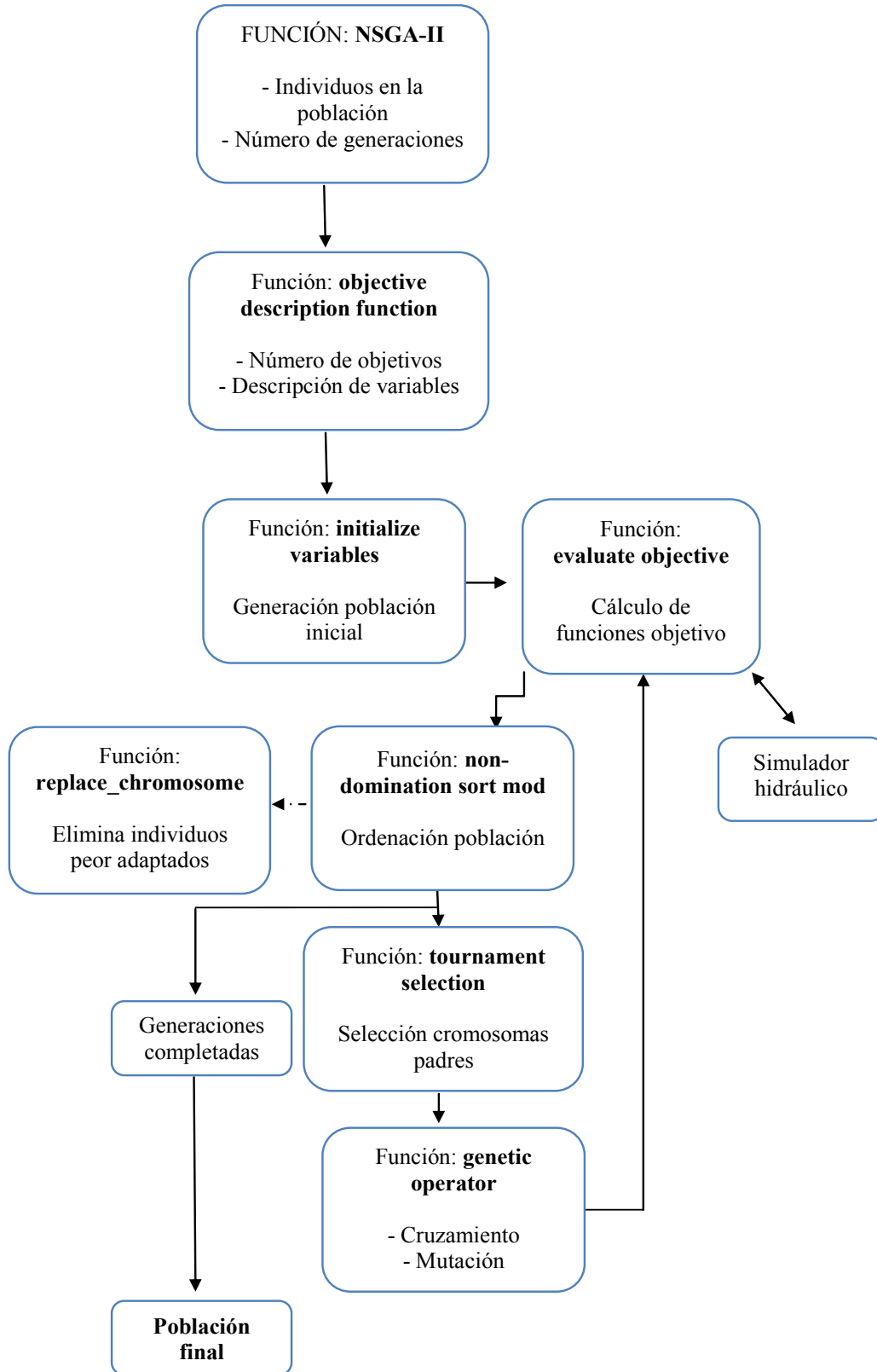
---

<b>ID hidrante</b>	<b>Cota</b>	<b><math>z_j^*</math></b>	<b><math>I_j^*</math></b>
C1184	27.46	0.00	0.18
C1215	8.74	-0.80	0.48
C1221	30	0.11	0.23
C1223	28.07	0.03	0.13
C1228	8.25	-0.82	0.40
C1230	15.39	-0.51	0.55
C1232	7.5	-0.85	0.52
C1234	30.66	0.14	0.14
C1236	11.4	-0.68	0.49
C1241	8.76	-0.80	0.58
C1254	7.8	-0.84	0.49
C1257	10.43	-0.72	0.49
C1258	16	-0.49	0.82
C1260	16.48	-0.47	0.34
C1262	17.5	-0.42	0.41
C1267	19.62	-0.33	0.50
C1274	21.49	-0.25	0.26
C1278	21.63	-0.25	0.30
C1284	22.64	-0.20	0.27
C1302	22.46	-0.21	0.37
C1304	18.49	-0.38	0.51
C1306	15.76	-0.50	0.37
C1308	17.6	-0.42	0.40
C1317	30.31	0.12	0.17
C1327	18	-0.40	0.31
J1389	20.5	-0.30	0.23
UR61	24	-0.15	0.34
UR65	25.59	-0.08	0.68
UR59	29.33	0.08	0.26

---



❖ ANEJO IV.A. Diagrama operativo del algoritmo multiobjetivo NSGA-II adaptado al problema planteado



## ❖ ANEJO IV.B.Código del algoritmo

```

function nsga_2(pop,gen)
nargin= 2;
pop=20;
gen=50;
% Number of Arguments
% Check for the number of arguments. The two input arguments are
necessary
% to run this function.
if nargin < 2
    error('NSGA-II: Please enter the population size and number of
generations as input arguments.');
```

end

```

% Both the input arguments need to of integer data type
if isnumeric(pop) == 0 || isnumeric(gen) == 0
    error('Both input arguments pop and gen should be integer datatype');
```

end

```

% Minimum population size has to be 20 individuals
if pop < 20
    error('Minimum population for running this function is 20');
```

end

```

if gen < 5
    error('Minimum number of generations is 5');
```

end

```

% Make sure pop and gen are integers
pop = round(pop);
gen = round(gen);
%% Objective Function
% The objective function description contains information about the
% objective function. M is the dimension of the objective space, V is the
% dimension of decision variable space, min_range and max_range are the
% range for the variables in the decision variable space. User has to
% define the objective functions using the decision variables. Make sure
to
% edit the function 'evaluate_objective' to suit your needs.
[M, V, min_range, max_range] = objective_description_function();
```

```

function [number_of_objectives, number_of_decision_variables,
