



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

## **TESINA DE MASTER**

*Ubicación óptima de hidrantes multiusuario en  
redes de riego a presión mediante el empleo de  
modelos de localización-asignación*

***Presentada por:***

***Francisco José González Villa***

***Director:***

***Dr. Alberto García Prats***

***Valencia, Octubre de 2010***

# Índice

Índice	i
Índice de figuras	iv
Índice de tablas	v
Índice de ecuaciones	vi
Notación	vii
Resumen	viii
Summary	ix
Síntesi	x
Publicaciones	xi
Agradecimientos	xii
1 Introducción	13
1.1. Antecedentes.	14
1.1.1. Los regadíos valencianos.	15
1.1.2. Redes de distribución de agua a presión.	17
Tipos de redes de distribución.	18
Redes de distribución de agua para riego a presión.	20
1.1.3. Diseño de redes.	20
Trazado de la red.	21
Caudales circulantes.	21
Dimensionado de la red.	22
1.1.4. La teoría de la localización.	24

1.1.5. Investigación operativa.	26
Tipos de modelos o problemas.	27
Formulación: Programación Matemática.	27
1.2. La ubicación de los hidrantes. Estado de la cuestión.	28
1.3. Objetivos y justificación de la Tesina.	30
1.4. Estructura de la Tesina.	31
2 Material y métodos	33
2.1. Datos de partida.	34
2.1.1. Cartografía base.	34
2.1.2. Tratamiento en SIG	34
2.2. Modelo de optimización.	36
2.2.1. Modelo minisum.	36
2.2.2. Modelo de programación matemática.	37
2.3. Las distancias.	39
2.4. Caso de estudio.	41
2.5. Ejecución del modelo, exportación de resultados y generación de mapas.	43
3 Resultados y discusión	44
3.1. Soluciones generadas.	45
3.1.1. Distancias euclidianas (DEUC).	45
3.1.2. Distancias a través de la red (DRED).	48
3.2. Comparación con iguales distancias.	51
4 Conclusiones	57

4.1. Conclusión.	58
4.2. Objetivos alcanzados.	59
4.3. Futuras líneas de investigación.	59
Bibliografía	60

# Índice de figuras

Figura 1.	Distribución geográfica de los regadíos valencianos.	17
Figura 2.	Red ramificada (izquierda) y red mallada (derecha).	19
Figura 3.	Evolución de los costes en el proceso de dimensionado de una red.	23
Figura 4.	Aspecto exterior e interior de un hidrante multiusuario.	29
Figura 5.	Múltiples líneas en cartografía catastral.	35
Figura 6.	Plano con vértices candidatos y líneas.	36
Figura 7.	Distancias euclidianas y distancias a través de la red.	39
Figura 8.	Centroides de las parcelas.	40
Figura 9.	Localización actual de hidrantes y parcelas asignadas.	42
Figura 10.	Solución DEUC.	45
Figura 11.	Solución DRED.	48
Figura 12.	Conducciones rodeando parcela en DEUC.	52
Figura 13.	Longitud media para distintos tamaños de parcela.	54
Figura 14.	Porcentaje del área total y casos en cada rango de longitud.	55

## Índice de tablas

Tabla. I.	Localización-asignación de la solución DEUC.	47
Tabla. II.	Localización-asignación de la solución DRED.	50
Tabla. III.	Comparación de distintas soluciones (siempre con DRED).	51
Tabla. IV.	Cuartiles del valor de la función objetivo y longitud para los tres casos.	56

# Índice de ecuaciones

(1) Función objetivo.

(2) Restricción nº1.

(3) Restricción nº2.

(4) Restricción nº3.

(5) Restricción nº4.

## Notación

$a_j$  : área de cada parcela  $j$  regada ( $m^2$ );

$d_{ij}$  : distancia entre cada punto candidato  $i$  a cada parcela  $j$  (m);

$h_i$  : variable hidrante (bin.);

$l_i$  : límite inferior de parcelas asignadas a un hidrante;

$l_s$  : límite superior de parcelas asignadas a un hidrante;

$m$  : número de puntos candidatos a albergar un hidrante;

$n$  : número total de parcelas;

$nh$  : número de hidrantes a ubicar;

$s_{ij}$  : variable servicio, de punto candidato  $i$  a parcela  $j$  (bin.);

$Z$  : valor de la función objetivo ( $m \cdot m^2$ ).

## Resumen

Los algoritmos de localización-asignación permiten ubicar servicios de forma eficiente en zonas donde la demanda está dispersa en el territorio. En este trabajo se ha utilizado el modelo de localización-asignación *minisum* para optimizar la ubicación de los hidrantes multiusuario que necesita una zona regable para ser abastecida. Dentro de una red colectiva de riego a presión, se conoce como hidrante multiusuario a la obra en la que se realiza la derivación agua a varias parcelas cercanas. La distancia que separa los hidrantes y las parcelas servidas debe ser salvada por una conducción adicional. La función objetivo busca minimizar los costes totales de acceso al servicio. En este trabajo se resuelve un caso de aplicación, emplazando un número total de hidrantes igual al existente en la actualidad, de forma que los resultados puedan ser comparados con la solución existente. El modelo reduce la distancia total recorrida para acceder al servicio, es decir, la longitud de las conducciones de 16.177 m a 13.560 m (16,17%) y reduce la función objetivo (proporcional al coste) un 28,95%.

## Summary

The location-allocation algorithms can efficiently locate services in areas where demand is spread across the territory. In this work we have used the location-allocation model *minisum* to optimize the location of multioutlet hydrants that need an irrigation area to be supplied. The distance between multioutlet hydrants and supplied plots should be joined by additional pipe. The objective function seeks to minimize the total cost of service access. An application case is resolved. The total number of hydrants located is the same as currently exists, thus the results can be compared. The model reduces the total length of pipes from 16.177 m to 13.560 m (16,17%) and reduces the objective function (proportional to the cost) in 28.95%.

## Síntesi

Els algorismes de localització-assignació permeten situar serveis de forma eficient en zones on la demanda està dispersa pel territori. En aquest treball s'ha utilitzat el model de localització-assignació *minisum* per a optimitzar la ubicació dels hidrants multiusuari que necessita una zona regable per a ser proveïda. Dins d'una xarxa col·lectiva de reg a pressió, es coneix com hidrant multiusuari a l'obra en la qual es realitza la derivació aigua a diverses parcel·les properes. La distància que separa els hidrants i les parcel·les servides ha de ser salvada per una conducció addicional. La funció objectiu busca minimitzar els costos totals d'accés al servei. En aquest treball es resol un cas d'aplicació, emplaçant un nombre total de hidrants igual a l'existent en l'actualitat, de manera que els resultats puguin ser comparats amb la solució existent. El model redueix la distància total recorreguda per a accedir al servei, és a dir, la longitud de les conduccions de 16.177 m a 13.560 m (16,17%) i redueix la funció objectiu (proporcional al cost) un 28,95%.

## Publicaciones

González Villa, F. J.; García Prats, A. (2010). Using location-allocation on networks algorithms to distribute multioutlet hydrants in irrigation networks desing. Journal of Irrigation and Drainage Engineering . ASCE. (under review).

## Agradecimientos

Desde aquí quiero agradecer el apoyo e ideas recibidas por el director de mi tesina, el Doctor Alberto García Prats. Quien propuso esta línea de investigación, fruto de sus anteriores trabajos de investigación.

También a mi antiguo profesor Vicent Giner Bosch, del Departamento de Estadística e Investigación Operativa Aplicadas y Calidad de la U.P.V., por su implicación desinteresada y aportaciones en las fases de desarrollo y ejecución del modelo. En esta última fase fue clave la aparición del Doctor Ramón Sala-Garrido, titular del Departament de Matemàtiques per a l'Economía y l'Empresa de la Universidad de Valencia.

A los profesores del Máster que han estado a mi disposición cuando los he necesitado. Y a los becarios del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente y compañeros del Máster por sus ánimos y solidaridad.

Por último y no por ello menos importante, sino más bien todo lo contrario, queda agradecer el constante ánimo recibido por parte de mi familia y amigos.

# 1

# Introducción

## 1.1. Antecedentes.

El sector agrario, es el mayor consumidor de agua dentro del país, yendo al regadío cerca de un 63,3% del total del agua consumida. En la Demarcación del Júcar, la agricultura de regadío, constituye una demanda correspondiente al 79% de la demanda total. La superficie regada en el ámbito de Demarcación se encuentra estabilizada en las últimas dos décadas en valores próximos a las 350.000 ha. El regadío en España sólo supone entorno al 13% de la Superficie Agrícola Útil. Sin embargo, del regadío se obtiene el 50% de la producción final agraria. El valor bruto de la producción por hectárea de regadío equivale, como media, a algo más de seis veces el del secano, existiendo algunas zonas en las que puede llegar a ser más de 20 veces.

La creciente necesidad de racionalizar los recursos hídricos en el sector del riego ha obligado a la introducción de nuevas tecnologías que permitan un mayor control del agua aplicada y por tanto un mayor ahorro de las dotaciones totales a suministrar. En los últimos años, los sistemas de distribución del agua a presión están sustituyendo al resto de formas de distribuir agua, principalmente en los tramos finales que llegan al usuario, por las múltiples ventajas que esto supone a distintos niveles. Con el objetivo de aumentar la eficiencia en las aplicaciones de agua a un cultivo, cada vez es más frecuente la utilización de riego localizado en muchos de los regadíos. El riego localizado supone la aplicación de agua sólo en una parte del suelo, utilizando pequeños caudales, permitiendo un mayor control sobre el agua y fertilizantes aplicados, así como la consecución de mayores eficiencias de aplicación.

La introducción de los sistemas de riego localizado obliga, por las propias características del mismo (alta frecuencia y localización), a disponer a pie de parcela de un caudal casi continuo y una presión mínima, ya sea suministrada por un grupo o grupos de elevación o mediante una red de tuberías a presión. Es por ello que la introducción de nuevas tecnologías de riego en parcela obligan, en la mayoría de los casos, a realizar unas obras de infraestructura de orden colectivo cuyo objeto sea por una parte, si el problema de captación ya ha sido solucionado, el almacenamiento y regulación del agua de riego y su posterior transporte y distribución hasta parcela cubriendo unos requerimientos mínimos de caudal y presión que garanticen el correcto funcionamiento del sistema de riego adoptado (Arviza, J. y Balbastre, I. [3]).

### **1.1.1. Los regadíos valencianos.**

Para caracterizar los regadíos valencianos se recurre al Libro Blanco de la Agricultura [25] elaborado por el entonces Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. En el apartado 4.17 del Tomo tercero se encuentran los datos presentados a continuación.

