



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE

Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica a la gestión técnica de redes de distribución de agua potable

TESIS DOCTORAL

PRESENTADA POR:

D. Francisco Javier Martínez Solano

DIRIGIDA POR:

Dr. D. Rafael Pérez García

Valencia, Julio de 2002

AGRADECIMIENTOS

Durante la realización de esta Tesis han sido muchas las personas que me han ayudado. Sirva esta nota de agradecimiento a todas ellas.

En primer lugar deseo agradecer a mi esposa Isabel su apoyo incondicional durante todo este tiempo. Su paciencia y sus continuas lecturas me han servido para depurar la redacción de todos y cada uno de los capítulos. Sin duda se ha visto afectada por todos los inconvenientes que se derivan de este trabajo sin recibir ninguno de los beneficios.

A continuación, debo agradecer a mi director de Tesis, el Dr. D. Rafael Pérez García sus comentarios, sugerencias y correcciones, sin las cuales no habría sido posible llegar a completar el trabajo realizado.

No puedo dejar de mencionar a todas y cada una de las personas que han pertenecido o pertenecen aún al Grupo Mecánica de Fluidos. De manera muy especial quiero dejar constancia de mi agradecimiento a Laura Gascón, Alicia Pitarque, Roberto Escolano y Pedro Iglesias. Su ayuda en algunas fases de la elaboración de la Tesis ha sido determinante. De igual modo, en las tareas de programación he recibido el apoyo de José Vicente Ribelles y de mi hermano, P. Daniel. En alguna ocasión, ellos han sido los que me han sacado de dudas.

Por último, y no por ello menos importante, debo agradecer a mi familia y en especial a mi padre su continuo apoyo a lo largo de los ocho años transcurridos desde que inicié los estudios de Doctorado en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.

A todos ellos, y a los que me haya podido olvidar, muchas gracias.

TESIS DOCTORAL

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA A LA GESTIÓN TÉCNICA DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

Presentada por:

D. Francisco Javier Martínez Solano

Dirigida por:

Dr. D. Rafael Pérez García

RESUMEN

El estudio de una red de distribución de agua potable, bien para conocer su comportamiento hidráulico, bien para ejercer una gestión eficaz de los recursos que la componen, exige el manejo de una importante cantidad de información. Esta información posee distinta naturaleza, aunque podría ser agrupada en tres grandes grupos según la misma y el uso a que será sometida. Estos grupos son: información física de los elementos de la red, información económica del sistema de abastecimiento e información espacial sobre la ubicación de los anteriores.

Tradicionalmente, esta información se ha guardado en distintos formatos. La información sobre los elementos de la red (diámetros, longitudes, fechas de puesta en operación, proveedores, etc.) quedaba guardada en planos de obra o pequeñas bases de datos de inventario. La información económica quedaba como la base de datos más cuidada del sistema, donde quedaban registrados todos los datos relativos a los abonados, sus consumos, direcciones, fechas de alta y otros datos necesarios para una correcta gestión económica del abastecimiento. Por último, la información espacial se encontraba dispersa en distintos planos topográficos donde aparecían las curvas de nivel del área geográfica abastecida, la ubicación de las tuberías principales y los trazados de las conducciones de distribución, en muchas ocasiones sin actualizar y realizados a mano. En cualquier caso, rara vez existía conexión entre estos tres sistemas de información.

Sin embargo, hoy en día es cada vez más frecuente la necesidad de ligar la información sobre las infraestructuras con la económica y ambas a su vez con la componente espacial. Esto es posible gracias a la implantación de un adecuado Sistema de Información Geográfica (SIG). Este sistema nos permite, no sólo relacionar datos de carácter geográfico o espacial con otros datos alfanuméricos, sino también actualizar de una manera sencilla los datos contenidos, a través de una apropiada interfaz gráfica.

El objetivo principal de la Tesis consiste en proporcionar una herramienta eficaz para el apoyo en la toma de decisiones relativas a la gestión técnica de los abastecimientos. Para ello, se han realizado los siguientes desarrollos específicos:

- Definición de una estructura de base de datos que recoge la totalidad de los datos necesarios para la elaboración del modelo matemático de una red de abastecimiento de agua potable. Esta base de datos recoge tanto los datos puramente cartográficos (como altimetría, viario o parcelario) como los datos más específicos de una red de abastecimiento de agua (abonados e infraestructuras).
- Elaboración de un modelo digital del terreno. Este modelo permite, por una parte, la interpolación de las cotas de cada uno de los elementos de la red, en el caso de que se desconozca este dato. Igualmente, esta interpolación se podrá utilizar para los nudos que resulten de la creación del modelo matemático. Junto a esto, se ha completado dicho modelo con un algoritmo de teselación que permite dividir el área de servicio en zonas de influencia de cada uno de los nudos.
- Elaboración de la modelación de la red a partir de los datos de la misma disponibles en el SIG. Puesto que las tareas de la gestión técnica de un abastecimiento son diversas, el modelo matemático debe responder a la necesidad para la cual se ha creado. Por ello, en función del uso que se va a hacer del modelo y el nivel de detalle necesario en éste, el SIG incorpora una serie de rutinas de simplificación de la red.
- De la misma forma que el nivel de detalle del modelo depende del uso que se va a hacer de él, la asignación de cargas o consumos al modelo también debe hacerse según el uso que se vaya a hacer del modelo y la técnica empleada para la simplificación de la red. En concreto, se han contemplado dos criterios de asignación. El primer criterio responde al nivel de detalle del modelo y a la finalidad del mismo. Así, habrá que distinguir entre los modelos estratégicos de operación y los modelos de detalle. En los primeros, se trabajará con caudales medios mientras que en los segundos se trabajará con caudales correspondientes a escenarios excepcionales de funcionamiento de la red (caudales punta, sequía, averías, etc.). El segundo criterio será temporal. Debe contemplarse la posibilidad de asignar consumos correspondientes a situaciones actuales, para lo cual se dispondrá de la información de las facturaciones. Sin embargo, sobre todo a efectos de planificación, será necesario integrar sistemas de predicción de demandas.
- Otro objetivo perseguido con esta Tesis es el de dar un primer paso hacia la interoperabilidad de los sistemas de información geográfica. Dicho de otra forma, se ha de tener en cuenta la posibilidad de compartir la información integrada en el SIG. Por ello, se ha elaborado un modelo de datos compatible con los estándares proporcionados por el Open GIS Consortium que permite implantar todo lo desarrollado en cualquier sistema, independientemente de la plataforma elegida.
- Por último, se ha incluido en la Tesis una aplicación práctica de todo lo expuesto de tal forma que quede patente la utilidad de la metodología desarrollada cuando se traslada a un caso real.

La principal conclusión que se puede extraer de esta Tesis es que se ha realizado un trabajo que facilitará la toma de decisiones relativas a la gestión técnica de los abastecimientos, basando estas decisiones en los resultados proporcionados por un modelo matemático obtenido a partir de los datos incluidos en un Sistema de Información Geográfica. Para ello ha sido necesario solventar una serie de aspectos que se han ido desarrollando a lo largo de los distintos capítulos de la Tesis.

PhD THESIS

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS APPLIED TO TECHNICAL MANAGEMENT OF DRINKING WATER DISTRIBUTION NETWORK

Presented BY:

D. Francisco Javier Martínez Solano

Directed by:

Dr. D. Rafael Pérez García

SUMMARY

When studying a Water Supply System (WSS), one needs to consider a huge amount of information in order to understand its hydraulic performance or to determine how to manage the existing resources of the network efficiently. There are many types of information, but the information can be classified into three main groups, depending on its nature and its later usage. These groups are: physical features of the network elements, economic information of the water supply system and spatial information about the location of both economic and physical data.

Traditionally, this information has been saved in different formats. The information about network elements (diameters, lengths, starting date, suppliers, etc.) was saved in work plots or small inventory data bases. The economic information was the most carefully kept data base in the system. This database stored all the consumer data, including customers' addresses, registering dates and other relevant data for correct economic management of the system. Finally, spatial information was usually scattered in various topographic maps where the izolines of the supplied geographic area, the location of the mains and the distribution pipes layout appeared. However, most of the time these were not updated sketches. In any case, a connection rarely existed among the three information systems.

However, nowadays there is a greater need to link spatial, economic and physic information together. This is now possible thanks to the implementation of a proper geographic information system (GIS). This system allows us not only to link geographic or spatial data with another alphanumeric data, but also to update in a simple way the included data, through an appropriate graphical interface.

The aim of this thesis consists of supplying an efficient tool for decision making support related to water supply technical management. In order to get this target, some developments have been done:

- Definition of a database structure gathering the whole of the necessary data to create the mathematical model of the water distribution network. This database must collect

both cartographic data (such as elevation, roads or parcels) and specific data relating to water supply (consumers and infrastructures).

- Elaboration of a digital terrain model. This model must allow the interpolation of the elevation of every element in the network. In the same way, this interpolation could be applied to the new nodes appeared after the model creation. On the other hand, the model has been completed with an algorithm of tessellation that allows dividing the service area in influence zones of every node in the model.
- Creation of a mathematical model of the network starting from the network data available in the GIS. Since the management tasks in a water supply system are diverse, the model must suit the need it has been created for. So that, the GIS includes a set of routines to simplify the network depending on the use and the level of detail needed.
- The load allocation, this is, the definition of the demand to be assigned to the nodes of the model, depends on the use and the level of detail of the model and the techniques used for model skeletonation. In this case two criteria for load allocation have been proposed. The first criteria responds to the level of detail and purpose of the model. So, there must be defined to kinds of models: strategic and detailed model. Strategic model will be used with average loads while detailed models will work with different situations such as peak demand flows, droughts, faults, etc. The second criteria involves time. The situations may vary from current situation to long term flow estimations. For present day situation, the billing data will be used, but in order to plan the future growth of the network, some tools for estimating future demands have been developed. For projected demands, statistic analysis of demand time series and spatial based regressions have been used.
- Another aim of this PhD Thesis consists of initiating the interoperability among the different geographic information systems. For that, the possibility of sharing information has been taken into account. In order to facilitate the information exchange, a data model has been developed. This data model follows the recommendations made by the Open GIS Consortium. This contribution will allow the use of the tools developed in any system, independently of the used software.
- Lastly, a case study has been included in the Thesis showing the usefulness of applying the methodology proposed to the technical management of a real water supply system.

The main conclusion that can be extracted from this Thesis is that a powerful tool for making decision has been created. A proper use of geographic information system will aid to some decisions related to the technical management of a water supply system. These decisions will be supported by the results from hydraulic simulation made with a mathematical model of the network generated from georeferenced data in a GIS. To get this model a succession of problems were solved, which are described along the chapters of the Thesis.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS.....	3
2. CONTEXTO GENERAL DE LA TESIS.....	4
2.1. TENDENCIAS EN LA GESTIÓN DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA.	4
2.2. EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA.	7
2.3. EL PAPEL DEL SIG EN LA GESTIÓN DE REDES.	8
3. OBJETIVOS DE LA TESIS.....	9
4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA PRESENTADA.	12
5. CONCLUSIÓN.	17
CAPÍTULO 2. APLICACIÓN DE LOS SIG A LA GESTIÓN DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE. ESTADO DEL ARTE	19
1. INTRODUCCIÓN	21
2. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	22
2.1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA.	22
2.2. DEFINICIÓN Y COMPONENTES DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	23
2.3. MODELACIÓN DE LOS DATOS ESPACIALES.....	26
2.3.1. El modelo ráster.	26
2.3.2. El modelo vectorial.....	28
2.3.3. ¿Modelo ráster o vectorial?	30
2.4. MODELACIÓN DE LOS ATRIBUTOS.....	31
2.4.1. Estructura de lista invertida.....	34
2.4.2. Estructura jerárquica.	34
2.4.3. Estructura de red.	35
2.4.4. Estructura relacional.....	36
2.4.5. Estructura orientada a objetos.	37
2.5. INTEGRACIÓN DE LOS DATOS ESPACIALES Y LOS ATRIBUTOS.	39
2.6. HERRAMIENTAS PROPIAS DE UN SIG.....	40
2.6.1. Consultas.....	41
2.6.2. Topologías.....	42

2.6.3. Mapas temáticos.....	43
2.6.4. Modelos digitales del terreno.....	45
2.6.5. Desarrollo de aplicaciones.....	45
3. UTILIZACIÓN DE LOS SIG EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE.....	46
3.1. ESTRUCTURA GENERAL DE LA GESTIÓN DE UN ABASTECIMIENTO APOYADA EN UN SIG.....	46
3.2. APLICACIÓN DE LOS SIG A LA CREACIÓN DE NUEVAS INFRAESTRUCTURAS.....	49
3.2.1. Planificación de un abastecimiento.....	50
3.2.2. Diseño de la red.....	51
3.2.3. Proyecto de la red.....	53
3.3. APLICACIÓN DE LOS SIG EN LA CREACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	55
3.3.1. Utilización del SIG durante la creación del modelo.....	55
3.3.2. Aportación de los SIG al mantenimiento de los modelos matemáticos.....	56
3.4. APLICACIÓN DE LOS SIG A LA OPERACIÓN Y EL CONTROL DE LA RED.....	57
3.4.1. Control de la red.....	58
3.4.2. Gestión de maniobras de cierre parcial.....	60
3.4.3. Cálculo de los indicadores de gestión.....	62
3.4.4. Generación y gestión de sectores en la red.....	63
3.4.5. Control y gestión de pérdidas volumétricas.....	67
3.5. APLICACIÓN DE LOS SIG A LA GESTIÓN DE LAS INFRAESTRUCTURAS EXISTENTES.....	72
3.5.1. Gestión del inventario.....	72
3.5.2. Mantenimiento preventivo.....	74
3.5.3. Mantenimiento correctivo.....	76
3.5.4. Rehabilitación y renovación de la red.....	77
4. CONCLUSIONES.....	79
CAPÍTULO 3. MODELOS DE CÁLCULO UTILIZADOS	81
1. INTRODUCCIÓN.....	83
2. APROXIMACIÓN A LOS MODELOS DIGITALES O MATEMÁTICOS.....	84
2.1. CONCEPTO DE MODELO DIGITAL O MATEMÁTICO.....	84
2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS.....	85
2.2.1. Clasificación en función de la naturaleza del modelo.....	85
2.2.2. Clasificación en función del tratamiento de la variable temporal.....	86
2.2.3. Nivel de detalle y objetivos del modelo.....	87
3. INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO.....	88
3.1. PRINCIPALES ESTRUCTURAS DE DATOS PARA LOS MDT.....	88
3.1.1. Matrices de Altitud.....	89
3.1.2. Estructura de Redes Triangulares Irregulares (TIN).....	90

3.2.	FUENTES DE DATOS EN UN MDT	91
3.2.1.	Puntos de observación regularmente repartidos.	92
3.2.2.	Puntos repartidos de forma irregular.....	92
3.2.3.	Curvas de nivel.....	93
3.3.	ALGORITMO DE TRIANGULACIÓN Y POLIGONIZACIÓN	93
3.3.1.	El mosaico de Dirichlet.	93
3.3.2.	Introducción al algoritmo de Watson para la Triangulación de Delaunay.	95
3.3.3.	Introducción de nuevos puntos.....	97
3.3.4.	Definición de un triángulo.....	99
3.3.5.	Obtención de los polígonos de Voronoi a partir de la triangulación de Delaunay	100
3.4.	ALGORITMOS DE INTERPOLACIÓN.....	102
3.4.1.	Planteamiento de un problema de interpolación espacial.	102
3.4.2.	Interpolación por proximidad	103
3.4.3.	Interpolación lineal	104
3.4.4.	Interpolación mediante superficies de tendencia.....	105
3.4.5.	Interpolación inversa a la distancia.	105
3.4.6.	Interpolación por kriging.	106
3.4.7.	Interpolación por técnicas de elementos finitos.....	110
3.4.8.	Otros métodos de interpolación.....	112
4.	MODELO DE ANÁLISIS HIDRÁULICO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA.....	112
4.1.	CODIFICACIÓN DE LA REALIDAD EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	112
4.2.	INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA DE REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA.	114
4.2.1.	Definiciones básicas en un problema de análisis de redes.....	114
4.2.2.	Definiciones propias de la teoría de grafos o topología.....	118
4.3.	FASES EN LA ELABORACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.....	119
4.3.1.	Recopilación de Información.....	121
4.3.2.	Esqueletización de la Red.....	121
4.3.3.	Asignación de cargas.....	122
4.3.4.	Verificación y calibración del modelo.....	123
4.4.	UTILIZACIÓN DE UN SIG PARA LA SIMPLIFICACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA.	124
4.5.	RESOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES HIDRÁULICAS DE LA RED.	131
4.4.1.	Ecuaciones básicas del flujo en tuberías.....	131
4.4.2.	Resolución de la red por el método del gradiente.....	133
5.	CONCLUSIONES.....	141

CAPÍTULO 4. ASIGNACIÓN DE CARGAS EN UN MODELO MATEMÁTICO	143
1. INTRODUCCIÓN.....	145
2. ANÁLISIS DE CONSUMOS Y DETERMINACIÓN DE CAUDALES MEDIOS.....	147
2.1. OBTENCIÓN DEL CAUDAL MEDIO CORRESPONDIENTE A UN INSTANTE ACTUAL.	149
2.1.1. Consumo registrado y consumo facturado	149
2.1.2. Consumo no registrado	152
2.2. OBTENCIÓN DE UNA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL PROYECTADO.	155
2.2.1. Demandas actuales frente a demandas futuras.....	155
2.2.2. Método para estimar el caudal en una red con ausencia de datos.....	157
3. TÉCNICAS DE ASIGNACIÓN DE CARGAS.....	161
3.1. ASIGNACIÓN DE CONSUMOS UNITARIOS POR CALLE.....	161
3.2. ASIGNACIÓN POR DERIVACIONES DE LÍNEAS Y NUDOS.	162
3.3. ASIGNACIÓN POR MALLAS DEL MODELO.....	163
3.4. ASIGNACIÓN PUNTO A PUNTO.	164
4. ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS PARA DETERMINAR EL CAUDAL PUNTA EN UNA INSTALACIÓN.	166
4.1. INTRODUCCIÓN A LA NATURALEZA ESTADÍSTICA DEL CONSUMO INSTANTÁNEO DE AGUA.	166
4.2. MÉTODOS BASADOS EN LA FORMULACIÓN PROBABILÍSTICA	168
4.2.1. Estudios realizados en Inglaterra por Butler y Graham (1995).....	168
4.2.2. Estudio realizado en España por Arregui (1998)	170
4.3. MÉTODOS EMPÍRICOS UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL PUNTA.	171
4.3.1. Mediciones realizadas por la American Water Works Association (AWWA).....	171
4.3.2. Arizmendi (1991).....	172
4.3.3. Lingereddy et al. (1998)	173
4.3.4. Ayuntamiento de Valencia (1995).....	174
5. MODELO ESTOCÁSTICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL MÁXIMO DE UNA LÍNEA.	175
5.1. APROXIMACIÓN A LA TEORÍA DE LÍNEAS DE ESPERA.	176
5.2. MODELO DE POISSON PARA EL CAUDAL EN UNA TUBERÍA.	179
5.3. DISTRIBUCIÓN DEL CAUDAL CONSUMIDO EN UNA VIVIENDA.	180
5.4. DISTRIBUCIÓN DEL CAUDAL EN UNA CONDUCCIÓN QUE ABASTECE A VARIAS VIVIENDAS SIMULTÁNEAMENTE.....	182
5.5. MODELO PROPUESTO PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS.	187
5.5.1. Distribución del caudal aportado por un aparato.....	188
5.5.2. Determinación del factor de utilización.	189
5.5.3. Modificaciones realizadas para acelerar el cálculo.	190
5.6. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON ESTUDIOS PREVIOS.	192
5.6.1. Comparación con mediciones realizadas.....	192
5.6.2. Comparación con otros métodos empíricos.....	194

5.6.3. Conclusiones.....	196
6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	196
6.1. EFECTO DEL NÚMERO DE VIVIENDAS EN LA CURVA DE CAUDALES ACUMULADOS.	197
6.2. EFECTO DE LA DOTACIÓN MEDIA	198
6.3. EFECTO DE LA TIPOLOGÍA DE LOS APARATOS DE CONSUMO.	202
6.4. CONCLUSIONES EXTRAÍDAS.	205
7. PROCEDIMIENTO PARA LA ASIGNACIÓN DE CARGAS A UN MODELO DE DETALLE.	205
7.1. PLANTEAMIENTO GENERAL.	205
7.2. ORDENACIÓN TOPOLÓGICA DE LA RED.	208
7.3. APLICACIÓN A REDES RAMIFICADAS. CÁLCULO DIRECTO.	212
7.4. APLICACIÓN A REDES MALLADAS. CÁLCULO ITERATIVO.	214
7.4.1. Determinación del número de abonados abastecidos.	215
7.4.2. Cálculo del caudal punta en cada línea.....	216
7.4.3. Determinación de las demandas a cargar en cada nudo.....	218
7.4.4. Ejemplo de cálculo de caudales punta en redes malladas.	219
8. CONCLUSIONES.....	227
CAPÍTULO 5. MODELO DE DATOS	229
1. INTRODUCCIÓN	231
2. FUNDAMENTOS DE LA MODELACIÓN DE DATOS.	232
2.1. INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO DE INTEROPERABILIDAD.	232
2.1. NECESIDAD DE DOCUMENTAR LOS DATOS.	233
2.2. INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN DE DATOS ESPACIALES.	235
2.2.1. Representación de entidades.	236
2.2.2. Representación de relaciones.	237
2.3. CLASES ESPACIALES SIMPLES.	239
3. MODELO DE DATOS PARA EL MODELO DIGITAL DEL TERRENO.....	240
3.1. TOPOLOGÍA DE PUNTOS.....	241
3.2. TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY.....	241
3.3. MOSAICO DE THIESSEN.....	242
4. MODELO DE DATOS PARA LA GESTIÓN DE ABONADOS.....	244
5. MODELO DE DATOS PARA LOS ELEMENTOS DE LA RED.....	249
5.1. ESTRUCTURA GENERAL DE LOS DATOS.....	249
5.2. ENTIDADES TOPOLÓGICAS.	252
5.2.1. Nodo.....	252
5.2.2. Línea.....	253

5.3.	ENTIDADES PUNTUALES.....	253
5.3.1.	Nudos de consumo y conexiones	254
5.3.2.	Tanques o depósitos de nivel variable.....	255
5.3.3.	Depósitos de nivel constante o embalses.....	255
5.4.	ELEMENTOS LINEALES	256
5.5.	ELEMENTOS HIDRÁULICOS LINEALES CON REPRESENTACIÓN GRÁFICA PUNTUAL.....	258
5.5.1.	Tratamiento general.....	258
5.5.2.	Válvulas.....	260
5.5.3.	Bombas.....	262
5.6.	MODELO DE DATOS CONJUNTO.	263
6.	CONCLUSIONES	265
CAPÍTULO 6. CASO DE APLICACIÓN: MODELACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE LA COOPERATIVA VALENCIANA DE EL PLANTÍO Y LA CAÑADA		267
1.	INTRODUCCIÓN.....	269
2.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA RED DE AGUA POTABLE DE EL PLANTÍO Y LA CAÑADA.	270
2.1.	MODO GENERAL DE OPERACIÓN.	270
2.2.	OPERACIÓN DE LA MITAD NORTE DE LA RED.	273
2.3.	OPERACIÓN DE LA MITAD SUR DE LA RED.....	274
2.4.	CARACTERÍSTICAS DE LA FACTURACIÓN.	276
3.	CAPTACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE.	278
3.1.	INTRODUCCIÓN	278
3.2.	DIRECTRICES DE LA DIGITALIZACIÓN.	279
3.3.	FUENTES DE INFORMACIÓN GRÁFICA.	280
3.3.1.	Información correspondiente a los términos municipales de Bétera y La Pobla de Vallbona.	281
3.3.2.	Información correspondiente a los términos municipales de Paterna y San Antonio de Benagéber.....	283
3.3.3.	Tratamiento del fondo cartográfico.....	286
3.4.	INFORMACIÓN DISPONIBLE DE FACTURACIÓN.....	287
4.	INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN EN EL SIG.....	291
4.1.	MODELO DE DATOS.....	291
4.1.1.	Tuberías.....	292
4.1.2.	Pozos.....	293
4.1.3.	Depósitos.	294
4.1.4.	Nudos.....	295
4.1.5.	Estaciones de bombeo.....	296

4.2.	VINCULACIÓN DE LOS DATOS.	297
4.2.1.	Vinculación de los datos de la red.....	297
4.2.2.	Vinculación de los datos de los abonados.	298
4.3.	GENERACIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE LA RED.	299
4.4.	CREACIÓN DEL MDT E INTERPOLACIÓN DE LAS COTAS.	300
5.	DEFINICIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.	302
5.1.	SIMPLIFICACIÓN DEL MODELO.	302
5.2.	ESTUDIO DE CONSUMOS.	303
5.2.1.	Análisis de los consumo.....	303
5.2.2.	Asignación de cargas al modelo.....	304
5.3.	CALIBRACIÓN DEL MODELO.	308
5.3.1.	Mediciones en la red	308
5.3.2.	Ajuste y calibración del modelo.....	312
5.4.	ESCENARIOS SIMULADOS.....	313
5.4.1.	Situación actual.	313
5.4.2.	Estudio de consumos con horizonte en el año 2010.....	315
6.	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS.	318
6.1.	CÁLCULOS Y RESULTADOS.	318
6.2.	ESCENARIO ACTUAL.....	319
6.2.1.	Montesano	319
6.2.2.	Zona Sur Colinas de San Antonio.....	320
6.3.	HORIZONTE AÑO 2010.....	322
6.4.	RESUMEN DE RESULTADOS.....	325
7.	CONCLUSIONES.....	326
 CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS		329
1.	INTRODUCCIÓN.	331
2.	PRINCIPALES APORTACIONES DE LA TESIS.	332
2.1.	APORTACIONES GENERALES EN EL CAMPO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	332
2.1.1.	Elaboración de un Modelo Digital del Terreno (MDT).....	332
2.1.2.	Elaboración de un modelo de datos orientado a objetos para la obtención y almacenamiento del MDT.....	333
2.2.	APORTACIONES ESPECÍFICAS A LA MODELACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE.	334
2.2.1.	Definición de una estructura de datos para la gestión técnica de una red de abastecimiento.	334
2.2.2.	Integración en el SIG de las técnicas de simplificación de modelos.....	334

2.2.3. Desarrollo de un método de asignación de cargas teniendo en cuenta los caudales punta y la probabilidad de ocurrencia de los mismos.	335
2.2.4. Aplicación de todo lo desarrollado a un caso real.	335
3. DESARROLLOS FUTUROS.	336
3.1. INTEGRACIÓN EN UN MISMO SISTEMA DE LAS REDES DE ABASTECIMIENTO Y DE SANEAMIENTO.	336
3.2. EXTENSIÓN DEL MÉTODO DE ASIGNACIÓN DE CARGAS A CONSUMOS NO DOMÉSTICOS.	337
3.3. INCLUSIÓN DE LAS FUGAS EN EL PROCESO DE ASIGNACIÓN DE CARGAS.....	337
3.4. INCLUSIÓN EN EL SIG DE TÉCNICAS DE EXTRACCIÓN NO TRIVIAL DE INFORMACIÓN.	338
ANEXO. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	339

Capítulo 1.

Introducción general

1. Justificación de la Tesis.

“El agua es indispensable para la vida humana porque satisface tanto los placeres como las necesidades de uso diario.” Esta frase, atribuida a Vitrubio (Veltri, 1996), resume la importancia indiscutible del agua en cualquier actividad humana.

La Ley de Aguas recientemente aprobada en España, califica el agua como recurso, particularmente escaso en la España seca y mediterránea. La escasez de este recurso y la consideración integral de los usos, demandan un análisis económico de mayor alcance en la administración y gestión del agua, acorde con el espíritu de la actual Ley de Aguas.

En las modernas técnicas de gestión y explotación de abastecimientos públicos de agua, la preocupación sobre los recursos suministrados a los usuarios debe ser una actitud rutinaria, tanto en los aspectos cuantitativos como cualitativos.

A medida que aumenta el desarrollo del país deben incrementarse los controles y cuidados para la conservación de los bienes y recursos. Sin una vigilancia exhaustiva de la productividad de los recursos disponibles, los servicios de abastecimiento de agua deberán afrontar, tarde o temprano, cuantiosas inversiones en la búsqueda de nuevas fuentes, posiblemente cada vez más alejadas. Se incrementarán también los costes de producción, debido a un mayor desgaste de los equipos electromecánicos. Se incrementará innecesariamente la presión de servicio en cabecera y, finalmente, se perjudicará la imagen pública de la explotación. Así pues, los costes que estos controles suponen, se compensan ampliamente por la progresión geométrica del incremento de riqueza obtenido.

El agua, sujeta al enunciado económico anterior, tiene características diferenciales sobre otros bienes, como son su imprescindibilidad para la vida y también su escasez. Por ello su captación, adecuación, control y consumo, es un problema socioeconómico que supone una importante responsabilidad para los políticos, técnicos y consumidores.

El primer paso para poder efectuar una gestión y control eficientes del agua consiste en disponer de un conocimiento adecuado de cada una de las redes de distribución de agua. Este conocimiento resulta difícilmente alcanzable sin un estudio de la red de distribución de agua potable mediante su análisis y posterior diagnóstico.

Esta necesidad de gestionar de una manera eficiente el agua junto con el continuo desarrollo de la tecnología y, especialmente, la tecnología de la información, sitúan a la presente Tesis en un marco de plena actualidad, además de constituir una demanda de la sociedad a corto plazo.

2. Contexto general de la Tesis.

2.1. Tendencias en la gestión de las redes de distribución de agua.

Como cualquier otro recurso natural, el agua está también sometida a una presión creciente por parte del hombre. De una parte, aumenta la demanda como consecuencia del aumento de la población mundial. Por otra parte, disminuye o se encarece la producción debido a los desarreglos climáticos en forma de sequías e inundaciones y a un progresivo deterioro medioambiental.

Por todo ello, en los últimos tiempos se viene hablando repetidamente de la gestión del ciclo integral o simplemente de la gestión integral del agua (AWWA, 1995). Mitchell (1990) considera que deben tenerse en cuenta tres aspectos en la gestión integral del agua como recurso:

- a) Consideración sistemática de las distintas dimensiones del agua, tanto el agua superficial como el agua subterránea y teniendo en cuenta tanto cantidad como calidad.
- b) Implicaciones que tiene el hecho de que el agua, además de ser considerada como un sistema en sí mismo, también es un componente que interactúa con otros sistemas.
- c) Interacciones entre la gestión del agua, el entorno social y el desarrollo económico de una región.

Una red de distribución de agua potable es un claro ejemplo de estos aspectos. La producción puede realizarse a partir de pozos (aguas subterráneas) o ríos, lagos o embalses (aguas superficiales). Además, es creciente la preocupación no sólo por la cantidad (o escasez del agua) sino también de la calidad de ésta tanto en la captación como en la distribución. Por último, una empresa de distribución de agua debe tener en cuenta los aspectos sociales y económicos de su gestión.

A pequeña escala, en la gestión de un abastecimiento intervienen una gran cantidad de variables que deben ser entendidas e interpretadas utilizando en muchas ocasiones modelos de simulación como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones.

Entre otros motivos, la variabilidad de la cantidad de agua disponible como recurso, tanto en el espacio como en el tiempo, así como la evolución (sino revolución) de la programación hacen que sean muy pocos los modelos de cálculo que sean aplicables a la gestión integral del agua. Como se verá, junto con la gestión espacial de los datos, una de las principales aportaciones de esta Tesis está referida al desigual reparto del consumo de agua a lo largo del tiempo y del espacio.

Tradicionalmente, la gestión técnica de una red se ha limitado tradicionalmente a un control patrimonial de la misma, incluyendo la programación de tareas de mantenimiento correctivo y la inclusión de nuevas conducciones. Esta forma de control de la red se ha estado llevando habitualmente a través de fichas, croquis o planos

cartográficos realizados manualmente. Este tipo de gestión lleva consigo una serie de problemas que se pueden resumir en los siguientes (Zaragozá, 1997):

- Acceso a una gran cantidad de planos a diferentes escalas.
- Actualización (o más bien falta de actualización en muchos casos) de la información de dichos planos.
- Costosa gestión patrimonial de la red.
- Escaso control de la red en general.
- Poca efectividad de las consultas sobre los elementos de la red.
- Dificil integración de esta información con los programas informáticos de simulación.

La aplicación de los **Sistemas de Información Geográfica (SIG)** ha permitido una base inteligente para la gestión de todos estos datos. A partir de su implantación se ha podido profundizar en otras prioridades de la gestión técnica. Así, se ha podido incorporar la exportación de datos a los modelos de simulación, la integración de las mediciones para el control de fugas, la gestión de los abonados, los programas de mantenimiento preventivo, etc. En todos estos casos, la elaboración de un modelo matemático de la red constituye un elemento clave para el éxito de la gestión. Por ello, hablar de mejoras en la gestión técnica de las redes significa, entre otras cosas, hablar de mejora en la modelación de las mismas.

La elaboración de un modelo matemático es un ejemplo de problema en el cual la solución no es única y no viene dada exclusivamente por un único planteamiento matemático, sino que incorpora decisiones basadas en criterios espaciales o en reglas dependientes de los datos de partida o de experiencias previas. Además, en la generación de un modelo intervienen gran cantidad de datos correspondientes a distintos aspectos del funcionamiento de la red y cuya única relación suele ser la posición geográfica. Así, por ejemplo, se necesitarían:

- Información sobre los abonados, principalmente volúmenes consumidos, aunque otras informaciones como el tipo o el patrón diario de consumo también resultan de gran utilidad.
- Descripción física de las infraestructuras. Son los datos principales, los datos relativos a las cotas de cada punto de la red, los diámetros de las conducciones, los caudales de las bombas, etc.
- Mediciones efectuadas. Resultan una pieza clave para la validación y calibración del modelo.
- Localización geográfica de abonados, infraestructuras y ubicación de los puntos de medición. Esta ubicación no es sólo geográfica, es decir basada en unas coordenadas, sino también ha de ser topológica, esto es, debe conocerse la

relación de conectividad que hay entre los diferentes elementos de la red así como la relación entre estos elementos y los abonados o los puntos de medición.

Resulta evidente que, con tal cantidad de información y el papel protagonista que juega la componente espacial (geográfica y topológica) de la misma, los sistemas de información geográfica pueden y deben jugar un papel importante en la generación de modelos matemáticos de las redes y, por consiguiente, en la mejora de la gestión técnica de los abastecimientos.

La gestión técnica de un abastecimiento comprende el tratamiento de toda la información relacionada con la red de distribución, desde los puntos de producción hasta las acometidas, y también el seguimiento de todos los elementos de la red a lo largo de toda su vida útil. Entre las tareas específicas de la gestión técnica destacan las siguientes (Vela et al., 1996):

- Gestionar toda la información correspondiente a las infraestructuras de la red de distribución de agua.
- Optimizar la operación y explotación del sistema.
- Realizar una política adecuada de mantenimiento y rehabilitación de las infraestructuras.
- Realizar la planificación de nuevas infraestructuras.
- Automatizar la operación normal de la red.
- Comprobar que se verifican unos niveles de calidad en el servicio mínimos en términos de presión de suministro y calidad del agua.

Para la primera tarea, la utilidad del SIG resulta incuestionable. Una red de distribución de agua tiene como principal característica la dispersión espacial de sus infraestructuras. En este sentido, un sistema de información especialmente diseñado para manejar datos cuya característica principal es su ubicación espacial sin duda constituye el mejor modo de gestionar este tipo de sistemas.

En cuanto al resto de tareas, todas se pueden apoyar en mayor o menor medida en herramientas de simulación que ayuden al gestor en la toma de decisiones. En el caso de las redes de distribución de agua, estas herramientas son los modelos de simulación hidráulica. Para su utilización es necesario realizar previamente una abstracción de la red hasta reducirlo a una serie de objetos cuyo comportamiento represente a aquella. Esta es la esencia de un modelo matemático de la red de distribución.

Por tanto, la clave en la utilización de un SIG para la gestión técnica de redes está, de una parte, en una óptima definición de la estructura de la base de datos que permita una buena gestión del inventario de la propia red. Por otra parte, el sistema debe incorporar la

posibilidad de crear un modelo matemático de la red que atienda al uso posterior que se va a hacer de él.

2.2. Evolución de los modelos de simulación hidráulica.

Abbott et al. (1991) describen la evolución de los modelos de simulación hidráulica por ordenador y los clasifican en *generaciones*. Así, según estos autores, con la aparición de los primeros ordenadores a mediados del siglo pasado surgió la posibilidad de adaptar las operaciones matemáticas que hasta ese momento eran realizados por los ingenieros. Surge aquí la **primera generación** de modelos de simulación. Esta generación, que llegó hasta principios de la década de 1960, se caracterizó por la adaptación (casi se podría decir que traducción) de los métodos analíticos basados en funciones algebraicas.

Conforme se popularizaba el uso de los ordenadores, surgieron métodos numéricos como las diferencias finitas o los elementos finitos, claramente dirigidos a su uso mediante ordenadores. Este cambio en el planteamiento de las ecuaciones, más orientado a la máquina, constituye la **segunda generación** de modelos hidráulicos de cálculo y se extendió durante toda la década de 1960. Esta segunda generación traducía las ecuaciones diferenciales (perfectamente interpretables por las personas) en series de ecuaciones algebraicas fácilmente interpretables por el ordenador.

En los modelos de la segunda generación, los datos de la red o del sistema que se debía calcular debían ser introducidos teniendo en cuenta el algoritmo de cálculo utilizado por el programa, de tal manera que la entrada de datos era tediosa y debía ser realizada por personal entrenado en hidráulica computacional. Surge la necesidad de desarrollar técnicas de pretratamiento de los datos que permitan una introducción menos específica y más general de los datos de la red. Aparece la **tercera generación** de modelos hidráulicos, caracterizada por una modelación de la red más cercana a la realidad que percibe el hombre y que posteriormente el modelo interpretará. Esta generación se extenderá a lo largo de la década siguiente. Hasta aquí, los usuarios de tales modelos debían ser auténticos expertos en hidráulica computacional.