min_range_of_decesion_variable, max_range_of_decesion_variable] =
objective_description_function()
```

```

g = sprintf('Input the number of objective: ');
% Obtain the number of objective function
number_of_objectives = input(g);
if number_of_objectives < 2
    error('This is a multi-objective optimization function hence the
minimum number of objectives is two');
```

end

```

g = sprintf('\nInput the number of decision variables: ');
% Obtain the number of decision variables
number_of_decision_variables = input(g);
clc
g = sprintf('\nInput the min_range_of_decesion_variables %d ');
% Obtain the minimum possible value for each decision variable
```

---

```

min_range_of_decision_variable = input(g);
g = sprintf('\nInput the max_range_of_decision_variable %d ');
% Obtain the maximum possible value for each decision variable
max_range_of_decision_variable = input(g);
clc

g = sprintf('\n Now edit the function named "evaluate_objective"
appropriately to match your needs.\n Make sure that the number of
objective functions and decision variables match your numerical input. \n
Make each objective function as a corresponding array element. \n After
editing do not forget to save. \n Press "c" and enter to continue... ');
% Prompt the user to edit the evaluate_objective function and wait until
% 'c' is pressed.
x = input(g, 's');
if isempty(x)
    x = 'x';
end
while x ~= 'c'
    clc
    x = input(g, 's');
    if isempty(x)
        x = 'x';
    end
end

chromosome = initialize_variables(pop, M, V, min_range, max_range);

function f = initialize_variables(N, M, V, min_range, max_range)

min = min_range;
max = max_range;

% K is the total number of array elements. For ease of computation
decision
% variables and objective functions are concatenated to form a single
% array. For crossover and mutation only the decision variables are used
% while for selection, only the objective variable are utilized.

K = M + V;

%% Initialize each chromosome
% For each chromosome perform the following (N is the population size)

f= round (rand(N,V));
for i=1:N
    for s=1:12
        sectores(i,s)=randi(5);
    end;
    k=1;
    for j=0:15:(V-15)
        m=3*(sectores(i,k));
        for t=(j+1):(m+j)
            f(i,t)= round (rand);
        end
    end
end