#### **Epígrafe: Rasgos Básicos. Distribución de las explotaciones.**

*La estructura de las explotaciones de la Comunidad Valenciana es muy atomizada. El 87% de las explotaciones tienen una superficie inferior a 5 ha, casi la mitad de las explotaciones no supera 1 ha y solamente el 2% supera las 20 ha. Este carácter minifundista es muy marcado en los cultivos de cítricos.*

#### **Epígrafe: Rasgos Básicos. Importancia relativa de los grupos de cultivos.**

*La agricultura de la Comunidad Valenciana se basa fundamentalmente en el regadío, ya que el 44% de la superficie cultivada está regada. Entre los cultivos en regadío el predominio de los cítricos es el dato más destacado, con casi un 60% de la superficie regada total. La mayor parte de la superficie está ocupada por naranjos y mandarinos, principalmente en Castellón y Valencia, mientras que los limoneros se concentran al sur de Alicante.*

#### **Epígrafe: Tendencias, Especificidades y Oportunidades. La Modernización del Regadío: Una herramienta para el ahorro del agua.**

*El regadío valenciano ocupa una superficie de 366.396 ha, lo que supone el 44% de las tierras cultivadas en la Comunidad Autónoma, cifra que se eleva al 48% en las provincias de Alicante y Valencia. La media española es el 18%, lo que nos confirma la avidez por el agua que desde siempre ha caracterizado al agricultor valenciano. El regadío valenciano supone aproximadamente un 11% del total nacional, mientras que la región sólo aporta el 4,5% de las tierras de cultivo. Contribuye en un 70% a la Producción Final Agraria de la Comunidad Valenciana.*

*La mayor parte del regadío está organizado colectivamente (el resto son regadíos de gestión individual casi todos ellos de aguas subterráneas). Las formas de organización colectiva son variadas, entre los regantes de aguas subterráneas son frecuentes las Sociedades Agrarias de Transformación, las Sociedades Civiles y menos frecuentemente las Sociedades Anónimas. Entre los regantes de aguas*

*superficiales la organización mayoritaria es la Comunidad de Regantes, a veces agrupadas en Comunidades Generales de Usuarios u otras formas similares.*

*Las Comunidades de Regantes están fuertemente arraigadas en toda el área y algunas de ellas tienen sus orígenes en la Edad Media (Tribunal de las Aguas de Valencia, Juzgado Privativo de Aguas de Orihuela, etc.), y tienen autoridad y prestigio entre los agricultores, lo que les permite la gestión unitaria del agua. Son un elemento imprescindible y un colaborador valioso para cualquier programa de modernización de regadíos que quiera emprenderse.*

*La estructura de las explotaciones de regadío tradicional se caracterizan por el minifundismo, tanto la superficie media de la explotación como el tamaño de las parcelas son muy inferiores a los mínimos que se requieren para una explotación racional y con tecnología moderna. Los nuevos regadíos conservan una estructura más racional, aunque aún insuficiente, procedente del antiguo secano y todavía poco modificada.*

**Epígrafe: Tendencias, Especificidades y Oportunidades. Evolución de la citricultura: Mejoras técnicas y reestructuración de la propiedad.**

*La tendencia actual de la citricultura valenciana, se caracteriza por la expansión de la superficie cultivada, el aumento del minifundismo y el incremento de las mejoras técnicas.*

*Con relación al aumento del minifundio se ha constatado que desde la década de los 60 hasta finales de los 90, han aumentado alrededor de un 40% las parcelas con menos de 1 ha de superficie, principalmente, en detrimento de las de superficie mayor.*

*El origen del minifundio en la citricultura valenciana es consecuencia de factores socioeconómicos. Estos factores se ven reflejados, por un lado, en un aumento generación tras generación de la parcelación y, por otro, en la compra de parcelas que no se basa, en la mayor parte de los casos, en completar explotaciones para hacerlas rentables sino en el propio incremento del patrimonio.*

Todo lo anterior puede resumirse en que el regadío es de gran importancia en la Comunidad Valenciana, predominando el cultivo de cítricos, la estructura es minifundista y la gestión del agua de riego se realiza de forma colectiva.

En cuanto al tamaño de las parcelas, el tamaño medio de parcela en la Comunidad Valenciana es de 0,76 ha (Dirección General del Catastro [19]). Ahora bien, considerando únicamente las comarcas con regadíos y exceptuando las tres comarcas de regadío del sur de Alicante, cuyo tamaño medio de parcela es anormalmente alto en comparación con el resto del regadío valenciano, quizás más similar, tanto en cultivos como en estructura catastral a la región de Murcia, el tamaño medio de parcela para toda la Comunidad queda en 0,45 ha (García, A. y Guillem, S. [13], [14] y [15]).

En la siguiente figura se señalan las comarcas consideradas como representativas de los regadíos tradicionales valencianos para este estudio.

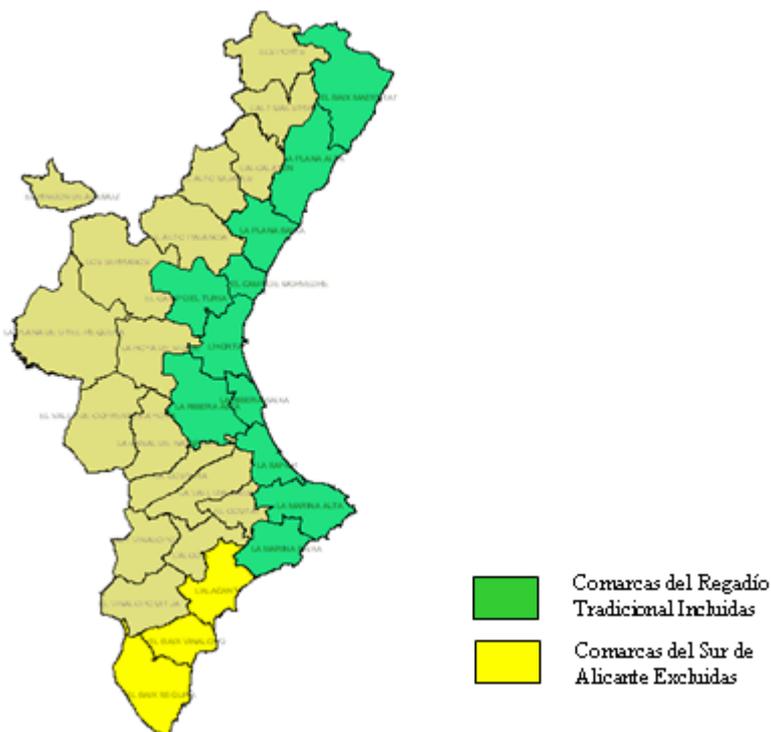


Figura 1. Distribución geográfica de los regadíos valencianos.

### 1.1.2. Redes de distribución de agua a presión.

Una red de distribución es un sistema encargado de suministrar agua desde los puntos de producción y almacenamiento hasta los puntos de consumo, en condiciones adecuadas de caudal y presión (Arviza, J. [1], [2]), (Pérez, R. [28]).

Las redes de distribución están formadas básicamente por nudos y líneas. Los nudos pueden ser puntos de inyección de caudal (puntos de alimentación), puntos de

consumo (hidrantes), o bien bifurcaciones. Por su parte las líneas son tramos de red que unen dos nudos.

### Tipos de redes de distribución.

Las redes de distribución pueden ser clasificadas atendiendo a un gran número de factores:

- 1) Según el punto de alimentación.
  - Redes alimentadas por un único punto.
  - Redes alimentadas por múltiples puntos. Tanto en un caso como el otro, el punto de alimentación suele ser un depósito elevado o una inyección directa desde un pozo de aprovechamiento de aguas subterráneas.
- 2) Según la forma de distribuir el agua.
  - Distribución a la demanda. El usuario dispone del agua en todo momento y realiza el consumo con total libertad, con una única limitación del caudal máximo extraído que deberá ser el previsto en el diseño. La fijación de caudales se realiza de forma probabilística (Clement, R. y Galand, A. [8], [9]), sustentado en la hipótesis de que el usuario que ya ha realizado el riego, no abre su toma hasta el día siguiente.
  - Distribución por turnos. Un grupo de usuarios abren su toma y realizan el consumo en una franja horaria prevista. La fijación de caudales es por tanto totalmente determinista.
  - Distribución mixta, combinación de las anteriores.
- 3) Según la topología de sus elementos.
  - Redes ramificadas o arborescentes. Es aquella en la que para una situación definida de consumos en los nudos, pueden calcularse los caudales circulantes por las tuberías sin más que aplicar la ecuación de continuidad; es decir, la fijación del caudal de una línea es una pura cuestión aritmética de acumulación de los consumos de los nudos acumulados aguas abajo. El agua solamente puede llegar a los nudos

de consumo por un único trayecto, no existiendo bucles ni circuitos. Por tanto solamente puede tener un nudo de alimentación.

- Red mallada. En las redes malladas, los caudales circulantes no quedan definidos aplicando la ecuación de continuidad, siendo necesario además utilizar ecuaciones de equilibrio de malla. Se trata pues de una red en la que las líneas se cierran formando circuitos o bucles, por lo que el agua puede llegar al punto de consumo por al menos dos caminos. El camino por el cual llega el agua al nudo tendrá un condicionante hidráulico. Esto se traduce en la práctica en una mayor seguridad en el suministro.

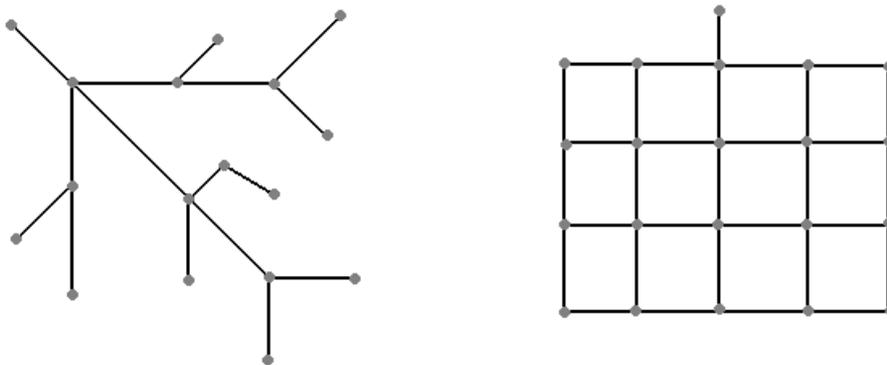


Figura 2. Red ramificada (izquierda) y red mallada (derecha).

- 4) Según el elemento que se utiliza para derivar el agua al usuario.
  - Tomas individuales. El agua se deriva de la red mediante tomas individuales que afloran del terreno en cada ubicación donde hay un consumo. Según el tamaño de las parcelas, abordar una red con tomas individuales puede resultar inviable por la densidad de líneas que debería tener.
  - Hidrantes colectivos o multiusuario. Se agrupan varias parcelas, y aproximadamente en el centro de las mismas se ubica una estructura llamada hidrante, de donde se abastecen todas ellas. Presenta la ventaja de un mayor control por parte de la Sociedad o Comunidad tanto a nivel de lectura de contadores como mantenimiento. Por contra es necesario prever una conducción adicional desde el hidrante a cada una de las parcelas.

## Redes de distribución de agua para riego a presión.

Las redes de distribución de agua a presión para riego, se dimensionan con una estructura en planta de tipo arborescente o ramificado por dos cuestiones fundamentales: primero, una avería y la consiguiente falta en el suministro durante varias horas no supone perjuicio alguno para el cultivo y segundo, las superficies cubiertas son muy importantes, lo que se traduce en caudales importantes y en grandes longitudes de conducciones. De esta forma, las configuraciones de tipo ramificado consiguen redes más económicas de implantar y más sencillas de gestionar.

Al mismo tiempo, la derivación del agua en parcela se realiza mediante hidrantes multiusuario, (al menos en el ámbito de la Comunidad Valenciana), por la imposibilidad de llegar a todas y cada una de las parcelas con la red de distribución. La determinación de caudales se realiza indistintamente por turnos o a la demanda, es decir, por métodos probabilísticos. Este será pues el caso en el que se centrará el presente estudio.

### **1.1.3. Diseño de redes.**

El diseño y dimensionado de la red, es decir, todo el proceso desde que se toma la decisión de proyectar una red hasta la obtención de los diámetros de cada una de las líneas que la componen, tiene las siguientes fases (Granados, A. [17]):

- Ubicación de los hidrantes.
- Trazado de la red.
- Determinación de los caudales circulantes por cada una de las líneas.
- Determinación de los diámetros de las tuberías.

Como indica Pérez, R. en la referencia [28], tradicionalmente, el diseño de sistemas de distribución ha estado impregnado de una base fuertemente intuitiva, basada en la experiencia y en el juicio personal del proyectista de aquello que parecía razonable, basado en ciertas reglas empíricas, seguido de un dimensionado de los diámetros de las tuberías.

Cada una de las fases anteriores se explican brevemente a continuación, a excepción de *la ubicación de los hidrantes* que será tratada con mayor detenimiento más adelante, dado que es el objeto de esta Tesina.

### Trazado de la red.

El elemento fundamental de la red de riego a presión es la propia red. Está constituida por las conducciones que distribuyen el agua desde el punto de inyección a la totalidad de puntos de consumo o hidrantes que ya se habrían definido.

Como se ha dicho anteriormente las redes de riego tienen una topología del tipo ramificado o arborescente. Al mismo tiempo el trazado de las conducciones está principalmente condicionado por la facilidad de ejecución, así como de detección de averías y de acceso para reparación y mantenimiento. Como consecuencia el trazado de conducciones, en la mayoría de los casos se realiza siguiendo los márgenes de caminos, lindes de parcelas, etc.

En la práctica el método más habitual es diseñar sobre un plano digitalizado distintas soluciones alternativas de trazado y valorar sus repercusiones económicas y técnicas sobre la solución final.

La tendencia en la actualidad es aprovechar los SIG (Sistemas de Información Geográfica) e integrar herramientas específicas que permiten automatizar el proceso de diseño en planta de la red, ejemplo de ello es el trabajo de García, A. (2004) que muestra una metodología para obtener la red más económica. No obstante la utilización de estas técnicas está condicionada a la disponibilidad de información no siempre posible de recopilar en fase de proyecto.