La aparición de los modelos de **cuarta generación** alrededor del año 1985 y la incorporación a los mismos de las interfaces de usuario amigables permitieron que pudiesen ser utilizados por profesionales de la hidráulica aunque no fuesen expertos. Surge entonces el término *Hidroinformática* (del inglés *Hydroinformatics*, propuesto por Abbott en 1991). Este autor define la hidroinformática como “*el estudio de los flujos de información relativos a las corrientes de agua y todo lo que ésta transporta, junto con las interacciones con entorno tanto naturales como artificiales*”.

En toda la evolución de los modelos de cálculo se observa una tendencia a separar el funcionamiento interno del modelo y la introducción de los datos. Así, la tendencia es facilitar la entrada de estos datos, haciendo que se acerquen más a la realidad del objeto que se pretende modelar. Abbott et al (2001) publican una estadística que pone de

manifiesto este hecho. En 1985, el 80% de la inversión en modelación hidráulica estaba asociada al desarrollo de herramientas numéricas de cálculo. Sin embargo, en 1998, el 70% de dicha inversión se estaba empleando en la mejora de las herramientas de intercambio y transmisión del conocimiento, esto es, en preprocesamiento y postprocesamiento de la información.

En este contexto surge a finales de los años 1990 la **quinta generación** de modelos hidráulicos de simulación. En ella se integran conceptos propios de la inteligencia artificial que permiten extraer conclusiones de los resultados de la simulación e incluso proponer soluciones a dichos problemas. También en esta quinta generación aparecen conceptos tales como programación orientada a objetos, encapsulamiento, interoperabilidad o desarrollo de sistemas abiertos. Todos estos conceptos están relacionados en mayor o menor medida con la necesidad de compartir e intercambiar tanto los datos como los resultados de la simulación.

Así, Ejeta y Mays (2002) incluyen los modelos que integran los datos de un SIG con el análisis hidráulico y el posterior apoyo a la toma de decisiones dentro de los modelos pertenecientes a esta quinta generación.

En la Tesis que se presenta a continuación se desarrolla una metodología para la generación de modelos matemáticos de redes de distribución de agua y su posterior simulación desde el propio sistema de información geográfica. Como se ha comentado en párrafos anteriores, se prestará mayor atención al intercambio de los datos entre el gestor de bases de datos y el programa de simulación, aunque sin descuidar algunas tratamientos matemáticos necesarios para adaptar los datos a las necesidades del modelo.

2.3. El papel del SIG en la gestión de redes.

Los paquetes más utilizados para el desarrollo de proyectos SIG se pueden utilizar bien para la presentación de resultados, bien para interactuar con otros módulos de cálculo. Maksimovic et al. (1994) discuten en un congreso celebrado en Delft (Holanda) el uso que se ha hecho de los SIG desde su aparición en el mercado del agua durante la década de los 80. Aparecen dos alternativas de uso de los SIG. La primera como herramienta de presentación para mostrar resultados de forma que sea la estética el criterio predominante. La otra alternativa consiste en utilizar el SIG como un sistema gestor de bases de datos que incluye la posibilidad de incorporar índices geográficos, es decir, que combina las consultas aritméticas y lógicas tradicionales con consultas espaciales.

Tanto los autores de dicha discusión como el de la presente Tesis han optado por entender los SIG como una herramienta útil para la gestión técnica de los abastecimientos a través de su capacidad para ayudar a la elaboración de modelos matemáticos de la red de distribución.

Nadie discute hoy en día la utilidad de los SIG en la gestión diaria de un abastecimiento de agua potable. Sin embargo, muchas de las aplicaciones de los SIG se

limitan al ámbito de la gestión de abonados y facturaciones o al ámbito de la gestión administrativa. La utilización de los SIG para la gestión técnica de las redes utilizando la simulación hidráulica como herramienta para la toma de decisiones es todavía un campo en el que se debe profundizar. Si bien existen algunos sistemas que incluyen esta posibilidad, la mayoría de ellos concentran los esfuerzos en la propia integración del programa hidráulico de simulación con los datos del SIG, dejando como tarea del usuario la simplificación de la red o, de no existir ésta, la interpretación de los resultados. Es el caso de DC Water Design Extension (Macke, 2001) y MIKE Net (DHI, 2000) basados en el paquete ArcView, o de H2ONET (Montgomery Watson, 1996) y WaterCAD (Walski et al., 2001) que utilizan AutoCAD como soporte.

En todos los casos, la reducción de los datos del SIG a un modelo matemático de la red corresponde al usuario, si bien alguno de ellos incluye algunas funciones básicas de simplificación de la red. En ningún caso se incluye la conversión de las facturaciones de los abonados en demandas, las cuales deben ser definidas por el propio usuario.

3. Objetivos de la Tesis.

De todo lo expuesto hasta ahora se concluye que la gestión técnica busca cumplir unos objetivos que precisan en unos casos una visión general de la red y en otros un conocimiento en detalle de la misma. Así, por ejemplo, no será el mismo problema estudiar el efecto que una futura ampliación de la red tiene sobre las estaciones de bombeo que comprobar las condiciones de suministro en una acometida durante el día de mayor consumo.

Por tanto, sería recomendable que durante la elaboración del modelo sea tenida en cuenta la finalidad para la cual se está elaborando el mismo. Esto presenta una disyuntiva: ¿se genera un único modelo que sea polivalente y se utiliza para todas las aplicaciones o se genera uno cada vez que sea necesario apoyar una decisión en los resultados de una simulación hidráulica de la red? La segunda alternativa presenta como principal ventaja que los datos de partida para la elaboración del modelo son los que están disponibles en el abastecimiento en ese momento. Así, si se ha realizado un esfuerzo en mantener actualizadas las bases de datos, el modelo reflejará el estado actual de la red en el momento en que ha sido necesaria la elaboración del modelo. Puesto que un SIG es ante todo un sistema de gestión de bases de datos, su concurso en la gestión de un abastecimiento y, por tanto, en la elaboración de modelos, es fundamental.

Esta diferencia debe ser contemplada cuando se elabora un modelo matemático de la red, tanto al fijar el nivel de detalle de éste como al efectuar la asignación de cargas al mismo. De todo esto se deduce cuál es el objetivo principal de la presente Tesis. Se pretende proporcionar una herramienta eficaz para el apoyo en la toma de decisiones relativas a la gestión técnica de los abastecimientos. La pieza clave de esta herramienta es

la elaboración de un modelo matemático de la red a partir de la información contenida en el SIG. Para ello, se han definido los siguientes objetivos específicos:

- a) Definición de una estructura de base de datos que recoja la totalidad de los datos necesarios para la elaboración del modelo matemático de una red de abastecimiento de agua potable. Esta base de datos recogerá tanto los datos puramente cartográficos (como altimetría, viario o parcelario) como los datos más específicos de una red de abastecimiento de agua.

La base de datos deberá contemplar la relación espacial que existe entre los distintos agentes de la red: los abonados, los elementos de la red y los aparatos de medida. De la misma forma, debe contemplar la vinculación de la componente espacial y temática de cada uno de los agentes anteriores.

La principal característica de esta base de datos está en que incluye la estructura necesaria para almacenar el modelo matemático antes incluso de que se haya planteado la necesidad de su creación.

- b) Además de los datos anteriores, el sistema debe permitir obtener la información necesaria de la base cartográfica disponible e integrarla en la base de datos específica del servicio. Para ello, será necesaria la elaboración de un modelo digital del terreno (MDT).

Este MDT debe permitir, por una parte, la interpolación de las cotas de cada uno de los elementos de la red, en el caso de que se desconozca este dato. Igualmente, esta interpolación se podrá utilizar para los nudos que resulten de la creación del modelo matemático. Por ello, se revisarán las distintas estructuras de MDT descritas en la bibliografía así como los distintos métodos de interpolación de los valores representados. Junto a esto, se completará el MDT desarrollado con un algoritmo de teselación que permita dividir el área de servicio en zonas de influencia de cada uno de los nudos.

- c) Realizar una modelación de la red a partir de los datos de la misma disponibles en el SIG. Puesto que, como se ha visto, las tareas de la gestión técnica de un abastecimiento son diversas, el modelo matemático debe responder a la necesidad para la cual se ha creado. Por ello, en función del uso que se vaya a hacer del modelo y el nivel de detalle necesario en éste, el SIG incorporará una serie de rutinas de simplificación de la red.

La principal característica en la elaboración del modelo estará en que será el propio SIG el que lo genere a partir de unas consignas preestablecidas de antemano. Durante la elaboración del modelo se tendrá presente la máxima de que *“siempre es mejor añadir una tubería de más que eliminar una que pueda resultar importante en el modelo”* (López et al., 1996).

- d) De la misma forma que el nivel de detalle del modelo depende del uso que se va a hacer de él, la asignación de cargas o consumos al modelo también debe hacerse según

el uso que se vaya a hacer del modelo. En concreto, se han de contemplar dos criterios de asignación.

El primer criterio ha de responder al nivel de detalle del modelo y a la finalidad del mismo. Así, habrá que distinguir entre los modelos estratégicos de operación y los modelos de detalle. En los primeros, se trabajará con caudales medios mientras que en los segundos se trabajará con caudales correspondientes escenarios excepcionales de funcionamiento de la red (caudales punta, sequía, averías, etc.).

El segundo criterio será temporal. Debe contemplarse la posibilidad de asignar consumos correspondientes a situaciones actuales, para lo cual se dispondrá de la información de las facturaciones. Sin embargo, sobre todo a efectos de planificación y estudio de ampliaciones será necesario integrar sistemas de predicción de demandas basados en extrapolación de los datos ya existentes o incluso predicción de demandas basada en la definición de usos del suelo.

- e) En cualquier caso y relacionado con el objetivo anterior, si se opta por el estudio de las situaciones extremas o caudales proyectados, debe tenerse en cuenta la incertidumbre en forma de probabilidad de ocurrencia. Por ello, se elaborará un procedimiento para la determinación de caudales máximos a partir de estudios estadísticos en el cual se asumirá que un consumo no es sino una variable estadística consistente en un pulso rectangular con un cierto caudal (intensidad), que se prolonga durante un cierto tiempo (duración) y que se repite un determinado número de veces en un período de tiempo (frecuencia). La determinación de este caudal punta ha de ser válido, obviamente, tanto para el estudio de redes ramificadas como para el estudio de redes malladas.
- f) Otro objetivo perseguido con esta Tesis es el de dar un primer paso hacia la interoperabilidad de los sistemas de información geográfica, entendiéndose por ésta la posibilidad de desarrollar herramientas que compartan datos y resultados de una manera independiente del entorno de trabajo (hardware, software, sistema operativo, etc...).

La principal implicación de esto es que se ha de tener en cuenta la posibilidad de compartir la información integrada en el SIG. Por ello, se elaborará un modelo de datos compatible con los estándares proporcionados por el *Open GIS Consortium* que permita implantar todo lo desarrollado en cualquier sistema, independientemente de la plataforma elegida.

La solución adoptada para el problema de la integración de los distintos componentes de un SIG se basará en la abstracción y representación de los mismos utilizando el estándar UML (*Unified Modeling Language*) como forma de intercambio de datos y de metadatos.

- g) Se ha considerado importante incluir en la Tesis una aplicación práctica de todo lo expuesto de tal forma que quede patente la utilidad de la metodología desarrollada

cuando se traslada a un caso real. El contenido mínimo de esta aplicación debe incluir la creación de la estructura de la base de datos, la elaboración de un modelo matemático y la asignación de cargas en escenarios presentes y futuros al mismo.

En este caso se aplicará todo el desarrollo al estudio de la red de abastecimiento de la Cooperativa Valenciana de El Plantío y La Cañada.

4. Estructura de la memoria presentada.

La Tesis que se presenta se ha estructurado de forma casi cronológica.

El **Capítulo 2** hace un repaso de cuál es el estado del arte de la aplicación de los sistemas de información geográfica (SIG) a la gestión de los abastecimientos de agua potable. En éste se comienza describiendo los componentes principales de un SIG así como la evolución histórica de cada uno de ellos y, cómo no, las tendencias actuales y en un futuro a corto plazo de los mismos. Puesto que la parte principal de un SIG es el sistema gestor de bases de datos espaciales, se ha prestado especial atención a la codificación de los datos tanto espaciales como alfanuméricos. También se han descrito con mayor detalle aquellas herramientas propias de un SIG que pueden resultar útiles durante su aplicación a las redes de transporte. Sin duda, de estas herramientas han resultado decisivas en este trabajo la gestión de las topologías, tanto de red como de polígonos y los modelos digitales del terreno.

Junto con este repaso a la situación actual de los SIG, se ha prestado mayor atención al caso concreto de la aplicación de éstos en el ámbito de los abastecimientos urbanos. Así, se ha descrito cuál es la estructura general de la implantación de un SIG en un abastecimiento, distinguiendo entre la gestión de los abonados, la gestión administrativa y la gestión técnica. Puesto que ésta última es representa uno de los objetivos de la Tesis, se ha prestado especial atención a cuáles son los objetivos de la gestión técnica de un abastecimiento y, sobre todo, se ha hecho especial hincapié en la necesidad e importancia de disponer de un modelo matemático fiable como herramienta de apoyo a la toma de decisiones propias de esta gestión técnica.

El **Capítulo 3** está dedicado a la descripción de los modelos de cálculo utilizados. Al fin y al cabo, un SIG pretende representar en el ordenador una realidad mediante una codificación basada en códigos, bien sean números, letras, formas o colores. Por tanto, antes de entrar en la descripción de los métodos de cálculo empleados para interpretar esa realidad, conviene estudiar cómo se ha codificado la misma. En este capítulo se describen los dos modelos utilizados.

El primero de ellos es el que se ha utilizado para representar el terreno y, más concretamente, su relieve. Se trata del modelo digital del terreno (MDT). En una red de abastecimiento, la presión es un parámetro muy importante y está íntimamente ligada a la elevación del punto que se esté considerando. Por tanto, una de las aportaciones que se han

realizado en esta Tesis es el desarrollo de un MDT que permita conocer la cota en cualquier punto del espacio a partir de una muestra de puntos de cota conocida. Se ha desarrollado un MDT vectorial basado en la triangulación de Delaunay y se ha optimizado para mejorar la velocidad de creación e interpolación de cotas del mismo gracias a una programación orientada a objetos. Se ha utilizado el algoritmo conocido como *algoritmo de Watson* o algoritmo de *división y conquista*. Entre las mejoras realizadas para acelerar el proceso de triangulación destacan la ordenación de los puntos a insertar según una de sus coordenadas. La mejora implica un ahorro en el tiempo de cálculo en las dos fases. Por una parte, durante el propio proceso de ordenación de los puntos, al utilizar el conocido algoritmo recursivo *Quick Sort* (Sedgewick, 1995). Además de la reducción en el tiempo de cálculo que supone la utilización de este algoritmo, esta ordenación permite descartar un triángulo ya creado una vez que la coordenada del punto con el que se está trabajado queda más allá del alcance del propio triángulo, definido dicho alcance como el círculo circunscrito al mismo.

Además, en el capítulo se hace un repaso de los principales métodos de interpolación espacial existentes para este tipo de problemas, resaltándose las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. Como parte final se ha completado el MDT con una estructura dual de *teselación* o poligonización del espacio, que posteriormente resultará útil para la asignación de cargas de caudal al modelo matemático de una red de distribución de agua en la que se desconozcan las facturaciones de los abonados. Este caso es muy habitual cuando se hacen predicciones a medio plazo basadas en planes de ordenación urbana.

Junto al MDT también se describe en este tercer capítulo los fundamentos de la modelación de redes. Se ha comenzado con la simplificación o esqueletización de los modelos. La simplificación de los modelos es una de las fases durante la elaboración de los mismos en las que tanto los datos como la experiencia de quien la hace resultan más decisivos. Por ello el trabajo en un entorno SIG es el óptimo para que esta tarea se realice con éxito. Se han revisado las distintas técnicas de simplificación de redes y cómo se han integrado éstas en el SIG de forma que el proceso de esqueletización sea automático una vez se dan las consignas oportunas. El método de simplificación queda de hecho abierto a la corrección de las consignas por parte del propio SIG en base a los resultados obtenidos de la simulación. En cierto modo, se deja abierta la posibilidad de crear un sistema experto de simplificación de modelos.

El capítulo se cierra con una descripción del método de resolución de las ecuaciones hidráulicas de la red empleado. En este caso se ha empleado el algoritmo del gradiente, que es el que incorpora el programa de cálculo EPANET (Rossman, 1993). Se hace una descripción superficial de dicho algoritmo y se centra dicha descripción en el tratamiento que se hace de cada uno de los elementos de la red como base para la futura codificación en el SIG de los mismos elementos.

El **Capítulo 4** es el capítulo central de la Tesis. En él se describe la conexión que se hace de todos los datos consignados en el SIG. El tema central del capítulo es la asignación de cargas a un modelo matemático. Tras hacer un repaso a las distintas técnicas existentes para la asignación de cargas a un modelo, en este capítulo se ha presentado una metodología para realizar la asignación de cargas en un modelo matemático utilizando la capacidad de manejo de datos de un SIG.

Un sistema de gestión de los abonados permite asignar cargas a los modelos matemáticos a partir de las facturaciones de los mismos y en registros históricos de volúmenes inyectados que permiten determinar una estimación del rendimiento hidráulico de la red. Sin embargo, esta forma de asignación de cargas a modelos presenta inconvenientes cuando se realizan simulaciones por escenarios en modelos de detalle, es decir, cuando se intentan representar instantes concretos de funcionamiento de la red. Este tipo de simulaciones son habituales para el estudio de presiones con caudales extremos o para predicción de comportamiento de la red en escenarios situados en un futuro a corto medio plazo.

Para el supuesto en que sea preciso trabajar con caudales proyectados para un futuro a corto o medio plazo, se ha propuesto un método basado en el SIG para la estimación de los caudales en ese escenario.

Puesto que uno de los objetivos de la Tesis consiste en realizar una modelación de la red a partir de los datos de la misma disponibles en el SIG, una de las dificultades que entraña este objetivo es la necesidad de contemplar la posibilidad de trabajar con redes con un nivel de detalle superior al recomendado para modelos matemáticos. Así, por ejemplo, Jankovic-Nišić et al. (2001) fijan en 250 abonados el tamaño mínimo de un sector para poder utilizar las mediciones de caudal de éste en un proceso de calibración. Esto, planteado de manera inversa, implica que para tamaños menores las intermitencias de los consumos individuales empiezan a cobrar importancia. Sin embargo, la *Safe Drinking Water Act* incluye la calidad en el punto de consumo (es decir, en la acometida) como uno de los indicadores de calidad que el gestor debe controlar. Esto obliga a trabajar con modelos con un gran nivel de detalle en los cuales el comportamiento individual de cada abonado puede llegar a ser importante en el funcionamiento de partes de la red situadas en sus extremos. En este sentido, se ha intentado paliar este hecho considerando el comportamiento individual de cada abonado en aquellos casos en que sea necesario observar el funcionamiento de la red puntos extremos.

En concreto, se han presentado dos aportaciones dirigidas a incluir el concepto de probabilidad de ocurrencia de un cierto caudal en una línea durante la simulación hidráulica. A partir del estudio de una red ramificada, se he descrito una metodología para determinar el caudal punta en una tubería a partir de una distribución estadística del caudal basada en la intensidad, la duración y la frecuencia de los consumos individuales de cada abonado que se abastece de la propia tubería.

Por último, se ha extendido este método al caso del estudio de una red mallada correspondiente a un modelo de detalle mediante un algoritmo iterativo integrado en el SIG.

En el **Capítulo 5** se presenta el modelo de datos que describe la estructura de la base de datos empleada. Otro de los objetivos de la Tesis es posibilitar el acceso a los datos desde distintas herramientas. Como se ha comentado, la gestión del agua debe tender a una gestión integral y para ello, los datos deben ser compartidos por las distintas herramientas y los distintos servicios responsables de su gestión. Esta es la base de la interoperabilidad en los SIG. Sin embargo, compartir datos entre distintas herramientas presenta problemas en tres niveles básicos (Visser et al., 2002): sintáctico, estructural y semántico. La integración sintáctica hace referencia a la necesidad de comunicar no sólo la información compartida, sino también el tipo de dato (binario, entero, real, texto, etc.). La integración estructural consiste en transmitir cómo se han codificado los datos, es decir, cuál es el formato digital de los mismos. Por último, la integración semántica es, con diferencia, la más difícil de conseguir. Consiste en homogeneizar la interpretación que cada herramienta hace de un mismo objeto real. Un ejemplo puede ser la forma diferente de interpretar una tubería enterrada con las mismas características físicas según sea utilizada para saneamiento o para abastecimiento. Tanto el *Open GIS Consortium* (OGC, 1999) como el comité 211 de la *International Standard Organisation* (ISO, 2000) están realizando una importante labor en la normalización de la transmisión de los datos georreferenciados a través de los *metadatos* o datos relativos a los datos.

Por todo ello, junto con la metodología propuesta para la modelación de redes de distribución de agua apoyada en el SIG se ha presentado un modelo de datos que ha de servir para organizar racionalmente toda la información necesaria para la gestión de la red. La elaboración de una base de datos orientada a objetos junto con la integración de las rutinas de cálculo en librerías de vínculos dinámicas (o DLL en términos de programación) permite la utilización de estas estructuras de datos en cualquier entorno, independientemente del programa gestor de bases de datos utilizado.

En primer lugar se ha presentado una estructura que completa el algoritmo presentado para la creación de un modelo digital del terreno basado en una red de triángulos irregulares. Así mismo, se ha incluido la posibilidad de extraer de dicho MDT el mosaico de Thiessen, utilizado para estimar caudales proyectados cuando se desconocen los datos de facturación.

A continuación se ha expuesto la estructura de la base de datos de abonados, incluyendo en la misma los métodos necesarios para utilizarla con el fin de realizar la asignación de cargas al modelo.

Por último, se ha presentado una completa estructura de datos para la creación del propio modelo matemático y su posterior utilización con un programa de cálculo hidráulico. La estructura de datos presentada es altamente flexible y permite el cálculo

hidráulico en régimen permanente y cuasi-permanente (simulación en período extendido). Además de estos cálculos, que podrían calificarse de tradicionales en los modelos matemáticos de redes, el modelo de datos ha sido completado para contemplar otras utilizaciones de los modelos matemáticos de redes, como la comprobación del funcionamiento con caudales punta o con caudales mínimos nocturnos.

Para concluir la Tesis, se ha incluido en el **Capítulo 6** una aplicación directa de todo lo expuesto a un caso concreto. Se trata de la modelación de la red de agua potable gestionada por la Cooperativa Valenciana de El Plantío y La Cañada. En este capítulo se han descrito todos los pasos realizados para la implantación de la metodología propuesta en la Tesis.

El estudio presentado se inició con un análisis preliminar de la información disponible. Una vez finalizado este análisis, se elaboró un protocolo de digitalización y tratamiento de la información previa disponible en el que ya se ha tenido en cuenta el uso futuro que se hará de esta información. De esta forma, el ejemplo presentado ha permitido desarrollar todo lo expuesto de una forma eficaz, además de servir para generar el modelo matemático de la red de una forma automatizada desde el propio SIG. De hecho, la estructura de la base de datos donde se acumulan la información relativa al modelo fue creada de forma previa a la creación del propio modelo y ya aparecía en el mencionado protocolo.

La fase de captación y organización de los datos ha recibido más atención en este capítulo ya que la Tesis versa sobre la utilización de los SIG en la gestión técnica de los abastecimientos. Sin embargo, no se ha descuidado la descripción del proceso de conexión de los datos del SIG con el programa de simulación hidráulica. De la simulación y sus resultados destaca el escenario creado para simular la posible funcionamiento de la red en el año 2010. Para esta simulación ha sido necesario determinar unos caudales proyectados en dicho año que han combinado por un lado los métodos típicos de extrapolación de caudales basados en el análisis de series temporales con la determinación de caudales proyectados basados en usos del suelo y desigual reparto espacial de caudales.

En resumen, si bien este caso de estudio presentado no recoge la totalidad de las propuestas presentadas en la Tesis, sí constituye un buen ejemplo de lo que se puede conseguir con una adecuada implantación de un SIG en un abastecimiento de pequeño tamaño.

El **Capítulo 7** presenta de manera resumida cuáles han sido las principales aportaciones de esta Tesis en la aplicación de los SIG en la gestión técnica de las redes de distribución de agua. Además, también se presentan algunas de las líneas de investigación que quedan abiertas en este tema para futuros desarrollos. La Tesis se cierra con una recopilación de todas las referencias bibliográficas utilizadas en la redacción de la misma y que quedan recogidas en el **Capítulo 8**.

5. Conclusión.

Tras todo lo comentado en este capítulo, se deduce que el contenido de la Tesis presentada está totalmente justificado desde el punto de vista de las necesidades de los servicios de abastecimiento de agua. Responde igualmente a una necesidad real de nuestra sociedad.

Capítulo 2.

Aplicación de los SIG a la gestión de los sistemas de distribución de agua potable. Estado del arte.

1. Introducción

La propia idiosincrasia de los abastecimientos españoles ha hecho que el estado general de estos se pueda calificar de mejorable. Al menos, así se recoge en Cabrera y García-Serra (1997), donde además se destacan los principales problemas que presentan en general los abastecimientos de agua potable en España. Estos problemas son:

1. Descontrol por parte de la Administración, al no existir normativa o directrices sobre funcionamiento de los abastecimientos.
2. Niveles inaceptables de agua no contabilizada en general y de fugas en la red en particular. Estos niveles son muy superiores a los de otros países europeos (Vela et al., 1994).
3. Existencia de aljibes domiciliarios que constituyen un serio riesgo para la salubridad del agua destinada al consumo humano (Martínez Solano et al., 2001).
4. A pesar de la escasez del agua en España, su precio sigue siendo político.
5. La política de financiación pública de los abastecimientos ha sido deficiente.
6. El control de la calidad del agua en el punto de consumo constituye uno de los puntos débiles de los abastecimientos.
7. Existe en la actualidad escasez de planes concretos de renovación y rehabilitación de la red, tendiéndose a la improvisación.

Si se presta atención a un entorno geográfico más amplio, Tübke (2001) asegura igualmente que una de las principales fuentes de creación de valor en los países candidatos a ingresar en la Unión Europea es el sector de las infraestructuras urbanas (agua, gas y electricidad). En estos países, los precios de la energía permanecen subvencionados lo que ha conducido a una mala gestión energética de este tipo de infraestructuras. Esto hace que, de cara a su futura integración en la U.E., también tengan que realizar un esfuerzo importante en la modernización de estos servicios estratégicos.

Todos estos hechos hacen que sea necesaria una modernización de los abastecimientos, en especial aquellos de pequeño y mediano tamaño, y una de las principales formas de modernización es establecer un sistema de gestión integral del abastecimiento basado en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

En este capítulo se revisará la definición de lo que es un SIG, destacando aquellas funcionalidades del mismo que posteriormente serán de utilidad para la aplicación de aquél en la gestión de los abastecimientos. Así, además de la definición, se repasará su historia y se verán las distintas formas de almacenamiento de los datos, tanto geográficos como alfanuméricos, y las principales herramientas que serán necesarias en un SIG para su aplicación a la gestión de los abastecimientos. Sin embargo, no se pretende ser exhaustivo en la descripción de los componentes de un SIG, por lo que para una descripción más detallada de éste se recomienda consultar bibliografía específica, en concreto, Bernhardsen (1992). Se repasará también las últimas tendencias en el desarrollo de este tipo de sistemas de gestión de datos espaciales.

A continuación, se hace una revisión del estado del arte en la gestión de los abastecimientos urbanos de agua potable, resaltando los puntos en los que un SIG puede ayudar a esta gestión. Así, se hace una distinción entre la gestión de abonados (o atención al cliente), encargada de la facturación, cobro y recepción de reclamaciones; la gestión administrativa, más relacionada con lo que sería la gestión interna de cualquier empresa (básicamente, administración de recursos humanos y económicos); y, por último, gestión técnica, encargada de garantizar el correcto funcionamiento de la red, tanto desde un punto de vista estructural (estado de la red) como hidráulico (garantía de unos niveles de calidad del servicio adecuados). Puesto que el objetivo de la Tesis es contribuir a la mejora de la gestión técnica del abastecimiento, se dedicará una especial atención al papel que un SIG puede jugar en ella.

2. Introducción a los Sistemas de Información Geográfica

2.1. Breve reseña histórica.

Hacia finales de los años 1950 apareció lo que se ha dado en llamar la segunda generación de ordenadores. Estos tenían un coste mucho más económico que sus predecesores y facilitaron que su uso se extendiera más allá de las grandes agencias gubernamentales. La primera consecuencia del aumento en el uso de los ordenadores fue un incremento progresivo de la exigencia requerida a los mismos. Esto incluía su uso para dos aplicaciones que requerían una gran capacidad de cálculo: la estadística y el manejo de información gráfica. Así, en 1959 Waldo Tobler diseña un sistema de gestión de mapas que bautizó como MIMO (Map In – Map Out). Este sistema sentó las bases para la geocodificación, y poseía todas las herraminetas estándar de lo que hoy se conoce como SIG. Un poco más tarde, en 1963, se desarrolla en Canadá un proyecto dirigido por Roger Tomlison denominado Canadian Geographic Information System (CGIS). Dos años después surge en los Estados Unidos un sistema similar, el MIDAS. Tanto con el CGIS como con el MIDAS se pretendía procesar información sobre los recursos naturales. Un año después se creó el Laboratorio de Análisis Espacial y Gráfico por Ordenador en la

Universidad de Harvard. Allí estudiaron, entre otros, los creadores de Intergraph (David Sinton), ESRI (Jack Dangermond) y ERDAS (Lawrie Jordan y Bruce Rado).

La evolución de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) discurre paralela a la de los ordenadores desde su aparición. Así, hay un segundo salto en su evolución, paralelo a la aparición de los microprocesadores, a principios de 1970. A esta época corresponde la creación del ODYSSEY en la Universidad de Harvard, el primer SIG vectorial de la historia. Además, también a esta época corresponde la aparición del sistema DIME de codificación, basado en el concepto de topología, así como la creación del Environmental Systems Research Institute (ESRI) en 1969 por J. Dangermond. Esta empresa empezó a comercializar su producto estrella, el ARC/INFO, una década más tarde, en 1981. De la misma forma, también en 1969, Jim Meadlock crea Intergraph Corporation.

Las décadas de 1980 y 1990 suponen el despegue de los SIG. En estos años surgen los programas más influyentes en el campo de la información geográfica, como ARC/INFO, SMALLWORLD, ERDAS, IDRISI, etc.

En la actualidad se está produciendo una nueva revolución en las tecnologías de la información, con la aparición y el uso generalizado de tecnologías como el GPS (Global Positioning System), Internet o sistemas de telefonía móvil. Esto afecta también a los SIG, que han ido cediendo protagonismo al usuario, integrando los dos formatos principales de SIG (vectorial y matricial), facilitando el desarrollo de aplicaciones personalizadas mediante el uso de lenguajes de programación de última generación con gestión de datos orientada a objetos y descentralización de la información en bases de datos distribuidas.

En este entorno, la utilización de los SIG para la gestión de infraestructuras ha sido una consecuencia lógica del desarrollo de aquellos.

De hecho, desde su aparición a principios de la década de 1960, los SIG se han utilizado de una manera bastante extensa para la gestión de infraestructuras urbanas. Primero fueron las grandes compañías eléctricas, para que a continuación se le sumasen las compañías de gas. La primera aproximación al uso de los SIG en la gestión de redes de distribución de agua potable documentada en la bibliografía se produce en Denver Waters (Cesario, 1986). No se trataba exactamente de un SIG tal y como lo conocemos hoy en día. En realidad se trataba de un sistema de cartografía automatizada o AM/FM (Automated Mapping/Facility Management). En cualquier caso, este se puede considerar el primer paso en el uso de sistemas de gestión informatizada de la información cartográfica en el entorno de las redes de distribución de agua.

2.2. Definición y Componentes de un Sistema de Información Geográfica

Existen múltiples definiciones sobre qué es un SIG. Aunque algunas de ellas son más completas que otras, todas coinciden en resaltar dos características básicas del SIG:

- Un SIG es un sistema gestor de bases de datos, y como tal, debe tener todas las herramientas que poseen las bases de datos convencionales. Pero además de aquéllas, debe poseer igualmente herramientas específicas de gestión de base de datos ordenadas geográficamente (es decir, georreferenciadas).
- Un SIG almacena y relaciona datos espaciales (posición o localización) con datos temáticos (atributos alfanuméricos) distribuidos en *capas* o *coberturas*. En la Figura 2.1 se muestra un esquema explicativo de la organización de la información temática en capas.



Figura 2.1. Representación de la realidad en un SIG mediante capas de información temática.

De acuerdo con lo anterior, una de las definiciones más simples que podría hacerse de un SIG es que constituye *un potente conjunto de herramientas para la recogida, almacenamiento, extracción, análisis y visualización de información geográfica procedente del mundo real* (Burrough, 1986). Esta es, sin ninguna duda, una definición que muestra el origen del SIG como la integración de los programas de diseño asistido por ordenador (en adelante CAD, del inglés Computer Aided Design) con las utilidades de gestión de cartografía digital y su relación con el software de gestión de bases de datos.

La diferencia entre las múltiples soluciones comerciales del SIG radica por una parte, en el tipo de datos espaciales que manejan, y por otra en la manera en que esos datos se almacenan y se relacionan con atributos.

También es posible entender un SIG como una filosofía de gestión. En definitiva, se trata de centrar la definición en la finalidad de estos sistemas, y no en los medios o herramientas utilizados para alcanzarla. En este caso, podría ser una forma de tomar

decisiones dentro de una organización basada en información que se gestiona de manera centralizada, pero ordenada dependiendo de su localización geográfica.

Por último, una definición más global podría distinguir en el concepto de SIG tres componentes conectados entre sí, tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.2, debida a Parsons (1997):

- Un conjunto de datos ordenados dependiendo de su localización geográfica. Esto es lo que se conoce como una base de datos georreferenciada.
- Equipos y software para gestionar y relacionar los datos. En este caso, ese papel lo realiza el Sistema Gestor de Bases de Datos Georreferenciadas o, simplemente, SGBDG.
- Un problema específico u objetivo que se intenta resolver de los datos espacialmente distribuidos, con la ayuda de las herramientas disponibles (denominadas aplicaciones o funcionalidades del SIG).



Figura 2.2. Representación Esquemática de los componentes de un SIG.

En este punto conviene hacer una distinción entre lo que es el SIG en su conjunto, tal y como se acaba de definir, y lo que es el software utilizado para la gestión de datos georreferenciados. En un SIG, la pieza fundamental es la que se ha enunciado en primer lugar, esto es, el conjunto de datos ordenados espacialmente. A partir de este conjunto de datos se construyen una serie de herramientas de gestión y consulta de estos datos. Estas herramientas es posible encontrarlas comercialmente en distintos paquetes o programas conocidos como Sistemas de Gestión de Bases de Datos Georreferenciadas (SGBDG). Estos programas además suelen incluir herramientas de personalización o programación de tareas específicas para cada uso.

Como conclusión, se puede decir que un SIG es una base de datos georreferenciada, esto es, una base de datos en la cual los datos se localizan por medio de coordenadas

geográficas con respecto a algún sistema de referencia. Esta es la principal diferencia entre un software de SIG y uno de CAD (Rossiter, 1994).

Massana y Cortón (2001) establecen tres niveles en la evolución tecnológica de los SIG. Así, los autores distinguen entre:

- CAD + SGBD. Consiste en abordar la solución SIG combinando las herramientas de representación gráfica de un programa de diseño asistido por ordenador con un sistema gestor de bases de datos estándar. Es sin duda la opción más antigua y correspondería a un programa como AutoCAD o Microstation, que permiten establecer vínculos entre la información gráfica y gestores como MS Access u Oracle.
- SIG de sobremesa. Constituyen la evolución de los anteriores e incorporan a la solución anterior cierta capacidad de personalización de aplicaciones a través de algún lenguaje de programación. Incluye también algunas herramientas típicas de un SIG, especialmente relacionadas con la gestión de los datos espaciales. Es el caso de AutoCAD Map o Geomedia (procedentes, respectivamente, de AutoCAD y Microstation).
- SIG Corporativo. Este tipo de sistemas están diseñados prácticamente a medida para cada aplicación y permiten el trabajo en red y la gestión de grandes bases de datos. Las bases de datos suelen ser propias para permitir gestionar el acceso de múltiples usuarios, aunque también permiten utilizar bases de datos estándar con extensiones para manejar datos espaciales. Es el caso de ArcInfo o Smallworld.

2.3. Modelación de los datos espaciales

Las diferentes representaciones espaciales de datos se llaman Modelos Espaciales de datos. Los modelos espaciales de datos usados por un SIG pueden clasificarse básicamente en dos modelos elementales: el *modelo ráster* o *matricial* (también llamado *modelo grid*) y el *modelo vectorial*.

2.3.1. El modelo ráster.

El modelo ráster de representación de datos espaciales emula la realidad a través de la creación de una rejilla regular. En este modelo de datos, lo que se almacena de cada objeto es, no solo su contorno, sino su interior. Se suele aplicar una rejilla o cuadrícula en la cual cada celda tiene la misma forma y tamaño. De esta forma se obtiene una especie de matriz cuyas celdas almacenarán el valor que la variable elegida toma en ese punto. Esta variable almacenada puede ser cualitativa (como es el caso de usos del terreno o el tipo de demanda de agua) o cuantitativa (elevación o caudal demandado en cada punto de una red).

Se han descrito varias estructuras de datos para el almacenamiento permanente de esta información. La primera sería una enumeración exhaustiva. Consiste básicamente en la recogida de manera individualizada y secuencial de los contenidos de cada celda.

Obviamente, cuando el ámbito de trabajo es grande o el tamaño de la celda (o, lo que es lo mismo, la resolución) muy pequeño, la cantidad de información que debe ser almacenada y gestionada crece hasta hacerse excesiva. Este hecho constituye el principal inconveniente de esta estructura.