```

```

        end;
        if sectores (i,k)~=5
            for t=(m+j+1):(j+15)
                f(i,t)=0;
            end;
        end;
        k=k+1;
    end;
    for j=1:V
        if f(i,j)~=0
            f(i,j)=min(j) + (max(j) - min(j))*rand(1);
        end;
    end;
    f(i,V + 1: K) = evaluate_objective(f(i,:), M, V);
end;
save poblacioninicial.txt f -ASCII

function f = evaluate_objective(x, M, V)

f = [];
% Objective function one
Preq=30;
Qd=1.2;
a1=0;
a2=0;
a3=0;
b1=-4000;
b2=500000;
b3=-30;
g=9800;
P=0.10;
nnudos=512;
rendi=0.8;

load tdisponible.mat;

load Qnecesario.mat;

load sectores.mat;

load superficie.mat;

load cotas.mat;

load mes.mat;

load tim.mat;

s=1;
for m=0:15:(V-15);
    r=1;
    n=0;

```

```

for v=(m+0):3:(m+12) %para cada mes
    if x(v+1)==0 && x(v+2)==0 && x(v+3)==0
        nsect(r)=0;
    else
        nsect(r)=1+n;
        n=n+1;
    end;
end;

sector(s)=max(nsect);
if sector(s)==0
    C(s)=25000;
    Deficitmes(s)=1;
    presionesmes(s)=2;
else

td=tdisponible(sector(s));
    if tim(s) > td
        t= td;
    else
        t=tim(s);
    end;
tiempo(s)=t;
superficies=superficie(:,s);
XX=superficies>0;

r=1;
n=0;
for v=(m+0):3:(m+12)
    if nsect(r)==(1+n)
        k=1;
        for u=1:(nnudos-3)

            if XX(u)==1 && Sectores(k,sector(s))==nsect(r)
                patronsector(u)=1;
                k=k+1;
            elseif XX(u)==1 && Sectores(k,sector(s))~=nsect(r)
                patronsector(u)=0;
                k=k+1;
            else
                patronsector(u)=0;
                k=k+1;
            end
        end
    end;

    patronsector(510:512)=0
    Dembase=superficies;
    Dembase=Dembase*Qd;
    Dembase(510:512)=0;
    Dembase= Dembase.*patronsector';

    cotas(510)=(x(v+1))+25
    cotas(511)=(x(v+2))+28.98;

```



```

cotas(512)=(x(v+3))+28.36;
H1=cotas(510);
H2=cotas(511);
H3=cotas(512);

B=epanetloadfile('Palos.inp');
setdata('EN_ELEVATION',cotas);
setdata('EN_BASEDEMAND',Dembase');

Caudal=getdata('EN_FLOW');

Q1=(Caudal(507))/1000
Q2=(Caudal(170))/1000;
Q3=(Caudal(367))/1000;

Cssector(s,nsect(r))=((g*(tiempo(s)))/rendi)*((Q1*(H1-25))+(Q2*(H2-
28.98))+(Q3*(H3-28.36)))/1000*mes(s)*P;
Qa(s,nsect(r))=(Q1+Q2+Q3)*(tiempo(s))*3600*mes(s);

Pnudos=getdata('EN_PRESSURE');
epanetclose();

Pssector=Pnudos.*patronsector;
for k=1:nnudos
    if patronsector(k)==1
        alfa(k)=Pssector(k)-Preq;
    end;
end;
alfamin=min(alfa);
if alfamin<0 && alfamin<=-30
    presiones=2;
elseif alfamin<0 && alfamin>-30
    alfanegativo=alfa<0;
    alfanegativos=sum(alfanegativo);
    sumpatronsector=sum(patronsector);
    ffallo=alfanegativos/sumpatronsector;
    magnitudfallo=(alfamin-a3)/(b3-a3);
    presiones=ffallo + magnitudfallo;
elseif alfamin>=0
    presiones=0;

end;
presionessector(s,nsect(r))=presiones;

end;
r=r+1;
end;

C(s)=sum(Cssector(s,:));
Qap(s)=sum(Qa(s,:));%ver unidades
Deficitmes(s)=Qap(s)-Qnecesario(s);
if Deficitmes(s)>=0
    Deficitmes(s)=0;
elseif Deficitmes(s)<0 && Deficitmes(s)<=-4000