### Caudales circulantes.

Finalmente, para poder dimensionar la red necesitamos conocer los caudales circulantes por cada una de las líneas. Dos metodologías son las que podemos encontrar descritas en las citas bibliográficas:

- Por turnos
- A la demanda libre

La fijación de caudales por turnos, no es más que aplicar la ecuación de continuidad en cada uno de los nudos de la red en los que se produce consumo en un

momento determinado. Acumulando caudales desde los nudos finales hasta el origen, se obtiene tantos estados de carga como sectores en lo que se divide la red.

El cálculo de caudales a la demanda precisa de un proceso mucho más laborioso. Sin entrar en detalles, el cálculo se basa en el fundamento de que como el usuario puede disponer del caudal a cualquier hora, y que una vez que se ha regado en un día no vuelve a hacerlo, la probabilidad de que una cierta toma esté abierta o cerrada se distribuye según una binomial, la cual para un número importante de tomas puede transformarse en una distribución normal. Así, Clement [8] llega a una expresión para el cálculo probabilístico de caudales, tan profusamente empleada. Para los tramos finales (número de tomas acumuladas inferior a un número dado), la fórmula no se aplica y se supone que la probabilidad de apertura de una toma es del 100%, por lo que el caudal resultante es equivalente al total del hidrante.

En general, que los caudales resulten superiores por uno u otro método, depende del número de sectores que se hagan en el primer método, ya que en el método de Clement el estado de carga obtenido es único. Así para una división entre 5 y 6 turnos de la organización del riego, los resultados suelen salir similares, por lo que no haremos distinciones a la hora de analizar las distintas redes por el método empleado en la determinación de caudales.

En este sentido, hay que destacar la aportación hecha por Arviza, Martínez y Llopis en [4], planteando la optimización de la distribución de las tomas o los hidrantes en distintos sectores, de forma que redunde en un dimensionado más racional.

### Dimensionado de la red.

Sería la última etapa de todo el proceso. Consiste en obtener el diámetro de cada una de las líneas que compone la red. Básicamente consiste en formular matemáticamente el problema de optimización del total de los costes anuales en los que se incurre, tanto de instalación como su posterior utilización, cumpliendo las restricciones siguientes:

- Ecuación de continuidad (no si el caudal proviene de la fórmula de Clement).
- Ecuación de la energía.
- Presiones máximas y mínimas en los nudos dentro de un rango.

- Los diámetros máximos y mínimos posibles a adoptar dentro de un rango.
- Velocidad máxima de circulación en las líneas.

En general, el diagrama sobre el que se sustenta el problema de optimización, es el siguiente:

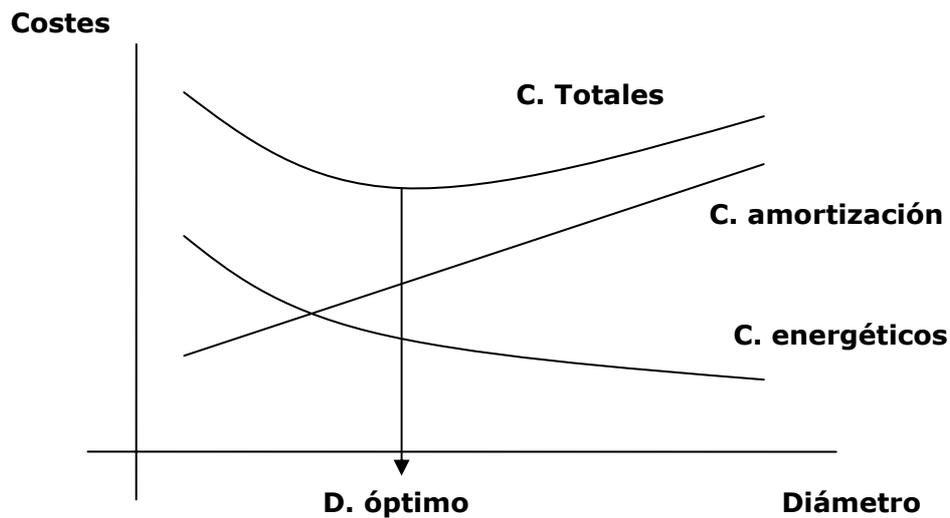


Figura 3. Evolución de los costes en el proceso de dimensionado de una red.

Los costes totales anuales en los que se incurre en una instalación está formado por la suma de los costes de la energía consumida en el funcionamiento más la cuota anual de amortización de la inversión que supuso la instalación. A medida que se disminuyen los diámetros en una serie de conducciones, aumentan las pérdidas de carga y por tanto los costes energéticos para poder garantizar las presiones impuestas en los nudos, pero disminuyen los costes de instalación y por tanto la amortización anual de los mismos. Hay un punto en el cual los costes anuales totales se hacen mínimos, cumpliendo al mismo tiempo las restricciones hidráulicas y funcionales de la instalación.

De los métodos utilizados para el dimensionado destacan:

- Programación lineal. Aplicación del algoritmo *simplex*.
- El método de la serie económica.

El primer método supone que los costes de las tuberías son una función del diámetro como variable discreta, mientras que el segundo acepta que los costes son una función continua del diámetro, permitiendo en este segundo caso, desarrollar unas expresiones matemáticas de aplicación directa, por lo que el problema puede ser abordado mediante herramientas informáticas de uso general, como es el caso de hojas electrónicas de cálculo. Si bien, y dada la complejidad de las redes se suele recurrir a aplicaciones informáticas específicas.

#### **1.1.4. La teoría de la localización.**

El problema de la localización que, empieza a ser planteado en el siglo XVII por los matemáticos Fermat y Torricelli, en su forma más primitiva, trata de encontrar la posición de un punto en un plano, de tal forma que la suma de las distancias entre dicho punto y otros tres dados sea mínima (Fernández, F. [12]).

Durante muchas décadas el punto central fue la búsqueda de una explicación de las tendencias y modelos generales de localización de las actividades humanas, entre ellas sobresalieron las teorías clásicas esbozadas, entre otros, por Heinrich von Thünen (modelo de localización sobre el uso del suelo agrícola), Alfred Weber (modelo de localización industrial) y Walter Christaller (teoría de los lugares centrales) (Méndez, R. [24]). Pero los estudios de localización toman una dimensión más amplia cuando a principios de este siglo ciertos economistas toman interés en esta cuestión e incorporan además de la distancia, factores de carácter socioeconómico. Por ejemplo Alfred Weber, intentó encontrar el lugar más eficiente para la localización de industrias, tal que la misma se encontrara entre la producción de materia prima y el mercado consumidor. Sin embargo después de desarrollar su teoría reconoció que tanto los procedimientos geométricos, como los principios mecánicos utilizados presentaban limitaciones para explicar la relación coste-transporte, y que no podría ser empleado para resolver problemas complejos de localización o casos de multi-localización (Ghosh y Rushton [16]).

Hacia 1960, varias investigaciones, casi de manera simultánea, formularon soluciones para el problema de la localización de servicios. Estas aproximaciones no sólo proporcionaron una metodología para resolver el problema de Weber en ambientes complejos, sino que además extendieron el problema a la localización de múltiples instalaciones de servicios. De esta forma, con múltiples servicios, el objetivo además de encontrar la localización óptima, consistía en determinar la asignación de la demanda para aquellas localizaciones. Desde entonces la localización óptima

depende de la asignación y en el futuro ambas tendrían que determinarse simultáneamente (Ghosh y Rushton [16]).

Según éstos últimos autores, la dificultad principal de esta teoría de localización radica en el hecho de que en la mayoría de los casos no existen soluciones analíticas; por ello, a lo largo del tiempo, se han dado soluciones de tipo gráfico y analógico de gran imaginación, hasta que en la actualidad, con las modernas técnicas de la investigación operativa y, sobre todo, gracias al ordenador, es posible el empleo de procedimientos iterativos de una alta precisión (Ramírez, L. y Bosque, J. [27]).

Un modelo de localización-asignación responde a las características de un modelo matemático (porque intenta trasladar ideas conceptuales al lenguaje matemático), meso-espacial (porque intenta resolver problemas de competencia en un territorio definido) y normativo (porque se pretende responder a la pregunta ¿cuál es la mejor solución a este problema?). En síntesis un modelo de localización-asignación óptima, es aquel que procura, a la vez, determinar la ubicación óptima de los equipamientos (localización) y asignarles la totalidad de beneficiarios potenciales (asignación). En otras palabras son modelos que intentan determinar la región o área de influencia de un servicio concreto (Ramírez, L. y Bosque, J. [27]).

Los modelos de localización-asignación hasta ahora definidos consideran dos magnitudes: la eficiencia espacial de la localización de los centros de servicio y la justicia o equidad espacial de su distribución en el territorio (Bosque Sendra, 1992, p. 227).

- Eficiencia espacial: cuando dada una determinada configuración espacial de la demanda, la distribución de la oferta permite alcanzar bien un valor mínimo (o máximo, según el tipo de equipamiento) de la suma total de movimientos entre oferta y demanda o bien una distancia máxima entre un punto de demanda y alguno de los centros de oferta (Moreno y López de los Mozos [26]; Fernández y Bosque [11]); criterio profundamente influido por la teoría de la localización de Weber (De Verteuil, G. [10]).
- Equidad: puede manifestarse como igualdad, pero no son dos palabras que se tengan que emplear necesariamente como sinónimos. La equidad podría entenderse como imparcialidad o justicia, generalmente aplicada a la distribución de ingresos y otras oportunidades.

Generalmente, es admitido como justo que diferentes niveles de necesidades sean atendidos por una distribución desigual de los recursos. En un contexto geográfico la equidad en la distribución entre áreas distintas se alcanza si las diferencias o desviaciones desde la igualdad son proporcionales a las diferencias aceptadas como necesidades (Joseph y Phillips [22]; Johnston *et al.* [21]; Pacione [27]; ver la completa revisión de Jensen-Butler [20]).

### **1.1.5. Investigación operativa.**

La Investigación de Operaciones o Investigación Operativa, es una rama de las Matemáticas consistente en el uso de métodos analíticos avanzados (modelos matemáticos, estadística y algoritmos) con objeto de realizar un proceso de toma de decisiones (proceso humano que habitualmente se realiza mediante la intuición). Frecuentemente, trata del estudio de complejos sistemas reales, con la finalidad de mejorar (u optimizar) su funcionamiento. La Investigación Operativa emplea modelos matemáticos para analizar situaciones complejas, que pueden ser de tipo financiero, científico, industrial, etc, teniendo en cuenta la escasez de recursos, para determinar cómo se puede optimizar un objetivo definido, como la maximización de los beneficios o la minimización de costes.

Se pueden tomar mejores decisiones basándose en:

- Análisis exhaustivos de datos.
- Consideración de todas las alternativas posibles.
- Predicciones precisas de sucesos y estimaciones de riesgo.
- Uso de las últimas técnicas y herramientas de decisión.

Los métodos analíticos que emplea la Investigación Operativa incluyen:

- Optimización: encontrar la mejor decisión posible de entre un conjunto innumerable de alternativas.
- Simulación: imitación de la realidad (comportamientos, materiales, ideas, etc) que ahorra tiempo y dinero.

- Probabilidad y Estadística: ayuda a resumir o analizar información, medir riesgos, realizar predicciones, etc.

### Tipos de modelos o problemas.

Existen diferentes modelos y se clasifican según el tipo de problema y metodología de resolución. A continuación se muestran los más representativos:

#### **Deterministas:**

- Programación Matemática:
  - 1) Programación Lineal
  - 2) Programación No Lineal
  - 3) Programación Entera
  - 4) Programación Combinatoria
  - 5) Programación sobre redes
  - 6) Programación Dinámica
  - 7) Programación Multiobjetivo
- Teoría de juegos

#### **Probabilísticos:**

- Programación estocástica
- Teoría de colas
- Simulación

### Formulación: Programación Matemática.

La Programación Matemática es una herramienta de optimización utilizada en Investigación Operativa. Los elementos de un problema de optimización (programa matemático) son los siguientes:

- Variables de decisión: son las alternativas de acción o aspectos controlables del problema y que afectan al valor de la función objetivo.