Como alternativa para optimizar los recursos, se propone una enumeración por filas, en la cual se da el valor de la variable y la primera y última columna en la cual ese valor se mantiene. Esta estructura es especialmente adecuada en sistemas en los cuales está presente el principio de correlación espacial, porque la mayoría de las celdas contiguas tienen el mismo valor. En ocasiones, sólo se almacena el valor y la última celda donde la variable toma ese valor, sobreentendiéndose la columna en la cual comienza el siguiente conjunto de valores. A veces también se almacena el valor y el número de celdas que toman ese valor.

Sea cual sea la estructura de datos elegida para almacenar la información contenida en un plano, la principal limitación del modelo ráster es que, para cada variable, se guarda un plano. Esto es, para cada variable es necesario almacenar *una capa* de información tal y como se ha descrito arriba. En la Figura 2.3 se muestra un esquema de cómo la información de un plano se almacena en el modelo ráster. Se puede ver que una rejilla se superpone al plano y que cada celda toma un valor dependiendo del uso que la tierra tiene. En este caso, se usó un código de color para representar cada uso de la tierra en el plano, pero para cada celda el uso de la tierra que toma el mayor porcentaje de ella, se ha almacenado en la base de datos como un código alfanumérico (un número o una letra).

Este tipo de modelo de datos es especialmente adecuado para variables geográficas, en las cuales se encuentran pocas formas geométricas regulares y se debe describir la forma exacta de las áreas con el mismo valor con muchos polígonos y segmentos. Por tanto, su principal aplicación es la descripción del terreno (Modelos de Elevación Digital, Mapas de Aspecto, Mapas de Pendientes, etc.)

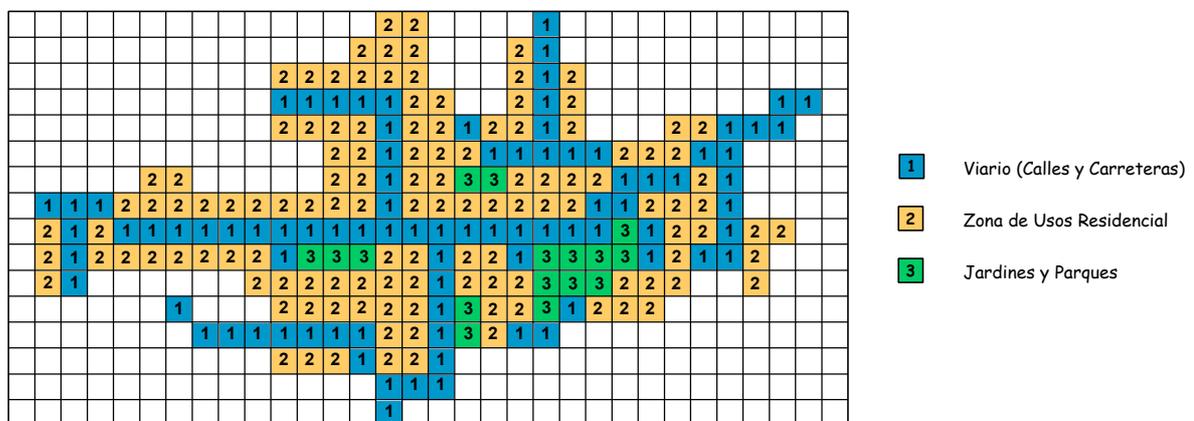


Figura 2.3. Esquema de una representación ráster de la información contenida en un mapa.

Puesto que este método de almacenamiento puede consumir mucha memoria, se han usado algunas estructuras alternativas para comprimir los datos ráster. Por ejemplo, en los casos en los que hay áreas de especial interés junto con otras sin ningún interés, se usa una estructura *quadtree*. La estructura *quadtree* o jerárquica es una estructura de datos que subdivide cualquier espacio dado en cuatro cuadrantes. Cada uno de esos cuadrantes puede contener información de los datos u otra rejilla con una mayor resolución de rejilla (es decir, con un menor tamaño de cada una de las celdas), y continúa subdividiendo cada cuadrante de manera similar hasta que son uniformes o se alcanza la resolución básica de los datos.

2.3.2. El modelo vectorial.

Otra manera de representación espacial de datos consiste en la reducción de las áreas donde las variables toman un valor fijo a geometrías simples (tales como puntos, líneas o superficies) que en su forma más simple pueden ser almacenadas como un conjunto de puntos o vértices, e instrucciones sobre cómo estos puntos se conectan entre sí. Otra alternativa es que esos datos que pueden ser representados como líneas (este es el caso del trazado de una red de distribución de agua), se almacenen como una función matemática, por ejemplo una combinación de polinomios. Como se puede deducir de la descripción dada, hay dos diferencias principales entre el modelo vectorial y el modelo ráster. La primera es que en el caso del modelo vectorial, lo que se almacena explícitamente son los bordes o límites de los objetos del mapa geográfico, pero no sus contenidos interiores. La segunda diferencia es que sólo un valor de la variable considerada se almacena en cada objeto. Por ejemplo, supóngase que se tiene una red principal consistente en varias tuberías o segmentos con características homogéneas. En una estructura vectorial sólo se guardará un valor de estas características vinculado a una línea quebrada o polilínea que representará el trazado de las tuberías. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, en el modelo ráster se guardará un valor de las características para cada una de las celdas por donde pasa la tubería.

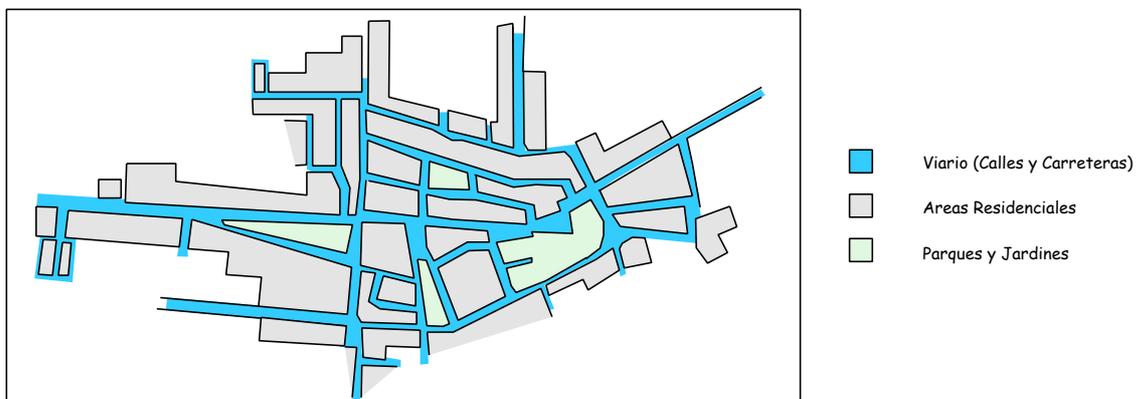


Figura 2.4. Representación esquemática en modelo vectorial de la información contenida en un mapa.

En la Figura 2.4 se observa un esquema de la representación de la información en el modelo vectorial en el mismo mapa de la Figura 2.3. Las calles se representan con líneas de cierto color y espesor, mientras que las áreas cubiertas de vegetación (parques y jardines) o edificios se representan con polígonos con diferentes rellenos.

En el modelo vectorial los datos son almacenados como objetos y éstos pueden ser clasificados dependiendo de su naturaleza en dos tipos principales (OGC, 1999):

- **Objeto geométrico o cartográfico.** La geometría proporciona el medio para la descripción cuantitativa de un objeto, a través de atributos (sus coordenadas) o funciones matemáticas basadas en ellos, incluyendo su posición, dimensión, tamaño, forma y orientación. Los atributos y funciones matemáticas de un objeto geométrico dependen del tipo de sistema de coordenadas usado para definir su posición espacial. Por lo tanto, si el sistema de referencia de coordenadas cambia, el objeto geométrico cambia también. Un objeto cartográfico se almacena de manera secuencial como una entidad propia.
- **Objeto topológico.** La topología trata con las características de los objetos que permanecen idénticas si el espacio se deforma elástica y continuamente. Este es el caso de un cambio en el sistema de referencia de coordenadas. El tipo más común de topología es la conectividad en una red. En este caso, un cambio en el sistema de referencia de coordenadas no afecta a las relaciones entre los diferentes objetos en la topología. Un objeto topológico se almacena como una referencia a sus límites, estos es, un polígono no es una sucesión de coordenadas correspondientes a sus vértices sino una serie de segmentos que le separan de sus vecinos.

Existe una tercera forma de gestión de los datos espaciales en formato vectorial, y es la representación simbólica. Es este tipo de representación se almacena unas coordenadas y un símbolo o icono para representar distintas entidades. Es la forma típica de almacenamiento de los planos cartográficos y se debe acompañar de leyendas para la correcta interpretación de los símbolos (Theobald, 2001).

Los objetos básicos en un SIG vectorial se clasifican dependiendo de sus dimensiones. Por tanto, los tres objetos comúnmente usados son:

- **Punto o nodo.** Los nodos tienen dimensión 0 y se almacenan en el ordenador con su posición a través de sus coordenadas.
- **Líneas o arcos.** Dependiendo del tipo de objeto, una línea puede ser representada como al menos las coordenadas de sus nodos finales (objeto geométrico) o como una función (recta o cualquier otra función) que conecta dos objetos del tipo *nodo* (objeto topológico).

- **Polígono.** Los polígonos o superficies son el tercer objeto básico de cualquier SIG vectorial. Desde el punto de vista de la representación, los polígonos pueden ser una sucesión de líneas cerrada, una expresión matemática de superficie o un conjunto ordenado de puntos.

Theobald (2001) realiza una comparación entre la estructura de datos cartográfica y la estructura de datos topológica, describiendo las ventajas e inconvenientes de una y otra. En la Tabla 2.1 se resumen los resultados de esta comparación.

Tabla 2.1. Comparación entre las estructuras de datos vectoriales cartográfica y topológica.

<i>Estructura Cartográfica</i>	<i>Estructura Topológica</i>
<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Simplicidad de la estructura de datos, al almacenarse cada entidad individualmente y de manera secuencial como una sucesión de coordenadas. • Velocidad de edición y representación, al almacenar las entidades geométricas de manera secuencial. 	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se reduce el almacenamiento de polígonos al no almacenar dos veces las aristas adyacentes. • Las relaciones de vecindad se mantienen de manera explícita. • La producción de mapas y la entrada de datos se mejoran al disponer de herramientas de gestión de islas, huecos, solapamientos y recubrimientos.
<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Duplicidad de información almacenada al guardarse la separación entre polígonos dos veces. • Difícil gestión de las relaciones espaciales como adyacencia, continencia y conectividad. • La generación y edición de mapas no es robusta al no incorporar las relaciones espaciales anteriores. 	<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Las tablas topológicas deben crearse antes incluso de ser utilizadas. • La generación de mapas es lenta debido a que las entidades gráficas no se almacenan de manera secuencial. • Dificultad en representar características tridimensionales como túneles o pasos elevados.

2.3.3. ¿Modelo ráster o vectorial?

Cuando se desarrolla un modelo de datos basado en un SIG, la elección de la estructura del modelo es importante. En la siguiente tabla se revisan algunas recomendaciones sobre las ventajas y desventajas de las estructuras descritas anteriormente (Reca, 1997):

Tabla 2.2. Comparación de los modelos ráster y vectorial.

<i>GIS Ráster</i>	<i>GIS Vectorial</i>
<p>Ventajas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Estructura de datos simple 2. Fácil superposición de capas y cálculos 3. Adecuado para gran variabilidad espacial (p.ej. Modelos de Elevación Digital) 4. Adecuado para escaneo, software de análisis de imagen y teledetección 	<p>Ventajas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Estructura de datos compacta 2. Eficiente codificación espacial de datos 3. Potente análisis espacial, propio de aplicaciones de redes 4. Salida gráfica de alta calidad
<p>Desventajas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Estructura de datos que consume almacenamiento, a una resolución fija 2. Pérdidas de información a cualquier resolución 3. Dificultades con relaciones topográficas entre los datos 4. Cualquier transformación de datos debe aplicarse a cada celda 	<p>Desventajas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Estructura de datos compleja 2. No apropiada para descripción del terreno o superficies continuas 3. Operaciones algebraicas espaciales difíciles, como superposición de capas 4. Software caro en general 5. Manipulación de la imagen difícil en modelo vectorial

El modelo ráster se usa para modelos altamente variables, tales como modelos de elevación digital, modelos hidrológicos de escorrentía o modelos de cubierta vegetal. Por otra parte, el modelo vectorial se usa para aplicaciones donde se requiere un análisis de las líneas de la red, tales como las redes eléctricas, de suministro de aguas o de recogida de agua de lluvia.

El modelo vectorial se usa a menudo en las compañías encargadas del transporte energético (gas natural, agua potable, aguas residuales, teléfono, etc.), es decir, en lo que en el mundo anglosajón se denomina genéricamente *utilities*. En estos casos se usa el SIG para mantener una base de datos de calidad actualizada, que frecuentemente forma la parte central de sus estrategias de actuación. En las aplicaciones del SIG vectorial, las funciones de cartografía automatizada (AM/FM, *Automated Mapping y Facilities Management*) son principalmente usadas para gestionar la distribución en planta de la infraestructuras o la organización de las mismas (Parsons, 1997).

2.4. Modelación de los atributos

Una de las herramientas fundamentales para garantizar el éxito en el funcionamiento de un SIG es el Sistema Gestor de Bases de Datos Georreferenciadas (SGBDG). Los gestores de bases de datos convencionales presentan algunas limitaciones cuando se aplican a la gestión de datos espaciales. Por ello, aunque para el usuario de un SIG no es necesario entender en detalle cómo se ordenan y almacenan los datos en la

memoria del ordenador, cierto conocimiento le ayudará a entender como trabaja el sistema y cuáles son las ventajas y limitaciones del sistema de gestión de bases de datos.

Las misiones del gestor de bases de datos son, principalmente (Healey, 2001):

- Almacenamiento de los datos.
- Validación de datos mediante herramientas apropiadas.
- Gestión de las restricciones de seguridad en el acceso a los datos.
- Control de accesos de varios usuarios para consultas o actualización de datos.

La principal característica de cualquier sistema de gestión de datos es permitir un rápido acceso a los datos y establecer referencias cruzadas. En este sentido existen dos tendencias: las orientadas a la gestión de archivos mediante punteros y las orientadas al propio sistema gestor. Entre las primeras destacan la más simple *lista de ficheros*, los *ficheros secuencialmente ordenados* y los *ficheros indexados*. Entre las segundas estarán las estructuras más complejas usadas por el gestor de bases de datos. Conforme aumenta el número de registros en las bases de datos, su estructura adquiere un papel más y más relevante.

La gestión de bases de datos basados en ficheros tienen como principal característica la velocidad de acceso a los datos, mientras que los sistemas de gestión de bases de datos presentan una mayor flexibilidad en el acceso, al no ser necesario tener los punteros a los datos predefinidos.

Se describirán cinco tipos principales de estructura de base de datos de uso común en los SIG a lo largo de su historia. Estos tipos son la *lista invertida*, la *estructura jerárquica*, la *estructura de red*, la *estructura relacional* y la base de datos *orientada a objetos*. Las tres primeras fueron más populares durante las décadas de los setenta y ochenta mientras que la base de datos relacional es la dominante en nuestros días. La estructura orientada a objetos está todavía en desarrollo. Estará disponible comercialmente cuando pueda disponerse de ordenadores más potentes en un futuro cercano. Actualmente, la aproximación orientada a objetos aplicada sobre la base de datos relacional está ganando popularidad, principalmente porque añade todas las ventajas de la programación orientada a objetos al ya bien establecido modelo relacional de base de datos.

Puesto que gran parte del éxito en la gestión de un sistema radica en la eficacia de la gestión de la base de datos, se debe prestar mucha atención al diseño de ésta. Este diseño tiene dos vertientes: el diseño físico de la base de datos y el diseño funcional (Healey, 2001). El primero estudia la forma más eficiente de almacenamiento de los datos, así como su estructura. El segundo debe estudiar las relaciones y características de los datos que se han de almacenar. El diseño funcional, también conocido como análisis de sistemas, es lo que constituye la esencia de los modelos de datos, los metadatos y los diagramas de entidad-relación que se revisarán en el capítulo 5. A continuación se explican con un poco

más de detalle cada una de las estructuras que pueden constituir el diseño físico de la base de datos.

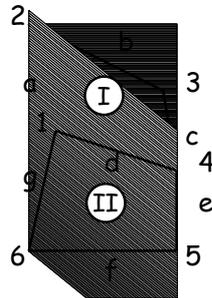


Figura 2.5. Ejemplo de sistema almacenado en una base de datos.

Tabla 2.3. Tabla de datos de los polígonos.

ID	Area
I	40
II	60

Tabla 2.4. Tabla de datos de las líneas.

ID	Longitud	Punto 1	Punto 2	Polígono
a	10	1	2	I
b	15	2	3	I
c	12	3	4	I
d	20	4	1	I
d	20	4	1	II
e	13	4	5	II
f	18	5	6	II
g	17	6	1	II

Tabla 2.5. Tabla de datos de los puntos.

ID	X	Y
1	X1	Y1
2	X2	Y2
3	X3	Y3
4	X4	Y4
5	X5	Y5
6	X6	Y6

Para apoyar la explicación, se utilizará un ejemplo de base de datos con componente espacial (ver Figura 2.5). Se trata de un dominio del espacio cubierto por dos polígonos limitados por segmentos los cuales, a su vez, tienen sendos puntos en cada uno de sus extremos. La estructuración básica de estos datos consistirá en tres tablas, una para los polígonos (Tabla 2.3), otra para las líneas (Tabla 2.4) y una última para los puntos (Tabla 2.5).

2.4.1. Estructura de lista invertida.

Es el mecanismo básico de organización de datos alfanuméricos. Junto con la estructura jerárquica está prácticamente en desuso y corresponde a los sistemas más antiguos.

Los datos se estructuran en tablas compuestas por filas o registros y columnas o campos, tal y como se han presentado anteriormente. En esta estructura es especialmente importante el orden de las filas para favorecer la velocidad de acceso. Así, con la estructura original anterior, si se desea localizar los datos de las líneas conectadas a un punto, es necesario crear una lista invertida como la presentada en la Figura 2.6. Posteriormente, con la el dato de la línea debe crearse una tabla de índices donde se almacenará la clave de búsqueda, el valor, la tabla o fichero donde se debe buscar y la posición de memoria que ocupa el registro buscado, guardado como un puntero.



Figura 2.6. Estructura de lista invertida con la tabla de índices.

Este sistema requiere que la tabla índice sea creada en el mismo momento en que se crea la base de datos. Por ello, esta estructura se ha mostrado muy ineficiente para el manejo de grandes bases de datos y apenas ha sido utilizada en el ámbito de los SIG.

2.4.2. Estructura jerárquica.

Esta estructura proporciona medios rápidos y eficaces para el acceso a los datos cuando éstos se almacenan con la relación uno a muchos o también cuando pueda existir una relación clara padre-hijo entre los datos. Algunos autores denominan la estructura jerárquica como *estructura en árbol*, ya que el modelo está formado por una serie de enlaces o punteros que conectan todos los registros en un árbol. La raíz es el primer nivel

de la jerarquía. La raíz está relacionada con uno o más elementos de menor nivel, y éstos a su vez con uno o más elementos de nivel aún menor. Como consecuencia, cada elemento está conectado a solamente uno de mayor nivel, llamado *padre*, pero a uno o más de menor nivel, llamados *hijos*.

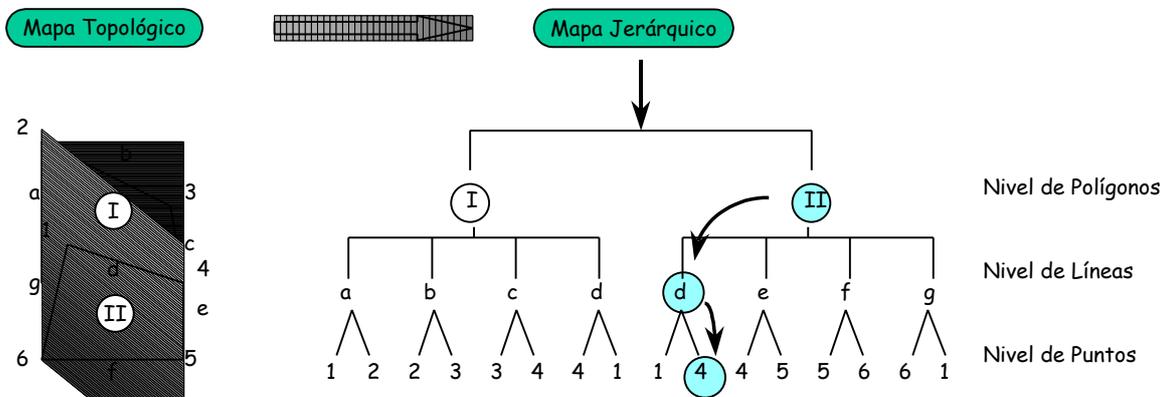


Figura 2.7. Ejemplo de estructura jerárquica de base de datos.

La Figura 2.7 muestra un ejemplo esquemática de la estructura de una base de datos jerárquica. Como se puede apreciar, no existen enlaces entre elementos del mismo nivel así como tampoco enlaces diagonales. Este es el mayor inconveniente de esta estructura, ya que una vez se ha establecido el modelo, no es posible generar nuevos enlaces entre elementos. Por otro lado, esta estructura permite una alta velocidad de acceso en grandes bases de datos, al igual que una fácil actualización e inclusión de nuevos datos en el menor nivel.

2.4.3. Estructura de red.

En la mayoría de las aplicaciones SIG, la simple relación uno a muchos ofrecida por la estructura jerárquica conduce a una gran cantidad de información redundante (como se muestra en la Figura 2.7). Sin embargo las relaciones muchos a muchos son necesarias, lo que permitirá las conexiones diagonales entre elementos de diferentes niveles. Este tipo de estructura se denomina estructura de red (Figura 2.8). El enlace entre entidades se realiza mediante punteros y no se permiten enlaces entre elementos del mismo nivel (dentro de una misma tabla o archivo).

Los sistemas de red resultan muy útiles cuando las relaciones o enlaces pueden ser especificados por adelantado. Con ellos se evita la redundancia de datos y permiten búsquedas rápidas a través de las conexiones existentes. Las desventajas estriban en que la base de datos aumenta de volumen por la inclusión de los punteros mencionados, lo que en sistemas complejos puede llegar a ser una parte sustancial de la base de datos. De la misma forma, el mayor inconveniente es que sólo se permiten las consultas que han sido previamente definidas, como también sucede en la estructura jerárquica. Para conseguir una base de datos realmente flexible a la vez que ampliable se necesitan los modelos relacionales u orientados a objetos.

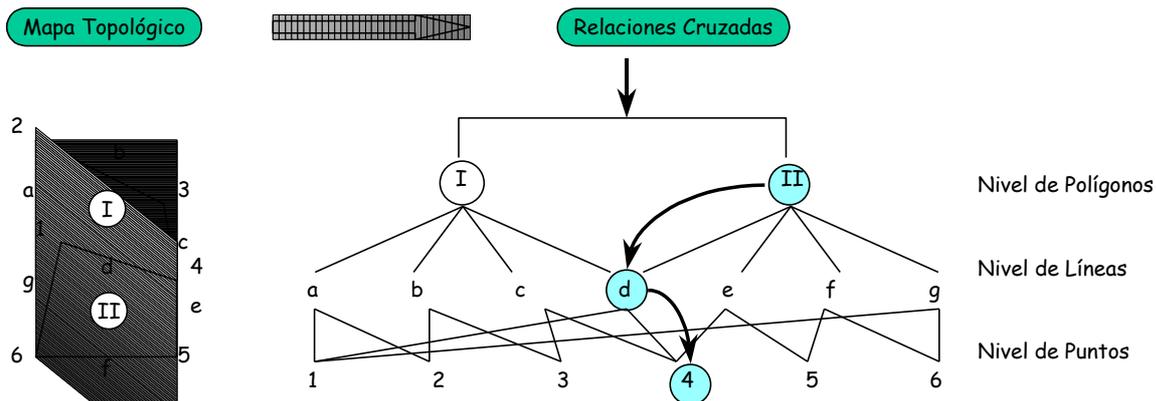


Figura 2.8. Ejemplo de estructura de red de base de datos.

2.4.4. Estructura relacional.

Las estructuras definidas hasta aquí, lista invertida, jerárquicas y de red, son conocidas como estructuras de navegación. La razón estriba en la utilización de punteros como enlaces: la aplicación *navega* a través de la base de datos gracias a esos punteros. Los únicos caminos para la búsqueda son aquellos definidos previamente.

Al contrario de lo que ocurre con la navegación de punteros, la base de datos relacional inserta el concepto de tablas de dos dimensiones interconectadas. Cada tabla tiene un número de columnas o registros, y cada registro tiene un conjunto de atributos predefinidos o campos. El diseño y el contenido de estas tablas han de realizarse teniendo presente las principales características de este tipo de estructuras: la existencia de claves primarias, los vínculos relacionales y las formas normales.

Las tablas están relacionadas a través de un conjunto de claves, una primaria y algunas secundarias. La misión de la clave primaria, que puede incluir uno o varios campos, es garantizar la unicidad de cada registro, es decir, no pueden existir dos registros con una misma clave primaria.

La segunda característica son los vínculos relacionales. En este caso es el usuario quien crea los vínculos cuando es conveniente, ya sea al crear la base de datos, durante la introducción de los datos o más tarde, durante el trabajo diario. Los vínculos temporales y las tablas pueden ser creadas por el gestor de la base de datos durante una consulta particularmente compleja. Sin ninguna duda, el concepto de *consulta* es la llave de la estructura relacional de la base de datos. Por ello, se han de desarrollar lenguajes que permitan la redacción de consultas que sean fácilmente inteligibles por el SGBD. De éstos, el más conocido es el SQL (Structured Query Language).

El primer paso para el diseño de tablas es separarlas de manera que la redundancia de datos se reduzca al mínimo. Para ello se establece la forma normal de una tabla, por la cual cualquier campo que no forme parte de la clave primaria debe ser dependiente de ésta. Un diseño apropiado de las tablas y los vínculos evitarán la redundancia en los datos.

La Figura 2.9 muestra las áreas adyacentes usadas como ejemplo para describir las estructuras anteriores. En este caso, se han definido tres tablas: una para cada polígono (con sus correspondientes atributos), otra para las líneas y otra para cada punto. Para obtener información de la base de datos, el usuario puede construir cualquier consulta usando los elementos clave como criterio de selección.

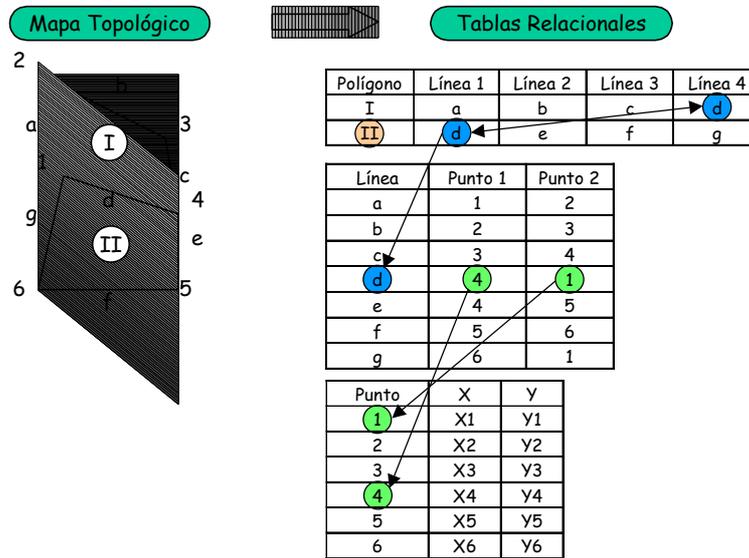


Figura 2.9. Estructura Relacional de base de datos.

Por ejemplo, el usuario puede formular una consulta como: *Seleccionar todos los puntos que pertenezcan a ambos polígonos*. Así, de la tabla de polígonos se buscarán líneas de cada uno. Tras la comparación, se seleccionarán las que pertenezcan a los dos y, posteriormente, de la tabla de líneas se obtendrán los puntos comunes. La clave es la utilización del álgebra para las consultas. Del resultado de esta consulta se obtendrán los puntos comunes a ambos polígonos.

2.4.5. Estructura orientada a objetos.

Actualmente, la tendencia generalizada en el desarrollo de las tecnologías de la información es la aproximación *Orientada a Objetos* (OO). Los sistemas OO son más modulares, fáciles de mantener y de describir que los sistemas de procedimiento tradicionales. Por ello, una serie completa de lenguajes de programación especializados permite la implantación de la orientación al objeto fácilmente en diferentes campos. El término *Orientado a Objetos* puede encontrarse en casi todo el software moderno y por tanto, también en las bases de datos.

Normalmente, la orientación a objetos se usa sin una definición clara de lo que hace realmente. Una de las definiciones de la orientación a objetos es que dada una entidad, independientemente de su estructura y complejidad, puede ser representada de una manera exacta como un objeto. Un objeto se puede definir como una entidad o elemento de software que tiene una identidad y un estado representado por unos valores de variables

locales y un comportamiento representado por un conjunto de métodos y funciones que se ejecutan cuando se accede al objeto. La identidad del objeto viene establecida por la clase a la que pertenecen todos los objetos con idénticas características. Por ejemplo, en el caso del sistema de la Figura 2.5 las líneas a, b, c, etc. son objetos independientes entre sí, pero tienen en común ser líneas con un punto en cada uno de sus extremos. Es decir, pertenecen todos a una clase definida como línea. Del mismo modo, cada clase puede tener variables propias que la identifican como clase. En el ejemplo anterior, por ejemplo, esta variable podría ser el número de vértices que la definen (dos). Además, una clase puede pertenecer a su vez a una superclase, por ejemplo la de estructuras geométricas, que también puede tener sus propios atributos y métodos.

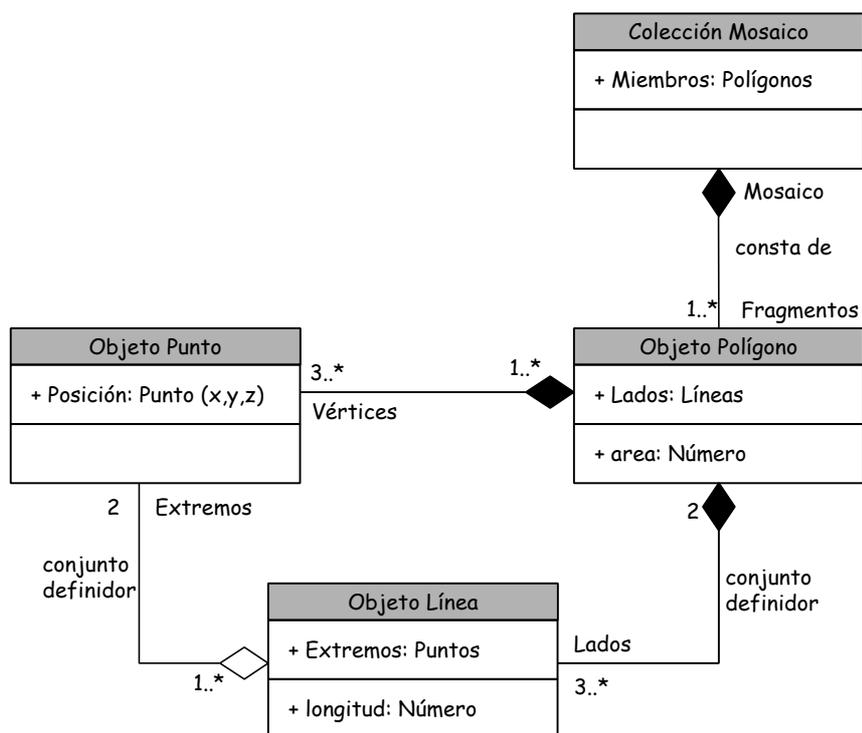


Figura 2.10. Diagrama de Contexto (o diagrama Entidad-Relación) para una topología poligonal como la mostrada en la Figura 2.5.

La definición anterior contrasta con lo que ocurre con el resto de estructuras de datos, donde una entidad debe ser separada en sus partes constituyentes básicas geográficas. La definición de objeto incluye el hecho de que el sistema de base de datos almacenará y tratará el objeto como es y no como una recopilación de sus partes. Es aquí donde surgen las discrepancias, ya que gran parte de las estructuras de datos orientadas existentes almacenan los datos de manera similar a las bases de datos relacionales, es decir, a partir de sus componentes básicos, tal y como se ha descrito en puntos anteriores (Domínguez Bravo, 2000). Es en el análisis de las relaciones entre los distintos objetos donde radica realmente la diferencia entre esta estructura de base de datos y las demás. Las bases de datos orientadas a objetos incorporan relaciones del tipo uno a uno o uno a

muchos, pertenencia, herencia, etc. Hernández Rodríguez (1995) hace un completo repaso de la aplicación de este formato de base de datos en su Tesis Doctoral.

Una descripción típica de un modelo de datos para una base de datos orientada al objeto se muestra en la Figura 2.10. A continuación se hará un análisis de la representación de un polígono. Un objeto polígono tiene, por ejemplo, un conjunto de al menos tres puntos que lo definen. Además, debe haber al menos 3 lados del polígono, designados por otro conjunto de dos puntos. El polígono también tiene una función que calcula su área y cada lado tiene una función para calcular la longitud de los lados. Para calcular el perímetro del polígono, por ejemplo, sólo es necesaria una suma de la longitud de los lados que lo definen.

2.5. Integración de los datos espaciales y los atributos.

Cuando se trata de combinar la información espacial almacenada en cualquiera de los formatos descritos en el apartado 2.3 con la información temática estructurada según alguna de las estructuras anteriores surge el problema de que las estructuras eficientes para el acceso directo a los datos no lo son tanto para el establecimiento de vínculos y viceversa. Además, tal y como se describió en la Tabla 2.2, los formatos de almacenamiento de información gráfica también presentan distintas características.

Es habitual que la información espacial se almacene en estructuras basadas en ficheros que permitan velocidad de acceso a los datos, tanto para presentación como para actualización de los mismos. Sin embargo, los datos temáticos se codifican mayoritariamente en bases relacionales que presentan una mayor agilidad en el empleo de consultas.

Cuando se intentan integrar ambas fuentes de información, resulta deseable una gran velocidad de acceso a los datos (estructura basada en ficheros) pero es recomendable utilizar sistemas gestores de bases de datos para emplear los esfuerzos de programación en las complejas operaciones espaciales. La integración de ambas fuentes de información se puede desarrollar de dos modos (Bernhardsen, 1992 o Healey, 2001):

- a) Modelo híbrido de datos. En esta aproximación se respetan los formatos originales de cada tipo de datos. Así, la información espacial se mantiene en sistemas basados en el manejo de ficheros y el uso de punteros para acelerar el acceso a los datos espaciales, mientras que los atributos se mantienen en bases de datos comerciales de tipo relacional. La misión del SIG en estos casos es exclusivamente la de manipular los vínculos establecidos entre ambas fuentes durante las operaciones espaciales. Así, el mecanismo de integración se basa en la generación de una tabla o plantilla de vínculos con un identificador único del objeto espacial y la correspondiente clave primaria de la base de datos temática. Puesto que en esta aproximación ésta última suele ser del tipo relacional, la clasificación que se puede establecer correspondería a la ya descrita de modelo vectorial o modelo matricial.

- b) Modelo de datos integrado. Es también conocido como sistema gestor de bases de datos georreferenciadas (SGBDG). En este modelo, el SIG está por encima del resto de sistemas y actúa como procesador de consultas, tanto espaciales como alfanuméricas. Los sistemas que utilizan este modelo almacenan todos los datos (temáticos y espaciales) en tablas relacionales y desarrollan por tanto herramientas de gestión espacial de estos datos. De hecho, los datos temáticos y espaciales no tienen porqué estar en tablas separadas. El principal inconveniente de este modelo está en la necesidad de equipos más potentes para gestionar grandes bases de datos.

Desde un punto de vista comercial, la solución híbrida está bastante extendida. Sin embargo, la progresiva popularización de las técnicas orientadas a objetos están favoreciendo que las distancias entre ambos modelos se acorten y el modelo integrado de datos empieza a ser una solución propuesta por gran parte de los proveedores de SIG, utilizando para ello bases de datos propietarias o extensiones espaciales de bases de datos comerciales.

2.6. Herramientas propias de un SIG.

Como se ha comentado, un Sistema de Información Geográfica ha de incorporar algunas herramientas que permitan gestionar eficazmente tanto los datos georreferenciados como los atributos, o datos alfanuméricos. Así, junto a las respectivas bases de datos, un SIG debe proporcionar la posibilidad de *vincular* ambas fuentes de información, hacer consultas y operaciones (numéricas o espaciales) indistintamente sobre una u otra base de datos, analizar topologías e interpolar datos espaciales mediante modelos digitales del terreno. Puesto que el SIG tiene una presencia creciente en todos los ámbitos de gestión del territorio, es difícil encontrar un SGBDG que cubra todos los aspectos. Por ello, una herramienta adicional que debe tener todo SGBDG es la posibilidad de personalizar las aplicaciones, es decir, de crear programas que tomen los datos del SGBDG, hagan operaciones con ellos y devuelvan los resultados al propio SIG permitiendo igualmente su vinculación geográfica.

La mayoría de estas herramientas suelen estar incluidas en los SIG comerciales. En la Figura 2.11 se observan algunos de los componentes que integran un proyecto SIG desarrollado sobre el paquete AutoCAD Map.