```

```

        Deficitmes(s)=1;
    elseif Deficitmes(s)<0 && Deficitmes(s)>-4000
        Deficitmes(s)=(((Deficitmes(s))-a1)/(b1-a1));
    end;
    presionesmes(s)=max(presionessector(s,:));

    end;
    s=s+1;

end;

for z=1:12
    if C(z)==25000
        Coste=1;
    end;
end;
if Coste==0
    Coste=((sum(C))-a2)/(b2-a2);
end;
Deficit=max(Deficitmes);
if Deficit==1
    f(1)=2;
    f(2)=1.9;
else
    f(1)=Coste+Deficit;
    Presiones=max(presionesmes);
    f(2)=Presiones;
end;

%% Check for error
if length(f) ~= M
    error('The number of decision variables does not match you previous
input. Kindly check your objective function');
end

chromosome = non_dominatation_sort_mod(chromosome, M, V);

function f = non_dominatation_sort_mod(x, M, V)

[N, m] = size(x);
clear m

% Initialize the front number to 1.
front = 1;

F(front).f = [];
individual = [];

for i = 1 : N
    % Number of individuals that dominate this individual
    individual(i).n = 0;
    % Individuals which this individual dominate

```

---

```

individual(i).p = [];
for j = 1 : N
    dom_less = 0;
    dom_equal = 0;
    dom_more = 0;
    for k = 1 : M
        if (x(i,V + k) < x(j,V + k))
            dom_less = dom_less + 1;
        elseif (x(i,V + k) == x(j,V + k))
            dom_equal = dom_equal + 1;
        else
            dom_more = dom_more + 1;
        end
    end
    if dom_less == 0 && dom_equal ~= M
        individual(i).n = individual(i).n + 1;
    elseif dom_more == 0 && dom_equal ~= M
        individual(i).p = [individual(i).p j];
    end
end
if individual(i).n == 0
    x(i,M + V + 1) = 1;
    F(front).f = [F(front).f i];
end
end
% Find the subsequent fronts
while ~isempty(F(front).f)
    Q = [];
    for i = 1 : length(F(front).f)
        if ~isempty(individual(F(front).f(i)).p)
            for j = 1 : length(individual(F(front).f(i)).p)
                individual(individual(F(front).f(i)).p(j)).n = ...
                    individual(individual(F(front).f(i)).p(j)).n - 1;
                if individual(individual(F(front).f(i)).p(j)).n == 0
                    x(individual(F(front).f(i)).p(j),M + V + 1) = ...
                        front + 1;
                    Q = [Q individual(F(front).f(i)).p(j)];
                end
            end
        end
    end
    front = front + 1;
    F(front).f = Q;
end

[temp,index_of_fronts] = sort(x(:,M + V + 1));
for i = 1 : length(index_of_fronts)
    sorted_based_on_front(i,:) = x(index_of_fronts(i),:);
end
current_index = 0;

for front = 1 : (length(F) - 1)
    % objective = [];
    distance = 0;
    y = [];