- Función objetivo: medida cuantitativa del funcionamiento (de la bondad o efectividad) de un sistema que se desea maximizar o minimizar.
- Parámetros del problema: representan los aspectos no controlables del problema, son valores constantes que actúan como coeficientes al lado derecho de las variables tanto en la función objetivo como en las restricciones y que se basan en datos tecnológicos de los problemas.
- Restricciones: conjunto de relaciones que las variables deben satisfacer, por tanto limitan el rango de valores que pueden tomar las variables de decisión.

Resumiendo, la optimización consiste en encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones.

Por último, una vez formulado el problema se resuelve mediante un algoritmo de optimización. Existen distintos algoritmos en función del tipo de problema que se trate de resolver.

## **1.2. La ubicación de los hidrantes. Estado de la cuestión.**

Los hidrantes suelen colocarse a pie de parcela o para suministrar el agua a varias parcelas. Incluyen, al menos, las funciones de "corte de suministro" y "medición" (Figura 4). También pueden integrar las funciones de "limitación de caudal" y "regulación de presión". El hidrante tiene una limitación física en cuanto al tamaño de la obra civil que lo acompaña de cara a poder ubicarlo en campo, dado el poco espacio que en múltiples ocasiones se dispone. Es por ello que encontramos también una limitación del número de tomas abastecidas por cada uno de ellos.



Figura 4. Aspecto exterior e interior de un hidrante multiusuario.

Se puede afirmar, que a la hora de ubicar los hidrantes en la red de distribución, no existe en la literatura científica relacionada, documentación que aborde el tema con cierto rigor. El motivo posiblemente esté relacionado con los dos condicionantes principales que afectan a dicha tarea: la configuración parcelaria (grado de parcelación básicamente) y el sistema de riego empleado. Ello impide generalizar metodologías que sean válidas en cualquier situación.

Aun así se puede encontrar varios trabajos en donde los autores esbozan una serie de recomendaciones y reglas empíricas, derivadas de la práctica, que han tenido eco en las instalaciones existentes. Así, Labye, Y. *et al.* [23]; Clement, R. y Galand, A. [9] recomiendan:

- Hidrantes agrupando 4 a 6 parcelas o tomas de salida.
- La localización de los hidrantes será tal que suponga un compromiso entre los deseos del agricultor (quiere el hidrante lo más cerca de su parcela) y la del gestor de la red (normalmente Comunidad de Regantes) que quiere el menor número posible y una red también lo más corta posible, para disminuir costes de implantación y mantenimiento.
- En orden a evitar excesivas pérdidas de carga en la toma individual del usuario, se dispondrá a una distancia máxima de 200 m para parcelas de unas pocas hectáreas y 500 m para los que superan 10 ha.

Sin embargo, por otro lado Bonnal [5], indica:

- Las tomas serán colectivas para pequeñas parcelas, menores a 3 hectáreas, e individuales para las superiores a 5 ha.
- En parcelas muy pequeñas se plantea una solución colectiva con hidrantes más o menos alejadas de la zona que riegan.
- La ventaja de la toma colectiva es que se reduce la longitud de la red principal fija hasta hidrante y por tanto la inversión.
- Fija algunos ejemplos del sur de Francia, destacando una distancia entre hidrantes siempre inferior a 300 m. El número máximo de parcelas en tomas colectivas es de 5.
- En todo caso supedita la solución a un eventual estudio económico y a la experiencia y conocimiento de la estructura catastral de la zona.

A la vista de todo lo anterior queda patente una cuestión básica. La colocación de hidrantes se sustenta en una serie de criterios y recomendaciones prácticas y empíricas, en la que la componente de experiencia previa del proyectista, su inteligencia espacial y el azar, conducen a mejores o peores soluciones.

Por último, en el ámbito de la Comunidad Valenciana, y por lo que respecta a redes de distribución realizadas sobre zonas regables similares a la analizada en este trabajo, Guillem, S. [18] observa las siguientes tendencias:

- Nº de parcelas alimentadas por el hidrante: 4 a 12, según su superficie.
- Superficie abastecida por el hidrante: 15 a 50 hanegadas valencianas (1,25 a 4,2 ha), según el número de parcelas que supone.
- Distancia máxima entre las parcelas abastecidas y el hidrante: 25 a 150 m.

### **1.3. Objetivos y justificación de la Tesina.**

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología para automatizar y optimizar el proceso de localización de hidrantes multiusuario y

asignación de parcelas, correspondiente a la fase de diseño de redes colectivas de riego a presión.

Para alcanzar este objetivo general se cumplen otros objetivos más concretos o específicos, mostrados a continuación:

- 1) Revisión del estado del arte y de la literatura científica desarrollada sobre el diseño de redes de distribución de agua a presión para riego y especialmente la localización de hidrantes.
- 2) Revisión de los modelos de localización-asignación y su adaptabilidad al problema en cuestión.
- 3) Planteamiento de un modelo matemático que optimice el proceso de localización-asignación.
- 4) Obtención y análisis de distintos tipos de distancias, empleadas como *inputs* del modelo.
- 5) Evaluación y comparación de las soluciones generadas.

## **1.4. Estructura de la Tesina.**

A fin de cumplir con los objetivos se ha planteado realizar la investigación mediante el desarrollo de cuatro capítulos.

El primero corresponde a la introducción que incluye los antecedentes, la revisión del estado del arte sobre la ubicación de hidrantes, los objetivos y la estructura de la tesina.

En el Capítulo 2 se presenta la metodología de la investigación, se muestran los datos de partida correspondientes al caso de estudio, así como el tratamiento realizado a la información catastral. También se presenta el modelo de optimización mediante el cuál se pretende resolver la localización óptima de los hidrantes, a la vez que se estudia el empleo de distintos tipos de distancias

En el Capítulo 3 se presentan y discuten los resultados obtenidos al aplicar el modelo con los distintos tipos distancias empleadas, también se comparan con la situación actual.

Por último en el Capítulo 4 se incluyen las conclusiones y aportes del trabajo, y se proponen posteriores líneas de investigación.

# **2** **Material y métodos**

## 2.1. Datos de partida.

### 2.1.1. Cartografía base.

La base cartográfica para nuestro trabajo será la cartografía catastral digitalizada rústica. La cartografía catastral rústica procede de un vuelo fotogramétrico efectuado a escala 1/20.000 ó 1/15.000 (para zonas muy parceladas) obteniéndose ortofotos a escala 1/5.000 o 1/2.000 respectivamente, a partir de las cuales se realiza el retintado del parcelario y la digitalización de las líneas. Dicha cartografía se adquiere en la Gerencia o Subgerencia del Catastro en cuyo ámbito territorial de competencias se localiza el municipio. El formato elegido es *shapefile* que se puede leer con la mayoría de aplicaciones SIG. Se trata de un mapa vectorial parcelario rústico por municipio con líneas de polígono, parcelas y subparcelas (cultivos/usos), vías de comunicación (ejes), ríos, arroyos, límites administrativos, puntos de control y otras informaciones.

### 2.1.2. Tratamiento en SIG

La información catastral ha recibido una serie de tratamientos y transformaciones con el programa ArcMap 9.2, con el fin de disponer de información manejable para resolver el modelo.

En primer lugar, se ha creado un nuevo tema, seleccionando aquellas parcelas que pertenecen a la zona regable, y asignándoles la condición de regable. También un tema de puntos con la localización actual de hidrantes en la zona.

El siguiente paso es simplificar las líneas del plano parcelario. Puede observarse en la Figura 5 que las parcelas están separadas en muchos casos por caminos y lindes representados con dos líneas separadas. Esto generaría un gran volumen de datos innecesarios para el modelo y errores en la solución. Por tanto es necesario unificar estas líneas para evitar posteriores problemas. Para ello se ha transformado el fichero de formas *.shp* en cobertura *Arc-Info*, y se ha tratado mediante la orden *Integrate*. Esta orden lo que hace es integrar en una sola línea, aquellas que estén más cerca de una cierta tolerancia a definir. Es por ello que los caminos han quedado reducidos a su eje.



Figura 5. Múltiples líneas en cartografía catastral.

A continuación se han seleccionado de entre los puntos posibles, aquellos candidatos a albergar un hidrante, que son los vértices formados por la confluencia de dos o más lindes de parcelas (Figura 6). Una vez seleccionados los puntos, se han delimitado las líneas, quedando una polilínea entre cada par de puntos conectados. Además se ha eliminado cualquier elemento extraño e innecesario que pudiera conducir a errores.

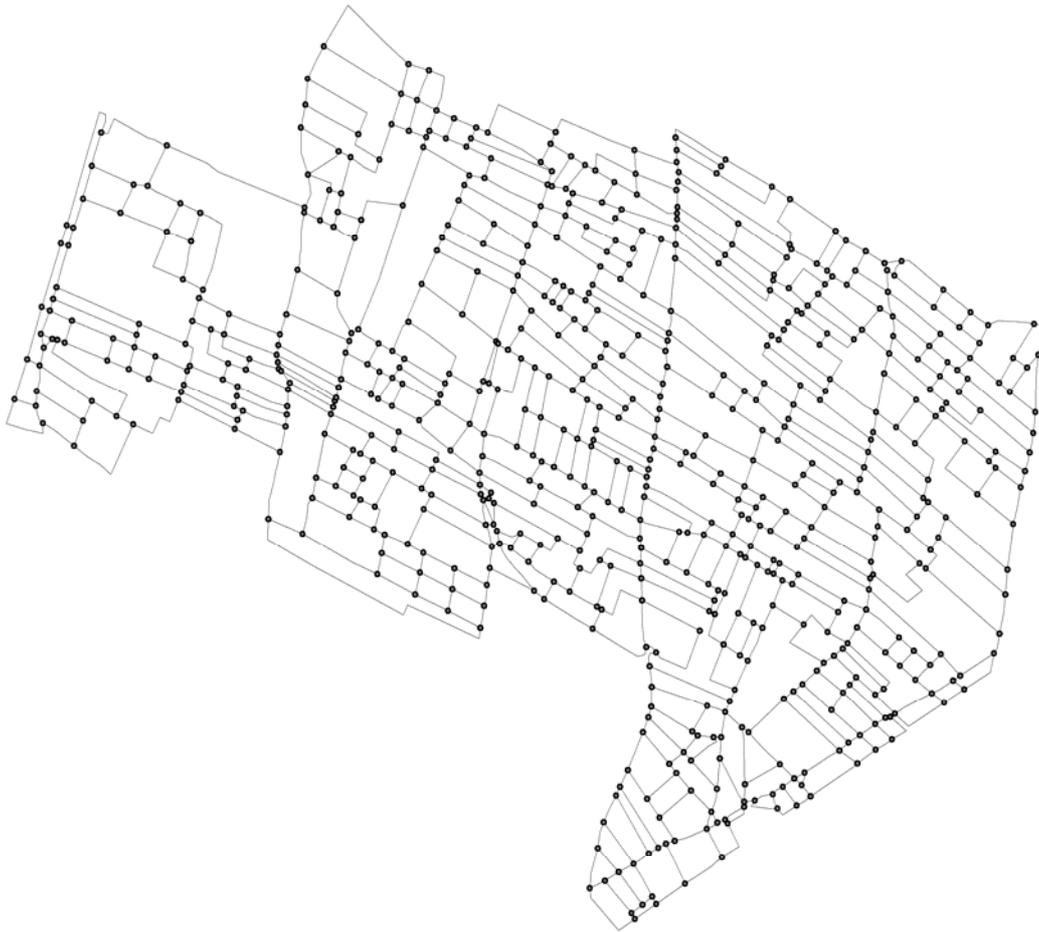


Figura 6. Plano con vértices candidatos y líneas.

## 2.2. Modelo de optimización.

### 2.2.1. Modelo minisum.

El objetivo del modelo es optimizar la localización de un determinado número de hidrantes y la asignación de parcelas. Para alcanzar éstos objetivos se emplea el modelo de localización-asignación óptima *mimisum*, que tiene como único objetivo el de la eficiencia espacial, en el sentido de que la solución al problema tenga una relación insumos-resultados óptima. La función que desempeña el modelo es: dado un número de centros de servicio a instalar, averiguar, de entre los emplazamientos posibles, el conjunto que minimizaría el desplazamiento total de los usuarios, asignándolos al centro más próximo. En su formulación, por tanto, el acento recae en la minimización de los “costes” totales de desplazamiento de la demanda a los centros

de servicio. Se trata por tanto de una formulación que permite manejar dos facetas: el número de centros y el desplazamiento total. Un aumento de la cifra de centros de servicios permitiría una presencia en más lugares, por lo que el desplazamiento total disminuiría, y viceversa. La limitación presupuestaria implica así un *trade-off* o relación de intercambio entre financiar la instalación de más centros (y por ende difundir espacialmente más el servicio) o asumir costes en el transporte más elevados; ambos podrían asignarse respectivamente a los capítulos de costes fijos y variables u operativos (Bosque, J. y Moreno, A. [7]).