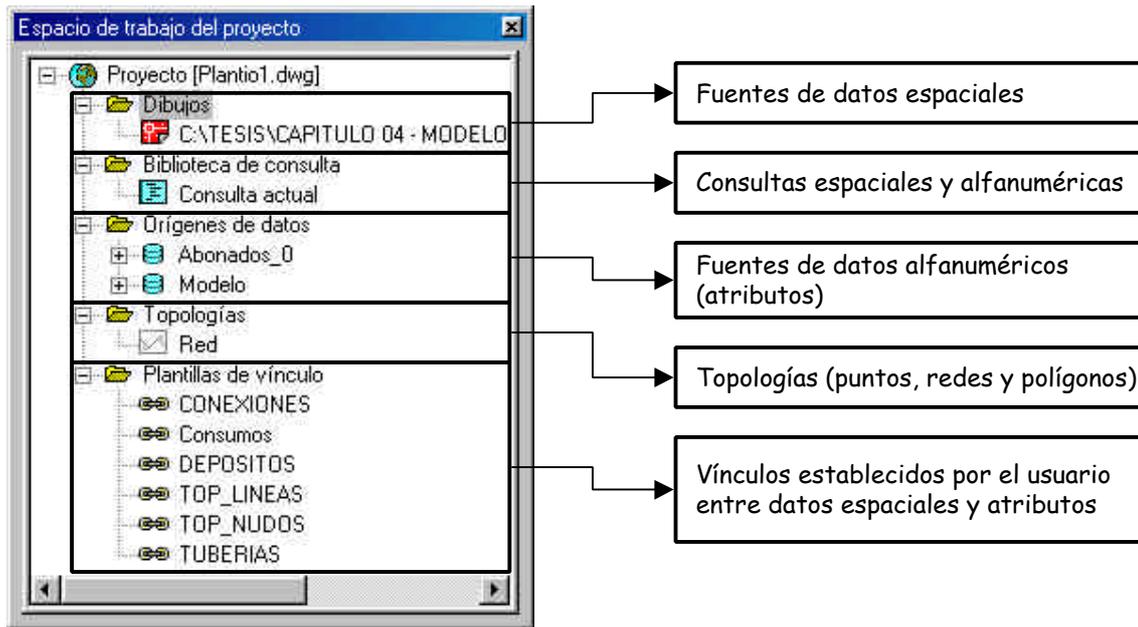


Figura 2.11. Componentes esenciales de un Sistema de Información Geográfica.

2.6.1. Consultas

La convivencia en un SIG de datos geográficos con datos alfanuméricos hace necesaria la utilización de herramientas de consulta espacial. ¿Cómo si no responder a cuestiones como el número de válvulas cerradas en una determinada calle, por ejemplo? Para realizar este tipo de consultas, un SIG debe permitir hacer operaciones espaciales como superposiciones, áreas de influencia o análisis de vecindad. Por supuesto, además de estas consultas, un SIG, como sistema de gestión de base de datos que es, debe incorporar todas las herramientas propias de una base de datos, como las consultas alfanuméricas y las relaciones entre datos.

Las operaciones o relaciones espaciales se pueden clasificar en (Ester et al., 1999):

- **Relaciones topológicas.** Estas son quizás las más importantes, sobre todo en el análisis de redes. Por ello se dedica el siguiente punto a su descripción. Como se comentó en la definición de los *objetos topológicos*, estas relaciones son invariables ante operaciones como la rotación, traslación o cambio de escala de los objetos que pretenden ser relacionados.
- **Relaciones de distancia.** Son aquellas que implican un conocimiento de la distancia que separa los objetos que se desea comparar. Son relaciones de este tipo la búsqueda del vecino más próximo o el tiempo que se tardaría en ir del punto A al punto B. Otra relación de distancia muy importante es el área de influencia, es decir, los objetos situados a una distancia inferior a una dada de otro.

- **Relaciones direccionales.** En estas relaciones existe la necesidad de establecer un objeto *origen* y un objeto *destino*. En un plano, son relaciones direccionales por ejemplo, las del tipo norte-sur, izquierda-derecha, rumbo, etc.

Así, a la consulta planteada anteriormente, para saber cuántas válvulas hay cerradas en una determinada calle, habrá que combinar algunas de estas consultas con otras clásicas de las bases de datos. En primer lugar, puesto que en un SIG las calles suelen estar representadas por una línea o eje central, se deberá consultar la anchura de la calle. A continuación se buscarán todas las válvulas cuya posición geográfica esté a una distancia inferior a la anchura de la calle del eje de la misma. Por último, del subconjunto obtenido anteriormente, se extraerán aquellas válvulas que estén cerradas. Esta será la respuesta a la consulta realizada. Resulta evidente que esta consulta se puede resolver también con una base de datos alfanumérica sin más que incluir la calle o la posición de la válvula como atributos de la misma. Sin embargo, para cada nueva consulta sería necesario incluir nuevos atributos y programar nuevas operaciones, lo cuál hace que la base de datos aumente de tamaño y las operaciones sean más lentas.

Es evidente que las relaciones presentadas permiten su combinación con operadores lógicos “Y” y “O” para obtener relaciones espaciales complejas.

2.6.2. Topologías

Topología es uno de los conceptos más importantes para entender la estructura de datos en el modelo vectorial de SIG. Permite una gran flexibilidad y poderosos enlaces entre datos. Además, una topología incluye sus propias funciones para consultas espaciales. Cada una de las estructuras de vector básicas (punto, línea y polígono) tiene una información intrínseca:

- Su localización, bien a través de un objeto geométrico o de un conjunto de coordenadas.
- Sus relaciones con otras estructuras de vectores (codificadas como adyacencia, conectividad e inclusión).
- La habilidad de sus atributos para ser usados en consultas espaciales y funciones externas.

Todas estas informaciones se obtienen por medio del concepto de *orientación*. En este sentido, una línea se define con una dirección y una orientación de manera que puede ser recorrida en sentido directo, inverso y en ambos sentidos; un punto puede permitir una circulación a través de él o no y un polígono puede tener vecinos rodeándolo o islas dentro.

El aspecto más importante en una topología consiste en su capacidad de entender los objetos en sus cercanías. La topología relaciona cada parte de la estructura de datos de tal manera que trabaja como se desea. Las principales relaciones u operaciones topológicas que pueden ser realizadas son:

- **Adyacencia.** Este operador permite identificar si dos objetos tienen fronteras comunes o no. Si se combina con la orientación a objetos, también permite averiguar qué objeto está a la derecha y cuál a la izquierda.
- **Conectividad.** Una propiedad muy útil en el caso de usar redes de infraestructuras, tales como suministro de agua, sistemas de alcantarillado o telecomunicaciones. Este operador devuelve la conectividad de los objetos en un conjunto, lo que permite incluso, conocer cuál es el objeto inicial y el final.
- **Inclusión.** Se usa principalmente para topología de polígonos. Este operador devuelve verdadero si un objeto está incluido en otro y falso si no tienen esta relación.
- **Superposición.** Es una de las herramientas básicas de las topologías. Permite combinar las anteriores de forma que se solapan las capas de información combinando los atributos en función de su inclusión o no en una o varias topologías superpuestas. Se utilizará para determinar, por ejemplo, el caudal en un punto a partir del área de influencia del mismo y el mapa de usos del suelo.

Aunque estos son los principales operadores espaciales de las topologías, hay algunos otros, como distancia, perímetro, área o coste de transporte a través de la topología. El último (coste de transporte) se usa a menudo para usos de transporte, pero también para redes de agua como una manera de definir las maniobras de mantenimiento correctivo y análisis de cierre de tuberías de la red.

2.6.3. Mapas temáticos.

El trabajar con una base geográfica de referencia pone en muchas ocasiones de manifiesto relaciones entre las fuerzas que gobiernan un determinado sistema, en este caso un sistema hidráulico. Permite detectar patrones y pautas de comportamiento que antes no podían detectarse; descubrir nuevos fenómenos o frentes de acción; y, en general, aumentar las capacidades de gestión y explotación del sistema en base a disponer de mayores elementos de juicio a la hora de tomar decisiones.

La capacidad de visualizar los resultados directamente sobre un mapa permite, además de las ventajas ya mencionadas con anterioridad, extraer conclusiones de forma rápida e intuitiva. Los métodos clásicos de análisis, basados en interminables listados de hojas de cálculo con los datos en columnas e innumerables gráficos, apenas permitían obtener conclusiones de forma rápida. En muchas ocasiones los gráficos recogían tan solo aquello que el usuario era capaz de generar a partir de los datos, por lo que la detección de nuevos fenómenos y pautas de comportamiento quedaba más a la agilidad del usuario que a la capacidad del programa.

Con la visualización sobre un mapa cada categoría se representa mediante su propio color y tramado, con la de que se puede cambiar el criterio (consulta) y ver rápidamente como afecta al dibujo. Esta función, que añade prestaciones y capacidades al análisis de

resultados basándose en la presentación de los mismos, es lo que se denomina genéricamente como el Análisis Geográfico.

La presentación de resultados es el paso final de un complejo engranaje que tiene como base la gestión de un determinado volumen de información desde un soporte SIG, que normalmente constituye la base para un módulo de simulación que gestiona la información del sistema para obtener información sobre la red.

El objetivo último del módulo de presentación de resultados es que los valores obtenidos en los módulos de simulación se expongan de la forma más clara y visual posible. En ocasiones dicha representación es sencilla.

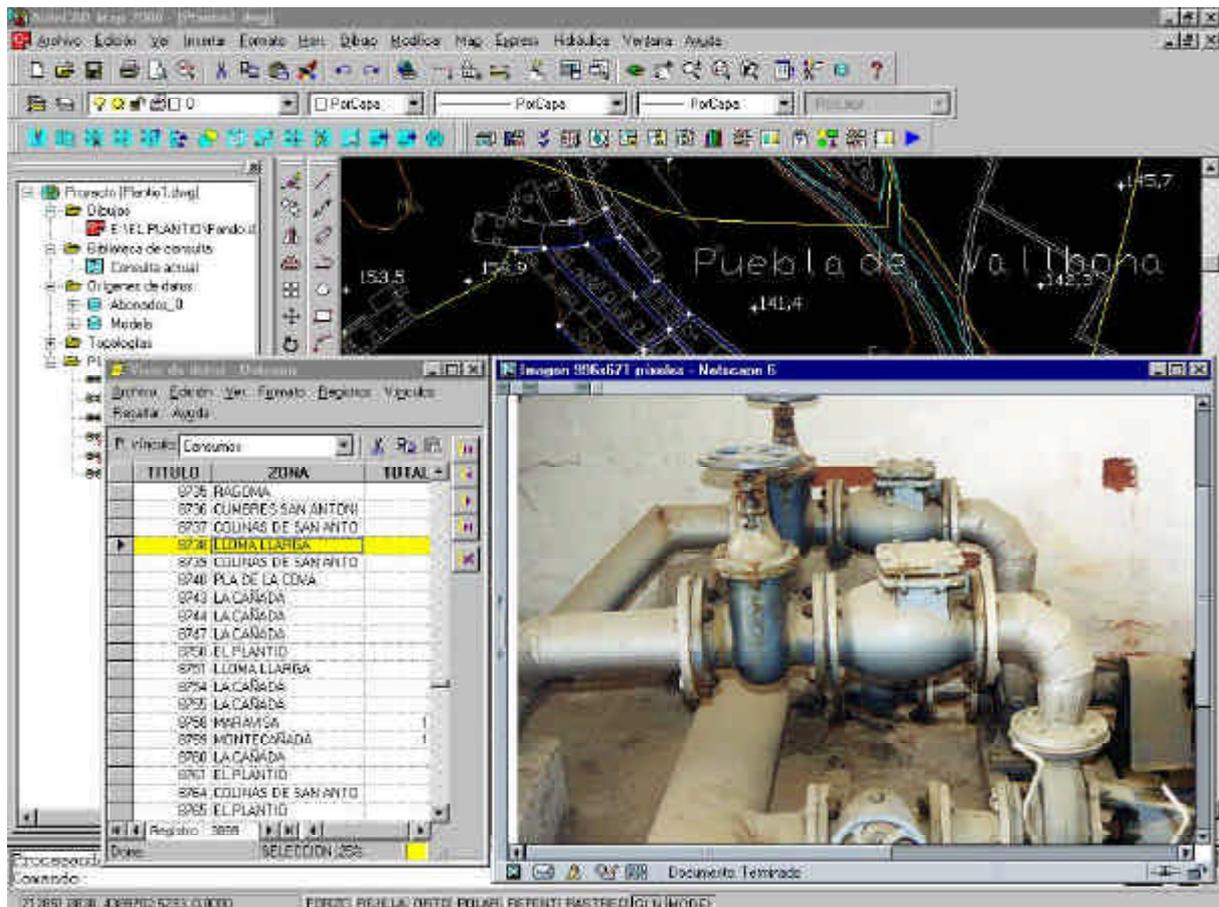


Figura 2.12. Integración de datos de distinta naturaleza en un SIG.

Considérese por ejemplo el caso del SIG representado en la Figura 2.12. Se trata de analizar una red de abastecimiento de agua potable. Para ello, un paso muy importante es la creación de un adecuado modelo de datos y la inclusión en él de los principales elementos de la red. Así, en la figura aparece una lista de los abonados de una determinada zona, diferenciados del resto mediante código de colores. Además, para la ubicación seleccionada se puede observar una imagen de la impulsión de la estación de bombeo que hay en dicha ubicación. De esta forma, se combinan los dos tipos de información ya comentados: geográfica (la cartografía de fondo que se observa) y alfanumérica (datos

concretos de los abonados) con la imagen de la bomba que permite extraer otro tipo de informaciones más subjetivas, como el estado de conservación, por ejemplo.

En los casos en los cuales el tratamiento de la información, una vez realizada la simulación, es laborioso se vuelve fundamental la determinación de las prestaciones del software encargado de gestionar estos datos.

La adecuada selección del módulo de presentación de resultados de un SIG facilita notablemente la tarea encargada al usuario del mismo. Si la generación de informes, gráficos, etc. es pesada y tediosa el usuario no obtendrá del SIG todas las capacidades que éste tiene. En última instancia ha de tenerse en cuenta que la presentación de los resultados es a menudo la culminación de todo un proceso que ha de ser valorado por personas muchas veces ajenas a dicho proceso.

2.6.4. Modelos Digitales del Terreno.

Aunque la mayoría de los gestores de bases de datos espaciales comerciales lo incorporan, hay algunos más orientados al análisis de redes que no lo hacen. Básicamente, un Modelo Digital del Terreno (MDT) es una herramienta que permite representar y manipular datos alfanuméricos con una distribución espacial. En general, el dato en cuestión es la cota, al quedar ésta omitida en representaciones bidimensionales (como es el caso de un plano en papel o una representación en pantalla). A pesar del nombre, un MDT no es sólo una forma de representación de la realidad, sino que incluye aplicaciones que permiten realizar operaciones con los datos puntuales, como estadísticas espaciales o interpolaciones.

Entre las aplicaciones más avanzadas de los MDT están la obtención de modelos derivados, como los modelos de visibilidad, orientación, pendiente o cauces naturales. También se utilizan para crear mapas de cercanía a puntos, como se verá más adelante.

2.6.5. Desarrollo de aplicaciones.

En un SIG las aplicaciones se pueden clasificar en dos categorías: aplicaciones de gestión de datos y las aplicaciones analíticas (Thompson, 1999). Las aplicaciones de gestión de datos incluyen las operaciones básicas para el almacenamiento, procesamiento, visualización, actualización y consulta de los mismos. Las aplicaciones analíticas de un SIG hacen referencia a la modelación. El potencial de un SIG permite la posibilidad de integrar modelos externos para analizar la información existente y generar nuevas capas de información con los resultados obtenidos de la simulación. Según García (2002) o Ungerer y Goodchild (2002) se pueden definir tres formas de integración de los modelos:

- a) Integración libre o abierta. En ella, el SIG y la aplicación funcionan de manera independiente. El SIG actúa como proveedor de datos para el modelo y éste realiza las operaciones necesarias con estos datos y envía los resultados de vuelta al SIG para su visualización o almacenamiento. Es a día de hoy la forma más habitual de integración.

- b) Integración rígida o cerrada. En esta segunda modalidad, tanto el SIG como la aplicación comparten la misma base de datos. En este tipo de integración pueden surgir conflictos entre usuarios durante el acceso simultáneo a los datos.
- c) Integración embebida. Es el último escalón en la integración de aplicaciones. En ella, la aplicación se desarrolla sobre el propio SIG, compartiendo no sólo la base de datos, sino también el entorno de trabajo y las librerías de personalización del SIG.

3. Utilización de los SIG en los sistemas de distribución de agua potable.

3.1. Estructura general de la gestión de un abastecimiento apoyada en un SIG.

El avance de las nuevas tecnologías también tiene su repercusión en la gestión de los abastecimientos de agua potable. Durante mucho tiempo la gestión de los abastecimientos ha estado caracterizada por la falta de competencia y un régimen cercano al monopolio. Esto ha hecho que en algunos campos esa gestión no haya seguido un desarrollo tecnológico similar al de otras actividades económicas.

Un magnífico texto para comprender la complejidad y versatilidad del uso de los SIG en la gestión integral de las redes de distribución de agua potable lo encontramos en Cubillo et al. (1997).

Hoy en día empiezan a darse inquietudes por modernizar y actualizar los abastecimientos. Cubillo et al. (1997) apuntan que esta inquietud innovadora se debe a cuatro necesidades de los abastecimientos:

- Cumplimiento de estándares de calidad del servicio.
- Mejora de la eficiencia en la gestión del recurso agua.
- Mejora de la eficacia en la gestión económica y financiera.
- Mejora de la eficiencia en la atención al abonado.

Un problema para satisfacer las necesidades anteriores viene derivada del hecho de que en gran parte de los abastecimientos no se tiene un conocimiento adecuado del mismo. Este hecho es especialmente notorio en abastecimientos pequeños y medianos. En ocasiones se desconoce incluso el volumen facturado a cada abonado. Es evidente que no se puede gestionar bien lo que no se conoce.

Para el estudio de un sistema de abastecimiento de agua potable hay que manejar una gran cantidad de información. Esta información es necesaria para cualquiera de los objetivos mencionados anteriormente. Dependiendo de su naturaleza, podría clasificarse ésta en tres grandes grupos:

- Información sobre los abonados.

- Descripción física de las infraestructuras.
- Localización geográfica de abonados e infraestructuras.

Tradicionalmente esta información se ha almacenado en diferentes formatos. La información sobre los elementos de la red (diámetros, longitudes, fechas de inicio, suministradores, etc.) se almacenaba en planos de trabajo o en pequeñas bases de datos de inventarios. La información económica constituía la base de datos que se almacenaba de manera más cuidadosa, incluyendo todos los datos relativos al usuario, sus consumos, direcciones, datos de registro y otros datos relacionados para una correcta gestión económica del sistema. Finalmente, la información espacial estaba normalmente repartida en varios mapas topográficos donde aparecían las curvas de nivel del área geográfica del suministro, la localización de las líneas principales y las tuberías de distribución. La mayoría de las veces los planos no estaban actualizados. De cualquier manera, raramente se establecía una conexión entre los tres sistemas de información existentes.

La aparición de los Sistemas de Información Geográfica ha abierto la posibilidad de relacionar la información económica y física de la red con la componente espacial o geográfica. Como ya se comentó previamente, el SIG permite no sólo relacionar datos geográficos o espaciales con datos alfanuméricos (o atributos), sino que también permite la edición sencilla de los datos, así como su presentación. Además, permite la comunicación de este sistema con otros, básicamente como proveedor de datos para herramientas externas. Probablemente es esta última funcionalidad la que hace que el SIG se llegue a convertir en la pieza central en la gestión de un abastecimiento.

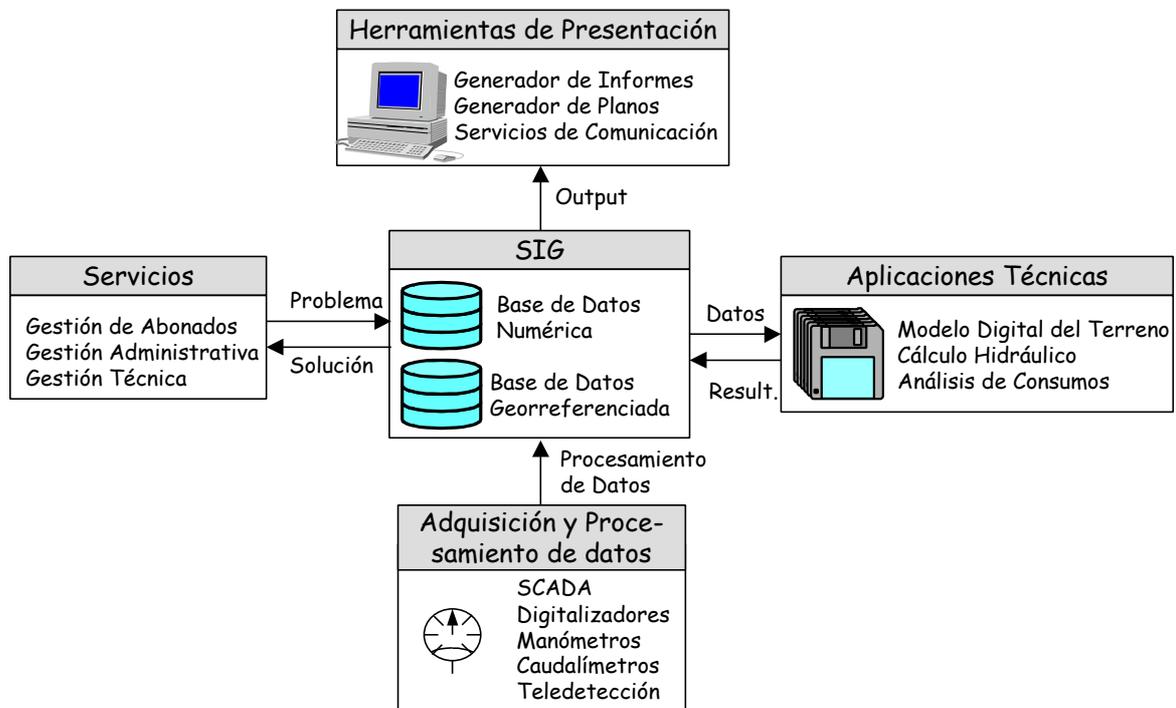


Figura 2.13. Esquema de un SIG utilizado para la gestión de un abastecimiento de agua potable a una población.

La posibilidad de conectar con herramientas externas junto con las capacidades propias del sistema de gestión de bases de datos georreferenciadas permiten al SIG un control sobre todos los elementos del abastecimiento a lo largo de su vida útil. El seguimiento a lo largo de su ciclo de vida de cualquier elemento de la red, ya sea un abonado, una tubería o un empleado, asegura un adecuado control de la calidad de los datos. Este hecho es absolutamente necesario para una gestión eficiente del abastecimiento.

En la Figura 2.13 se muestra la estructura general que tendrá un SIG destinado a la gestión integral de un abastecimiento de agua. Como se ha comentado, el núcleo central de dicha estructura será el SIG propiamente dicho, aunque sería más correcto referirse a él como el sistema de gestión de las bases de datos georreferenciadas.

Este sistema servirá de proveedor de soluciones a los problemas planteados durante la gestión del abastecimiento. En función de los problemas planteados o de los objetivos que se pretendan cumplir, la propia compañía estará estructurada en departamentos o servicios. Entre éstos podemos distinguir tres:

- Gestión de abonados. Se encarga del seguimiento de todos los aspectos de la gestión relacionados con los abonados. Incluye el alta y la contratación, facturación, bajas, reclamaciones, avisos y cualquier otra contingencia que pueda afectar al servicio al abonado. Ese servicio tendrá acceso ilimitado a la base de datos de abonados.
- Gestión administrativa. Sea cual sea el sistema de gestión de un abastecimiento, éste debe estar sometido a un control financiero. La información económica y financiera del abastecimiento es fundamental para su gestión. Son funciones de este servicio el control de los recursos humanos y financieros. Debe disponer por tanto de toda la información económica tanto de los abonados como de la propia red.
- Gestión técnica. Este último servicio será el encargado de gestionar toda la información relacionada con la red de distribución, desde los puntos de producción hasta las acometidas. Se encargará del seguimiento de todos los elementos de la red a lo largo de toda su vida útil. Esta Tesis prestará especial atención al papel que juega un SIG en la gestión técnica de los abastecimientos.

Para ayudar a cada uno de estos servicios, el SIG debe tener una serie de herramientas de captación, organización, manipulación y presentación de los datos. Siguiendo el flujo de los datos, el primer paso consistirá en ser captados por el SIG. En unos casos se hará una introducción masiva de datos de forma manual a través de formularios de edición, pero en otros casos se recurrirá a herramientas más sofisticadas, como digitalizadores, SCADA (del inglés *Supervisory Control And Data Acquisition*), teledetección y telemedida.

A continuación, los datos pueden ser manipulados por el propio SIG o bien enviados a las herramientas externas creadas para su manipulación. Entre estas herramientas se pueden mencionar la creación de modelos, encargada de simplificar la red hasta un nivel adecuado al uso que se vaya a hacer del modelo, y el simulador hidráulico que debe calcular presiones y caudales en nudos y líneas, respectivamente. Otras herramientas que pueden resultar útiles en la gestión técnica de un abastecimiento son los modelos digitales del terreno o un estudio de las demandas de agua. El SIG ha de ser capaz de recibir, procesar y almacenar los resultados proporcionados por otras herramientas.

Por último, el SIG debe proporcionar una interfaz de usuario sencilla de utilizar y con funcionalidades para la presentación de planos, mapas temáticos e informes. Además de su carácter estético que esta necesidad tiene en muchas ocasiones, una interfaz útil y manejable se convierte en muchas ocasiones en el mejor aliado del gestor que pretende implantar una tecnología innovadora como es el caso del SIG.

A continuación se detallan con una mayor profundidad los usos que puede tener un SIG en la gestión técnica de un abastecimiento.

3.2. Aplicación de los SIG a la creación de nuevas infraestructuras.

El ciclo de vida de cualquier elemento de la red pasa por siete etapas:

- Planificación
- Diseño
- Proyecto
- Construcción
- Operación
- Mantenimiento
- Renovación

De estas etapas, las cuatro primeras constituyen el nacimiento del nuevo elemento y su incorporación a la red. La planificación se interpreta como la detección de una necesidad de nuevas infraestructuras en alguna de las zonas de la red. Esta necesidad vendrá dada en general por el servicio de gestión de abonados al intentar dar de alta un nuevo abonado para el cual no existe acometida. A partir de ahí comienza un proceso que concluirá en la construcción de las nuevas infraestructuras. De las cuatro fases de las que consta la creación de un nuevo elemento de la red, la fase de diseño es quizás la más importante y también la que más se puede beneficiar de la existencia de un SIG.

Una vez concluida la fase de diseño, se pasará a la elaboración y redacción de un proyecto, si la magnitud de la obra lo requiere. Por último, se procederá a la construcción y conexión con el resto de la red, dando así por concluida la creación de la nueva infraestructura.

3.2.1. Planificación de un abastecimiento.

Como se ha comentado, la planificación del abastecimiento implica la detección de necesidades futuras de infraestructuras hidráulicas. Sin embargo, resulta evidente que no es lo mismo programar la instalación de una nueva acometida para dar servicio a un edificio de reciente construcción que realizar el proyecto de urbanización de un Plan de Acción Urbanística. En el primer caso apenas hace falta realizar ningún cálculo, mientras que en el segundo hay que hacer una previsión a largo plazo de las demandas que tendrá que suministrar la nueva red en un horizonte en ocasiones por encima de los 20 años.

Lee Cesario, en una publicación de 1995 recoge los resultados de una encuesta facilitada a un conjunto de abastecimientos estadounidenses, en los que se concluye que el uso mayoritario de los modelos era precisamente el de la planificación a largo plazo.

El proceso de planificación debe cubrir los diferentes aspectos que afectan a la toma de la decisión de construir una nueva tubería. Así, es tarea de planificación la comprobación de las cinco variables que justificarán la nueva tubería (Martínez Solano et al., 2002):

- **Necesidad.** Debe comprobarse que realmente es necesaria esa tubería.
- **Impacto.** Debe comprobarse la influencia de la construcción de la nueva tubería en el entorno, tanto a nivel medioambiental como funcional.
- **Viabilidad.** Antes de aprobar la construcción de la nueva tubería se deben calcular las necesidades de recursos tanto humanos como materiales, así como la disponibilidad de financiación.
- **Fiabilidad.** La solución final debe satisfacer las necesidades para las cuales se ha creado, así como cumplir unos requisitos mínimos de fiabilidad ante fallos.
- **Control.** La última fase será la de control de todo el proceso de ejecución, tanto a nivel de plazos como de desviación con respecto a los recursos inicialmente asignados.

Desde el mismo momento en que se detecta la necesidad de ampliar la red de distribución, el primer paso que hay que dar es la definición del trazado de las nuevas tuberías. Este problema es relativamente sencillo de resolver cuando se dispone de un SIG. Se trata de hecho de una operación típica de las topologías de la red, como ya se comentó con anterioridad.

Si se ha estimado la ubicación de las nuevas demandas que deben ser satisfechas, se trata de calcular el trazado menos costoso que garantice el suministro a los nuevos consumos con un determinado nivel de calidad del servicio.

Este problema ya ha sido resuelto eficazmente en otras aplicaciones urbanas, básicamente relacionadas con el transporte. Dado que las tuberías suelen colocarse siguiendo el trazado de las calles, el problema es fácilmente extrapolable sin más que

sustituir los tiempos de viaje por los costes de instalación. En resumen, en vez de tenerse en cuenta la velocidad media de circulación por las calles deberá tenerse en cuenta el coste unitario de construcción de las tuberías en cada calle.

3.2.2. Diseño de la red

Si bien estrictamente hablando el diseño de una red implica el cálculo del trazado y las dimensiones de los elementos de la red, es muy común que se entienda por diseño sólo el cálculo de las dimensiones de los elementos de nueva creación.

Un modelo de cálculo para el diseño óptimo de una red debe cumplir dos objetivos principales:

- Minimizar los costes de construcción.
- Maximizar la fiabilidad de la solución final.

Junto a estos dos objetivos, el diseño de la red también está sujeto a restricciones, en general en términos de presiones mínimas y calidad del agua. Estas restricciones vienen establecidas en el Reglamento de Servicio.

La Figura 2.14 (Martínez Solano et al., 2002) muestra un esquema del procedimiento general para la creación de nuevas infraestructuras. El proceso comienza con la planificación de las mismas. El SIG recibirá la orden de estudiar el suministro a nuevos abonados. Para ello proporciona al módulo de diseño la ubicación de los nuevos usuarios, los datos necesarios para determinar sus dotaciones previstas y un modelo matemático de la red actualizado.

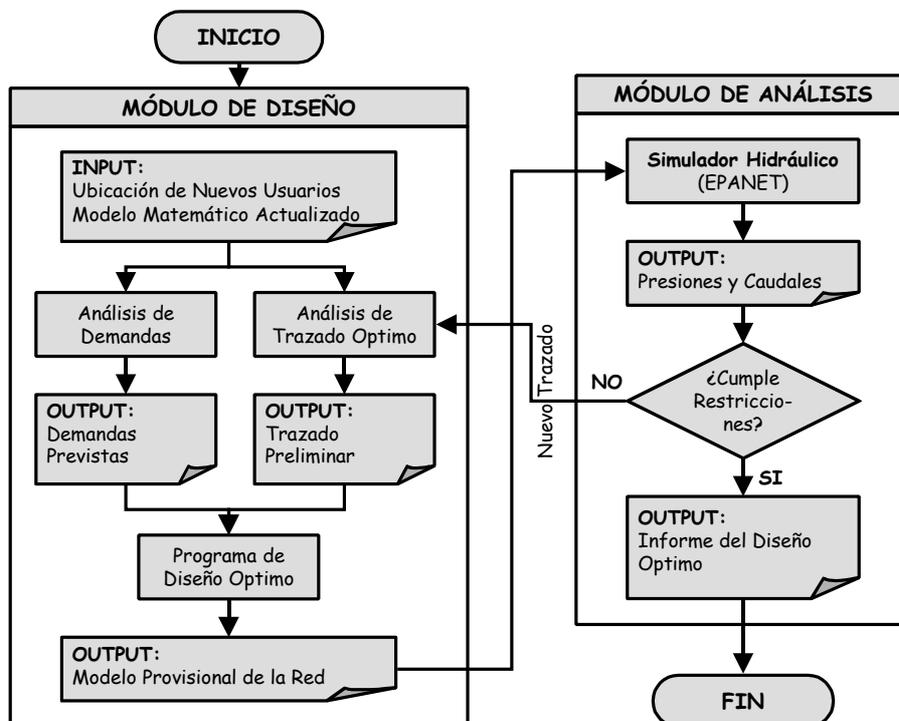


Figura 2.14. Aplicación de SIG al diseño óptimo de una red.

Con la localización de los nuevos abonados y el modelo de la red existentes se entraría en el análisis del trazado óptimo de la nueva red. Paralelamente, con esa misma información se procedería al análisis de consumos con el fin de calcular las dotaciones previstas para cada uno de los nuevos usuarios. En este punto, una gestión eficaz de los datos facilitará mucho los cálculos.

Ahora estaríamos en disposición de afrontar un problema típico de dimensionado de los elementos. Este problema ha sido suficientemente estudiado a lo largo del tiempo (Pérez García, 1993; Taher & Labadie, 1996; Iglesias et al., 1999). Esta tarea la realizará el módulo de diseño óptimo de redes.

Una vez que ya se dispone de un trazado de la nueva red con sus dimensiones **provisionales** se elabora un nuevo modelo matemático que se utilizará, junto con el módulo de cálculo hidráulico, para comprobar el efecto que la inclusión de las conducciones tiene en el resto de la red. Si la nueva red cumple los criterios y restricciones impuestas la solución se da por buena y se generará el correspondiente informe. Si procede, se dará la orden para la redacción de un proyecto de construcción para la nueva red. En el caso de que no se cumpliesen los criterios impuestos, se retornaría al módulo de diseño, iniciando un nuevo cálculo hasta que se satisfagan todas las restricciones.

De todo el proceso anterior merece la pena prestar especial atención al modelo de predicción de la demanda, cuyo objetivo principal consiste en obtener una estimación adecuada de la evolución de la demanda en la red. Esta estimación puede obtenerse con dos técnicas:

- Extrapolando los datos existentes.
- Con modelos económicos y demográficos.

En el primer caso, una única base de datos debería ser ayuda suficiente, dado que contiene registros históricos de demandas de agua a lo largo de un período dado de tiempo. Para el segundo método, las capacidades de un SIG pueden ser cruciales. El SIG permite distinguir, por ejemplo, áreas con diferentes características demográficas y económicas, que simplifican notablemente el uso de modelos demográficos para la predicción de futuras cargas de agua, distinguiendo fácilmente incluso entre áreas con diferentes tendencias. En este sentido, los datos básicos que deberían estar disponibles son:

- a) Localización geográfica de los abonados.
- b) Identificación de los abonados.
- c) Cuantificación del consumo medio de agua dependiendo del tipo de abonado.

Esta información es relativamente fácil de conseguir si se ha implementado un SIG en el abastecimiento donde se desarrolla el estudio. De hecho, la estimación de la demanda a través de una combinación de SIG y modelos demográficos ya se ha usado con éxito en otros campos en actividades económicas, como la localización de tiendas dependiendo del perfil del posible consumidor o la estimación del tamaño de *stocks* para cada producto.

Para determinar la carga media de agua por habitante o toma de conexión (ocasionalmente ambas cargas deben superponerse), debe hacerse una estimación basada en criterios socio-económicos (nivel de ingresos del abonado, número de habitantes por domicilio, etc.) y técnicos (tales como nivel de presión en un área o el diámetro del contador instalado). Por tanto, combinando la estimación de la carga de agua y las tendencias demográficas en las áreas con diferente crecimiento, es posible obtener resultados satisfactorios en la estimación de la demanda de agua.

Otro aspecto para el cual el uso del SIG puede ser una buena ayuda es la distinción del tipo de demanda dependiendo del uso del suelo. Debe comenzarse desde una distribución geográfica de los diferentes tipos de demandas (ordenadas por áreas con demanda mayoritaria o por superposición de capas con porcentajes de cada una):

- Doméstico
- Industrial
- Ocio
- Agricultura

Para la clasificación de los usos del suelo se pueden usar tanto técnicas basadas en el análisis estadístico de registros históricos o análisis de imágenes aéreas recogidas mediante técnicas de teledetección. En general es aconsejable combinar ambas técnicas para limitar la indeterminación intrínseca en la estimación de las demandas de agua con estos métodos.

Como consecuencia de este análisis se pueden estimar las demandas de abonados, toma de conexiones, calles o zonas. Por lo tanto podemos obtener el valor de la eficiencia volumétrica de la red comparando estas estimaciones con el caudal inyectado. También es posible estimar las variaciones diarias de las demandas (lo que se conoce como modelo de demanda). Esto permite distinguir entre el comportamiento de la red durante las horas pico y valle.

3.2.3. Proyecto de la red

Como resultado del diseño de la red se obtienen los datos de trazado y dimensiones de las nuevas tuberías. Esta información no se consolida en la base de datos porque pertenece sólo al diseño de la red. Dicho de otra forma, se trata de información provisional. Sin embargo, es importante que esta información esté disponible para asegurar que más tarde será actualizada. Los nuevos datos introducidos son almacenados en una base de datos no-consolidada, tomando parte de la base de datos global, pero separados de los datos reales para operaciones básicas de consulta.

Una vez el diseño se convierte en proyecto ejecutado y el abonado es registrado, los datos pueden ser consolidados en la base de datos principal.

En la fase de proyecto se consideran tanto la implantación de nuevas zonas de ejecución como la rehabilitación de otras existentes. Los problemas son similares, distinguiéndose sólo por la fiabilidad de la base de datos cartográfica. Para la implantación de nuevas redes la base cartográfica es una estimación de la realidad, mientras que el fondo urbano ya está consolidado en la base de datos para rehabilitación.

La redacción del proyecto de nueva tubería puede ser llevada a cabo por la propia compañía suministradora. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la ejecución de obras de gran envergadura será llevada a cabo por compañías externas a la propia compañía.

En la fase de proyecto tiene que considerarse qué tipo de mantenimiento lleva a cabo la compañía de abastecimiento. Si el proyecto tiene algún error o los materiales no son adecuados a las condiciones de trabajo, pueden ocurrir fallos frecuentemente y como consecuencia, los costes de operación y mantenimiento de la red aumentarán y su eficiencia decrecerá.

Durante la fase de proyecto, el SIG se utilizará para obtener información del fondo cartográfico urbano (de los planos urbanos de la zona), detectar interacciones con otras infraestructuras y servicios urbanos, seleccionar elementos de otras bases de datos comerciales, proporcionar automáticamente mediciones y presupuestos para los trabajos, actualizar la nueva información en la base de datos y comprobar si el proyecto cumple las normativas.