```

---

```

previous_index = current_index + 1;
for i = 1 : length(F(front).f)
    y(i,:) = sorted_based_on_front(current_index + i,:);
end
current_index = current_index + i;
% Sort each individual based on the objective
sorted_based_on_objective = [];
for i = 1 : M
    [sorted_based_on_objective, index_of_objectives] = ...
        sort(y(:,V + i));
    sorted_based_on_objective = [];
    for j = 1 : length(index_of_objectives)
        sorted_based_on_objective(j,:) = y(index_of_objectives(j),:);
    end
    f_max = ...
        sorted_based_on_objective(length(index_of_objectives), V +
i);
    f_min = sorted_based_on_objective(1, V + i);
    y(index_of_objectives(length(index_of_objectives)),M + V + 1 +
i)...
        = Inf;
    y(index_of_objectives(1),M + V + 1 + i) = Inf;
    for j = 2 : length(index_of_objectives) - 1
        next_obj = sorted_based_on_objective(j + 1,V + i);
        previous_obj = sorted_based_on_objective(j - 1,V + i);
        if (f_max - f_min == 0)
            y(index_of_objectives(j),M + V + 1 + i) = Inf;
        else
            y(index_of_objectives(j),M + V + 1 + i) = ...
                (next_obj - previous_obj)/(f_max - f_min);
        end
    end
end
distance = [];
distance(:,1) = zeros(length(F(front).f),1);
for i = 1 : M
    distance(:,1) = distance(:,1) + y(:,M + V + 1 + i);
end
y(:,M + V + 2) = distance;
y = y(:,1 : M + V + 2);
z(previous_index:current_index,:) = y;
end
f = z();

%% Start the evolution process
% The following are performed in each generation
% * Select the parents which are fit for reproduction
% * Perform crossover and Mutation operator on the selected parents
% * Perform Selection from the parents and the offsprings
% * Replace the unfit individuals with the fit individuals to maintain a
% constant population size.

for i = 1 : gen
    % Select the parents
    % Parents are selected for reproduction to generate offspring. The

```

---

```

    % original NSGA-II uses a binary tournament selection based on the
    % crowded-comparision operator. The arguments are
    % pool - size of the mating pool. It is common to have this to be
half the
    %           population size.
    % tour - Tournament size. Original NSGA-II uses a binary tournament
    %           selection, but to see the effect of tournament size this is
kept
    %           arbitrary, to be choosen by the user.
    pool = round(pop/2);
    tour = 2;
    % Selection process
    % A binary tournament selection is employed in NSGA-II. In a binary
    % tournament selection process two individuals are selected at random
    % and their fitness is compared. The individual with better fitness
is
    % selcted as a parent. Tournament selection is carried out until the
    % pool size is filled. Basically a pool size is the number of parents
    % to be selected. The input arguments to the function
    % tournament_selection are chromosome, pool, tour. The function uses
    % only the information from last two elements in the chromosome
vector.
    % The last element has the crowding distance information while the
    % penultimate element has the rank information. Selection is based on
    % rank and if individuals with same rank are encountered, crowding
    % distance is compared. A lower rank and higher crowding distance is
    % the selection criteria.
    parent_chromosome = tournament_selection(chromosome, pool, tour);

function f = tournament_selection(chromosome, pool_size, tour_size)

    [pop, variables] = size(chromosome);
    % The peunltimate element contains the information about rank.
    rank = variables - 1;
    % The last element contains information about crowding distance.
    distance = variables;

    % Until the mating pool is filled, perform tournament selection
    for i = 1 : pool_size
        % Select n individuals at random, where n = tour_size
        for j = 1 : tour_size
            % Select an individual at random
            candidate(j) = round(pop*rand(1));
            % Make sure that the array starts from one.
            if candidate(j) == 0
                candidate(j) = 1;
            end
            if j > 1
                % Make sure that same candidate is not choosen.
                while ~isempty(find(candidate(1 : j - 1) == candidate(j)))
                    candidate(j) = round(pop*rand(1));
                    if candidate(j) == 0
                        candidate(j) = 1;
                    end
                end
            end
        end
    end