### **2.2.2. Modelo de programación matemática.**

De entre los modelos de programación presentados en el capítulo anterior, los modelos de Programación Entera se dividen a su vez en tres grupos:

- Programación Entera pura, donde todas las variables toman valores enteros.
- Programación Entera Mixta, donde sólo algunas de las variables deben ser enteras.
- Programación Entera Binaria (PEB, más conocido como BIP, en siglas sajonas), en la que todas las variables son binarias y por tanto toman el valor 0 o 1.

El modelo desarrollado en el presente trabajo pertenece al último grupo, se trata de un modelo tipo BIP.

Como ya se ha explicado en el epígrafe anterior, entre los distintos modelos de localización-asignación, el modelo seleccionado para la ubicación de los hidrantes es el denominado *minisum*. El modelo tiene como meta determinar la localización de un cierto número de centros de servicio (hidrantes) y asignar a cada punto de demanda (parcela) aquel punto de oferta que consigue minimizar los costes totales de desplazamiento. En este caso se pretende minimizar el coste total de las conducciones necesarias para unir cada parcela con un hidrante. El coste de la conducción que une un hidrante y una parcela. Dado que los costes de una conducción es función de la superficie abastecida y de la distancia recorrida, se ha empleado el producto de estas dos variables como estimador del coste, en orden a simplificar el modelo (en lugar de una función más compleja relacionada con el cálculo

del diámetro). Por tanto, la función objetivo no define un coste real en sí misma, sino un valor directamente proporcional al mismo.

El modelo de optimización minimiza el valor de la función objetivo, que se calcula como el sumatorio de distancias ponderado por el tamaño de las parcelas:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_j \cdot d_{ij} \cdot s_{ij} \quad (1)$$

donde  $Z$  es el valor de la función objetivo ( $m^2 \cdot m$ ; valor proporcional al coste total de las conducciones, unidades sin sentido físico);  $a_j$  es el área de cada parcela regada ( $m^2$ );  $d_{ij}$  es la distancia de cada punto candidato  $i$  a cada parcela  $j$  (m); y  $s_{ij}$  es un término binario denominado “servicio”, que toma el valor 1 cuando la parcela  $j$  es servida por un hidrante ubicado en un punto candidato  $i$ , y 0 en caso contrario. El número total de parcelas es  $n$ , y el número total de puntos candidatos donde ubicar hidrantes es  $m$ .

El modelo está sujeto a las siguientes restricciones que delimitan la región factible:

$$\sum_{i=1}^m s_{ij} = 1, \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m h_i = nh \quad (3)$$

$$li \cdot h_i \leq \sum_{j=1}^n s_{ij}, \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n s_{ij} \leq ls \cdot h_i, \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (5)$$

Donde  $h_i$  es una variable que toma el valor 1 cuando un punto candidato  $i$  alberga un hidrante y 0 en el caso contrario;  $li$  y  $ls$  son los límites inferior (número mínimo) y superior (número máximo) respectivamente de parcelas que pueden ser adjudicadas a un mismo hidrante;  $nh$  es el número total de hidrantes a ubicar.

La región factible contiene todos los posibles valores que pueden tomar las variables de decisión. Una parcela nunca puede ser abastecida por más de un

hidrante. Por tanto un servicio y solo uno puede ser adjudicado desde un hidrante a una parcela (Ec. 2).

El número total de hidrantes que abastecerán a las parcelas debe ser un número fijo  $nh$  conocido a priori (Ec. 3).

Para evitar que algunos hidrantes tengan muy pocas o ninguna parcela asignada y otros tengan un número excesivamente grande de parcelas, se fijan unos límites inferior y superior de parcelas abastecidas por un mismo hidrante (Ecs. 4 y 5). Con estas dos restricciones se impide al mismo tiempo, que se den servicios desde puntos candidatos sin hidrante (cuando  $h_i$  vale 0).

Los datos iniciales para resolver el problema son el número total de parcelas  $n$ , las superficies de cada una de ellas  $a_j$ , el número total de hidrantes  $nh$ , el número total de puntos donde ubicar un hidrante  $m$  y las distancias entre dichos puntos candidatos y cada parcela  $d_{ij}$ . Las variables de decisión son  $s_{ij}$  y  $h_i$  las cuales solo pueden tomar valores de 0 ó 1, pues son de tipo binario.

## 2.3. Las distancias.

Entre la información inicial necesaria para aplicar el modelo se encuentra la distancia entre puntos candidatos y parcelas. Esta distancia puede ser medida de diferentes formas. La Figura 7 muestra dos de estas posibilidades: distancias euclidianas (DEUC) y distancias a través de la red (DRED). Ambas alternativas son estudiadas en el presente trabajo.

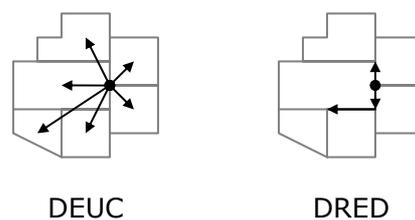


Figura 7. Distancias euclidianas y distancias a través de la red.

La distancia euclidiana mide la distancia entre dos puntos en línea recta. El primer punto es el vértice candidato a albergar un hidrante. El segundo punto es el centroide de la parcela (Figura 8). Es sencilla de obtener mediante un SIG, tiene unos costes de computación bajos, pero se ajusta poco a la realidad, pues las tuberías de

abastecimiento nunca atraviesan parcelas, sino que circulan por los bordes de las parcelas. El resultado final es una matriz de distancias  $m \times n$  (con  $m$  puntos candidatos y  $n$  parcelas).



Figura 8. Centroides de las parcelas.

La distancia a través de la red encierra gran complejidad de cálculo pero a cambio proporciona gran precisión, pues se ajusta exactamente a la realidad. La red la forman los lindes que rodean las parcelas. El punto de partida es el hidrante. El punto de llegada es el vértice más cercano de la parcela abastecida.

La distancia a través de la red exige la obtención de la ruta entre el punto de origen y el punto de destino, que recorra la menor distancia posible. Se trata de una variante del problema conocido en teoría de grafos como “problema de la ruta más corta”. La diferencia con éste radica en que cada parcela tiene varios vértices. Para

cada parcela nos interesa la distancia entre el punto candidato a hidrante y el vértice más cercano. Por esta razón el problema se ha resuelto en dos fases:

- En primer lugar, se obtiene la ruta más corta entre cada punto candidato a hidrante y todos los vértices considerados de cada parcela (los mismos puntos candidatos). Las rutas más cortas se han obtenido con el algoritmo de Dijkstra (Dijkstra 1969) implementado en Matlab. El resultado es una matriz con las distancias mínimas entre todos los puntos. La secuencia de lindes que forman cada ruta también se ha obtenido.
- En segundo lugar, para cada parcela y cada punto candidato a hidrante (origen), se ha seleccionado la ruta más corta a uno de sus vértices. Así, de nuevo se ha obtenido una matriz  $m \times n$  con  $m$  puntos candidatos y  $n$  parcelas.

## **2.4. Caso de estudio.**

El caso de estudio corresponde a una zona regable con un tamaño de 202 ha. Constituida por un total de 374 parcelas regables, de lo que resulta una superficie media por parcela de 0,54 ha. La zona dispone de una red de riego a presión de tipo ramificada y con organización del suministro a la demanda.

La red de riego existente emplea un total de 47 hidrantes multiusuario. Por tanto, cada hidrante tiene asignadas de media 8 parcelas y unas 4,3 ha. La disposición de los hidrantes y las parcelas asignadas a cada uno de ellos son las de la Figura 9.

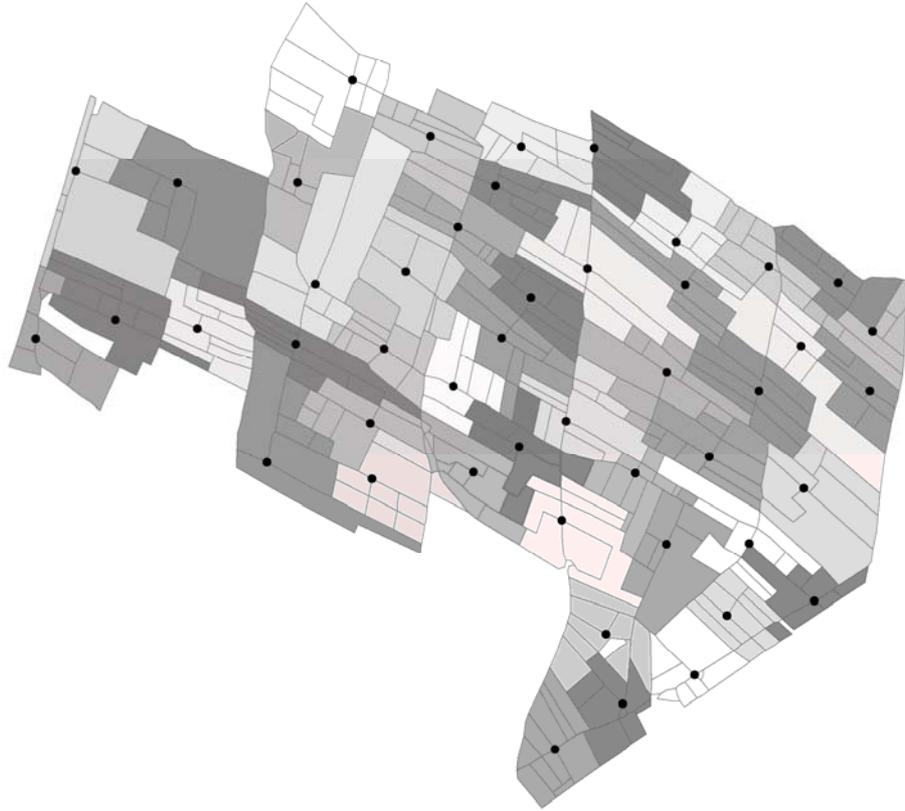


Figura 9. Localización actual de hidrantes y parcelas asignadas.

Así pues el modelo tendrá los siguientes datos de entrada y parámetros:

- $m = 659$  puntos candidatos.
- $n = 374$  parcelas.
- $nh = 47$  hidrantes a ubicar (para poder comparar el resultado del modelo con la situación actual).
- $li = 6$  y  $ls = 10$ , dos unidades alrededor de la media de 8 parcelas por hidrante.
- $a_j$ , listado con el área de cada parcela.
- $d_{ij}$ , matriz de tamaño  $m \times n$  con la distancia de cada punto candidato a cada parcela (dos versiones: DEUC y DRED).

## **2.5. Ejecución del modelo, exportación de resultados y generación de mapas.**

Para resolver el modelo, se ha empleado el software de optimización GAMS (General Algebraic Modeling System). El *solver* elegido para este caso es Cplex en su versión 10.1.1, la cual se adapta francamente bien a los modelos de programación entera binaria, en comparación con otras versiones anteriores u otros *solvers* distintos que precisaban de una cantidad de tiempo y/o recursos inviable.

Las dos matrices de distancias se han introducido en el modelo y han generado dos soluciones distintas. Las soluciones, en listados, se han exportado a hojas de cálculo. Así se ha filtrado el gran volumen de información, resumiéndolo en un formato más amigable para su posterior análisis y generación de mapas.

La exportación de los resultados al SIG ha consistido básicamente en crear nuevas capas a partir de las ya existentes, añadiendo nuevos atributos como: si se localiza o no un hidrante en cada vértice, o el hidrante (vértice) desde el que se sirve cada parcela.

Además, para la solución con distancias DEUC, se ha creado una nueva capa de líneas, que unen cada parcela con su hidrante asignado en línea recta. En el caso de DRED se ha creado una capa con los lindes que forman las rutas entre las parcelas y sus hidrantes, a la vez que se ha identificado el vértice por el que se sirve cada parcela.

# **3** **Resultados y discusión**

## 3.1. Soluciones generadas.

Como ya se ha dicho antes, el modelo ha sido ejecutado con dos versiones de datos. A continuación se presentan los respectivos resultados obtenidos.