Establecer un formato de proyecto estándar hará más fácil la actualización de datos en el SIG. El contenido del proyecto concierne tanto a los elementos en las redes principal y secundaria como a las tomas de conexión y las acometidas. En el primer caso, el estándar asegura la actualización de información gráfica y temática. En el segundo, el estándar también incluye el fondo urbano de la parcela del edificio, para que pueda ser consolidado en la base de datos.

Los planos de proyecto en el formato estándar se introducen en la base de datos consolidada. El posterior control y seguimiento de la ejecución del proyecto permite la validación en SIG de los datos existentes y modificados, si se producen durante la ejecución.

Para legalizar las obras se requiere la información actualizada de la parcela, con todas las modificaciones, en el formato estándar. Esta información se envía al *sistema de gestión* y si el supervisor de las obras comprueba que es correcta, se consolida.

Cuando un abonado se registra, SIG comprueba si su toma de conexión existe en la base de datos. Si esta información es correcta, los datos gráficos se completan con los temáticos sobre el abonado, mejorando la base de datos. De esta forma, se procede a dar de alta al abonado como nuevo usuario del servicio.

Los usuarios de *sistemas de planificación y proyectos* manejan sólo una pequeña parte de toda la información. Tienen permiso de acceso exclusivamente a unos datos. El

acceso a cualquier otra información que tenga que ver con el sistema no se permite, no solo por seguridad, sino como una manera de mantener la fiabilidad de los datos.

También se debe permitir el acceso a las aplicaciones de previsión de demanda, usadas para estimar futuras demandas de agua, análisis hidráulico, comprobación de tamaño de la red, bases de datos comerciales de tuberías o selección de diámetros de tuberías.

El acceso a información no-consolidada de la base de datos es exclusiva del *sistema de planificación y proyectos*. Ningún otro servicio en el SIG puede tener permiso para acceder a estos datos.

3.3. Aplicación de los SIG en la creación de modelos matemáticos de la red de distribución.

La toma de decisiones sobre cualquier estrategia a adoptar debe estar basada en una buena información. En este sentido, se podría afirmar que la confección del modelo matemático de una red de distribución de agua no es sino una forma de organizar adecuadamente la información disponible sobre la misma con el objetivo de alimentar un programa de análisis hidráulico que nos permita simular el comportamiento del sistema que representa con la mayor exactitud posible. De los resultados de esta simplificación dependerán las decisiones adoptadas.

Desde este punto de vista, el modelo de una red no es más que una herramienta de ayuda a la toma de decisiones basada en la información existente sobre la red (Fuertes et al., 1999).

Así, y dada la gran cantidad y variedad de datos necesarios para la elaboración de un modelo matemático, la ayuda de un SIG resulta importantísima.

3.3.1. Utilización del SIG durante la creación del modelo.

El proceso de elaboración del modelo matemático de una red de abastecimiento atraviesa tres fases hasta llegar a un modelo preliminar, tal y como describen López Patiño et al. (1996) o Fuertes et al. (1999):

- a) Recopilación de información. Como se ha dicho, un modelo matemático es básicamente un modo de organizar la información disponible de tal modo que resulte útil para apoyar la toma de decisiones. La primera fase de la creación de un modelo ha de ser recoger toda esa información. La existencia de un SIG facilita una estructuración de toda esta información de forma tal que ésta pueda ser condensada posteriormente para alimentar el módulo de cálculo hidráulico.
- b) Simplificación de la red. De manera general, la información recopilada incluirá la totalidad de los elementos de la red. Si el SIG ha sido eficientemente implantado, se tendrá información con un nivel de detalle que puede llegar incluso a las acometidas. Sin embargo, por una serie de motivos que se expondrán más adelante

en esta Tesis, un mayor nivel de detalle no implica un mayor nivel de exactitud del modelo. Así pues, es necesario simplificar o *esqueletizar* el modelo.

- c) Asignación de cargas. Tras el proceso de simplificación la apariencia de la red representada en el modelo diferirá ligeramente de la red original. Eso significa que la asignación de cargas (o previsión de consumos) del modelo no será directa, sino que dependiendo de las decisiones adoptadas durante el proceso de simplificación se deberá proceder de una u otra forma. Esta es quizás la fase más delicada durante el proceso de creación del modelo y por ello también recibe una especial atención en esta Tesis.

Tras estas tres fases se llega a un modelo provisional, pero se desconoce si este modelo responderá en el programa de simulación como lo haría la red en la realidad. Aquí comienza el proceso de verificación y calibración del modelo, hasta llegar a un modelo que se pueda aceptar como fiable.

El proceso de verificación y calibración consiste en ajustar los valores de aquellos parámetros del modelo con mayor incertidumbre a partir de la comparación de resultados medidos y calculados por el modelo.

En la fase de creación el SIG puede prestar sus capacidades a lo largo de todo el proceso:

- Proporcionará todos los datos topológicos, de los elementos y de los abonados para iniciar el proceso.
- Dispone de la información y las operaciones topológicas necesarias para apoyar el proceso de simplificación.
- Facilita la relación espacial entre los elementos de la red y los abonados para realizar la asignación de cargas.
- Dispone de registros históricos del funcionamiento de la red para realizar simulaciones de situaciones pretéritas con el fin de compararlas con el comportamiento real de la red.

3.3.2. Aportación de los SIG al mantenimiento de los modelos matemáticos.

En general, la creación de un modelo matemático con o sin la ayuda de un SIG requiere un coste elevado en recursos humanos y financieros. Sin embargo, su utilidad hace que cada vez más abastecimientos se planteen la necesidad de su desarrollo.

En cualquier caso, una vez se ha tomado la decisión de crear un modelo de la red, aparece un segundo problema para su utilización. El modelo se crea en un determinado momento y representa la red en ese momento. Puesto que la red se comporta en cierto modo como un ser vivo, con incorporación de elementos nuevos y sustitución o eliminación de otros que quedan obsoletos, el modelo debe seguir esa misma evolución.

Dicho de otro modo, el modelo necesita un mantenimiento continuo. Éste es el segundo gran obstáculo con el que se encuentran algunos abastecimientos.

El mantenimiento de un modelo consta básicamente de dos partes:

- La puesta al día de los elementos del modelo.
- La calibración continua del modelo.

El apoyo de un SIG supone una ayuda inestimable para el mantenimiento del modelo. Puesto que el SIG tiene capacidad para manejar las bases de datos georreferenciadas, permitirá actualizar continuamente los datos de los elementos de la red, teniendo en cuenta incluso la edad de los mismos para el cálculo de las rugosidades. Estas actualizaciones se pueden transferir también a los elementos del modelo.

Del mismo modo, el control de la red con el SIG proporciona una medición continua de variables en la red y estado de los elementos de regulación. Esta información también se puede utilizar para contrastar nuevas situaciones medidas con simulaciones del modelo. Como resultado de estas comparaciones se pueden corregir los parámetros de la calibración para adaptar el modelo al momento actual.

Por último, como se vio en la utilización del SIG en la planificación de nuevas infraestructuras, en el momento en que se diseña una nueva porción de red, esta información se utiliza para generar un nuevo modelo que queda almacenado en una base de datos provisional. Tan pronto como el proyecto de nueva red se hace realidad, las modificaciones de la base de datos provisional se consolidan en la base de datos de elementos de la red. Del mismo modo, el modelo provisional se corrige para tener en cuenta las posibles discrepancias surgidas durante el proceso de construcción y sustituirá al modelo anterior. El SIG ayuda a que todo este proceso se pueda realizar de una forma casi automática y en tiempo real.

3.4. Aplicación de los SIG a la operación y el control de la red.

Podemos englobar dentro de las aportaciones de un SIG a la operación y el control de la red a todas aquellas funciones dirigidas a mejorar la eficiencia y eficacia del servicio de distribución de agua potable.

En cualquier abastecimiento, hay multitud de herramientas que pueden ser utilizadas con el fin de controlar y mejorar el funcionamiento de la red. Es el caso de los sistemas SCADA, programas de simulación hidráulica y optimización de operaciones, planos, programas de mantenimiento y rehabilitación (Vela Gasulla, 1993), sistemas expertos de toma de decisiones, etc. ... Aunque la mayoría de estas herramientas comparten los mismos datos, tradicionalmente se han utilizado independientemente e incluso por distintos departamentos en un mismo abastecimiento.

Al igual que sucede con otras tareas de la gestión de un abastecimiento, el SIG permite manejar eficazmente toda la información necesaria. Además, permitirá igualmente

compartir e integrar todas las funciones de operación de la red. A continuación se describirá la función del SIG en las principales aplicaciones para operación de la red:

- Control de la red.
- Gestión y estudio de maniobras de cierre parcial.
- Cálculo de indicadores de gestión.
- Generación y gestión de sectores en una red.
- Control y gestión de pérdidas hidráulicas.

3.4.1. Control de la red

El control de un abastecimiento para que su funcionamiento optimice los recursos disponibles es un problema complejo dada la propia naturaleza del sistema alimentado. De hecho, como se verá posteriormente, el consumo de un abonado es una variable aleatoria de la que sólo es posible obtener márgenes de funcionamiento, probabilidades de ocurrencia y valores medios. Esto hace que el funcionamiento de la red cambie de un momento a otro.

Por tanto, para poder controlar la red es necesario disponer de medidas de campo pormenorizadas de una serie de magnitudes, a ser posible en tiempo real. De estas medidas obtenidas en un determinado momento y de su comparación con series históricas deben surgir las decisiones sobre el modo de operación del abastecimiento.

Desde su aparición, los sistemas SCADA han realizado las funciones de adquisición de datos con notable éxito. Básicamente, un SCADA es un dispositivo de hardware y software ligado de forma remota a los elementos de la red que han de ser regulados. Las principales funciones de un sistema SCADA son:

- Captar, filtrar y registrar los datos medidos en distintos puntos de la red.
- Realizar el control de calidad de los datos captados.
- Procesar los datos para optimizar el funcionamiento de la red.
- Modificar si ha lugar las consignas de las estaciones remotas de control de la red.

Hasta ahora el control centralizado de la red se ha realizado sin ayuda del SIG. Las estaciones remotas toman las medidas necesarias y mediante unos algoritmos sencillos y con el concurso de un PLC (*Programmable Logic Control* o autómatas programables) las comparan con unas consignas establecidas y deciden en tiempo real (control ON-LINE) las maniobras a realizar sobre el elemento controlado.

Una red de comunicaciones (vía radio o vía telefónica) envía los datos recogidos y las maniobras efectuadas a un puesto de control central. En este puesto de control central, un sistema SCADA recogerá las informaciones de todas las estaciones remotas, las almacenará y procederá a una optimización conjunta del funcionamiento de la red en

tiempo diferido (control OFF-LINE). De esta optimización saldrán nuevas consignas que deberán ser comunicadas de nuevo a las estaciones remotas correspondientes.

La aparición de nuevas tecnologías de comunicación (sobre todo Internet) y de gestión de datos (bases de datos orientadas a objetos y SIG, principalmente) pueden significar un paso muy importante en el control de la red.

Para hacerse una idea de la importancia creciente que tienen los SIG en el telemando y telecontrol de una red de abastecimiento, baste señalar que en el *Pliego de Condiciones Técnicas* para el abastecimiento de Agua Potable a la Ciudad de Valencia (GMF, 2001), en su artículo 9.7 se establece que la entidad concesionaria deberá conectar el sistema de telemando y telecontrol al SIG. Este debe permitir conocer los valores de las variables controladas, las consignas de regulación y el estado de los actuadores.

Básicamente, Internet y otras tecnologías de la comunicación como la telefonía móvil o las comunicaciones vía satélite aportan economía, velocidad y fiabilidad en las transmisiones de los datos y las órdenes de maniobra. Sin restar importancia a lo anterior, la aportación de los SIG va más allá. Al fin y al cabo, un sistema SCADA maneja datos y toma decisiones, y los SIG son gestores de bases de datos, con el valor añadido de que éstas puede estar georreferenciadas. Además, es habitual que los sistemas SCADA tengan utilidades de presentación de los datos y el estado de los elementos regulados: y uno de los puntos fuertes de los SIG es la generación de informes y presentación gráfica de resultados.

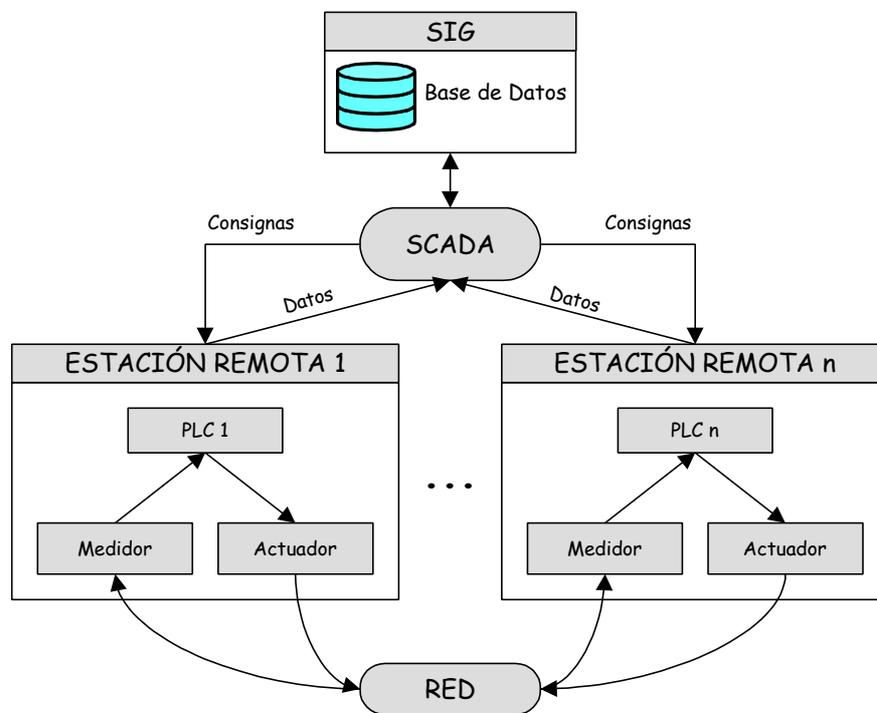


Figura 2.15. Estructura general del intercambio de datos en la aplicación de los SIG en la telemática y telecontrol de redes de distribución de agua.

Por otra parte, si el SIG incluye un modelo matemático de la red y un módulo de predicción de demandas a corto plazo a partir del estudio de series temporales, estas herramientas pueden contribuir a la toma de decisiones para la regulación incluso mejor que el propio SCADA. Un esquema general de la conexión del SIG con un sistema de control centralizado con estaciones remotas es el que se muestra en la Figura 2.15.

Otra funcionalidad que puede aportar la combinación SIG-SCADA-Modelo Matemático es la de contrastar los datos recibidos con los derivados de la simulación con el modelo matemático. De esta comparación pueden surgir dos casos:

- Si la discrepancia es pequeña, los nuevos datos recibidos se pueden incorporar al proceso de calibración continua del modelo.
- Si la discrepancia se sale de unos márgenes aceptables, puede interpretarse como una anomalía del equipo de medición o de la propia red, enviando un aviso para proceder a una operación de mantenimiento correctivo.

3.4.2. Gestión de maniobras de cierre parcial.

Aparte de las maniobras generadas por los sistemas de control de la red (sea el propio SIG, el SCADA o las estaciones remotas), existen otras maniobras que por su impredecibilidad y sus repercusiones en el funcionamiento de la red no pueden ser ordenadas de forma automática como sucedía con aquéllas, y han de ser estudiadas previamente. Si las maniobras automáticas para el control de la red persiguen una mejora de la eficacia o la eficiencia del funcionamiento de la misma, las maniobras programadas responden en general a operaciones de mantenimiento, ya sea correctivo o preventivo. De estas maniobras programadas, la más común y a la vez la que más se beneficia de la existencia de un SIG en el abastecimiento es el cierre parcial de un sector del suministro. Es lo que comúnmente se denomina *cerrada*.

De manera general, las cerradas surgen como respuesta a un aviso y este aviso puede estar programado de antemano o ser el resultado de una emergencia en la red. El primer caso correspondería a operaciones de mantenimiento preventivo o resolución de anomalías leves de la red. Así, se dispondrá de tiempo para preparar la maniobra (maniobra programada) y elegir el instante menos crítico para realizarla. Por el contrario, ante una emergencia (como puede ser una rotura en una conducción de la red arterial) la respuesta ha de ser inmediata y debería tener un protocolo de actuaciones tanto de operación sobre la red como de información a los afectados (principalmente abonados y ayuntamiento o ayuntamientos afectados). Este segundo tipo de maniobras de cierre se suelen denominar maniobras inmediatas. En ambas funciones de operación e información el SIG resultará de suma utilidad.

Cualquier operación de mantenimiento o reparación precisa el aislamiento del tramo de la red donde se va a realizar dicha operación. Puesto que el número de válvulas de aislamiento no es ilimitado, el cierre no afectará únicamente al tramo afectado, sino que

también quedarán aislados los tramos aledaños. Una de las herramientas básicas de todo SIG, al menos si éste es de tipo vectorial, es la conectividad de redes. De esta herramienta se deriva el rastreo de flujo, que buscará todos los caminos posibles que, partiendo de un punto de la topología, cumplan una determinada condición. En el caso de una cerrada, la condición sería la de no atravesar ninguna válvula de seccionamiento. En la Figura 2.16 se observa un ejemplo de cerrada. En ella, se ha creado un corte basándose en la ubicación de las válvulas más cercanas y se han listado todos los abonados que se verían afectados por ella.

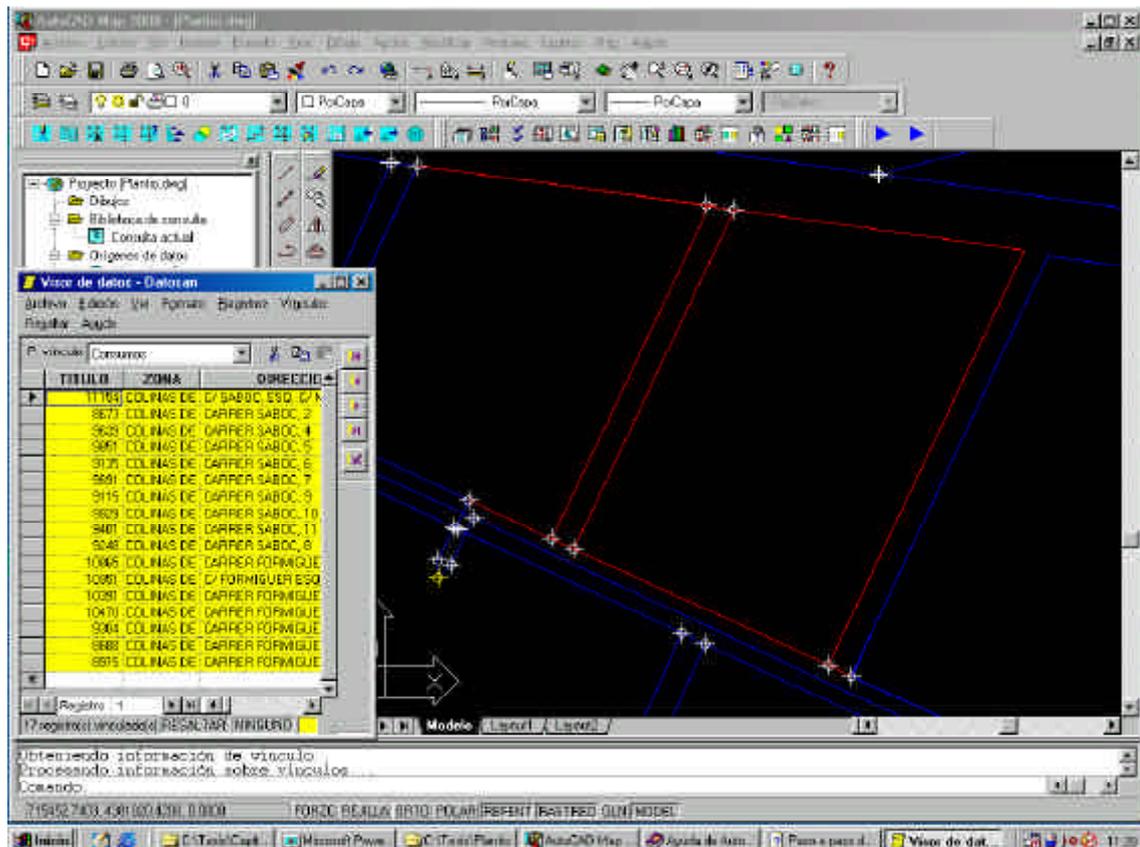


Figura 2.16. Gestión de cerradas. En rojo la zona afectada por la cerrada y en el visor de datos las direcciones de los abonados afectados por el cierre parcial.

Evidentemente, una vez localizadas las válvulas que han de cerrarse, habrá que seguir todo el protocolo asociado con la cerrada (GMF, 2001):

- Generación de un informe de maniobra.
- Información a los implicados.
- Actualización de la base de datos.

El informe de maniobra, que será utilizado por los encargados de realizarla, debe contener al menos los siguientes puntos:

- a) Programación y secuencia de operación de las maniobras a realizar: cierre de válvulas, apertura de desagües, arranque o parada de bombas, etc. ...

- b) Croquis o plano de ubicación de la zona afectada por la maniobra, con acotaciones.
- c) Listado de los elementos afectados por la maniobra de cierre, tanto si han de ser maniobrados como si han de quedar como están. Deberán incluir, al menos, la localización exacta (incluida la profundidad), accesibilidad y estado de cada uno.
- d) Estrategia alternativa de cierre ante la posibilidad de fallo de las válvulas. Esta se hará para fallo en cada una de las válvulas de seccionamiento.

Paralelamente a la generación del informe de maniobra se procederá a informar a los afectados. En primer lugar, se deberá avisar al ayuntamiento o ayuntamientos afectados por la cerrada. A continuación, se avisará al servicio de bomberos si algún hidrante pudiera quedar inoperativo. Por último, sería recomendable avisar igualmente a los abonados afectados. En este último punto la combinación SIG e Internet puede jugar un papel importante a corto plazo.

Si los abonados están georreferenciados, del propio informe de maniobras se puede realizar una consulta espacial sobre la base de datos para obtener un listado de los mismos. Con estos listados se llamará individualmente a cada abonado para avisar del corte del suministro, aportando una buena imagen a la compañía suministradora. Internet permite ir más allá, enviando un mensaje SMS por telefonía móvil o un correo electrónico a los usuarios que dispusieran de estos servicios. Esta última es una posibilidad factible a corto plazo.

Una vez que la maniobra ha concluido, se actualizarán los datos de los elementos afectados en la base de datos de infraestructuras. Así mismo, se incluirá la maniobra, con fecha y descripción, en una base de datos de incidencias, a fin de garantizar la disponibilidad de un histórico de mantenimiento.

Para finalizar, la existencia de un modelo matemático ligado al SIG permitiría acompañar el informe de las maniobras programadas con una alternativa de regulación de la red para minimizar la repercusión de la cerrada en el funcionamiento global de la red.

3.4.3. Cálculo de los indicadores de gestión.

La propia idiosincrasia de los abastecimientos españoles hace necesaria su modernización inmediata. Puesto que se trata de un servicio público, su gestión no puede medirse única y exclusivamente en términos de rentabilidad económica, sino que deben contemplarse otros aspectos como la optimización de la gestión (eficiencia y eficacia de la misma), niveles de fiabilidad y seguridad, y nivel de calidad del servicio. Los *indicadores de gestión* son parámetros que se utilizan para evaluar el comportamiento del abastecimiento en términos de gestión. Se pretende que sean valores que sirvan para comparar la excelencia en la gestión de los abastecimientos en términos relativos, independientemente del tamaño de la red o del número de abonados servidos. Básicamente se trata de importar en la gestión de los abastecimientos el funcionamiento *por objetivos* tan habitual en las actividades industriales.

Los indicadores de gestión se pueden clasificar en dos grandes grupos (Cascetta, 2000):

- a) Indicadores socioeconómicos, que sintetizan toda la información útil para comprender el contexto en el cual se halla inmerso el abastecimiento.
- b) Indicadores operativos, que recogen información más específica sobre la gestión técnica de los abastecimientos.

Una descripción exhaustiva del uso de estos indicadores de la gestión de un abastecimiento de agua potable se puede encontrar en la Tesis Doctoral de Cabrera (2001) o en Cubillo et al. (1997).

Para elaborar estos indicadores de gestión es necesario manejar y procesar una gran cantidad de información de todo tipo, desde clasificación socioeconómica de los abonados hasta especificaciones técnicas de los elementos de la red, pasando por los recursos humanos y económicos disponibles y requeridos por el abastecimiento. Es en este punto donde radica la importancia estratégica de disponer un SIG sobre el que desarrollar un sistema de evaluación de indicadores de gestión.

Además, un SIG permitiría obtener estos indicadores de gestión por calles, sectores de la red, etc. ... Esta información puede ser aprovechada por el propio SIG para, por ejemplo, acometer programas de rehabilitación de tuberías o renovación del parque de contadores en aquellos sectores donde los indicadores se califiquen como mejorables.

En el uso de los SIG para obtener los indicadores de gestión, es habitual realizar las siguientes operaciones en la base de datos:

- Consultas sobre la base de datos de infraestructuras.
- Consultas al registro histórico de incidencias y operaciones de mantenimiento.
- Vinculación geográfica de indicadores de gestión.
- Vinculación de indicadores de gestión con abonados.
- Cálculo de los indicadores de gestión mediante acceso a atributos de bases de datos relacionales.

3.4.4. Generación y gestión de sectores en la red

La sectorización de la red, entendiéndose por ésta su subdivisión en varias subredes de menor tamaño, no es un fin en sí mismo, sino una herramienta que ayuda a regular eficazmente un abastecimiento. Cada porción en que se ha dividido la red se denominará *sector* en lo sucesivo. Estos sectores deben constituir una unidad de distribución suficientemente limitada y homogénea para que la gestión de los datos a captar y analizar tenga la máxima rapidez y fiabilidad. La delimitación de los sectores es pues, fundamental para garantizar la eficacia de una gestión técnica basada en la sectorización, y precisará por tanto un trabajo preparatorio previo muy laborioso.

Al proceder con una sectorización de la red de distribución de agua potable se han de atravesar distintas fases:

- a) Previo al inicio de los trabajos de sectorización hay un trabajo de gabinete en el que se elaborará un diseño preliminar de sectores, en el que se ha de tener en cuenta la disgregación espacial y funcional de la propia red.
- b) Selección de un sector para proceder a realizar una prueba piloto. No es en ningún modo recomendable afrontar desde el inicio la sectorización completa de la red.
- c) Para proceder al confinamiento del sector se debe comprobar previamente la integridad estructural del mismo, esto es, la caracterización de cada uno de los elementos, tanto de datos físicos como de ubicación. También se comprobará el estado de los mismos, así como su operatividad (principalmente estanqueidad y accesibilidad de las válvulas de seccionamiento).
- d) El paso siguiente será la valoración hidráulica del sector. En ella se realizarán mediciones en puntos significativos del mismo, y se procederá a un primer confinamiento, a partir del cual se valorará el rendimiento hidráulico del sector y se elaborará un modelo digital de alturas piezométricas (obtención de caudales mínimos).
- e) Con todos los datos recogidos se procede a la comparación con las predicciones del modelo matemático. De las discrepancias habidas se pueden concluir las actuaciones necesarias (reparaciones) sobre el sector para poder validarlo y una calibración del modelo para la nueva situación.
- f) Una vez validado y confinado el sector piloto, se hará un estudio de viabilidad técnica (posibilidad de cierre del sector, mantenimiento de los niveles de calidad del servicio) y económica (inversiones necesarias frente a beneficios esperados) de la sectorización completa de la red. Si el estudio es positivo, se procederá con los demás sectores de la misma forma que se ha procedido con el sector piloto.

Las fases anteriores deben permitir cierta flexibilidad para, por ejemplo, cambiar los límites de un sector si hubiere imposibilidad de manipular o instalar una válvula de seccionamiento.

La existencia de un sistema de gestión del abastecimiento basado en un SIG permite una interacción importante con la sectorización de la red. A continuación se describen estas interacciones.

a) Aportaciones de un SIG al proceso de sectorización.

Como se ha expuesto en la breve descripción de las fases de que consta la sectorización de una red, durante ésta se requiere una ingente cantidad de datos, tanto alfanuméricos como espaciales. Resulta evidente la aportación de los SIG en este punto.

Por un lado, el estudio del diseño previo de los sectores utilizará la información georreferenciada para definir, al menos, los sectores *satélite* a partir de las zonas dispersas que puedan ser igualmente abastecidas por la red. En otras ocasiones, la propia topología de la red sugiere algunas subdivisiones claras (urbanizaciones periféricas o zonas completamente ramificadas dentro de la red). Así, por ejemplo, durante los trabajos de sectorización de la red de Reus (Ayza, 1991) se definieron 8 sectores satélite atendiendo única y exclusivamente a su situación en la red, fuera del anillo principal (ver Figura 2.17).

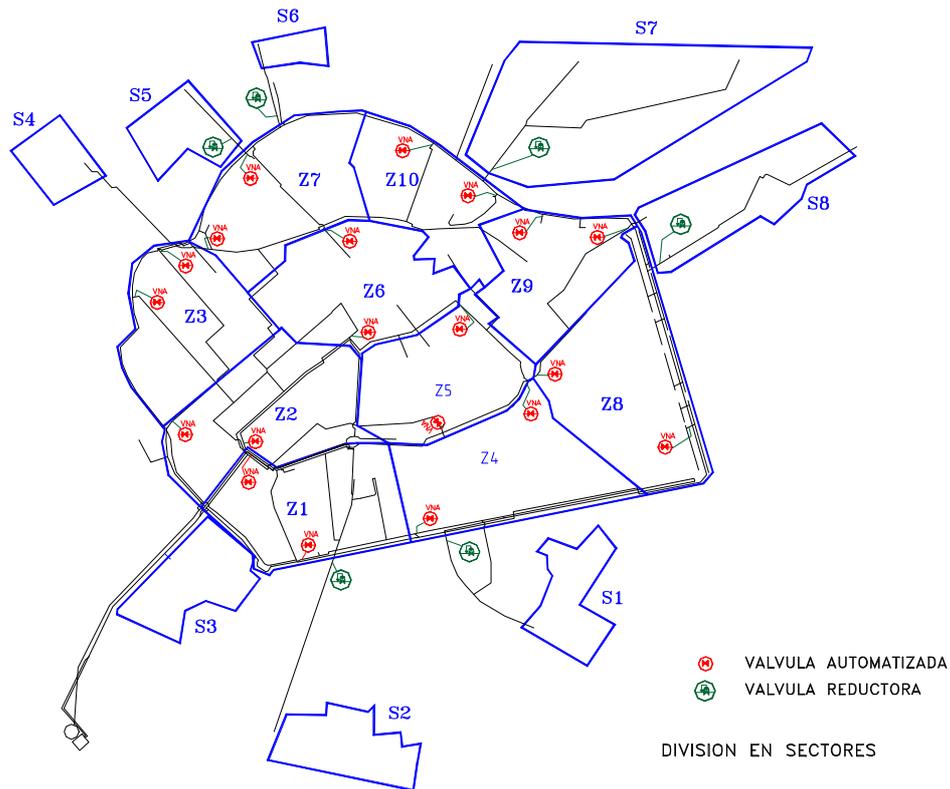


Figura 2.17. Resultado de la sectorización de la red de Reus.

En ese mismo estudio, la definición de los sectores interiores se basó en criterios funcionales. En concreto, un sector debería tener una extensión limitada (entre 10 y 50 ha o 5 y 10 km de tubería). Además, si se ha de utilizar la sectorización como herramienta para optimizar la gestión de la red, es imprescindible que los sectores tengan cierta homogeneidad de presiones. En el primer caso, de nuevo el SIG puede aportar los datos de superficie, kilómetros de tubería o abonados servidos por cada sector. Si el SIG dispone además de un modelo matemático de la red, es posible conocer también la división natural de la red en pisos de presión.

Con la información anterior disponible en forma de mapas temáticos, se procede a la elaboración de una sectorización inicial. El siguiente paso será determinar los puntos de corte de los sectores, es decir, las válvulas que habrá que cerrar para aislar cada uno de los sectores de los demás. La herramienta utilizada será una ampliación de la descrita para la gestión de maniobras de cierre parcial.

El SIG aquí elaborará la información necesaria para el confinamiento del sector:

- Cartografía de fondo de todo el sector.
- Válvulas de seccionamiento que han de ser manipuladas, con información exacta de su ubicación, accesibilidad y modo de accionamiento.
- Ubicación más adecuada para los equipos de medida, tanto definitivos (caudalímetros en los puntos de entrada de agua al sector) como provisionales.
- Planos de detalle de las instalaciones que deban ser manipuladas, con sus correspondientes cotas.

A todo esto hay que añadir la posibilidad de estudiar con ayuda de un modelo matemático el punto de alimentación al sector más adecuado para no afectar a los niveles de calidad del servicio.

Con esta información se procede al confinamiento del sector.

b) Aportaciones de la sectorización al SIG.

Durante el proceso de confinamiento del sector se recogen gran cantidad de datos que en condiciones normales no estarían disponibles:

- Mediciones de presión en puntos interiores del sector. Esta información podrá ser incorporada a la base de datos de mediciones para la calibración posterior del modelo matemático.
- Medidas de caudal, que permiten deducir curvas de modulación del consumo. Estas medidas de caudal se pueden relacionar con el tipo de abonado para ser utilizadas posteriormente en el módulo de predicción de demandas.
- Durante las obras de adaptación de los elementos de la red (manipulación, sustitución o reparación de válvulas, principalmente) se obtienen fragmentos de válvulas y tuberías que sirven para conocer el estado interno de la red en ese sector.

Además de las aportaciones mutuas entre el SIG y el proceso de sectorización, hay que añadir el hecho de que ésta última es una operación iterativa, cuyo seguimiento debe ser actualizado continuamente y que puede traer consigo inconvenientes para los abonados. El seguimiento debería ser reportado al SIG y éste a su vez utilizará el modelo matemático para obtener la estrategia de regulación más adecuada para minimizar tales inconvenientes.

Por último, una vez se ha completado la sectorización de la red, su combinación con el modelo matemático y la potencia del SIG para el manejo de datos permitirán:

- Aumentar el grado de precisión del modelo, al disponer de al menos una medida continua de caudal por sector.
- Mejorar la uniformidad de presiones en la red al tener sectores agrupados por pisos de presión.

- Simplificar las tareas de optimización energética de la red, al limitarse el área a optimizar al ámbito de cada sector.
- Como se verá a continuación, la existencia de una sectorización en la red mejora considerablemente la eficacia de un programa de detección de fugas.

En Iglesias et al. (1999) puede obtenerse más información sobre la utilización de los SIG en la sectorización de redes y su aplicación a la detección de fugas. En Fernández (1999) se detallan todas las operaciones realizadas para la sectorización de la red de Sevilla con la ayuda del paquete SIG ARC/INFO (ESRI, 1989) y los modelos de cálculo hidráulico SARA (Iglesias, 2001) y EPANET (Rossman, 1993).

3.4.5. Control y gestión de pérdidas volumétricas.

De los problemas que afectan a los abastecimientos españoles, el del bajo rendimiento hidráulico de la red es sin lugar a dudas el más grave. La calificación que este hecho merece en un país que se ve continuamente afectado por las sequías no puede ser otra sino inaceptable. Si, como se ha comentado, la implantación de los SIG en los sistemas de distribución de agua potable viene motivada por la necesidad de la modernización de la gestión de los abastecimientos, un objetivo prioritario de los SIG ha de ser el de la mejora del rendimiento de la red a través de la reducción de pérdidas de agua. Dicho de otra forma, los SIG **deben** contribuir a la lucha contra las fugas y otras pérdidas volumétricas en la medida en que ello sea posible.

Básicamente, se puede clasificar el volumen de agua inyectado en la red en cuatro categorías, según sea o no medido y según sea o no consumido (adaptado de Vela et al, 1994):

Volumen Inyectado	{	Vol. Consumido y Registrado	}	Vol. Facturado
		Vol. No Consumido y Registrado		
		Vol. Consumido y No Registrado	}	Vol. No Facturado
		Vol. No Consumido y No Registrado		

De manera genérica, se denomina *rendimiento hidráulico* o *volumétrico* de una red de distribución de agua al cociente entre el volumen facturado y el volumen inyectado. Sin embargo, en esta medida se incluye como pérdida de agua el volumen consumido no registrado, que se corresponde principalmente con el consumo de uso público y las conexiones clandestinas a la red. Por otra parte, se da por facturado el volumen registrado no consumido, que es aquel debido a las pérdidas de agua en las instalaciones interiores de los edificios. Este último caso es responsabilidad del abonado y debe ser éste el que

solucione el problema. Con todo esto se concluye que un proceso de control de las pérdidas volumétricas en la red deberá ir dirigido a cuantificar y limitar los volúmenes debidos a:

- Subcontaje en los contadores domiciliarios.
- Consumos para usos públicos.
- Conexiones clandestinas.
- Fugas a través de roturas e imperfecciones.

El subcontaje en los contadores es un problema que se puede resolver con una estrategia adecuada de gestión del parque. Algunos autores han desarrollado metodologías de renovación para minimizar este concepto. Entre ellos se puede destacar la expuesta por Arregui et al. (1998).

Por su parte, la localización de pérdidas volumétricas exige un control exhaustivo de **todo** el volumen consumido. Esto incluye la medición y la facturación del volumen servido para usos públicos, aunque luego éste no sea facturado, o se facture a precio simbólico. Así pues, en un abastecimiento se pueden considerar realmente pérdidas volumétricas las conexiones clandestinas y las fugas de agua a través de anomalías e imperfecciones de la red.

Ambos conceptos comparten el hecho de ser pérdidas, pero hay entre ellos una diferencia sustancial. Las fugas propiamente dichas tienen un comportamiento hidráulico y dependen, por tanto, de la presión de la red en el punto donde está la anomalía. Sin embargo, las conexiones ilegales tienen un comportamiento análogo al de cualquier otro consumo humano. La metodología que se va a exponer a continuación va dirigida al control de las primeras pues se basa en el aumento de las fugas durante las horas nocturnas debido al aumento de la presión en ese período.