```

```

        end
    end
    % Collect information about the selected candidates.
    for j = 1 : tour_size
        c_obj_rank(j) = chromosome(candidate(j),rank);
        c_obj_distance(j) = chromosome(candidate(j),distance);
    end
    % Find the candidate with the least rank
    min_candidate = ...
        find(c_obj_rank == min(c_obj_rank));
    % If more than one candidate have the least rank then find the
candidate
    % within that group having the maximum crowding distance.
    if length(min_candidate) ~= 1
        max_candidate = ...
            find(c_obj_distance(min_candidate) ==
max(c_obj_distance(min_candidate)));
        % If a few individuals have the least rank and have maximum
crowding
        % distance, select only one individual (not at random).
        if length(max_candidate) ~= 1
            max_candidate = max_candidate(1);
        end
        % Add the selected individual to the mating pool
        f(i,:) = chromosome(candidate(min_candidate(max_candidate)),:);
    else
        % Add the selected individual to the mating pool
        f(i,:) = chromosome(candidate(min_candidate(1)),:);
    end
end
end

% Perform crossover and Mutation operator
% The original NSGA-II algorithm uses Simulated Binary Crossover
(SBX) and
% Polynomial mutation. Crossover probability pc = 0.9 and mutation
% probability is pm = 1/n, where n is the number of decision
variables.
% Both real-coded GA and binary-coded GA are implemented in the
original
% algorithm, while in this program only the real-coded GA is
considered.
% The distribution indices for crossover and mutation operators as
mu = 20
% and mum = 20 respectively.
mu = 20;
mum = 20;
offspring_chromosome = ...
    genetic_operator(parent_chromosome, ...
        M, V, mu, mum, min_range, max_range);

function f = genetic_operator(parent_chromosome, M, V, mu, mum, l_limit,
u_limit)

[N,m] = size(parent_chromosome);

```

---

```

clear m
p = 1;
% Flags used to set if crossover and mutation were actually performed.
was_crossover = 0;
was_mutation = 0;

for i = 1 : N
    % With 90 % probability perform crossover
    if rand(1) < 0.9
        % Initialize the children to be null vector.
        child_1 = [];
        child_2 = [];
        % Select the first parent
        parent_1 = round(N*rand(1));
        if parent_1 < 1
            parent_1 = 1;
        end
        % Select the second parent
        parent_2 = round(N*rand(1));
        if parent_2 < 1
            parent_2 = 1;
        end
        % Make sure both the parents are not the same.
        while
isequal(parent_chromosome(parent_1,:),parent_chromosome(parent_2,:))
            parent_2 = round(N*rand(1));
            if parent_2 < 1
                parent_2 = 1;
            end
        end
        % Get the chromosome information for each randomly selected
        % parents
        parent_1 = parent_chromosome(parent_1,:);
        parent_2 = parent_chromosome(parent_2,:);
        % Perform corssover for each decision variable in the chromosome.
        minimo=0;
        maximo=15;
        for k=0:15:(V-15)
            u=round((minimo+k+1)+((maximo+k)-(minimo+k+1))*rand(1));
            if u==k+1 || u==k+15
                for j=k+1:k+15
                    child_1(j)=parent_1(j);
                    child_2(j)=parent_2(j);
                end;
            elseif u~=k+1 && u~=k+15
                for j=k+1:u
                    child_1(j)=parent_1(j);
                    child_2(j)=parent_2(j);
                end;
                for j=u+1:k+15
                    child_1(j)=parent_2(j);
                    child_2(j)=parent_1(j);
                end;
            end;
        end;
    end
end

```

```

        end;
    end;

    % Evaluate the objective function for the offsprings and as
before
    % concatenate the offspring chromosome with objective value.
    child_1(:,V + 1: M + V) = evaluate_objective(child_1, M, V);
    child_2(:,V + 1: M + V) = evaluate_objective(child_2, M, V);
    % Set the crossover flag. When crossover is performed two
children
    % are generate, while when mutation is performed only only child
is
    % generated.
    was_crossover = 1;
    was_mutation = 0;
    % With 10 % probability perform mutation. Mutation is based on
    % polynomial mutation.
    else
        % Select at random the parent.
        parent_3 = round(N*rand(1));
        if parent_3 < 1
            parent_3 = 1;
        end
        % Get the chromosome information for the randomly selected
parent.
        child_3 = parent_chromosome(parent_3,:);
        % Perform mutation on each element of the selected parent.
        for j = 1 : V
            if child_3(j) ==0
                child_3(j)=0;
            else
                r(j) = rand(1);
                if r(j) < 0.5
                    delta(j) = (2*r(j))^(1/(mum+1)) - 1;
                else
                    delta(j) = 1 - (2*(1 - r(j)))^(1/(mum+1));
                end
                % Generate the corresponding child element.
                child_3(j) = child_3(j) + delta(j);
                % Make sure that the generated element is within the decision
                % space.
                if child_3(j) > u_limit(j)
                    child_3(j) = u_limit(j);
                elseif child_3(j) < l_limit(j)
                    child_3(j) = l_limit(j);
                end
            end
        end;
    end

    child_3(:,V + 1: M + V) = evaluate_objective(child_3, M, V);
    % Set the mutation flag
    was_mutation = 1;
    was_crossover = 0;