### 3.1.1. Distancias euclidianas (DEUC).

En primer lugar se ha introducido la matriz DEUC, para dar valores a la variable  $d_{ij}$  (distancia de punto candidato  $i$  a parcela  $j$ ) y ha generado la solución representada por la Figura 10. Donde los puntos negros son los hidrantes, las parcelas tienen distinta tonalidad según el hidrante que les sirve y aparecen unidas a estos por líneas rectas en representación de las distancias euclidianas consideradas.



Figura 10. Solución DEUC.

La solución generada ha localizado los hidrantes en los puntos candidatos y asignado las parcelas que se resumen en la Tabla I. Por último, para esta solución, el valor alcanzado por la función objetivo es de unos 153 millones ( $m \cdot m^2$ ).

Punto con Hidrante	Parcela						
24	177	177	252	330	7	533	230
24	180	177	280	330	11	533	239
24	185	181	64	330	14	533	245
24	212	181	69	330	19	533	251
24	216	181	70	394	17	533	264
24	236	181	80	394	22	534	25
24	263	181	85	394	24	534	28
24	267	181	99	394	26	534	30
33	301	181	108	394	29	534	36
33	311	181	119	394	32	534	37
33	334	181	131	394	33	534	39
33	341	209	332	394	38	534	40
33	361	209	337	398	82	534	42
33	363	209	344	398	83	534	43
36	223	209	353	398	90	534	45
36	228	209	355	398	94	546	266
36	237	209	357	398	100	546	268
36	249	209	362	398	101	546	271
36	255	209	366	398	105	546	283
36	269	229	155	398	118	546	286
36	277	229	163	398	122	546	292
36	329	229	165	398	147	546	296
50	243	229	170	404	44	546	302
50	270	229	194	404	60	546	307
50	306	229	201	404	61	575	97
50	318	229	208	404	67	575	107
50	324	229	219	404	75	575	109
50	351	229	234	404	78	575	111
58	184	229	248	406	128	575	125
58	188	235	86	406	143	575	135
58	190	235	93	406	152	575	144
58	211	235	95	406	153	575	157
58	213	235	110	406	171	580	49
58	218	235	112	406	209	580	51
58	241	235	115	407	6	580	52
58	246	235	121	407	8	580	53
58	254	235	129	407	9	580	57
58	259	235	137	407	10	580	59
91	126	235	142	407	13	580	63
91	134	246	262	407	21	600	168
91	139	246	274	429	186	600	179
91	146	246	275	429	192	600	200
91	156	246	278	429	202	600	204
91	169	246	281	429	244	600	215
91	183	246	284	429	261	600	226
91	187	246	285	429	294	600	229
109	193	246	291	444	316	600	238
109	206	246	313	444	322	613	242
109	214	294	323	444	336	613	257
109	224	294	330	444	340	613	260
109	227	294	333	444	343	613	273
109	231	294	342	444	348	613	276

Punto con Hidrante	Parcela						
109	233	294	345	444	354	613	287
109	247	294	346	444	356	613	293
109	258	294	349	455	50	618	35
109	288	294	352	455	54	618	41
112	347	294	360	455	55	618	46
112	358	300	62	455	56	618	47
112	359	300	65	455	58	618	48
112	364	300	71	455	77	618	73
112	365	300	76	481	282	618	89
112	369	300	81	481	289	635	103
116	124	300	87	481	295	635	133
116	319	300	104	481	298	635	145
116	320	300	120	481	299	635	149
116	326	315	132	481	300	635	166
116	331	315	138	481	309	635	172
116	338	315	148	481	315	648	175
134	79	315	150	481	328	648	198
134	91	315	151	486	12	648	220
134	102	315	160	486	15	648	221
134	114	315	161	486	16	648	225
134	116	315	173	486	18	648	250
134	130	315	178	486	20	648	253
142	141	315	181	486	23		
142	154	322	197	486	27		
142	158	322	210	486	31		
142	167	322	222	486	34		
142	176	322	232	508	66		
142	182	322	240	508	68		
142	191	322	256	508	72		
142	195	322	265	508	74		
142	199	322	272	508	84		
142	205	322	279	508	88		
144	367	329	290	508	92		
144	368	329	303	508	96		
144	370	329	304	508	98		
144	371	329	308	508	106		
144	372	329	310	513	113		
144	373	329	317	513	117		
168	297	329	321	513	123		
168	305	329	325	513	127		
168	312	329	335	513	136		
168	314	329	339	513	140		
168	327	330	0	513	159		
168	350	330	1	513	162		
177	203	330	2	513	164		
177	207	330	3	513	174		
177	217	330	4	533	189		
177	235	330	5	533	196		

Tabla. I. Localización-asignación de la solución DEUC.

### 3.1.2. Distancias a través de la red (DRED).

Al introducir como dato para el modelo, la matriz DRED, se genera la solución de la Figura 11, que corresponde a la localización de hidrantes y asignación de parcelas de la Tabla II. En la figura los puntos negros son los hidrantes, las líneas negras son las rutas consideradas desde el hidrante, hasta el vértice marcado con un punto blanco perteneciente a una parcela de destino, a su vez coloreadas en distintas tonalidades según el hidrante.

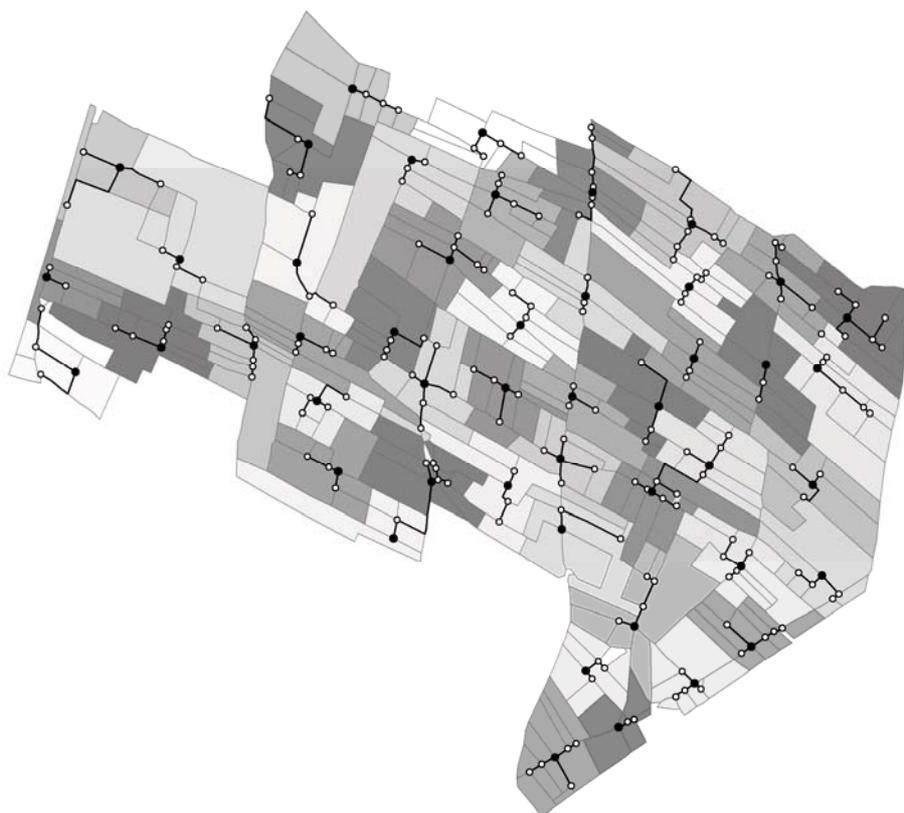


Figura 11. Solución DRED.

Punto con Hidrante	Parcela						
9	255	186	332	359	143	519	109
9	263	186	337	359	147	519	117
9	267	186	344	359	152	519	125
9	269	186	350	359	161	519	127
9	277	186	355	359	171	519	136
9	301	200	124	359	173	519	140
21	177	200	141	359	181	547	45
21	180	200	142	375	240	547	49
21	185	200	155	375	244	547	51
21	212	200	163	375	261	547	53

Punto con Hidrante	Parcela						
21	216	200	170	375	272	547	55
21	243	200	176	375	279	547	57
33	311	200	194	375	290	547	59
33	324	200	219	375	304	547	66
33	334	200	234	376	17	547	68
33	341	211	85	376	22	557	25
33	361	211	86	376	24	557	28
33	363	211	93	376	26	557	30
44	184	211	95	376	29	557	35
44	190	211	99	376	32	557	36
44	211	211	108	387	308	557	37
44	223	211	110	387	316	557	39
44	228	211	115	387	321	557	40
44	236	211	119	387	322	557	42
44	237	211	131	387	335	557	43
44	249	222	275	387	336	573	144
44	254	222	278	387	339	573	157
54	259	222	281	387	349	573	168
54	270	222	284	387	354	573	196
54	306	222	285	387	356	573	204
54	318	222	291	407	6	573	245
54	329	222	297	407	8	587	229
54	351	222	305	407	9	587	238
80	169	222	312	407	10	587	257
80	183	222	314	407	13	587	266
80	187	249	345	407	21	587	273
80	188	249	346	432	31	587	283
80	193	249	352	432	33	587	286
80	206	249	353	432	38	587	292
80	213	249	357	432	44	587	293
80	218	249	360	432	50	587	296
80	241	249	366	432	54	611	89
80	246	263	303	432	56	611	97
102	233	263	310	432	58	611	103
102	247	263	313	454	72	611	107
102	288	263	317	454	74	611	111
102	319	263	323	454	78	611	135
102	320	263	325	454	83	614	133
102	326	263	330	454	84	614	145
107	182	263	333	454	90	614	149
107	195	263	342	454	92	614	166
107	199	273	137	454	98	614	172
107	205	273	148	454	100	614	175
107	214	273	150	454	105	614	179
107	224	273	151	459	113	614	200
107	227	273	160	459	123	614	215
107	231	273	165	459	128	614	226
107	258	273	178	459	153	618	41
112	331	273	201	459	159	618	46
112	338	273	208	459	202	618	47
112	347	276	65	459	209	618	48
112	358	276	76	494	239	618	52

Punto con Hidrante	Parcela						
112	359	276	87	494	251	618	63
112	365	276	104	494	264	618	73
112	369	276	121	494	268	633	198
120	134	276	129	494	271	633	220
120	139	293	197	494	282	633	221
120	146	293	210	494	289	633	225
120	154	293	222	494	299	633	242
120	156	293	232	494	309	633	250
120	158	293	248	499	295	633	253
120	167	293	256	499	298	633	260
135	79	293	262	499	300	633	276
135	91	293	265	499	302	633	287
135	114	293	274	499	307		
135	116	330	0	499	315		
135	126	330	1	499	328		
135	130	330	2	499	340		
144	362	330	3	499	343		
144	364	330	4	499	348		
144	367	330	5	501	162		
144	368	330	7	501	164		
144	370	330	11	501	174		
144	371	330	14	501	186		
144	372	330	19	501	189		
144	373	337	82	501	192		
175	64	337	94	501	230		
175	69	337	101	501	294		
175	70	337	118	503	12		
175	80	337	120	503	15		
175	102	337	122	503	16		
175	112	337	132	503	18		
177	191	337	138	503	20		
177	203	341	60	503	23		
177	207	341	61	503	27		
177	217	341	62	503	34		
177	235	341	67	519	77		
177	252	341	71	519	88		
177	280	341	75	519	96		
186	327	341	81	519	106		

Tabla. II. Localización-asignación de la solución DRED.

En este caso, la función objetivo asciende a un valor de 43 millones. Valor notablemente inferior que el alcanzado con DEUC. Hecho que se explica en parte por la presencia o ausencia de ceros en la matriz de distancias. La distancia podría ser cero si la parcela de destino está en contacto directo con el punto de origen. Así ocurre en DRED, cuando el punto de origen es un vértice de la parcela de destino y por lo tanto distancia es cero. En cambio, la distancia euclidiana al centroide de la parcela nunca llega a ser cero. Este suceso se da con relativa frecuencia en la matriz DEUC. Así, la suma de estas pequeñas distancias aumenta el valor de la función objetivo.

Además como ya se explicó anteriormente las tuberías no se colocan cruzando por el medio de otras parcelas hasta llegar al centroide de la servida. Por tanto, la comparación de las soluciones y también con la situación actual debe efectuarse considerando las distancias reales para llegar de un punto a otro, es decir, con las distancias a través de la red de lindes (DRED).