Los factores que afectan al volumen de agua perdida a través de una fuga son básicamente tres:

- a) Características de la anomalía a través de la cual se produce la fuga.
- b) Presión de la red en el punto donde se produce la fuga.
- c) Tiempo empleado en la localización y reparación de la fuga.

Cuando el abastecimiento dispone de una sectorización fiable, la combinación de ésta con el SIG resulta propicia para la implantación de un sistema de detección temprana de las fugas más importantes. El único requisito es que los sectores deben estar perfectamente aislados y deben tener un dispositivo de medición continua del caudal inyectado en el sector. Sería además recomendable que cada sector dispusiera de un punto único de alimentación y un punto alternativo de entrada de caudal.

El método que se describe a continuación se denomina *método de medida del consumo mínimo* (Di Federico, 1999), *método de los caudales mínimos nocturnos* (Fernández, 1999) o *método alemán*. Esta última denominación se debe a que es un método

muy utilizado en Alemania, de donde procede una primera formulación del mismo (Weimer, 1992). Este método parte de varias premisas.

En primer lugar, si consideramos como anomalía de la red cualquier imperfección de la misma que provoque pérdidas de agua, se comprueba que la distribución de las pérdidas es similar a la de cualquier otra anomalía en una pieza de un sistema mecánico: la mayor parte de las pérdidas se concentran en una pequeña porción de anomalías y viceversa. (Figura 2.18). Esta afirmación está avalada experimentalmente por análisis estadístico de mediciones realizadas en tres ciudades españolas (Vela, 1994).

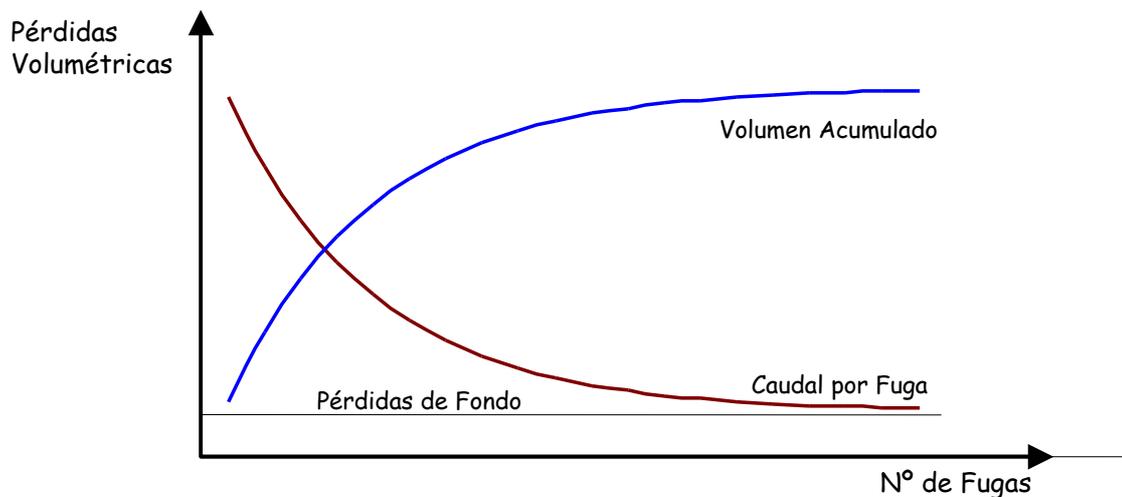


Figura 2.18. Evolución de las pérdidas acumuladas por fugas y distribución del caudal perdido por cada una de las fugas (adaptado de Vela et al, 1994).

De aquí se deduce que controlando las fugas más importantes se puede reducir considerablemente el volumen total debido a las fugas. Además, hay un umbral de fugas que es prácticamente imposible de localizar, al menos de forma que resulte mínimamente rentable. A este umbral se le denomina caudal de fugas latente o *pérdidas de fondo*. El orden de magnitud de estas pérdidas de fondo está entre 0,1 y 0,3 m³/h.km.

La segunda premisa en que se fundamenta el método de los caudales mínimos nocturnos se deriva de la dependencia del caudal de fugas con la presión en la red. Puesto que es por la noche cuando menor es el consumo y mayor la presión, es a estas horas cuando la importancia relativa de las fugas en el total del volumen circulante será mayor. Así, el método funcionaría de la siguiente forma:

- Para cada sector se tiene un registro continuo del caudal inyectado, que es enviado periódicamente al SIG para su almacenamiento. Para que una medida resulte estadísticamente significativa conviene promediar los caudales registrados durante un período entre 15 y 30 minutos.
- Además, en función del tipo de abonados de cada sector y sus pautas de consumo (curvas de modulación) se evalúa el caudal mínimo nocturno

esperado. Esta evaluación la realizará el módulo de análisis de demandas, considerando un valor para las pérdidas de fondo y considerando un margen para evaluar sólo las pérdidas que resulten económicamente rentables.

- Con ambos datos (caudal registrado y caudal mínimo nocturno) el SIG procede a la comparación de ambos antes de almacenar el primero. Si en un determinado instante el caudal registrado es mayor que el caudal mínimo nocturno se generará una alarma de fuga, y comenzará el proceso de localización.

También para la segunda fase (la correspondiente a la localización de la fuga) la existencia de un SIG resulta de gran ayuda. En el momento en que se genera la alarma, el SIG elaborará un informe de maniobras similar al generado para las maniobras de cierre parcial, pero con algunas diferencias. Deben realizarse todas las maniobras que sean necesarias para individualizar al máximo los tramos de la red. Para cada maniobra de cierre creada, el SIG debe recalcular el caudal mínimo nocturno (Q_{MN}) de la zona del sector que sigue recibiendo agua a través de su único punto de alimentación. Cada vez que se finalice una maniobra se comparará el caudal registrado con el Q_{MN} estimado por el SIG para esa maniobra en concreto. Se procede así con todas las maniobras proporcionadas por el SIG, hasta localizar el tramo donde presumiblemente se halla la fuga.

Una vez reducida la extensión de red al mínimo posible, se procederá a la localización puntual mediante técnicas clásicas. Si el sector dispone de un segundo punto de alimentación de emergencia, todo este proceso se puede realizar sin interrupción del suministro, salvo para proceder a la reparación de la fuga. En la Figura 2.19 se muestra un ejemplo de cómo proceder a la individualización del tramo con la fuga. El ejemplo corresponde a un sector de la red de distribución de Montecchio-Emilia en Italia (Di Federico, 1999). El informe de maniobras generado por el SIG y los registros del caudalímetro se exponen en la Tabla 2.6 y en la Figura 2.19 se muestra la secuencia seguida para la reducción del tramo que ha de ser auscultado.

Tabla 2.6. Informe de maniobras para la localización de una fuga en Montecchio-Emilia (Di Federico, 1999). En negrita las situaciones en que se genera una alarma por fuga.

Maniobra	Longitud (Km)	Q_{medido} (m^3/h)	Q_{MN} (m^3/h)
Fto. Normal	2,23	5,7	0,67
1	0,03	0,0	0,20
2	0,60	0,3	0,38
3	1,15	0,5	0,54
4	1,26	0,7	0,57
5	1,47	0,7	0,63
6	1,55	5,6	0,67

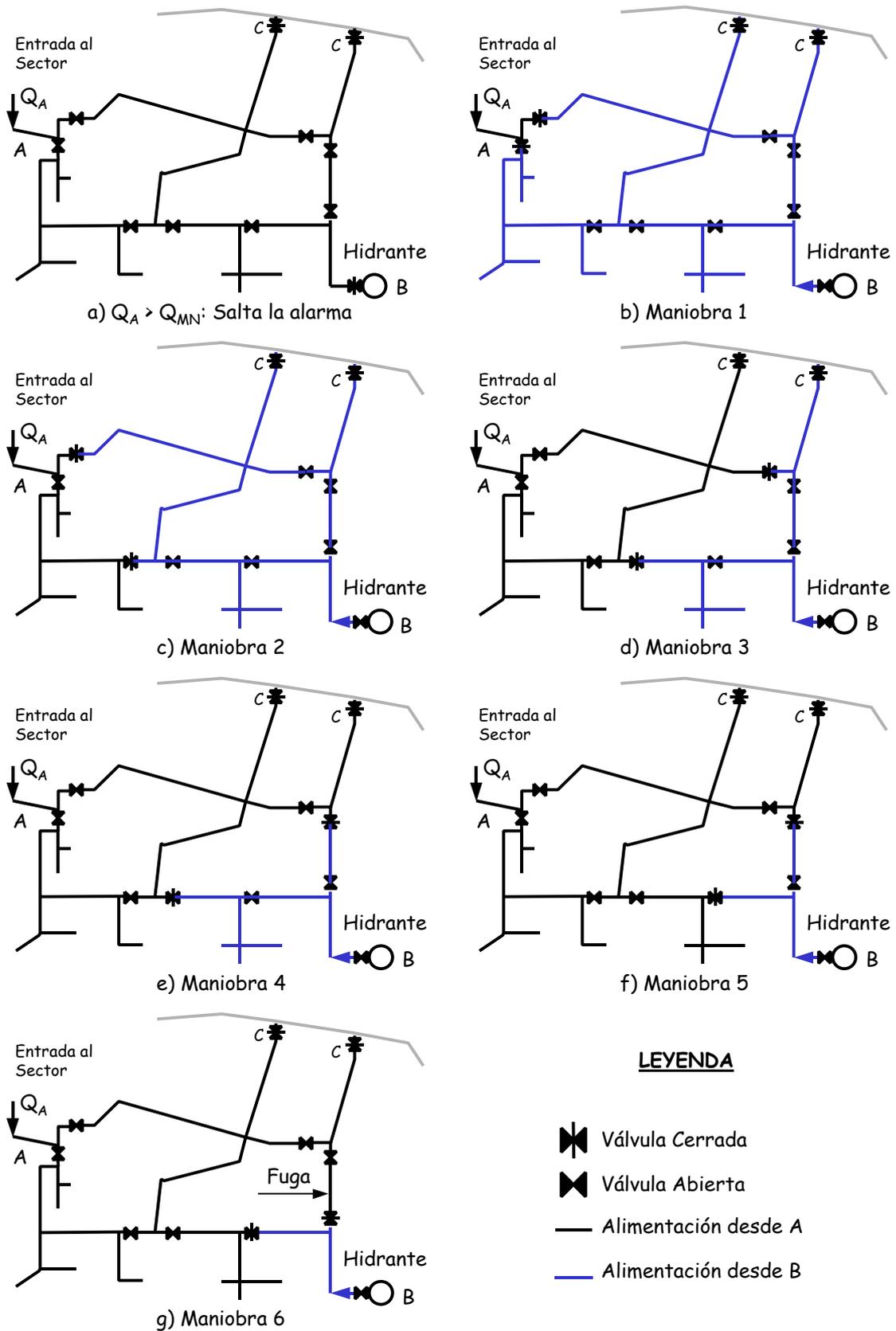


Figura 2.19. Maniobras para el control de fugas en un sector.

3.5. Aplicación de los SIG a la gestión de las infraestructuras existentes.

Como se ha visto en los apartados anteriores, la red es un sistema sumamente dinámico, sometido a cambios diarios en los elementos y equipos que la forman, buscando siempre la máxima eficiencia. Los elementos que componen la red modifican continuamente sus parámetros físicos para adaptarse a las distintas situaciones que se presentan y responder a las demandas solicitadas. Además, la red también crece para compensar el crecimiento de la población abastecida o para paliar defectos puntuales en la calidad del servicio en determinados puntos. Esto ya se comentó sobradamente cuando se describió la aplicación de los SIG a la creación de nuevas infraestructuras.

La red también envejece y muere. Así, siguiendo la analogía con los seres vivos, necesita cuidados para alargar su vida en la medida que ello sea posible (*mantenimiento preventivo*). También, en determinadas ocasiones sufrirá anomalías que deberán ser solucionadas si ello fuera posible (*mantenimiento correctivo*). En otras ocasiones, estas anomalías pueden ser graves y necesitan un tratamiento más prolongado y costoso que al tiempo corrija la anomalía y prevenga la aparición de otros similares (*rehabilitación*). Por último, si la anomalía es suficientemente grave, puede provocar la muerte de un elemento de la red, por lo que necesitará ser reemplazado por un elemento nuevo (*renovación*).

Un sistema de gestión de las infraestructuras debe estar encargado de controlar en todo momento el estado de los elementos de la red y proceder con las operaciones de mantenimiento de los mismos.

Son objetivos fundamentales de un sistema de gestión de las infraestructuras apoyado en un SIG los que se enuncian a continuación:

- a) Facilitar el acceso a toda la información relevante en las operaciones de alta, baja o modificación de cualquier elemento de la red. Esto incluye ubicación geográfica, datos técnicos e históricos de mediciones y mantenimiento.
- b) Minimizar los tiempos de interrupción del servicio por reparación de averías y el tiempo de respuesta para la ejecución de acometidas para nuevos abonados.
- c) Realizar un programa de mantenimiento adecuado que minimice los costes y maximice el nivel de calidad del servicio.
- d) Realizar un seguimiento del programa de mantenimiento anterior que posibilite evaluar su bondad.

En el libro editado por Cabrera et al (1996) se puede encontrar un completo tratado de los factores que influyen en la elaboración de un programa de mantenimiento integral de redes de abastecimiento, así como de los objetivos del mismo.

3.5.1. Gestión del inventario.

Esta es sin duda la principal aplicación de un sistema de gestión de infraestructuras en un abastecimiento. Puesto que la principal misión de un SIG es la de recoger, almacenar

y proporcionar datos a los distintos abonados o servicios que tiene el sistema, el SIG debe tener esta información permanentemente actualizada. Esta parte del SIG funcionará como cualquier otro sistema gestor de base de datos, pero con la peculiaridad de manejar información georreferenciada. Básicamente, deberá trabajar con cinco grandes bases de datos de infraestructuras:

- Fondo cartográfico urbano. Esta base de datos debe poner a disposición de cualquier otro servicio la información sobre callejeros, direcciones postales e infraestructuras urbanas del área solicitada. Además deberá disponer de utilidades de depuración de datos para detectar incongruencias entre aquellos procedentes de distintas fuentes.
- Elementos de la red. Debe contener toda la información de los distintos elementos de la red, debidamente actualizada. Esta información debe incluir la descripción física, la localización geográfica, la valoración de su capacidad hidráulica y la integridad estructural.
- Base de datos provisional de elementos. Es una réplica de la anterior en la que se reflejan cambios previstos en la red que aún no han sido consolidados, es decir, aún no existen realmente. Esta base de datos es especialmente importante en las operaciones de proyecto y mantenimiento de la red. Tan pronto como el cambio previsto se hace realidad, la información se consolida en la base de datos de elementos de la red.
- Mediciones y telecontrol de la red. Para la actualización del modelo y para apoyar a la toma de decisiones es necesaria una base de datos de funcionamiento de la red que recoja los parámetros de la misma: mediciones hechas, maniobras realizadas, consignas, etc....
- Mantenimiento. Aquí se almacenarán todos los datos relacionados con las operaciones de mantenimiento: incidencias, actuaciones realizadas, previsión de nuevas actuaciones programadas, costes de cada actuación, indicadores de la mejora habida, etc.... También debe incluir fotografías, grabaciones y otras impresiones realizadas durante una operación de mantenimiento que ayuden a conocer mejor esa infraestructura.

Por último, cabe señalar que la gestión del inventario requiere la posibilidad de generar información gráfica del mismo, por tanto, debe estar íntimamente ligada a las herramientas de creación de mapas temáticos, elaboración de informes e impresión de planos de obra.

3.5.2. Mantenimiento preventivo.

La definición de un programa de mantenimiento, como se ha comentado, requiere prestar atención a los aspectos técnicos y económicos de la red. Entre los aspectos técnicos será necesaria información sobre:

- Niveles de calidad del servicio: presiones, caudales y calidad del agua.
- Rendimientos volumétricos de los sectores que pudiera haber en la red.
- Identificación de las relaciones causa-efecto en las anomalías a partir de los datos anteriores y la información obtenida durante la reparación de la anomalía.
- Impacto que las tareas de mantenimiento tienen sobre el funcionamiento de la red.

Por otra parte, a partir de los datos históricos de mantenimiento, se ha de encontrar la relación óptima entre el mantenimiento preventivo y el mantenimiento correctivo. Una inversión mayor en mantenimiento preventivo redundará en una disminución del coste correspondiente al mantenimiento correctivo, aunque el coste de este último no bajará nunca de un mínimo (ver Figura 2.20). Por tanto, se buscará la combinación de ambos que minimicen los costes totales.

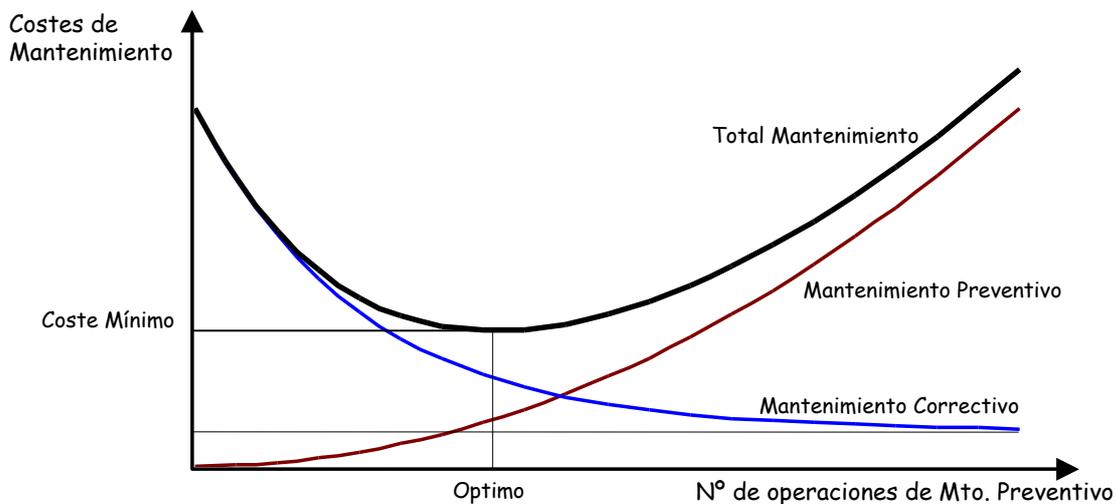


Figura 2.20. Determinación del coste óptimo de mantenimiento de un abastecimiento (adaptado de Cabrera y García-Serra, 1997).

En este contexto, podemos definir el mantenimiento preventivo como el conjunto de medidas y actuaciones sobre la red dirigidas a reducir la probabilidad de ocurrencia de situaciones indeseables (Vela, 1993). Algunas operaciones comentadas anteriormente pueden considerarse como mantenimiento preventivo. Es el caso del diseño de redes apoyado en una buena predicción de las demandas o la utilización del SIG para una adecuada regulación de la red a través de sistemas SCADA.

En función de la definición que se haga de *situación indeseable* se podrán añadir otras operaciones típicas del mantenimiento preventivo. En general, serán situaciones indeseables un rendimiento bajo en un sector o el incumplimiento de los niveles de calidad del servicio en presiones, caudales o calidad del agua servida.

Básicamente son tareas a realizar dentro de un programa de mantenimiento preventivo de una red los siguientes (Cabrera y García-Serra, 1997):

- Control periódico de todos los elementos de la red.
- Limpieza selectiva de tuberías.
- Pintado o recubrimiento con polímeros del interior de tuberías.
- Gestión óptima de los repuestos (disponibilidad en almacén y proveedores).
- Inspección y reparación si procede de los aparatos de medida y de regulación.
- Existencia de programas de renovación del parque de contadores.
- Protección de los elementos vulnerables o sensibles de la red.
- Regulación óptima de las presiones en la red para evitar roturas debidas a excesos de presión.
- Evitar o amortiguar los transitorios hidráulicos en la red.

Los programas de mantenimiento preventivo se elaboran a partir de la información que cada fabricante proporciona sobre su producto. De ella se obtiene una primera idea de la metodología y periodicidad de las revisiones. Este programa preliminar es progresivamente modificado a partir de la información disponible sobre averías de ese elemento y otros de características similares, las condiciones de funcionamiento de la red en el área donde está instalado, los costes asociados a una hipotética reparación, etc. El SIG ha de ser capaz de cruzar toda esta información para determinar la estrategia óptima de mantenimiento para cada elemento.

Con la estrategia de mantenimiento de todos los elementos, el SIG elaborará el programa de mantenimiento. Utilizando las herramientas de gestión de datos espaciales, el SIG puede contribuir a la reducción de los recursos humanos necesarios para desarrollar el programa elaborando una ruta óptima de trabajo que minimice tiempos. Además, puede proporcionar la información cartográfica y de red, imprescindible para realizar cualquier operación.

Puesto que algunas operaciones de mantenimiento implican la alteración de algunos elementos de la red, el SIG elabora un informe de maniobra como el que se describía en el apartado dedicado a la gestión de cerradas. Además, de manera similar a como sucedía en la gestión de proyectos, los elementos que se puedan ver afectados por el mantenimiento se marcarán en una base de datos provisional en espera que se confirme su estado final.

Por último, si la operación precisa del empleo de repuestos del almacén, el SIG comprobará las existencias de los mismos y, si procede, generará un aviso para su reposición.

Con todas estas operaciones, el SIG contribuye a un importante ahorro de tiempo en las tareas de mantenimiento preventivo. Además, permite cumplir uno de los objetivos de la gestión de infraestructuras: la información detallada de los elementos que componen la red, incluidos su estado y su histórico de mantenimiento.

3.5.3. Mantenimiento correctivo.

El mantenimiento correctivo consiste en la detección, localización y posterior reparación de los fallos y anomalías existentes. Son medidas de mantenimiento correctivo aquellas encaminadas a minimizar el daño producido o el tiempo transcurrido desde el fallo hasta la reparación del mismo (Vela, 1993). Son actuaciones encaminadas a facilitar las operaciones de mantenimiento correctivo:

- Una adecuada sectorización de la red.
- Incorporación de válvulas de seccionamiento que reduzcan la longitud de tuberías afectadas por una cerrada.
- La monitorización y el telecontrol de la red.
- La evaluación de los caudales mínimos nocturnos.
- Análisis estadísticos cruzados de los caudales en la red de distribución con los circulantes en la red de evacuación de aguas residuales y pluviales.
- La mejora de los sistemas de regulación y de los de localización de fugas.
- La disponibilidad de un modelo matemático actualizado que permita contrastar mediciones con comportamiento teórico esperado.

Un programa de gestión de infraestructuras está íntimamente ligado al resto de componentes de un SIG aplicado a un abastecimiento. En lo referente al mantenimiento correctivo, una operación de corrección surge como respuesta a una alarma, y ésta puede tener dos orígenes:

- a) La gestión de abonados. En este caso, el abonado da el aviso ante un comportamiento visiblemente anómalo de la red (una rotura en la vía pública, una caída brusca de las presiones, etc.)
- b) El sistema de operación y control de la red. El aviso se produce si las medidas y los resultados del modelo discrepan más allá de un determinado umbral de error.

Independientemente del origen de la alarma, el SIG ha de proceder con el proceso de detección, localización y reparación de la anomalía. La detección es obviamente ajena al programa de mantenimiento, pues procede como se ha dicho de los usuarios o del

sistema de control de la red. En el primer caso, la localización de la anomalía suele ser sencilla pues el propio abonado que da el aviso suele informar también del lugar donde ha detectado la anomalía. Sin embargo, en el caso de que sea el sistema de control de la red, la zona de actuación es más amplia, al no tener la certeza de dónde está exactamente la anomalía. La localización de una fuga en un sector descrita con anterioridad es un caso particular de localización de anomalías.

Sea cual sea el origen del aviso, a su recepción el SIG proporcionará toda la información para la localización exacta y la reparación de la anomalía. Una vez localizada, el SIG también procederá a enviar una orden al sistema de gestión de cerradas. Así, pondrá a disposición del equipo de reparación un informe de maniobra.

En todo el proceso de reparación de la anomalía también ha de considerarse como origen de la misma un modelo no actualizado o no calibrado. Así, el equipo encargado de la reparación deberá confirmar todos los datos de los elementos implicados y corregirlos si es necesario. Además, si se procede a la reparación deberán actualizarse tanto la base de datos de elementos de la red como la base de datos de repuestos. Se asegura de esta manera que la información se mantiene siempre al día.

Por otro lado el registro de estas operaciones de mantenimiento permitirá mantener un histórico de incidencias. Este histórico se puede tratar estadísticamente para comparar con otras zonas de la red, con los datos de funcionamiento, etc. Con ello se pueden prevenir otros fallos en el futuro, elaborar indicadores de gestión del inventario o, como ya se ha comentado, revisar el programa de mantenimiento preventivo.

Por último, las posibilidades de comunicación y aglutinamiento de sistemas que tiene el SIG permite la reducción de los tiempos transcurridos desde que se produce la anomalía y hasta que ésta es reparada. Este hecho no sólo redonda en una mayor calidad del servicio, sino que cuando la anomalía genera pérdidas de agua (lo cual es bastante habitual) esta reducción del tiempo de respuesta se traduce en una reducción del volumen de agua perdida.

3.5.4. Rehabilitación y renovación de la red.

Las técnicas de rehabilitación y renovación de la red comparten características con las de mantenimiento preventivo y correctivo. Al igual que ocurre con el mantenimiento preventivo, se busca la reducción del número de anomalías en la red. Sin embargo, las actuaciones que se llevan a cabo sobre los elementos de la red se corresponden a las que se harían si la anomalía ya hubiera tenido lugar.

El documento técnico ISO/TR 11295:1992-08-01 (*Techniques for Rehabilitation of Pipeline Systems*) recopila cuatro tipos de métodos de rehabilitación:

- Reparación, corrección de averías y defectos en una instalación.

- Renovación de las conducciones existentes, mejorando el estado y rendimiento del sistema.
- Sustitución de la conducción existente por otra nueva.
- Mantenimiento, técnica y operaciones para asegurar la eficiencia del servicio de agua.

Estas técnicas son especialmente apropiadas en caso de redes donde concurren algunas circunstancias como:

- Que por envejecimiento puedan ver afectada su capacidad hidráulica, disminuyendo la calidad del servicio.
- Que por su ubicación geográfica el impacto de una rotura en el resto de las infraestructuras pueda ser importante.

Se observa que para establecer un adecuado plan de rehabilitación es necesario tener un conocimiento adecuado del funcionamiento de la red, la evolución temporal de las infraestructuras afectas al abastecimiento y la relación espacial entre los elementos de la red y el resto de infraestructuras urbanas.

Además de la información anterior, es conveniente disponer de información adicional:

- Sobre los recursos humanos y económicos disponibles.
- Información estadística de reparaciones (causas, número y tipo de las actuaciones realizadas, evaluación de costes de la reparación y estimación de costes derivados de la no sustitución en términos de pérdidas de agua).
- Energéticas y de calidad del servicio.
- Estado de conservación y frecuencia de mantenimiento.
- Fecha de la última revisión.

Al tratarse de actuaciones programadas sobre el abastecimiento (al igual que el mantenimiento preventivo) se puede recurrir a una herramienta de optimización propia del sistema para determinar la frecuencia y distribución geográfica de las tareas de rehabilitación de la red. Si la tarea de mantenimiento tiene envergadura suficiente, se tratará como si fuera la creación de una nueva parte de la red, procediendo a la elaboración de un proyecto de obra al igual que sucedía con la creación de nuevas infraestructuras. En caso contrario, las actuaciones seguirán el mismo patrón que las de mantenimiento preventivo (preparación de información cartográfica y específica, elaboración de informes de maniobra, actualización de la información recogida al final de la actuación).

4. Conclusiones

En este capítulo se ha hecho una revisión del estado del arte de los Sistemas de Información Geográfica y las herramientas que éstos ponen a disposición de los técnicos para llevar a cabo una adecuada gestión de los abastecimientos de agua potable. Se han establecido las diferencias entre los SIG de tipo matricial (ráster) y los de tipo vectorial y se ha comprobado que la potencia de las consultas espaciales de estos últimos los ha hecho los más adecuados para su utilización en aplicaciones basadas en estructuras de red, como ocurre con las redes de transporte (ya sea éste de personas, de mercancías, de energía eléctrica o, como en el caso que nos ocupa, de agua potable).

De las herramientas que incorpora el SIG se ha destacado la importancia de las dos que más se van a utilizar en el desarrollo de esta Tesis: los modelos digitales del terreno y las topologías. Ambas serán de indiscutible utilidad en la elaboración de modelos matemáticos de análisis o diseño de las redes.

A continuación se ha planteado de manera superficial cuál puede ser el modelo de gestión de un abastecimiento basado en un SIG. En este modelo de gestión se ha prestado especial atención a la parte de gestión técnica, entendiéndose por ésta todas aquellas operaciones encaminadas a mejorar la eficiencia y la eficacia de la red, no sólo en términos económicos, sino también en calidad del servicio. Esto implica un seguimiento de todos los elementos que componen la red a lo largo de toda su vida útil, desde su concepción hasta su renovación o sustitución. En este seguimiento a los elementos de la red hay dos herramientas que resultan imprescindibles para el conocimiento de su funcionamiento: un modelo matemático actualizado de la red y una adecuada previsión de las demandas en cada punto de la misma. Estas dos herramientas y la estrecha relación que hay entre ellas constituyen la columna vertebral de la Tesis.

En el desarrollo de este capítulo se ha tratado de destacar, por una parte, el papel que juega el SIG como proveedor de datos para las herramientas de apoyo a la toma de decisiones. Por otra parte, se ha destacado la contribución de las herramientas técnicas anteriores a las distintas facetas de la gestión técnica de la red.

Por último, este capítulo es una justificación de la necesidad de incluir los SIG como una medida para la modernización de los abastecimientos. Las aportaciones realizadas constituyen sólo una pequeña muestra de la potencialidad que tiene el uso de los SIG en la mejora de la gestión integral de los abastecimientos e incluso del conjunto de las infraestructuras urbanas en entornos corporativos.

Capítulo 3.

Modelos de Cálculo Utilizados

1. Introducción

En el capítulo anterior ha quedado patente que un SIG no es sólo una base de datos con posibilidad de tratar datos georreferenciados y de ejecutar consultas espaciales. También ha de permitir cierto grado de interacción, que en el caso de la gestión de abastecimientos de agua potable se traduce en la elaboración de una serie de utilidades de apoyo a la toma de decisiones (simulación hidráulica, predicción de demandas, sectorización, etc.). Para ello, han de tenerse en cuenta las necesidades de estos programas de apoyo desde el mismo momento en que se comienza a implantar el SIG.

Una de las principales limitaciones que tiene la representación de la realidad es que la forma de trabajo habitual suele estar definida en dos dimensiones, tanto para la captación de los datos como para la representación de los mismos. Así, es habitual tratar con datos presentados en forma de planos, en pantallas, en tablas o en monitores de ordenador. Cuando se trabaja con un sistema de información geográfica, en muchas ocasiones se debe trabajar con una representación bidimensional de una realidad tridimensional.

Por un lado, surge aquí la necesidad de representar de una forma alternativa la tercera coordenada. Esta puede ser la cota sobre el nivel del mar o altitud, pero también puede ser el resultado de alguna simulación. Así por ejemplo, se pueden establecer curvas que representen los puntos con idéntico valor de la presión o la altura piezométrica. Esta necesidad debe quedar cubierta por los Modelos Digitales del Terreno (en adelante, MDT). Además de la función de representación anterior, un MDT resulta ser una estructura que permite la interpolación espacial de la variable representada. Este hecho convierte a los MDT en una herramienta útil para la obtención de valores de altitud durante la generación de un modelo matemático de una red de distribución de agua.

Por otro lado, los programas de apoyo a la toma de decisiones deben recibir una información de entrada que dependiendo de su estructuración facilitarán o retrasarán el funcionamiento de dichos programas. Una adecuada representación matemática de los elementos de la red permitirán una explotación óptima de los programas de simulación. A la abstracción de la realidad a través de expresiones matemáticas se le denomina *modelo matemático*. Así, para el estudio de una red de abastecimiento será necesaria la elaboración de un modelo matemático de la red.

En este capítulo se realiza en primer lugar un barrido por las distintas estructuras de almacenamiento y gestión de los MDT de manera que sea posible la representación de cualquier variable distribuida espacialmente. También se presentará el MDT basado en la triangulación de Delaunay como estructura más adecuada para la aplicación al estudio de redes de abastecimiento. Se explica el algoritmo de Watson para la elaboración de dicha triangulación, así como el algoritmo utilizado para la obtención del mosaico de Thiessen (también llamado mosaico de Voronoi) como estructura derivada de la triangulación anterior. Este mosaico será utilizado con posterioridad para la asignación de cargas a un modelo matemático en aquellos casos en que se carezca de datos de facturación.

También se ha realizado un estudio de los distintos métodos de interpolación para la obtención de valores concretos de una variable a partir del MDT derivado de la misma.

A continuación se repasarán los fundamentos de la modelación de redes de distribución de agua potable, así como las distintas fases por las que pasa la elaboración del modelo. Se prestará especial atención al problema de la simplificación de redes y a cómo un SIG puede contribuir a facilitar dicha tarea.

Por último, se estudiará el problema del análisis de una red de distribución de agua y se describirá el método del gradiente como algoritmo de resolución de las ecuaciones hidráulicas en régimen cuasi-estático. Esta descripción será de utilidad para la selección de la estructura de datos más adecuada para la elaboración del modelo matemático de dicha red.

2. Aproximación a los modelos digitales o matemáticos

2.1. Concepto de Modelo Digital o Matemático.

Antes de entrar en el detalle de los distintos modelos que se han enunciado en la introducción, conviene recapitular sobre el concepto de modelo.

Una acepción de la palabra modelo nos la da el diccionario: *representación de la realidad*. La finalidad de un modelo puede ser la de conocer mejor un objeto real ya existente, o la de definir las necesidades de un objeto propuesto (prototipo). En cualquier caso, *una imagen vale más que mil palabras* y los modelos son en la mayoría de los casos representaciones gráficas de la realidad que se trata de modelar.

Una definición más amplia de la palabra modelo podría ser la de *una representación simplificada de la realidad que pretende imitarla y que conserva todas o parte de sus características* (Joly, 1988).

El objetivo de todo modelo matemático es reproducir mediante un ordenador, con la mayor exactitud posible, el comportamiento real del sistema físico que representa.

Así pues, un MDT se puede definir como una representación mediante símbolos matemáticos de una determinada característica del terreno, en general continua (como

puede ser la cota) o de las infraestructuras que se hallan en él (como puede ser el nivel de presiones de una tubería allí situada o la densidad de población en un punto).

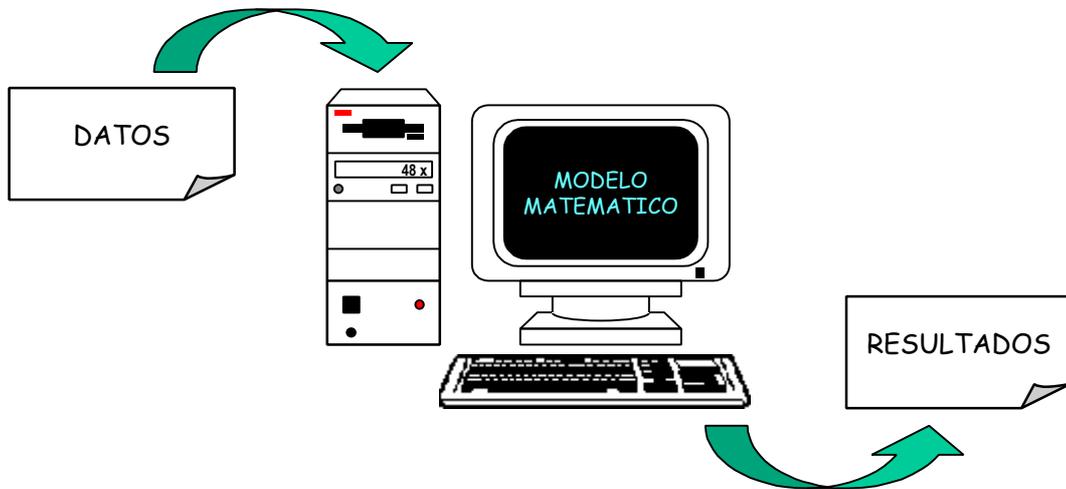


Figura 3.1. Concepto de modelo matemático.

Por otra parte, el modelo matemático de una red de transporte de agua consistirá en un conjunto de líneas y nudos que representan a las tuberías, las conexiones y demás elementos de dicha red. Si se trata de una red de saneamiento, las tuberías serán los colectores de la misma y los nudos serán los pozos de registro, las cuencas que contribuyen con su escorrentía a cada uno de los pozos, las estaciones de bombeo y el resto de estructuras de control presentes en una red de evacuación de aguas pluviales y residuales. Por el contrario, si se trata de una red de distribución de agua potable (que es el objeto que nos ocupa), el modelo matemático consistirá en un conjunto de elementos que representan a las tuberías, las bombas y estaciones de bombeo, las válvulas reguladoras y automáticas, los depósitos y embalses, y los puntos de consumo o inyección que forman la red.

2.2. Clasificación de los modelos

Puesto que uno de los objetivos principales de un modelo digital del terreno es representar en dos dimensiones objetos tridimensionales, la principal clasificación de los MDT viene dada por la naturaleza de dicha representación.

Por otro lado, en el estudio de los modelos matemáticos de análisis hidráulico es conveniente, además, tener en cuenta otros aspectos tales como el comportamiento del modelo frente a la variable tiempo y el nivel de detalle del mismo. En función de estos parámetros el modelo tendrá unas características u otras.