```



```

end

    child(p,:) = child_1;
    child(p+1,:) = child_2;
    was_crossover = 0;
    p = p + 2;
elseif was_mutation
    child(p,:) = child_3(1,1 : M + V);
    was_mutation = 0;
    p = p + 1;
end
end
f = child;

[main_pop,temp] = size(chromosome);
[offspring_pop,temp] = size(offspring_chromosome);
% temp is a dummy variable.
clear temp
% intermediate_chromosome is a concatenation of current population
and
% the offspring population.
intermediate_chromosome(1:main_pop,:) = chromosome;
intermediate_chromosome(main_pop + 1 : main_pop + offspring_pop,1 :
M+V) = ...
    offspring_chromosome;

% Non-domination-sort of intermediate population
% The intermediate population is sorted again based on non-domination
sort
% before the replacement operator is performed on the intermediate
% population.
intermediate_chromosome = ...
    non_domination_sort_mod(intermediate_chromosome, M, V);
% Perform Selection
% Once the intermediate population is sorted only the best solution
is
% selected based on it rank and crowding distance. Each front is
filled in
% ascending order until the addition of population size is reached.
The
% last front is included in the population based on the individuals
with
% least crowding distance
chromosome = replace_chromosome(intermediate_chromosome, M, V, pop);

function f = replace_chromosome(intermediate_chromosome, M, V,pop)

[N, m] = size(intermediate_chromosome);

% Get the index for the population sort based on the rank
[temp,index] = sort(intermediate_chromosome(:,M + V + 1));

clear temp m

```

---

```

% Now sort the individuals based on the index
for i = 1 : N
    sorted_chromosome(i,:) = intermediate_chromosome(index(i),:);
end

% Find the maximum rank in the current population
max_rank = max(intermediate_chromosome(:,M + V + 1));

% Start adding each front based on rank and crowding distance until the
% whole population is filled.
previous_index = 0;
for i = 1 : max_rank
    % Get the index for current rank i.e the last the last element in the
    % sorted_chromosome with rank i.
    current_index = max(find(sorted_chromosome(:,M + V + 1) == i));
    % Check to see if the population is filled if all the individuals
    with
    % rank i is added to the population.
    if current_index > pop
        % If so then find the number of individuals within with current
        % rank i.
        remaining = pop - previous_index;
        % Get information about the individuals in the current rank i.
        temp_pop = ...
            sorted_chromosome(previous_index + 1 : current_index, :);
        % Sort the individuals with rank i in the descending order based
        on
        % the crowding distance.
        [temp_sort,temp_sort_index] = ...
            sort(temp_pop(:, M + V + 2), 'descend');
        % Start filling individuals into the population in descending
        order
        % until the population is filled.
        for j = 1 : remaining
            f(previous_index + j,:) = temp_pop(temp_sort_index(j),:);
        end
        return;
    elseif current_index < pop
        % Add all the individuals with rank i into the population.
        f(previous_index + 1 : current_index, :) = ...
            sorted_chromosome(previous_index + 1 : current_index, :);
    else
        % Add all the individuals with rank i into the population.
        f(previous_index + 1 : current_index, :) = ...
            sorted_chromosome(previous_index + 1 : current_index, :);
        return;
    end
    % Get the index for the last added individual.
    previous_index = current_index;
end

if ~mod(i,100)
    clc
    fprintf('%d generations completed\n',i);

```

```
end

end;

%% Result
% Save the result in ASCII text format.
save solution.txt chromosome -ASCII
```