### 3.2. Comparación con iguales distancias.

Como se ha explicado en el epígrafe anterior la bondad de las soluciones obtenidas no puede compararse, dadas las diferencias existentes en la matriz de distancias. Para poder compararlas en igualdad de condiciones, la solución obtenida con DEUC debe recalcularse manteniendo su localización-asignación y sustituyendo las distancias por las DRED (ver detalle en Figura 12). De la misma manera se calcula qué valor daría a la función objetivo, la distribución actual de hidrantes (DAH). A continuación (Tabla III) se muestra un resumen de la comparación realizada según se ha descrito anteriormente.

Caso	Total		Media		Desviación Típica	
	Valor F.O. (m <sup>2</sup> × m)	Longitud (m)	Valor F.O. (m <sup>2</sup> × m)	Longitud (m)	Valor F.O. (m <sup>2</sup> × m)	Longitud (m)
DRED	43048586	13560	115103	36	155744	46
DEUC	99103243	25238	264982	67	439368	86
DAH	60596559	16177	162023	43	225715	48

Tabla. III. Comparación de distintas soluciones (siempre con DRED).

La función objetivo alcanza un valor de 99 millones para el caso de distancias DEUC, y de 43 millones para distancias DRED. Las tuberías actuales (DAH) suponen un valor de la función objetivo de unos 60 millones. Si atendemos simplemente a la distancia total necesaria para unir todas las parcelas con algún hidrante, para el caso DEUC son 25.238 m, para DRED 13.560 m, siendo para DAH 16.177 m. La aplicación del modelo de optimización con DRED, consigue por tanto una reducción del valor de la función objetivo (proporcional al coste real) de un 28,95% y una reducción en la longitud total de tuberías del 16,18%, cuando lo comparamos con DAH. El modelo cuando emplea DEUC empeora notablemente la situación real existente. El valor de la función objetivo se incrementa un 63.54%, mientras que la longitud de tuberías necesarias aumenta un 56.01%. Se ha calculado también la media y la desviación típica tanto del valor de la función objetivo como de la distancia entre parcelas e hidrantes. Al utilizar distancias medidas a través de la red de parcelas existe menor

dispersión, por lo que el valor medio de longitudes entre hidrantes y parcelas no solo es menor, sino que tiene menor incertidumbre.

Al observar el resultado gráficamente en las Figuras 10 y 11 puede parecer que la aplicación del modelo de localización-asignación produce resultados similares para los dos tipos de distancias utilizados. Sin embargo numéricamente se ha comprobado que son totalmente distintos. El caso DRED consigue mejorar a DAH, mientras que el caso DEUC lo empeora notablemente. La explicación la encontramos en el significado de la palabra “cerca” para cada uno de los tipos de distancias. Tal y como puede verse en el detalle de la Figura 12, una parcela que queda cerca de un hidrante en línea recta, puede quedar muy lejos a través de la red de parcelas, pues exige rodear a otras. Por ello, al emplear DEUC se asignan algunas parcelas (aparentemente cercanas) a hidrantes situados detrás de otras parcelas, que a su vez pueden ser grandes y penalizar en gran medida la función objetivo. En cambio, cuando las distancias se miden a través de la red, el proceso de optimización va desechando aquellas localizaciones que exigen rodear parcelas para alcanzar otras.

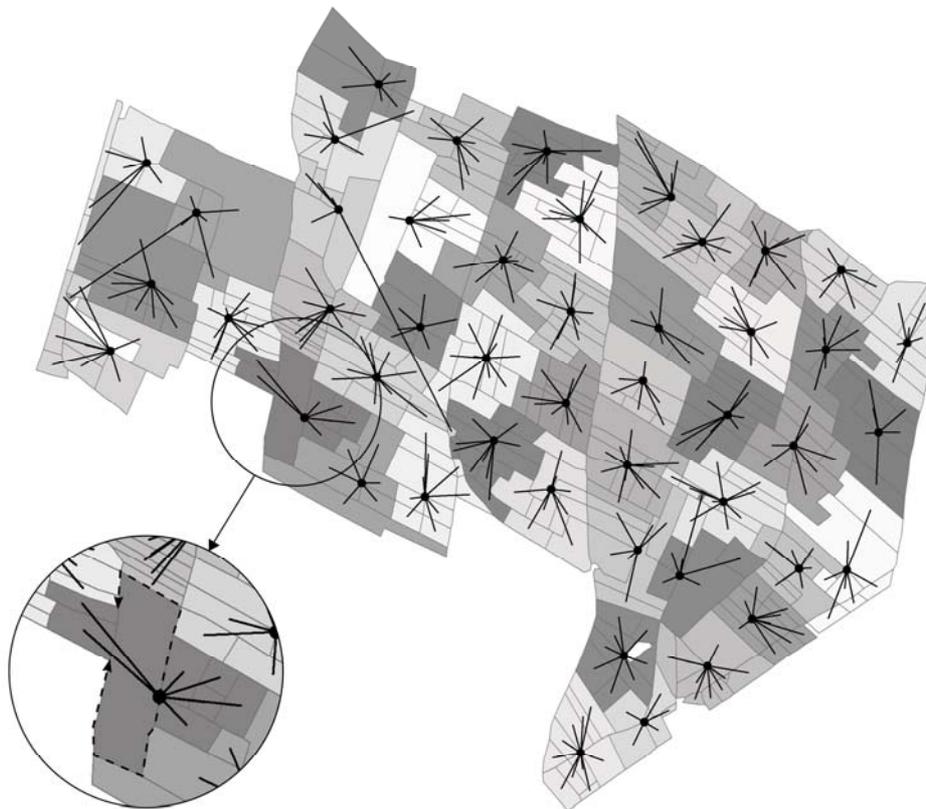


Figura 12. Conducciones rodeando parcela en DEUC.

Otra cuestión importante a destacar en el funcionamiento del modelo es el derivado de la estructura de la función objetivo. La función objetivo es el producto de una superficie por una distancia, la cual es proporcional al coste de la conducción. En el caso DRED, un hidrante ubicado en un vértice de una parcela no produce incremento de la función objetivo pues la distancia que tiene que recorrer para alcanzarla es nula. Esto hace que en el proceso de optimización, las parcelas de mayor superficie cuenten con un hidrante en su perímetro. Sin embargo en el caso DEUC, muchas de las parcelas que vemos cerca del hidrante, suponen una cierta distancia, la cual por pequeña que sea, hace aumentar la función objetivo.

Otra forma de ver este mismo efecto es a través de la Figura 13. En ella se muestra la longitud media de tubería necesaria para unir una parcela con su hidrante, segmentando la superficie de las parcelas en rangos. El éxito del caso DRED (Figura 13A) se debe a que el modelo busca ubicar hidrantes en contacto con las parcelas más grandes, pues de esta manera no aumenta la función objetivo. Con el caso DEUC (Figura 13B), parcelas que aparentemente estaban cerca, realmente (a través de la red) están lejos, lo que se traduce en que, en prácticamente todos los rangos de superficie, hay longitudes de más de 50 m. Finalmente, en la Figura 13C podemos ver como el diseñador de la red, al definir DAH ha seguido un criterio muy similar al mostrado en la Figura 13A. Ha ubicado los hidrantes en contacto con las parcelas de mayor tamaño, de forma que las parcelas más alejadas son las más pequeñas, cuya tubería de conexión al hidrante será de menor coste. Lógicamente, aunque la intención es la misma, el hecho de ejecutar el proceso manualmente no permite ser tan exhaustivo como el modelo de optimización, por lo que los resultados son peores a los conseguidos por éste.

De nuevo, otra forma de analizar el comportamiento del modelo según el tipo de distancia empleada puede verse en la Figura 14. En este gráfico se ha representado el número de casos, y el porcentaje de área total por rangos de longitud. Así, mientras que para DRED (Figura 14A), utilizando cero metros de tuberías (parcelas que tienen un hidrante en un vértice de su perímetro), más del 80% de la superficie ya estaba asignada a un hidrante, en DEUC (Figura 14B), apenas llega al 70%. Por su parte en DAH (Figura 14C) se supera el 75% del área. Además el caso DRED presenta un descenso notable y continuo de área y casos, entre cada rango de longitudes, mientras que en DAH y especialmente en DEUC, no se aparece la misma continuidad, sino que se estancan en el tercer nivel.

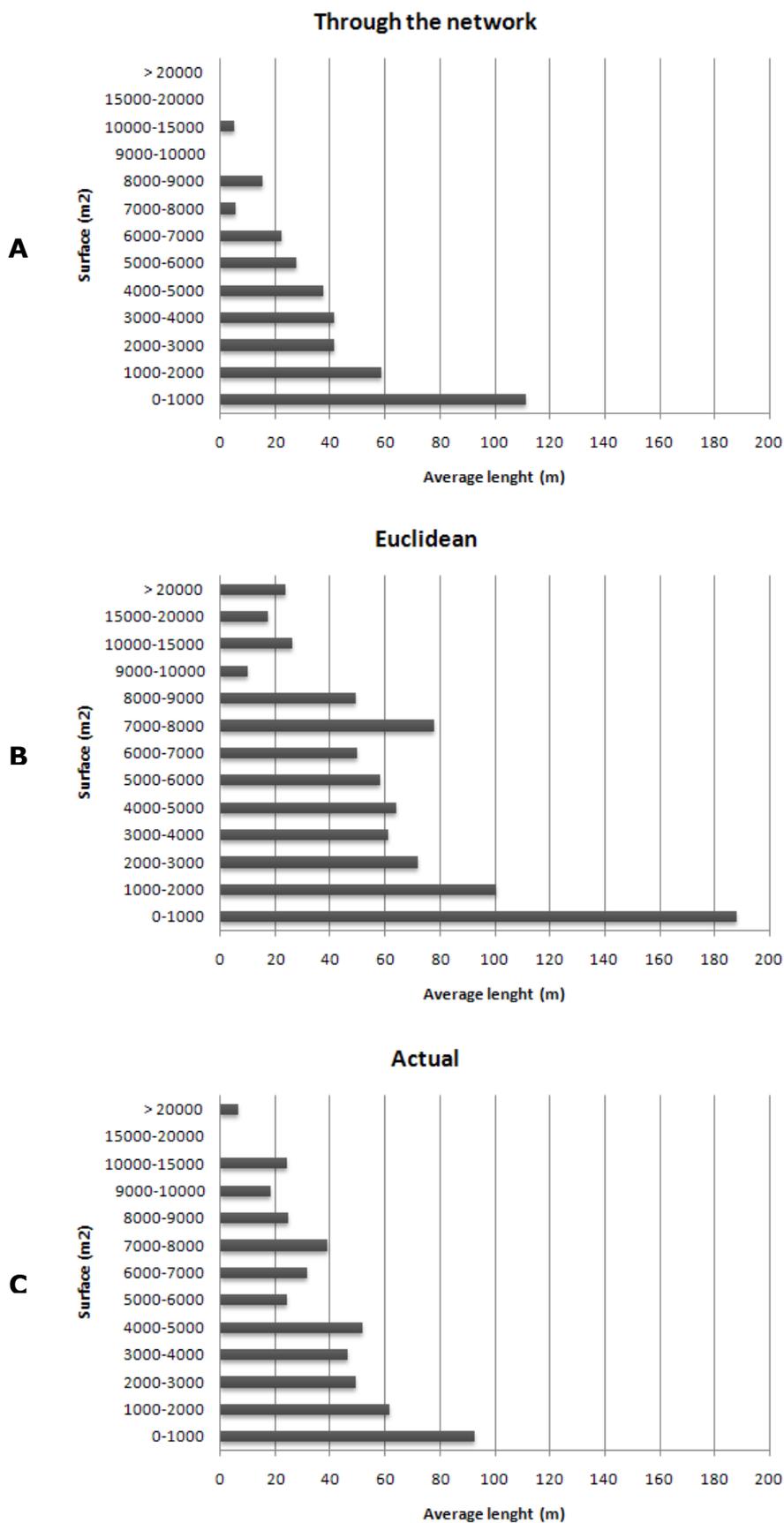


Figura 13. Longitud media para distintos tamaños de parcela.