2.2.1. Clasificación en función de la naturaleza del modelo.

En función de su naturaleza, se pueden clasificar los modelos en dos grandes grupos: *modelos físicos* y *modelos esenciales*:

- Modelo físico. En esta categoría se encuadran los *modelos tecnológicos* y los *modelos de implantación*. Un modelo físico muestra qué es y qué hace el sistema modelado. Además, representa morfológicamente dicho modelo, es decir, describe cuál es su implantación física. Así, en el caso de que se pretenda representar la cota altimétrica de los distintos puntos del mismo, un modelo *físico* del terreno sería una maqueta tridimensional del mismo realizada a una cierta escala geométrica.
- Modelo esencial. Un modelo esencial describe la esencia o el concepto de lo que se trata de representar, sin entrar en el detalle de su implantación física. Dicho con otras palabras, un modelo esencial describe qué es y qué hace el objeto a modelar, independientemente del aspecto que tiene dicho objeto. Son sinónimos de modelo esencial los *modelos lógicos*, los *modelos matemáticos*, los *modelos simbólicos* y los *modelos conceptuales*. Siguiendo con el ejemplo planteado anteriormente, un mapa dotado de curvas de nivel y vértices geodésicos es un modelo esencial de la altitud del terreno: lo describe fielmente, pero no nos hacemos una idea, a primera vista, de cómo es el terreno en realidad. La información recogida en un modelo esencial puede quedar codificada de dos formas: *digitalmente* (mediante cifras, matrices, ecuaciones y, en general, expresiones matemáticas) y *analógicamente* (mediante líneas, puntos y cualquier otra representación gráfica).

2.2.2. Clasificación en función del tratamiento de la variable temporal.

Para el análisis hidráulico de una red de distribución de agua se puede optar por los modelos estáticos y los modelos dinámicos.

- Modelo estático. En el modelo estático se analiza la red para un único estado de cargas. Se considera que tanto las variables de cálculo (básicamente, altura piezométrica y caudal) como las condiciones de contorno (en general, niveles en los depósitos y demandas en los nudos) son constantes a lo largo de todo el cálculo. Para la utilización de modelos estáticos de cálculo han de elegirse situaciones suficientemente significativas para el uso que se hace del modelo, que generalmente será de planificación de la red. Es habitual que se analicen las situaciones extremas. Un ejemplo de situación extrema es la situación punta de consumo, donde las presiones en la red (y por consiguiente en el modelo) son las más bajas, detectándose así posibles deficiencias en el nivel de servicio de abastecimiento. Otra posibilidad es el análisis del consumo nocturno (situación valle), cuando las presiones son mayores y se pueden producir roturas en las tuberías.
- Modelo dinámico. En el modelo dinámico se analizan una sucesión de diferentes estados de carga a lo largo del día, semana o mes. Se considera que tanto las variables como las condiciones de contorno cambian durante el proceso de cálculo. Realmente este tipo de modelos se puede descomponer en tres (golpe de ariete o modelo elástico, oscilación en masa o modelo rígido y simulación en período extendido o modelo cuasi-estático), en

función de las hipótesis simplificativas adoptadas. El más habitual de los tres para el análisis de redes es el que se denomina modelo cuasi-estático, que consiste en una sucesión de distintos modelos estáticos donde sólo las condiciones de contorno cambian a lo largo del tiempo. La diferencia entre los modelos elástico, rígido y cuasi-estático así como los límites de aplicación entre ambos se comentan con más detalle en Cabrera et al. (1995). La necesidad del modelo dinámico está determinada por el uso que se va a hacer del mismo, que en general consistirá en el estudio de estrategias óptimas de operación y regulación.

2.2.3. Nivel de detalle y objetivos del modelo.

En el planteamiento de análisis de una red de distribución cabe hacer una distinción según los objetivos perseguidos por los modelos utilizados para dicho análisis. En principio, el nivel de detalle y los objetivos perseguidos con el modelo condicionarán el método de asignación de cargas y la calibración del propio modelo.

- Modelo de detalle. En los modelos de detalle, la idea que se persigue es básicamente la de conocer el comportamiento de la red en determinadas situaciones o escenarios. Es el caso de comportamiento de la red cuando sucede una avería en conducciones principales o determinación de los niveles de servicio en los momentos de máxima demanda (lo que llamaremos *horas punta*). En estos modelos, se dará mayor importancia a los niveles de servicio proporcionados, es decir, al caudal máximo de que puede disponer un consumidor o de la presión mínima registrada en cada punto de la red.
- Modelo estratégico. En este modelo, lo importante es conocer el comportamiento global de la red. Este tipo de modelos se caracterizará por un nivel de detalle bajo, es decir, se trata de modelos arteriales en los que el objetivo primordial es estudiar el comportamiento de las instalaciones más importantes de la red, como son las estaciones de bombeo, los depósitos de regulación y las plantas de producción. Se suelen utilizar para la toma de decisiones estratégicas, como la optimización de esquemas de bombeo, la evaluación de la suficiencia de los volúmenes de reserva y regulación, etc. En este caso, el nivel de precisión necesario en presiones de los nudos de consumo no es excesivamente importante, centrándose la importancia de los resultados en los caudales intercambiados en depósitos, los caudales inyectados en las zonas de producción y los caudales impulsados por las distintas estaciones de bombeo, así como la altura aportada por éstas últimas.
- Macromodelos. Se trata de un paso más en la simplificación de la red. Los macromodelos están constituidos por un reducido número de elementos significativos de la red tales como depósitos, bombas, nudos de medida de presión o caudal, elementos de control, etc. Esta forma de modelización no está demasiado extendida por la dificultad

que presenta en la interpretación de los resultados por parte de personal no experto. Sin embargo, tiene como principal ventaja la rapidez de cálculo.

De los objetivos anteriores se vislumbra una diferencia significativa: en un modelo estratégico, la calibración ha de ir encaminada a que los caudales y las presiones tengan mayor fiabilidad en los puntos singulares de la red, manteniendo en todo momento el balance hídrico. Esto es equivalente a que en los modelos estratégicos se ha de trabajar con caudales medios circulantes por las líneas, o sucesión de caudales medios en el caso de que se opte por una simulación dinámica o cuasi-estática, mientras que en los modelos de detalle se trabajará con caudales máximos previstos.

3. Introducción a los Modelos Digitales del Terreno

3.1. Principales estructuras de datos para los MDT

Como ya se ha descrito en el capítulo 2, los SIG se pueden clasificar en dos grandes grupos: SIG vectoriales y SIG matriciales o *ráster*. Cada uno de estos esquemas de trabajo tiene una forma de almacenamiento de los datos. Además, los MDT también admiten representaciones mediante imágenes que se pueden clasificar en esos mismos tipos. Así, por ejemplo, para la representación de la cota z en un punto x, y podemos estructurar los datos de dos formas (Felicísimo, 1992; Prodanovic, 1997; Borrough, 1986):

- Estructuras basadas en imágenes. Existen básicamente dos modos de representación y almacenamiento de los datos para la construcción de los MDT. Estas estructuras están orientadas a una fácil visualización del MDT y se corresponden con las dos tipologías de sistemas de información geográfica existentes. Son:
 - a) Estructura matricial: se asigna un valor medio de la cota para cada unidad elemental en que se ha descompuesto la superficie a representar. Entre los modelos matriciales de representación de los MDT se pueden señalar las matrices o cuadrículas regulares, las matrices jerárquicas escalables (también llamadas estructuras *quadtree*) y los mosaicos de polígonos regulares basados en triángulos equiláteros o hexágonos.
 - b) Estructura vectorial: se definen objetos o entidades a los cuales se les asigna un valor de la cota. En cuanto a estructuras vectoriales de representación de los MDT estarían las curvas de contorno (curvas de nivel), los perfiles a lo largo de líneas y la red de triángulos irregulares (comúnmente llamada TIN, del inglés *Triangulated Irregular Network*). Este tipo de representaciones es utilizado normalmente para la creación de imágenes tridimensionales del terreno.
- Estructura matemática: la superficie del terreno se intenta representar mediante una o varias fórmulas matemáticas. Entre estas estructuras se encuentran las series de Fourier, los polinomios multidimensionales y la geometría fractal. Estas funciones

matemáticas pueden ser de aplicación global a todo el espacio que se pretende representar o estar aplicadas a fragmentos del mismo (tiras, cuadrículas, etc.). En realidad, es bastante común combinar esta estructura con las anteriores, de manera que se guarda una fórmula matemática para cada unidad elemental de superficie o para cada objeto definido en el SIG. Sin embargo, su uso en la modelización de la superficie terrestre está restringido debido a la complejidad intrínseca del terreno y a la dificultad de su utilización para la creación de imágenes. Por el contrario, este tipo de estructuras resultan muy eficientes para la interpolación de variables.

3.1.1. Matrices de Altitud.

La forma más común de MDT es la rejilla regular rectangular, también llamada matriz de altitudes o malla rectangular. El área bajo estudio se divide en un número de celdas rectangulares, en la que cada celda contiene una elevación. En la Figura 3.2 se da un ejemplo de MDT de rejilla en forma tabular, tal y como se almacenarían los datos en un ordenador.

y \ x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	6	9	1	4	10	2	0
2	0	0	5	5	5	5	9	10	8	7
3	0	0	7	7	1	6	9	9	10	3
4	0	5	5	8	7	2	9	9	6	9
5	0	8	6	1	8	9	3	7	0	6
6	8	2	7	2	5	1	10	7	4	2
7	9	7	8	8	10	9	1	1	7	7
8	9	8	8	8	4	3	2	7	2	0
9	4	5	6	7	0	3	1	7	7	0
10	0	0	8	5	1	8	3	9	0	0

Figura 3.2. Ejemplo de una matriz de altitudes.

Dada la facilidad con la que las matrices pueden ser manejadas en un ordenador, el MDT de rejilla se ha convertido en la forma de MDT más común, sobre todo en los paquetes más asequibles de SIG. El almacenamiento se lleva a cabo mediante una secuencia de números, valores de z , junto con una cabecera donde se especifican el tamaño de la celda y la orientación de la rejilla. La orientación de los ejes principales es la misma que la que se usa en la rejilla, de manera que todos los cálculos paralelos a las líneas de la rejilla se reducen a una simple búsqueda por filas o columnas, mientras que los cálculos en ángulos distintos requieren cálculos trigonométricos.

Pese a las numerosas ventajas, el MDT de rejilla presenta una serie de desventajas. La densidad de la rejilla, o tamaño de la celda, debe ser ajustada a la parte del terreno con

la irregularidad más alta. Esto puede causar *redundancia* en las áreas planas o con una topografía de pendiente suave. Este problema se soluciona con las estructuras tipo matrices jerárquicas escalables (o *quadtree*) en las que se da mayor densidad de puntos a aquellas zonas donde la variación de las cotas es más acusada.

En la Figura 3.3 se muestra un ejemplo esquemático de este tipo de estructura. Se trata del mapeado o conversión a formato *ráster* de un contorno o una curva de nivel, representados mediante una línea. Dada la forma del contorno, se comienza con una malla regular de 2×1 celdas o cuadrados. En aquellas celdas en las que se detecta que hay línea, se procede a la subdivisión de cada celda en cuatro celdas más pequeñas (reducción a la mitad de la anchura de la celda), dejando sin dividir las celdas donde no se detecta la línea. Esto deja una malla de 4×2 celdas. Si se sigue procediendo de igual modo, cada una de las 8 celdas anteriores se subdividirá en otras 4 más pequeñas si se detecta que la línea las atraviesa, y se dejará intacta si no es atravesada por el contorno. Así se continúa hasta llegar a un tamaño de celda suficientemente pequeño como para representar el contorno. En la figura se han sombreado las celdas que representaría el contorno en un formato vectorial de un SIG.

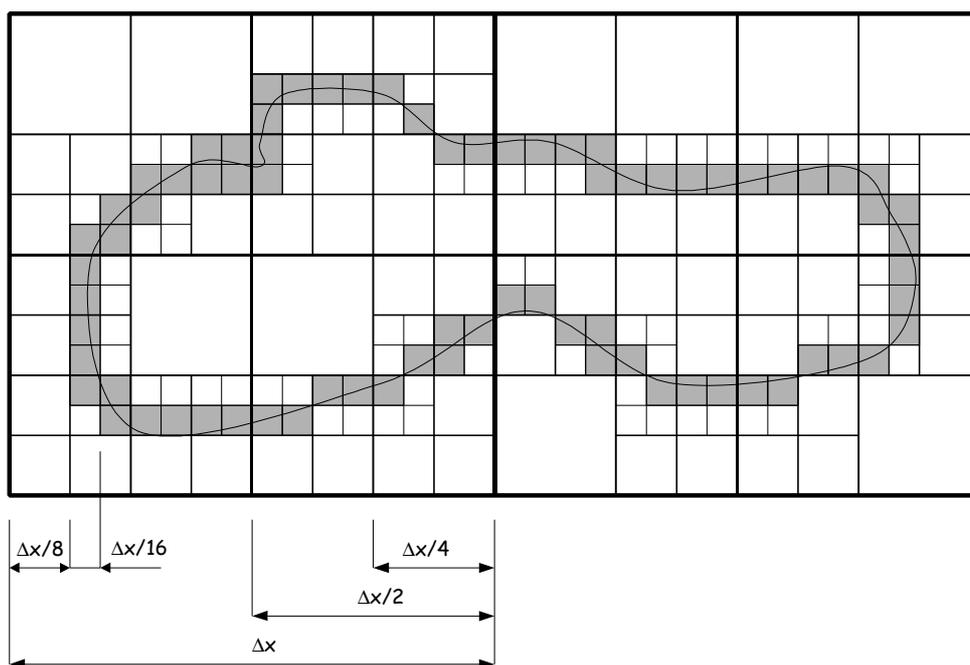


Figura 3.3. Ejemplo de una matriz de altitudes con estructura jerárquica.

3.1.2. Estructura de Redes Triangulares Irregulares (TIN)

Las redes de triángulos irregulares (TIN) representan una estructura más compacta que las estructuras de rejilla para el almacenamiento de datos. Reducen la redundancia de la matriz de alturas, permitiendo el uso de puntos esparcidos de manera aleatoria con la inclusión de características críticas. Tal y como se puede apreciar, un TIN es un modelo

del terreno que utiliza una red de triángulos conectados. Esta red de triángulos se basa en la triangulación de Delaunay de los puntos de observación. Las coordenadas de los nudos se almacenan con la precisión seleccionada, independientemente del tamaño del área seleccionada.

Una de las principales ventajas de la red de triángulos en comparación con la malla rectangular es que en la primera los triángulos tendrán mayor superficie en aquellas zonas donde no sea necesaria demasiada resolución, reduciendo su en las zonas que precisen más resolución. Además, las redes de triángulos permiten diversas técnicas de adaptación para tener en cuenta ciertas singularidades o condiciones de contorno en función del uso que se vaya a hacer de la triangulación (Nelson et al., 1999).

3.2. Fuentes de datos en un MDT

Antes de afrontar la construcción de un MDT es necesario disponer de los datos a partir de los cuales se va a generar dicho modelo. De la forma en que están presentados o almacenados estos datos va a depender en gran medida la complejidad y eficiencia de la creación del MDT. El uso de un conjunto de datos u otro dependerá del destino para el que se van a usar.

Además, el conjunto de los datos puede tener distintos orígenes. Así, una opción es la de medir directamente aquellos datos que inequívocamente van a ser más útiles para la construcción del MDT. Habitualmente a este conjunto de datos medidos directamente (por muestreo de campo, teledetección por satélite, etc.) se le denomina *conjunto de datos primario*. La principal ventaja del uso de datos primarios es que el usuario que piensa utilizarlos es el que toma la decisión de qué datos obtener y cuáles descartar. Incluso es este usuario el que tiene la opción de decidir el grado de precisión (número de puntos, densidad de muestreo, etc.) deseado. Los inconvenientes vienen de la propia naturaleza de las medidas. Se trata de medir la realidad mediante un muestreo, es decir, una toma de un número discreto de datos que pretenden representar la variación en todo un sistema y como toda medición, están también expuestos a los propios errores de la medición. Por último, en las tecnologías basadas en los SIG se estima que el 80% de los costes de implantación se deben a la captura y procesamiento de los datos necesarios.

Debido a los costes derivados a la obtención de datos primarios, es bastante habitual recurrir a datos que han sido medidos previamente. Estos conformarían el *conjunto de datos secundario*, que son aquellos que se pueden obtener de tablas, bases de datos o mapas ya existentes. El principal problema que tienen estos últimos es que no siempre están disponibles en el formato deseado. Además, requieren una información adicional sobre los propios datos. Información como nivel de precisión, formato, relaciones entre ellos, si las hay, etc. Esta información acerca de los datos es lo que se ha dado en

llamar los *metadatos* y que han provocado la necesidad de crear un modo de representación llamado *modelo de datos*.

Para la elaboración de un MDT es importante tanto el origen de los datos como el formato en que éstos han sido codificados. Si se trata de obtener un modelo digital del terreno de formato matricial, la opción de los puntos repartidos regularmente será la mejor. Si se opta por una red de triángulos irregulares, resultará más sencillo construirla a partir de puntos irregularmente repartidos. Por último, si el destino es un MDT en forma matemática, las curvas de nivel se prestan mejor a este tipo de ajustes.

Básicamente, los datos a partir de los cuales se va a construir el modelo digital del terreno pueden estar expresados de tres formas, cada una con sus correspondientes ventajas e inconvenientes.

3.2.1. Puntos de observación regularmente repartidos.

Estos pueden proceder directamente de una planificación en la toma de datos (por ejemplo, realizar el levantamiento topográfico en puntos previamente determinados) o de la superposición de información, como por ejemplo la superposición sobre una capa de datos de cotas, de la malla o rejilla que se desee utilizar.

Como principal ventaja se tiene que los datos ya constituyen en sí mismos un MDT del tipo matricial sin necesidad de más procesamiento. Es por tanto un buen método para visualizar de forma cualitativa la superficie de estudio.

Sin embargo, presenta dos inconvenientes importantes, siendo el principal que el protagonista de la adquisición de datos es el propio MDT y no la complejidad de la superficie a estudiar. Así, si la superficie es muy irregular, se tendrá que ir a un nivel de resolución mucho más fino, con lo que se necesita más espacio de almacenamiento, o recurrir a las matrices jerárquicas comentadas, por lo que se pierde al menos parte de la sencillez de creación del MDT. Por otra parte, no hay garantía de disponer de los valores máximos y mínimos locales, así como los puntos que por su especial relevancia pudieran requerir un tratamiento particular.

3.2.2. Puntos repartidos de forma irregular.

Esta es la forma habitual en que se encuentran los datos de los planos cartográficos más comunes. La principal ventaja es que los puntos con datos conocidos se eligen en general para obtener la mejor representación posible del terreno. Así, los máximos y mínimos locales suelen ser puntos incluidos en los datos. En cualquier caso, si no fuese así, no hay ningún problema en realizar una toma de datos en esos puntos e incluirlos en el conjunto que ha de servir para la creación del MDT.

Además, como se presentará más adelante en este capítulo, obtener un MDT por red de triángulos irregulares requiere un tratamiento matemático de los mismos relativamente simple.

El único inconveniente que se puede apuntar es que precisa de interpolación para obtener un MDT en forma de matriz. Como se verá, la interpolación es el proceso más complejo en el tratamiento de los MDT, al menos si se quiere garantizar una cierta precisión.

3.2.3. Curvas de nivel.

Es la forma más habitual de disponer de la información sobre las cotas del terreno, al menos de forma gráfica. Son líneas que tienen como característica un valor constante de la cota. Tienen como principal ventaja que su densidad es función del relieve. Así, a mayor relieve del terreno, mayor densidad de curvas de nivel para una determinado rango de cotas.

A pesar de esta ventaja, presentan no obstante algunos inconvenientes. El primero de ellos viene del propio concepto de curva de nivel: no hay curvas de nivel para los puntos máximos y mínimos. Este inconveniente se puede solventar convirtiendo las curvas de nivel en un conjunto tan denso como se desee de puntos y añadir al conjunto los máximos y mínimos locales para posteriormente proceder a una triangulación.

Por otra parte, es necesario tratar estos datos si se desea obtener imágenes tridimensionales de la superficie o interpolar valores a partir de las curvas. Por último, los algoritmos de interpolación para curvas de nivel son relativamente complicados de utilizar por la necesidad de extraer de las curvas de nivel el conjunto de puntos con los que se ha de hacer la interpolación.

En la mayoría de las ocasiones, sin embargo, las curvas de nivel son el resultado de un proceso de interpolación realizado sobre el propio MDT, y no el origen de los datos.

3.3. Algoritmo de triangulación y poligonización

3.3.1. El mosaico de Dirichlet.

G. L. Dirichlet planteó en 1850 por primera vez un método para descomponer un dominio del espacio en un conjunto de poliedros convexos de tal manera que no existan huecos ni solapamientos entre cada polígono en dicho dominio. El planteamiento realizado se enunciaría como sigue. Sea una serie de puntos de un plano $p_i (x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2$ con i variando entre 1 y n . Para cada punto p_i se puede definir una región \mathbb{V}_i tal que:

$$\mathbb{V}_i = \{ p \in \mathbb{R}^2 : \|p-p_i\| \leq \|p-p_j\| : \forall i \neq j \} \quad (3.1)$$

Donde la expresión $\|p-p_i\|$ representa la distancia que hay entre el punto p y el punto p_i :

$$\|p - p_i\| = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (3.2)$$

Esta región \mathbb{V}_i constituye un polígono donde todos los puntos incluidos en el mismo están más cerca del punto p_i que de ningún otro. Este polígono es cerrado y convexo, y recibe el nombre de *polígono de Voronoi* o *polígono de Thiessen*. Al punto p_i se le

denomina punto generador del polígono V_i . La colección de todos los polígonos de Voronoi $\{V_i : i = 1, \dots, n\}$ se conoce como *mosaico de Dirichlet*.

Se observa que los lados o fronteras de cada polígono de Voronoi son porciones de las mediatrices de los segmentos que unen p_i con cada uno de los puntos generadores de los polígonos adyacentes a V_i . Se comprueba también que si ahora unimos mediante un segmento cada uno de los pares de puntos que comparten un lado de un polígono de Voronoi se obtiene un nuevo mosaico que abarca todo el dominio sin huecos ni superposiciones. A esta nueva división del espacio se le conoce como *triangulación de Delaunay*.

De todo lo comentado se deduce que en un espacio bidimensional, cada uno de los lados de un polígono de Voronoi divide el plano en dos zonas, cada una de las cuales recoge los puntos que están más cerca de cada uno de los puntos generadores que están situados a ambos lados de dicho segmento. Se observa también que cada uno de los vértices del mosaico de Dirichlet es compartido por tres polígonos. Si se conectan entre sí los tres puntos generadores de cada uno de estos polígonos se forma el correspondiente triángulo de Delaunay T_i .

De lo anterior se deduce que cada uno de los puntos de este triángulo T_i debe estar separado por la misma distancia del vértice considerado. Dicho de otra forma, será posible trazar un círculo que, con centro en el vértice de Voronoi pase por los tres puntos que cierran el triángulo de Delaunay. Este círculo será por tanto el círculo circunscrito a dicho triángulo, también llamado *circuncírculo*. Todas estas construcciones geométricas se pueden observar en la Figura 3.4.

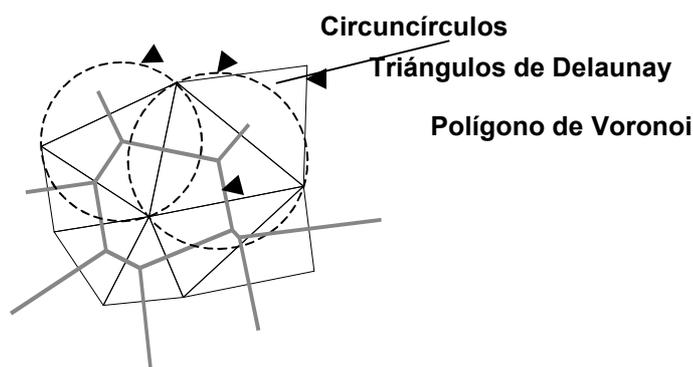


Figura 3.4. Construcción de un mosaico de Dirichlet y su triangulación de Delaunay.

Hay tres características básicas los algoritmos de elaboración de una triangulación de Delaunay:

- a) Dado un conjunto de puntos generadores, la triangulación de Delaunay de los mismos es única salvo en casos triviales, como puede ser una distribución regular de los mismos (por ejemplo, en una cuadrícula).

- b) Para cada uno de los triángulos de la triangulación, ningún circuncírculo puede contener en su interior ningún punto además de los tres que conforman el correspondiente triángulo.
- c) El mosaico formado por todos los triángulos constituye un dominio del espacio convexo y sin huecos o islas. Para contemplar dominios cóncavos o islas hay que modificar los algoritmos para introducir estas situaciones como condiciones de contorno.

Estas definiciones son igualmente válidas para cualquier conjunto de puntos de un espacio n-dimensional \mathbb{R}^n .

3.3.2. Introducción al algoritmo de Watson para la Triangulación de Delaunay.

En 1981, D. F. Watson propuso un algoritmo para la generación de la triangulación de Delaunay. Este algoritmo también se conoce como *algoritmo de inserción incremental* (Felicísimo, 1992; Bourke, 1989) y se basa en la creación de una triangulación mínima inicial, para posteriormente ir añadiendo uno por uno todos los vértices que han de formar parte de la triangulación.

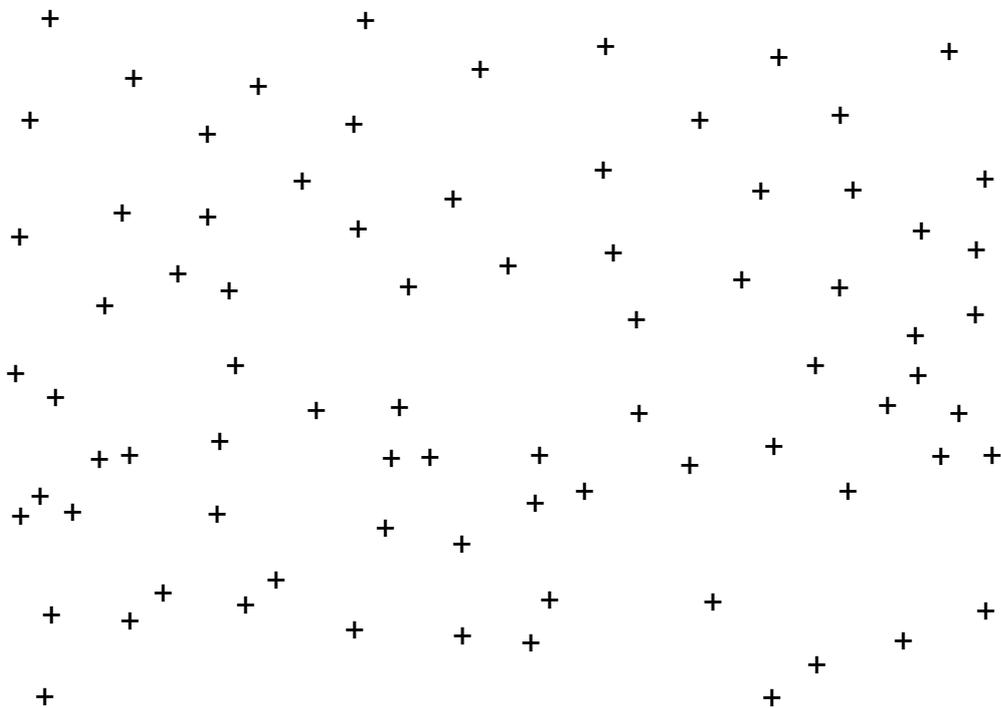


Figura 3.5. Conjunto de puntos cuya triangulación de Delaunay se quiere obtener.

Supóngase que se dispone de un conjunto de n puntos de un plano $p_i (x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2$ con i variando entre 1 y n (Figura 3.5) y se desea obtener la triangulación de Delaunay

correspondiente. De una forma general, el algoritmo se puede describir mediante pseudocódigo mostrado en la Figura 3.6.

```
Generar la triangulación inicial
Calcular el centro y el radio de los círculos circunscritos a los triángulos de la triangulación inicial
Para cada uno de los  $n$  puntos del conjunto...
  Para cada triángulo de la triangulación actual...
    Comprobar si el punto está dentro o fuera del círculo circunscrito al triángulo
    Si el punto está dentro
      Marcar el triángulo para ser eliminado
      Almacenar los vértices del triángulo
    Pasar al siguiente triángulo
  Eliminar los lados compartidos por los triángulos marcados para su eliminación
  Eliminar los triángulos marcados
  Crear los nuevos triángulos uniendo el nuevo punto con cada uno de los vértices almacenados
  Calcular el centro y el radio de los círculos circunscritos a los nuevos triángulos
Pasar al siguiente punto
```

Figura 3.6. Pseudocódigo del algoritmo de Watson para la triangulación.

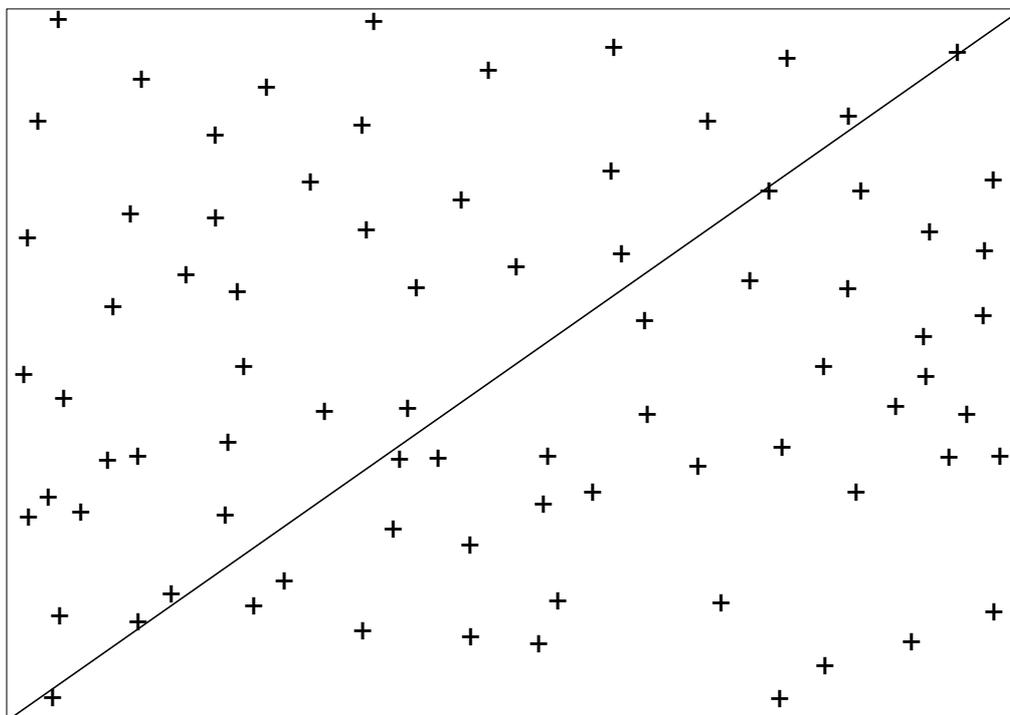


Figura 3.7. Marco exterior y triangulación inicial.

Para implementar este algoritmo, la triangulación inicial debe contener a la totalidad de los puntos. Una forma de crear esta triangulación inicial es con un rectángulo a partir de los valores extremos de las coordenadas de los puntos (Figura 3.7).

Esta triangulación inicial estará constituida por el propio rectángulo y una diagonal del mismo. El algoritmo requiere almacenar para cada triángulo los siguientes datos:

- los tres vértices de mismo,
- el punto de intersección de las mediatrices de cada uno de los lados, llamado *circuncentro*. Este circuncentro es el centro del triángulo circunscrito al triángulo, y
- el radio de la circunferencia circunscrita al triángulo, que necesariamente ha de pasar por los tres vértices del mismo. Esta circunferencia tiene por centro el circuncentro y se ha denominado circuncírculo.

3.3.3. Introducción de nuevos puntos

La forma de proceder, según se ha expuesto en el pseudocódigo de la Figura 3.6, consiste en ir añadiendo sucesivamente todos los puntos que han de servir de vértices de la propia triangulación. Para explicar el procedimiento, se ha tomado una etapa intermedia del proceso de triangulación.

Supóngase que se ha llegado a una triangulación intermedia como la mostrada en la Figura 3.8 a). Esta triangulación se denominará *triangulación original*. A continuación habrá que añadir un nuevo punto del conjunto de puntos generadores de la triangulación (por ejemplo en la ubicación mostrada en la Figura 3.8 b). Para este nuevo vértice, habrá que comprobar **uno por uno** qué triángulos de la triangulación original han de modificarse.

Como ya se ha visto, una de las propiedades de la triangulación de Delaunay consiste en que para cada uno de los triángulos de una triangulación, ningún circuncírculo puede contener en su interior ningún punto que no sean los tres que conforman el correspondiente triángulo. Dicho de otra forma, si se introduce un nuevo vértice y éste está dentro del círculo circunscrito de un triángulo de la triangulación original, ese triángulo deberá modificarse pues incumple esta propiedad de la triangulación de Delaunay. En la Figura 3.8 c) se puede observar que en este caso hay tres triángulos de la triangulación original que han de modificarse pues sus respectivos circuncírculos contienen al nuevo punto a introducir. Por tanto, estos tres triángulos deben marcarse para su modificación.

Con los triángulos marcados (ver Figura 3.8 d) se ha de comprobar cuáles de sus lados son compartidos por dos triángulos y cuáles no lo son. Los lados compartidos se deben eliminar. Los lados exteriores de estos triángulos (aquellos que no están compartidos) forman un polígono que rodea el nuevo vértice a añadir (Figura 3.8 e).

Por último, uniendo el nuevo punto con cada uno de los vértices del polígono anterior se obtienen los nuevos triángulos (en este caso cinco nuevos triángulos). Con esto se obtiene una nueva triangulación (Figura 3.8 f)

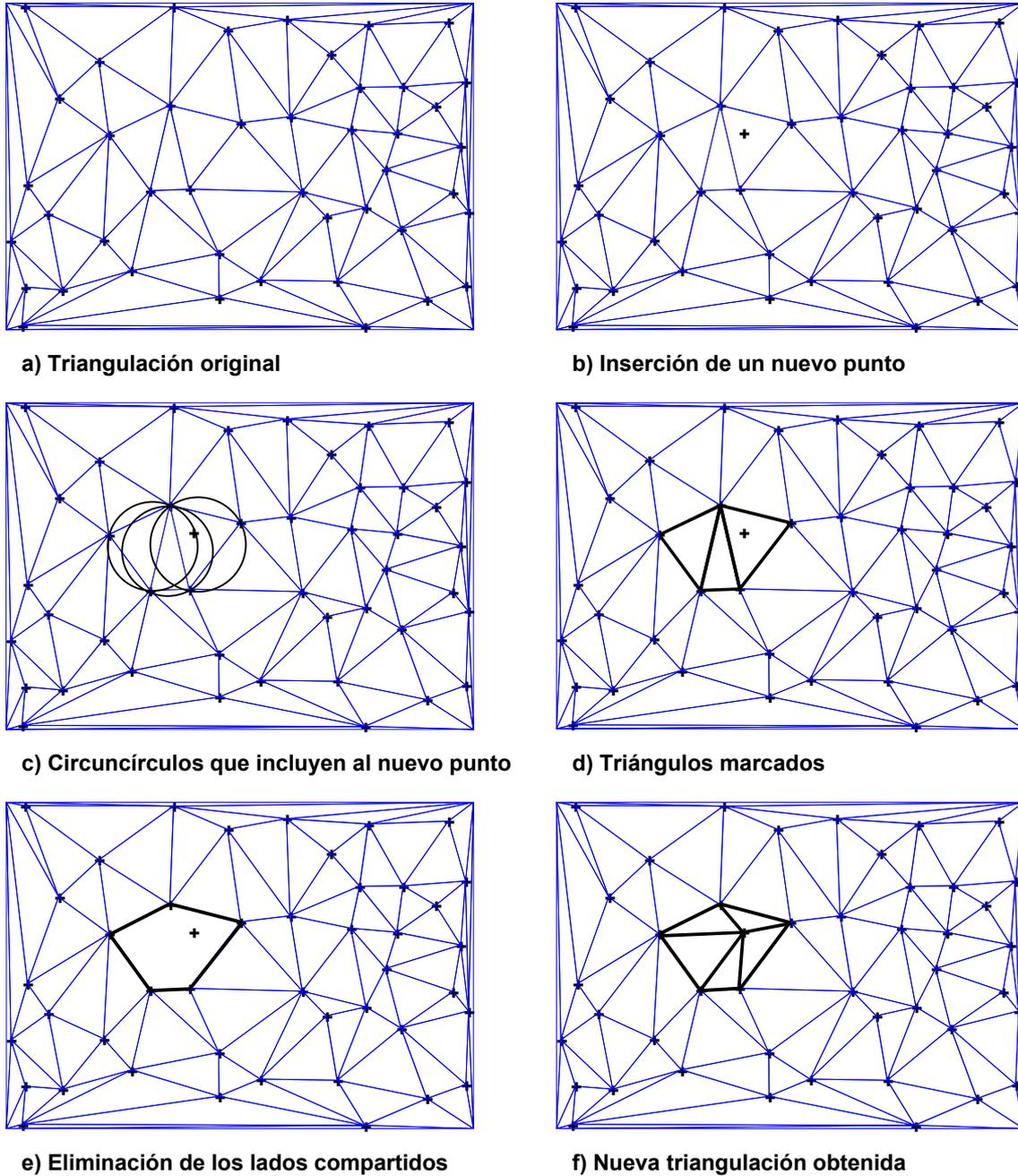


Figura 3.8. Pasos a realizar para la inclusión de un nuevo punto en la triangulación.

Este algoritmo presenta dos peculiaridades dignas de mención:

- a) Después de la inserción de un nuevo punto, la triangulación obtenida cumple todos los requisitos de una triangulación de Delaunay.

- b) Cada nuevo vértice introducido implica un incremento de dos nuevos triángulos en la triangulación. En el ejemplo que se ha seguido, se eliminan tres triángulos pero se crean cinco.

Así, una triangulación de Delaunay creada según este algoritmo tendrá $2 \times N + 2$ triángulos (dos por cada punto generador más los dos triángulos de la triangulación inicial).

Se observa que, para cada nuevo punto a insertar, ha de hacerse la comprobación de qué triángulos tienen un circuncírculo que incluye a dicho punto en su interior. Esto implica hacer un barrido de todos los triángulos cada vez que se añade un punto. Sin embargo, si se hace una ordenación previa del conjunto de puntos generadores en función de una coordenada, por ejemplo, se obtiene una ganancia neta del tiempo de cálculo.