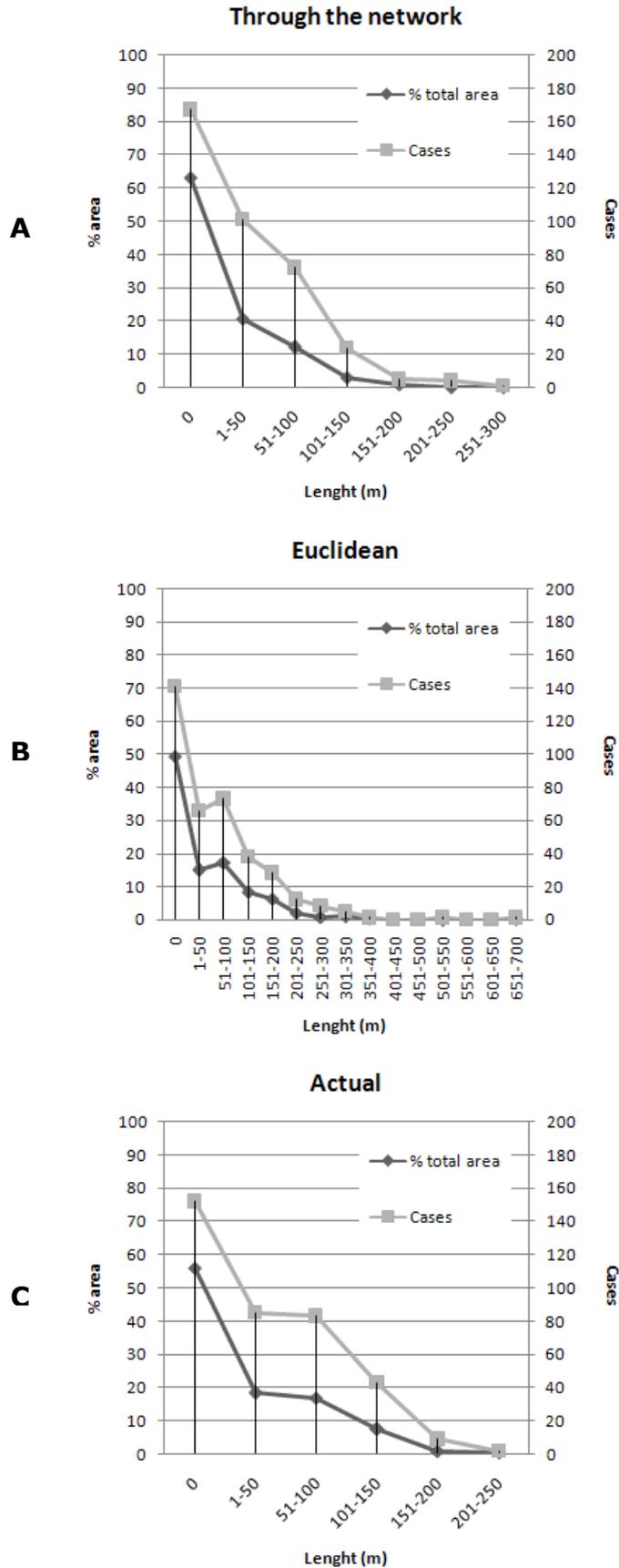


Figura 14. Porcentaje del área total y casos en cada rango de longitud.

Por último en la Tabla IV destacan los bajos valores del tercer cuartil para DRED, donde el 75% de las conducciones no superan una longitud de 58 m, en comparación con DEUC y DAH (75 y 102 m respectivamente). Si atendemos a la máxima longitud asignada, en el método DRED es de 295 m, mientras que DEUC llega a los 692 m. En el caso DAH, la longitud máxima es de 228 m. En este caso, DRED supera la longitud máxima entre un hidrante y una parcela asignada porque de forma deliberada no se ha introducido ninguna restricción en este sentido el modelo de optimización con el fin de observar su comportamiento. En cualquier caso, el valor registrado no es desorbitado.

Caso	Valor de F.O. (m <sup>2</sup> × m)				Longitud (m)			
	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>
DRED	0	63584	188082	1142451	0	24	58	295
DEUC	0	123793	322288	3981824	0	43	102	692
DAH	0	88025	243659	1523268	0	34	75	228

Tabla. IV. Cuartiles del valor de la función objetivo y longitud para los tres casos.

# **4 Conclusiones**

## 4.1. Conclusión.

En redes colectivas de riego a presión con hidrantes multiusuario el servicio queda a una cierta distancia de la parcela en donde se utiliza. En la literatura existe un gran vacío respecto a la forma en la que deben disponerse los hidrantes dentro de la red de riego. El coste de las conducciones entre hidrantes y parcelas depende de la localización de los hidrantes de qué parcelas se les asignan. Los algoritmos de localización-asignación ayudan a encontrar soluciones que minimizan este coste. En este trabajo se ha empleado el modelo *minisum* para realizar dicha tarea.

Para la aplicación de esta técnica, es indispensable la utilización de sistemas de información geográfica (SIG) para el tratamiento de la información espacial, y software de programación matemática que resuelvan los modelos de optimización planteados. El lenguaje de programación matemática resulta útil para desarrollar modelos que buscan la solución óptima en problemas de localización-asignación. Dicho sea de paso, es de vital importancia disponer de las versiones recientes de los *solvers* y/o programas empleados, especialmente para resolver problemas de programación entera binaria, pues se han encontrado grandes diferencias en el tiempo de ejecución según la versión utilizada y especialmente al emplear la matriz de distancias a través de la red, la cual incluía numerosos ceros.

Dos formas de medir las distancias han sido empleadas y comparadas posteriormente con las conducciones actualmente existentes. El empleo de distancias a través de la red es imprescindible. Con las distancias euclidianas se pierde gran cantidad de información y se generan soluciones inadecuadas.

Un parámetro importante en el modelo es el número de hidrantes a emplazar ( $nh$ ). El número de hidrantes fija una relación media de parcelas por hidrante (al mismo tiempo, de superficie por hidrante) y además influye en las longitudes de tubería necesarias para unir todas parcelas a algún hidrante (a mayor número de hidrantes menor longitud). Este estudio ha encontrado la solución óptima para el mismo número de hidrantes que en el caso real, con el objeto de poder comparar soluciones.

Por otra parte, se recomienda en caso de observar un reparto desigual de la superficie, añadir unos límites (superior e inferior) de superficie por hidrante, de la misma manera se ha realizado con el número de parcelas asignadas. Otra restricción que puede ser recomendable, es un límite máximo de distancia, en caso de observar la “discriminación” de parcelas muy pequeñas asignadas a hidrantes muy lejanos.

## **4.2. Objetivos alcanzados.**

Se ha logrado construir un modelo para optimizar la ubicación de un determinado número de hidrantes y las parcelas que se les asigna a cada uno de ellos, minimizando el producto de la longitud de las conducciones resultantes por la superficie de las parcelas, lo que es proporcional al coste real de las conducciones.

En este trabajo queda demostrada la conveniencia del uso del modelo frente a la tradicional asignación manual.

## **4.3. Futuras líneas de investigación.**

Volviendo al tema del número de hidrantes, no se ha considerado como variable y por tanto no se ha optimizado. Introducir esta variable implica añadir el coste de los hidrantes a la función objetivo. En ese caso sería necesario realizar paralelamente los cálculos hidráulicos pertinentes e introducir el coste real de las conducciones en la función objetivo. En futuros trabajos deberá estudiarse el efecto de aumentar o disminuir el número de hidrantes, teniendo en cuenta que se trata de estructuras que tienen un elevado coste. De esta forma en un mismo proceso se obtendrá cual es el número óptimo de hidrantes que minimiza el coste total formado por los propios hidrantes más las conducciones de unión con las parcelas.

## Bibliografía

- [1] Arviza, J. (1990). Curso de Riego. Alicante, Ed. C.A.P.A.
- [2] Arviza, J. (1996). Riego Localizado. Valencia. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.
- [3] Arviza, J. y Balbastre I. (2001). Generalidades. Datos de partida. Diseño redes colectivas de riego a presión. Curso "Proyecto de redes colectivas de riego a presión". Colegio Oficial Ingenieros Agrónomos. Valencia, España.
- [4] Arviza Valverde, J.; Martínez Alzadora, F. y Llopis Sancho, E. (2003). Propuesta de una metodología para la distribución óptima de tomas en sectores, en redes de riego a presión con organización por turnos. Mérida. XXI Congreso Nacional de Riegos.
- [5] Bonnal, C. (1960). Manual de riego colectivo por aspersión. París. Organización de Cooperación y Desarrollo Agronómico.
- [6] Bosque Sendra, J. (1992). Sistemas de Información Geográfica. Ediciones Rialp, S. A. 451 pp. Madrid, España.
- [7] Bosque Sendra, J. y Moreno Jiménez, A. (2004). "Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos". Madrid, Ra-Ma.
- [8] Clement, R. (1966). Calcul des debits dans les reseaux d'irrigation fonctionnant a la demande. Le Huille Blanch. n° 5, pp 553-575.
- [9] Clement, A. y Galand, A. (1986). El riego por aspersión y las redes colectivas de distribución a presión. Barcelona. Editorial Editores Técnicos Asociados.
- [10] De Verteuil, G. (2000). "Reconsidering the legacy of urban public facility location theory in human geography", *Progress in Human Geography*, 24(1), pp 47-69.
- [11] Fernández Palacín, F. y Bosque Sendra, J. (1991). "Evaluación de la localización de los centros sanitarios de la ciudad de Granada (España). Un análisis basado en un SIG", III Conferencia Latinoamericana sobre Sistemas de Información Geográfica. Viña del Mar, Chile. pp. 409-419.
- [12] Fernández Palacín, F. (1992): "Algunas ideas sobre análisis locacionab". Cuadernos de Geografía, n.º 3, pp. 49-58. Universidad de Cádiz. España.
- [13] García Prats, A. (2004). "Definición en planta de redes de riego a presión de mínimo coste de implantación y gestión mediante sistemas de información geográfica" Ph.D. thesis, Univ. Politécnica de Valencia.

- [14] García Prats, A. y Guillem, S. (2007). Layout Design of Irrigation Networks in Highly Parcelled Territories Using Geographical Information System. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE. 133, 573-582.
- [15] García Prats, A. y Guillem, S. (2009). Influence of the Spatial Configuration of the Irrigated Zone On The Irrigation Network Layout Design. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE. 135, 626-632.
- [16] Ghosh, A. y Rushton, G. (1987). *Spatial Analysis and Location-Allocation Models*. Van Nostrand Reinhold Company. 373 pp. New York. Estados Unidos.
- [17] Granados, A. (1990). *Infraestructura de regadíos, Redes colectivas de riego a presión*, 2ª Edición, E.T.S.I.C.C.P., Madrid.
- [18] Guillem, S. (2000). *Modelo económico del coste de implantación de redes de riego a presión para riego localizado utilizando los sistemas de información geográfica. Aplicación para el diseño topográfico óptimo de los sectores o zonas de riego*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- [19] Instituto Valenciano de Estadística (IVE). Generalitat Valenciana. (2002). *Recurso electrónico. Fichas Municipales. Información catastral de rústica*. Fuente: Centro de Gestión Catastral y Cooperación Tributaria. Ministerio de Economía y Hacienda.
- [20] Jensen-Butler (1999). *Cities in Competition:Equity Issues*”, *Urban Studies*, 36(5-6), pp. 865-891.
- [21] Johnston, R. J., Gregory, D. y Smith, D. M. (eds.) (1987). *Diccionario de Geografía Humana*. Madrid, Alianza.
- [22] Joseph, A. E. y Phillips, D. R. (1984). *Accessibility and Utilization. Geographical Perspective on Health Care Delivery*. London, Harper & Row.
- [23] Labye, Y., Olson, M.A., Galand, A. y Tsiourtis, N. (1988). *Design and optimization of irrigation distributions networks*. Roma. FAO.
- [24] Méndez, R. (1997). *Geografía económica. La lógica del capitalismo global*. Editorial Ariel S. A. Ariel Geografía. 384 pp. Barcelona, España.
- [25] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2003). *Libro Blanco de la Agricultura y el Medio Rural*. Madrid. Editorial Mapya.
- [26] Moreno Jiménez, A. y López de los Mozos, M. Á. (1989). “Organización espacial del sistema de centros públicos de EGB en el sureste de Madrid. Un análisis comparativo de modelos de localización-asignación”, *Revista de Educación*, 290,pp. 407-444.

- [27] Pacione, M. (1990). *Urban problems: an applied urban analysis*. London, Routledge.
- [28] Pérez García, R. (1993). *Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando elementos de regulación*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- [29] Ramírez, L. y Bosque Sendra, J. (2001). *Localización de hospitales: Analogías y diferencias del uso del modelo p-mediano en SIG raster y vectorial*. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*. n.º 21, pp. 53-79. Madrid, España.