Supóngase que se ha hecho una ordenación de los puntos generadores en función de su coordenada x , por ejemplo. Una vez que para un punto determinado, la suma de la coordenada x del circuncentro de un triángulo y el radio del mismo fuese mayor que la coordenada x de dicho punto, ese triángulo podría ser apartado, pues ya no habrá más puntos de los que quedan por añadir que vayan a quedar dentro de su circuncírculo. Con esta ordenación, se puede ahorrar hasta un 50% del tiempo de cálculo (Bourke, 1987).

3.3.4. Definición de un triángulo.

Cada vez que se defina un triángulo habrá que calcular la posición del circuncentro y el radio del circuncírculo. Sean $p_1 (x_1, y_1)$, $p_2 (x_2, y_2)$, y $p_3 (x_3, y_3)$ los vértices del triángulo, $p_c (x_c, y_c)$ el centro del circuncírculo y r el radio de dicho circuncírculo. Puesto que el circuncírculo debe pasar por cada uno de los vértices, se deberá cumplir que la distancia entre el centro y cada uno de los vértices sea igual al radio:

$$\begin{aligned} (x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2 &= r^2 \\ (x_2 - x_c)^2 + (y_2 - y_c)^2 &= r^2 \\ (x_3 - x_c)^2 + (y_3 - y_c)^2 &= r^2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Si se reordenan cada una de las ecuaciones del sistema (3.3) desarrollando los paréntesis:

$$\begin{aligned} x_1^2 - 2x_1x_c + x_c^2 + y_1^2 - 2y_1y_c + y_c^2 &= r^2 \\ x_2^2 - 2x_2x_c + x_c^2 + y_2^2 - 2y_2y_c + y_c^2 &= r^2 \\ x_3^2 - 2x_3x_c + x_c^2 + y_3^2 - 2y_3y_c + y_c^2 &= r^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Si se efectúa el siguiente cambio de variables:

$$x := x_c$$

$$y := y_c$$

$$z := r^2 - x_c^2 - y_c^2$$

la ecuación (3.4) quedará, expresada en forma matricial:

$$\left. \begin{aligned} x_1^2 + y_1^2 &= z + 2x_1x + 2y_1y \\ x_2^2 + y_2^2 &= z + 2x_2x + 2y_2y \\ x_3^2 + y_3^2 &= z + 2x_3x + 2y_3y \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & 1 \\ 2x_2 & 2y_2 & 1 \\ 2x_3 & 2y_3 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 \\ x_3^2 + y_3^2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Simplificando la expresión anterior y adaptándola a notación matricial quedará el sistema principal que se ha de resolver:

$$[A_{ij}] \cdot [X_i] = [B_j] \Rightarrow [X_i] = [A_{ij}]^{-1} \cdot [B_j] \quad (3.6)$$

donde X_i representa cada una de las incógnitas del sistema, B_j será cada uno de los términos independientes y A_{ij} es cada uno de los elementos de la matriz A . La solución al sistema quedaría:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{1}{\det A} \begin{bmatrix} 2(y_2 - y_3) & 2(y_3 - y_1) & 2(y_1 - y_2) \\ 2(x_3 - x_2) & 2(x_1 - x_3) & 2(x_2 - x_1) \\ 4(y_3x_2 - y_2x_3) & 4(y_1x_3 - y_3x_1) & 4(y_2x_1 - y_1x_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 \\ x_3^2 + y_3^2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Este sistema tendrá solución siempre que el determinante de la matriz A sea distinto de 0. Esta circunstancia se da cuando los tres vértices del triángulo están alineados. Y deshaciendo el cambio de variables:

$$\begin{aligned} x_c &= x \\ y_c &= y \\ r &= \sqrt{z + x_c^2 + y_c^2} \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.3.5. Obtención de los polígonos de Voronoi a partir de la triangulación de Delaunay

El mosaico de Voronoi obtenido a partir de un conjunto de puntos generadores representa la división del espacio según su proximidad a dichos puntos. Este tipo de construcción geométrica también se denomina en ocasiones mosaico de Thiessen o *teselación*. Así, cada uno de los polígonos o piezas de este mosaico rodea a uno de los puntos generadores. Además, cada polígono abarca a la porción del espacio que tiene como punto generador más cercano aquel que queda dentro del propio polígono. En la Figura 3.9 se muestra el mosaico correspondiente al conjunto de puntos generadores presentado en la Figura 3.5.

Como se ha comentado anteriormente, el mosaico de Voronoi es una estructura dual de la triangulación de Delaunay. Esto quiere decir que para una determinada triangulación de Delaunay sólo existe un mosaico de Voronoi y viceversa. De hecho, la forma más habitual de construir el mosaico es a partir de la triangulación obtenida mediante el algoritmo descrito con anterioridad.

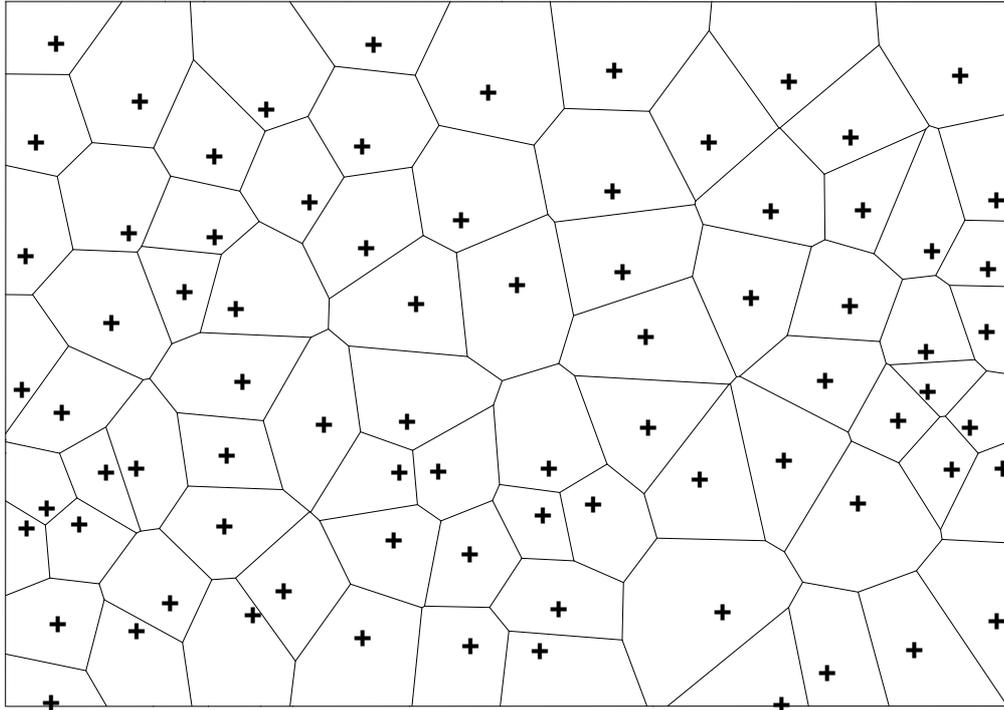


Figura 3.9. Mosaico de Voronoi para el conjunto de puntos de la Figura 3.5.

El procedimiento de construcción es muy simple. Se observa en la Figura 3.4 que un polígono está formado por lados que son las mediatrices de los triángulos que lo originan. Así, una cuestión importante es disponer de una matriz que recoja todos los lados de los triángulos.

Para ello se empieza con un barrido de los triángulos. Para cada uno de los triángulos que forman la triangulación, se comprueban uno por uno todos sus lados. Cada lado separa dos triángulos, por lo que si el lado no está en la comentada matriz, se añade, junto con una referencia al triángulo que se está comprobando. Si, por el contrario el lado ya está en la matriz, puesto que se anotó el primer triángulo que lo contenía, se tendrá toda la información necesaria para trazar la correspondiente arista de un polígono. Esta arista unirá los dos circuncentros implicados. En el caso de que alguno de los circuncentros se salga de los límites de la superficie analizada, será necesario delimitar los extremos de dicha arista. Cuando se acabe el barrido de triángulos, se dispondrá de todas las aristas del mosaico de Voronoi, por lo que el algoritmo se puede dar por concluido.

En la Figura 3.10 se presenta un posible planteamiento de esta rutina en la que los datos de partida son siempre la correspondiente triangulación de Delaunay.

```

Generar una triangulación de Delaunay
Inicializar una matriz de lados
Para cada uno de los  $t$  triángulos de la triangulación...
  Para cada lado del triángulo...
    Si el lado no está en la matriz
      Añadir lado a la matriz y anotar triángulo
    Si el lado ya está en la matriz
      Anotar triángulo
      Unir circuncentros de los dos triángulos anotados
      Si el circuncentro sale de los límites del espacio
        Delimitar extremos del lado
  Pasar al siguiente lado
Pasar al siguiente triángulo
    
```

Figura 3.10. Pseudocódigo del algoritmo para la obtención del mosaico de Voronoi a partir de una triangulación de Delaunay.

3.4. Algoritmos de interpolación

3.4.1. Planteamiento de un problema de interpolación espacial.

Se puede definir la interpolación espacial como un procedimiento para estimar el valor de una variable (espacial o alfanumérica) en un punto donde este valor se desconoce a partir de valores conocidos en sus alrededores.

La principal aplicación que se va a hacer de los modelos digitales del terreno consiste en conocer la altura sobre el nivel del mar de cualquier elemento de la red, esté o no incluido en el modelo. Por ello, en general serán puntos altimétricos los puntos generadores de la triangulación de Delaunay. Sin embargo, rara vez coincidirán los elementos con dichos puntos altimétricos. Por ello, la interpolación de valores a partir de los MDT constituye un problema muy habitual que es necesario resolver.

Otra utilización frecuente de la interpolación es la de creación de mapas matriciales a partir de datos vectoriales. Básicamente cualquier transformación entre distintos formatos del modelo de datos ha de pasar por la interpolación. El planteamiento podría hacerse así:

Determinar, a partir de un conjunto de puntos irregularmente repartido un nuevo conjunto de puntos ordenados matricialmente en forma de filas y columnas de tal forma que este segundo conjunto sea una representación adecuada del primero, es decir, sin pérdida de información o con la máxima precisión posible.

Los algoritmos de interpolación se pueden clasificar en función de los datos que se toman de partida, de su precisión en los puntos tomados como datos o de las operaciones matemáticas que se van a desarrollar para obtener el valor que resulta de dicha interpolación.

Como se mencionaba en el punto 3.1, es difícil buscar una única expresión matemática que pueda representar toda la superficie que se pretende analizar. Los métodos que pretenden hacer la interpolación a partir de todos los datos de la región analizada se denominan *métodos globales*. Esta opción no resulta demasiado adecuada para estudiar la realidad. Por ello, se suelen utilizar *métodos locales*, que son aquellos que estudian la variable en su entorno más cercano. De hecho, Waters (1988) enuncia la *Ley de Tobler* de la geografía: los puntos más cercanos en el espacio tienen mayor probabilidad de tener valores similares que los puntos más alejados.

Por todo lo anterior, en los SIG se utilizan casi exclusivamente los métodos locales, entendiendo por éstos la aplicación de una fórmula matemática que trate de representar con una precisión aceptable el entorno más cercano del punto problema. Sin embargo, esta clasificación no es exacta, pues un método puede ser local para toda la región analizada pero en última instancia es global para el entorno utilizado para su programación.

Otra forma de clasificar estos métodos de interpolación se basa en la estructura topológica utilizada para su codificación en el SIG. Así, se tienen métodos basados en puntos (por ejemplo, si los datos de partida son los vértices de los triángulos), en líneas (como podrían ser las curvas de nivel) o incluso basados en superficies, donde los datos están directamente guardados en polígonos o triángulos.

Otra clasificación sería aquella que se basa en la precisión de los valores obtenidos para la estimación de los datos que sirven como partida. Así estarían por un lado los *métodos aproximados* que incluyen el concepto de error en su programación y por otro lado los *métodos exactos*, que dan valores estimados en los puntos que sirven como dato iguales al dato de éstos. En los métodos aproximados se asume que existe un rango de variación pequeño en una zona pero con alta incertidumbre lo que da lugar a errores en la interpolación. Si el error se trata de forma estadística, el método se denominará *estocástico*, frente a los métodos determinísticos, que excluyen cualquier consideración probabilística.

Puesto que la decisión sobre el entorno más cercano va íntimamente ligada al MDT y éste ya se ha tratado como local (bien por mallas rectangulares, bien por triangulaciones, bien por poligonizaciones), se optará por la clasificación en función de las operaciones matemáticas a realizar.

3.4.2. Interpolación por proximidad

Es quizás el método más sencillo. Sea $z = f(x,y)$ la variable a interpolar. Este método consiste en asignar a z en el punto problema el valor que toma dicha variable en el punto más cercano al mismo. Al fin y al cabo, es el extremo de todos los demás métodos,

en el cual el entorno definido para el estudio de un punto se reduce a un único punto más cercano. El mecanismo de cálculo puede ser muy complicado si ha de realizarse cada vez, pero si se tiene disponible un mosaico de Voronoi el cálculo es inmediato.

Este método se utilizará para determinar valores no numéricos. En el caso de esta Tesis, una aplicación que se hará de este método es la determinación del área que ha de ser abastecida por un determinado nudo de una red en el diseño de redes a largo plazo.

Este método tiene como principal ventaja que es totalmente robusto, pues siempre es posible encontrar una solución al problema, aunque produce saltos bruscos al cambiar de punto de referencia.

3.4.3. Interpolación lineal

Se trata del procedimiento de interpolación más sencillo y probablemente el más extendido en aplicaciones que no requieren demasiada precisión, como pueden ser la preparación de salidas gráficas para presentación de resultados (Iglesias et al, 1997). Sea un conjunto de puntos con datos conocidos (por ejemplo, puntos dato con la cota conocida) y un punto cuyos datos se desean estimar (por ejemplo, se desea interpolar la cota de un punto problema). La interpolación lineal (también llamada *interpolación plana*) consiste en buscar un plano que suponga la mejor representación del entorno más cercano al punto problema, es decir, de los n puntos dato. La expresión de dicho plano vendrá dada por:

$$z(x, y) = A + Bx + Cy \tag{3.9}$$

Salvo en el caso en que el entorno más cercano esté compuesto por tres puntos (como ocurre en la interpolación en un MDT obtenido por triangulación), el plano generalmente no podrá contener todos los puntos dato. Por ello, surge la necesidad de buscar un ajuste de dicho plano con los datos del entorno, lo cual convierte a este método en un método aproximado. Este ajuste es con mucha frecuencia el de los mínimos cuadrados, lo cual minimiza el cuadrado del error cometido en las estimaciones en los puntos dato. Así, si x_i , y_i son las coordenadas del i -ésimo punto más cercano al punto problema y z_i es el dato conocido de dicho punto, los coeficientes del plano de ajuste se obtendrán de la resolución del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned} An &+ B \sum_{i=1}^n x_i &+ C \sum_{i=1}^n y_i &= \sum_{i=1}^n z_i \\ A \sum_{i=1}^n x_i &+ B \sum_{i=1}^n x_i^2 &+ C \sum_{i=1}^n x_i y_i &= \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ A \sum_{i=1}^n y_i &+ B \sum_{i=1}^n x_i y_i &+ C \sum_{i=1}^n y_i^2 &= \sum_{i=1}^n y_i z_i \end{aligned} \right\} \tag{3.10}$$

Este tipo de algoritmos suele ir acompañados de otros para localizar los puntos más cercanos. Sin embargo, en los casos en que los datos conocidos estén en formato matricial,

con idéntica separación, se suelen coger los cuatro o los nueve vértices más cercanos. En estos casos la solución a la expresión anterior se simplifica bastante.

Este método tiene básicamente el problema de representar las superficies con ángulos muy afilados, que no son habituales en la naturaleza. Por ello, para el estudio de superficies naturales se suele recurrir a otros métodos que suavicen éstos ángulos en los contornos del plano elegido. Además, el rango de variación de la variables interpoladas estará siempre dentro del rango de los datos, por lo que nunca se obtendrán valores extremos (picos). Sin embargo, la principal ventaja que aporta es que admite una representación gráfica en plano sencilla.

3.4.4. Interpolación mediante superficies de tendencia

Se trata de una generalización del método anterior. Representa la relación entre la localización geográfica de un punto y el valor de la variable a interpolar mediante un polinomio de grado k :

$$z(x, y) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^{k-i} A_{i,j} x^i y^j \quad (3.11)$$

Evidentemente, para $k = 1$ se tratará de la interpolación lineal antes comentada. La elección del orden del polinomio determinará la complejidad de las operaciones, la suavidad de las curvas resultantes en su representación gráfica y el error cometido. Cuanto mayor sea el grado del polinomio se tendrá menor error cometido en los puntos que sirven como dato y una representación más suavizada, pero el coste del cálculo se incrementará considerablemente. En cualquier caso, para que la interpolación sea fiable, el número de datos necesarios para obtener el polinomio ha de ser suficientemente grande para permitir un análisis estadístico significativo (Felicísimo, 1992).

Como principal inconveniente está la incapacidad práctica para las extrapolaciones, pues conforme aumenta el grado del polinomio, más grande es el error cometido fuera de la zona cubierta por los puntos que sirven de dato. Además, el polinomio da mejores resultados cuanto más regular sea el reparto de los puntos tomados para su obtención.

3.4.5. Interpolación inversa a la distancia.

Determina el valor de la variable a interpolar a partir de una función ponderada de la distancia que separa el punto problema de los puntos dato que componen su entorno más cercano. La expresión general de esta función es:

$$z(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^k}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^k}} \quad (3.12)$$

En esta expresión, d_i es la distancia que separa el punto problema con cada uno de los n puntos del entorno elegidos para realizar la interpolación.

Este método de interpolación espacial es exacto, pues toma los valores correctos para los puntos dato. Este es el método más utilizado para la interpolación espacial en entornos SIG. Tiene a su favor la sencillez de implantación y la velocidad de cálculo. Sin embargo, al igual que sucede con la interpolación plana, tiene como principal inconveniente el limitar los resultados al rango de valores extremos de los puntos con datos conocidos. Esto obliga a incluir en el conjunto de datos los máximos y mínimos relativos para cada zona. A pesar de ello, es el método que se ha elegido en el desarrollo de la Tesis para la interpolación espacial.

3.4.6. Interpolación por kriging.

El kriging (también conocido por *krigeado* en alguna bibliografía española) se trata de un método de interpolación óptima de variables regionalizadas. El origen de la palabra viene de su creador, D.G. Krige, que la utilizó por primera vez en Sudáfrica en la industria minera. Hay diversos tipos de kriging: puntual, de bloque o universal, pero es el primero de ellos, también llamado ordinario, el más extendido en el ámbito geográfico.

El objetivo del kriging ordinario es la obtención de un valor de z en un punto de una región del espacio a partir de n_d puntos cercanos de un total de n puntos con valores medidos u observados en dicha región. La expresión general del kriging ordinario es:

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^{n_d} A_i z_i \quad (3.13)$$

En esta expresión, A_i son coeficientes de ponderación que han de calcularse a partir de un análisis estadístico de los puntos dato. En cualquier caso, estos coeficientes han de cumplir la condición:

$$\sum_{i=1}^{n_d} A_i = 1 \quad (3.14)$$

La idea general de este método es que cualquier variable tiene aproximadamente el mismo comportamiento espacial. Así, la semivarianza $\gamma(d)$ del error cometido en la estimación de la variable a interpolar en función de la distancia que separa los puntos en cuestión también deberá cumplir:

$$\sum_{i=1}^n A_i g(d_{ij}) = g(d_j) \quad (3.15)$$

donde $\gamma(d_{ij})$ es la semivarianza correspondiente a la distancia que separa los puntos observados i y j ; y $\gamma(d_j)$ es una función que representa la semivarianza del error cometido al realizar el ajuste de la variable z en el punto problema por este método:

$$\begin{aligned} g(d_{ij}) &= \frac{1}{2} \text{var}(z_i - z_j) \\ g(d_j) &= \frac{1}{2} \text{var}(z - z_j) \end{aligned} \tag{3.16}$$

En la expresión (3.15), d_j es la distancia que separa el punto problema y el punto observado j (con datos conocidos). La representación de $\gamma(d_j)$ para todos los puntos observados se denomina *variograma* y muestra la variación de la correlación espacial entre los datos y la distancia que los separa. Para determinar el valor de $\gamma(d_{ij})$ a partir de los datos conocidos se suele utilizar la expresión siguiente (Felicísimo, 1992) para cada uno de los n puntos conocidos:

$$g(d_{ij}) = \frac{1}{2n_d} \sum_{i=1}^{n_d} (z_j - z_i) \quad j = 1, \dots, n; j \neq i \tag{3.17}$$

donde:

- n_d será el número de puntos de la muestra que están situados a una distancia inferior a d_{ij} del punto de la muestra para el cual se realiza la interpolación,
- z_j es el valor de la variable a interpolar en cada punto j del conjunto de puntos observados; y
- z_i son los valores que toma la variable interpolada en los n_d puntos situados a una distancia inferior a d_{ij} del punto j .

Dada la naturaleza discreta de los puntos observados, la representación del variograma presenta irregularidades y discontinuidades. Además, el valor de $\gamma(d_j)$ no se puede calcular, pues se desconoce cuánto vale z en el punto problema. Para su implantación en ordenador, se ajusta este variograma a una expresión matemática continua que elimine estos problemas, tal y como se muestra en la Figura 3.11.

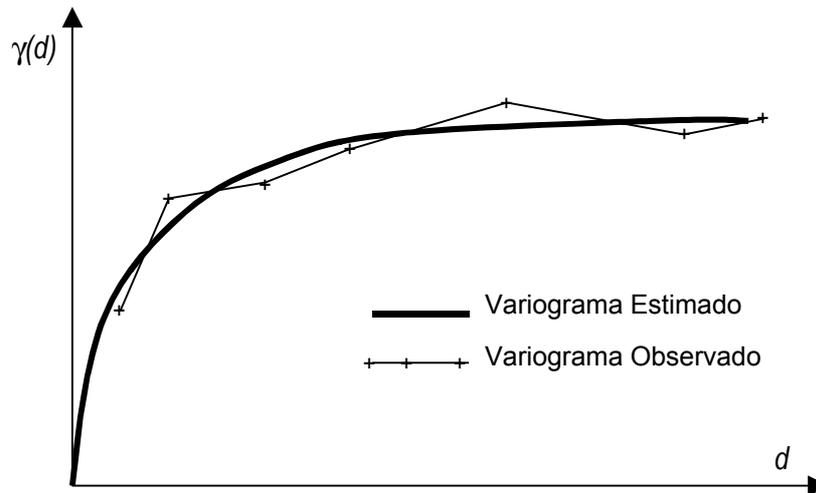


Figura 3.11. Curvas de variogramas: observado en los datos y calculado a partir de ellos.

A continuación se presentan algunas aproximaciones para la estimación del variograma mediante expresiones matemáticas. La primera de ellas se debe a Dorsel & La Brehce (1997) y asume un variograma lineal:

$$g(d) = 4 \cdot d \tag{3.18}$$

Esta aproximación tiene como principales ventajas la sencillez de cálculo, pero da resultados muy imprecisos.

Lang (2000) utiliza dos aproximaciones distintas en aplicaciones estadísticas para la neurobiología. La primera se trata de un variograma esférico:

$$g(d) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[1,5 \frac{d}{a} - 0,5 \left(\frac{d}{a} \right)^3 \right] & d \leq a \\ C_0 + C_1 & d > a \end{cases} \tag{3.19}$$

La segunda aproximación, más apropiada para su utilización en geoestadística es un variograma exponencial:

$$g(d) = \begin{cases} C_0 & d = 0 \\ C_0 + C_1 \left[1 - e^{-\frac{3d}{a}} \right] & d > 0 \end{cases} \tag{3.20}$$

En estas expresiones la constante C_0 representa lo que se conoce como *efecto nugget* (traducible como *efecto pepita*). Esta variable sirve para eliminar problemas para distancias muy cortas. Así, la teoría afirma que para distancias infinitamente pequeñas, la semivarianza debe ser cero, pero del análisis de los datos disponibles no es posible llegar a esta afirmación. Por otra parte, a es el *umbral*, es decir, la distancia a partir de la cual los

puntos se pueden suponer espacialmente independientes entre sí. Por último, $C_0 + C_1$ se denomina tendencia, y es el valor asintótico al que tiende el variograma a partir de una distancia a . La Figura 3.12 muestra estos conceptos en un variograma.

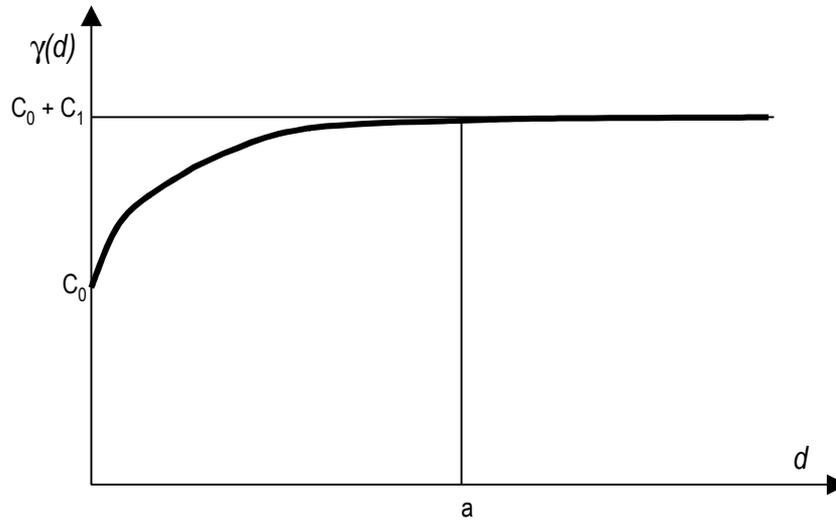


Figura 3.12. Rango, tendencia y efecto pepita de un variograma.

Salvo en el caso de optar por el variograma lineal, el resto de aproximaciones al problema requieren un estudio estadístico global de todos los puntos con datos conocidos, bien para tener una colección de puntos con los que interpolar la semivarianza, caso de optar por utilizar directamente la expresión (3.18), bien para ajustar los valores del rango, la tendencia y el efecto nugget de las expresiones matemáticas (3.19) y (3.20).

Puesto que se incluye la restricción (3.14), el sistema de ecuaciones a resolver constará de $n_d + 1$ ecuaciones, pero sólo n_d incógnitas: los n_d coeficientes de ponderación. Por esto, y para asegurar que la solución del sistema dará un error mínimo se incluye un coeficiente multiplicador de Lagrange, m . Con esto, el sistema a resolver quedará:

$$\sum_{i=1}^{n_d} A_i g(d_{ij}) + m = g(d_j)$$

$$\sum_{i=1}^{n_d} A_i = 1$$
(3.21)

La mayor desventaja del método kriging consiste en la cantidad de cálculos numéricos requerida, por lo que el consumo en tiempo es también muy elevado. Además, para cada punto que se pretenda interpolar es necesario calcular las distancias a los n puntos conocidos y tomar sólo los n_d que están situados a una distancia inferior al umbral a , o extender el cálculo a todos los puntos y tratar el método como global. A cambio, presenta un comportamiento muy bueno cuando se trata de interpolar superficies con gran interdependencia espacial, como es el caso de las cotas del terreno.

3.4.7. Interpolación por técnicas de elementos finitos.

El creciente desarrollo de los métodos basados en elementos finitos hace que éstos se estén utilizando en la práctica como herramienta de interpolación en modelos digitales del terreno. Así, por ejemplo, Martínez Marín et al. (2002) plantean un método de interpolación de isolíneas basado en la aplicación de los elementos finitos a una triangulación de Delaunay. En este caso, para cada triángulo, extiende el dominio de la interpolación a 6 puntos: los tres vértices del triángulo y los tres puntos medios de los lados, tal y como se muestra en la Figura 3.13.

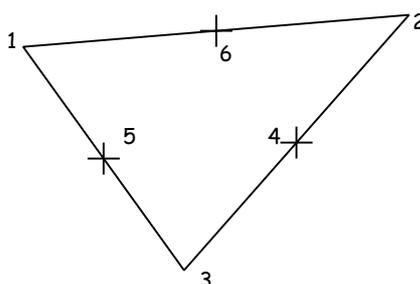


Figura 3.13. Puntos definidos para la interpolación por elementos finitos.

En una triangulación, todos los puntos de los cuales se conoce el valor a interpolar se incluyen en el conjunto generador. Por tanto, los puntos medios 4, 5 y 6 carecen de un valor de la cota conocido. Esto hace que sea necesario interpolar un valor de la cota como paso previo al proceso de interpolación completo. En este caso, Martínez Marín opta por una interpolación cuadrática inversa con la distancia a partir de los puntos que conforman los dos triángulos a los que pertenece cada lado (puntos A, B, C y D de la Figura 3.14). Sin embargo, también se puede aplicar la interpolación lineal entre los extremos del lado considerado (puntos A y C de la mencionada figura).

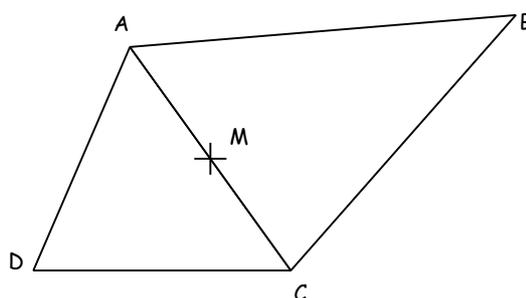


Figura 3.14. Estimación de la cota en los puntos medios de los lados.

Una vez definidos los 6 puntos a considerar en cada triángulo, se definen unas *funciones de forma* cuyas expresiones serán:

$$\begin{aligned}x &= c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3 \\y &= c_1 \cdot y_1 + c_2 \cdot y_2 + c_3 \cdot y_3\end{aligned}\tag{3.22}$$

Estas expresiones se completan con la restricción de que los coeficientes de ponderación c_1 , c_2 y c_3 cumplan:

$$c_1 + c_2 + c_3 = 1\tag{3.23}$$

Las ecuaciones (3.22) y (3.23) constituyen un sistema lineal con tres incógnitas, que expresado en forma matricial queda:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \Rightarrow [X] = [A][C]\tag{3.24}$$

La solución a los coeficientes de ponderación vendrá dada por:

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\det A} \begin{bmatrix} x_2 y_3 - x_3 y_2 & y_2 - y_3 & x_3 - x_2 \\ x_2 y_3 - x_3 y_2 & y_3 - y_1 & x_1 - x_3 \\ x_2 y_3 - x_3 y_2 & y_1 - y_2 & x_2 - x_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}\tag{3.25}$$

En la expresión (3.25) el determinante de la matriz A constituye el doble del área del triángulo.

Una vez calculados los coeficientes de ponderación, la cota se calcula como una combinación lineal de los seis puntos tomados como referencia:

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^6 N_i z_i\tag{3.26}$$

Los coeficientes N_i vienen dados por:

$$\begin{aligned}N_1 &= c_1(2c_1 - 1) & N_4 &= 4c_2c_3 \\N_2 &= c_2(2c_2 - 1) & N_5 &= 4c_1c_3 \\N_3 &= c_3(2c_3 - 1) & N_6 &= 4c_1c_2\end{aligned}\tag{3.27}$$

3.4.8. Otros métodos de interpolación.

Además de los métodos expuestos anteriormente, existen otros métodos de interpolación espacial menos extendidos en el campo de la geografía. Entre ellos destacaremos tres:

Interpolación por curvas polinómicas o *splines*.

La base para este método es similar a la del método de las superficies de tendencia. Se trata de elegir un polinomio que cumpla continuidad y derivabilidad en los bordes de la región donde se va a aplicar. La principal diferencia de este método con el de las superficies de tendencia es que es un método exacto, por lo que en función del grado del polinomio habrá que escoger un número de puntos con datos conocidos que permita determinar todos los coeficientes del polinomio. Tiene un buen comportamiento matemático en cuanto a continuidad en los mapas de cotas, pendientes o curvatura, pero no es demasiado utilizado en los SIG.

Interpolación por series de Fourier.

Ajusta los datos de la variable a lo largo de una superficie a través de sumatorios de senos y cosenos. La carga de cálculo es moderada y la exactitud del método sólo es buena en los casos en que la variable tiene cierta periodicidad, como es el caso de estudios en zonas dunares o en estudios marinos para representar oleajes.

Interpolación subjetiva.

Aún hoy en día (Dutton-Marion, 1988) algunos geógrafos opinan que la interpolación de valores que dependen de la naturaleza no se puede dejar en manos de los ordenadores. La opinión de éstos es que la experiencia es en muchos casos el mejor interpolador. Evidentemente, este método tiene como principal inconveniente la falta de repetitividad: dos geógrafos independientes obtendrán valores diferentes para una misma variable en un mismo punto del espacio.

4. Modelo de análisis hidráulico de redes de distribución de agua.

4.1. Codificación de la realidad en un Sistema de Información Geográfica.

Un SIG representa una realidad física a través de símbolos gráficos y datos alfanuméricos. La realidad es compleja y por ello el SIG no es capaz de reconocer los objetos que forman parte de la realidad y mucho menos sus atributos. De hecho, distintos observadores tendrán distintas percepciones de la realidad. Tómese el caso de una tubería. Para un técnico encargado de su instalación, una tubería es un cilindro hueco de un cierto diámetro exterior, con una cierta longitud y con elementos de unión en sus extremos. Por contra, para el técnico encargado de su correcto funcionamiento será un elemento de transporte cuya capacidad dependerá de la fecha de instalación, la rugosidad de las paredes

y el tamaño interior. En definitiva, dos personas distintas han creado dos *modelos de realidad* distintos de un mismo objeto. El modelo de realidad es una abstracción o representación que ayuda a interpretar esa realidad. Sin embargo, resulta difícil encontrar este tipo de representaciones en un SIG. La pieza mínima de representación en un modelo de realidad es la entidad. Una entidad debe tener ciertos atributos que la definan, así como relaciones con otras entidades.

Una vez se ha establecido el modelo de realidad de todo el sistema que se pretende codificar en el SIG, la siguiente etapa es establecer cómo se va a almacenar en el SIG cada una de las entidades definidas. El proceso de definición de los datos que resultan de interés para una determinada interpretación de la realidad se denomina *modelación de datos o análisis de sistemas*. Este proceso debe convertir cada entidad (tal y como el modelador la tiene representada mentalmente) en un objeto dentro de una base de datos que en esta ocasión está georreferenciada. Así, un objeto vendrá definido por un tipo y tendrá sus correspondientes atributos y relaciones con los demás objetos. Además, es importante que durante la modelación se tengan presentes las operaciones que se han de realizar con los distintos el objetos. Así, dependiendo del uso que el SIG vaya a hacer del mismo, se pueden realizar distintos modelos de datos de una misma realidad. Siguiendo con el ejemplo de la tubería, su codificación es radicalmente distinta si lo que se pretende es tener un inventario de infraestructuras de lo que sería si el objetivo fuese conocer el caudal y la presión en el interior de la misma.

Según Bernhardsen (1992) el modelo de datos de un objeto debe incluir sus atributos, relaciones, geometría y metadatos (es decir, datos relativos a la precisión, calidad y forma de codificación de los atributos del objeto).

Dado que en la actualidad la mayoría de aplicaciones hidráulicas integradas en un entorno SIG responden al tipo independiente, tal y como se definió este tipo de integración en el Capítulo 2, el modelo de datos ya codificado en el SIG ha de hacerse compatible con una herramienta de cálculo externa. Este último paso para el estudio de una red de distribución es la *modelación matemática* de la misma. Durante la elaboración de un modelo matemático, es necesario adaptar la estructura de datos utilizada para la codificación de la red en el SIG a los elementos que la herramienta de cálculo reconoce.

En el modelo matemático están identificadas las entidades que forman la realidad, pero con algunas simplificaciones como ya se comentó al principio de este capítulo. No sólo se prescinde de algunas entidades, simplificándolas con otras, sino que incluso aquellas que se mantienen se caracterizan sólo con algunos de sus atributos, aquellos que resulten de interés para la aplicación para la que se ha realizado el modelo matemático. El proceso completo de modelación de una realidad de manera que permita la interacción con una herramienta externa se puede representar de manera esquemática tal y como se muestra en la Figura 3.15.

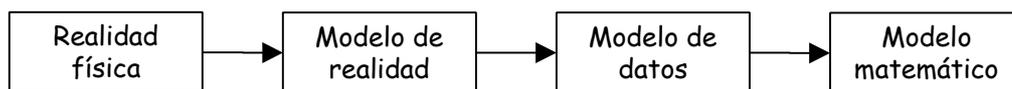


Figura 3.15. Transición desde el mundo real hasta el SIG.

A continuación se ilustra con un ejemplo la secuencia de modelos. En la red de abastecimiento el agua circula por el interior de las conducciones y éstas tienen diferentes características, materiales, etc. En el modelo de realidad se identifican las conducciones como una sucesión de tubos con propiedades físicas: diámetro, espesor, material, rugosidad, año de instalación, estado de conservación, nivel de incrustaciones, tipo de unión, fabricante, profundidad de instalación,...

En el modelo de datos se agruparán diferentes tubos de las mismas características en tuberías para formar una tubería. Una tubería será el tramo de conducción entre dos acometidas, en el que se mantienen todas las características. De esta forma se eliminan, entre otros, los sistemas de unión. Además, se definirían los datos de ésta. Para el modelo hidráulico sólo es necesario conocer el diámetro interior del tubo y su rugosidad, por lo que se prescinde del resto de información. Por contra los parámetros de calibración que no se guardaban originalmente en el modelo de datos son fundamentales para el análisis y hay que incluirlos en el modelo. Con todo esto se habría concluido el proceso de modelación matemática de la tubería.

Este proceso resulta bastante complicado y costoso, por lo que uno de los objetivos de esta Tesis consiste en diseñar la base de datos de manera que se facilite la creación del modelo matemático. En definitiva, se trata de tener en cuenta la elaboración del modelo durante la definición del modelo de datos.

4.2. Introducción a la simulación hidráulica de redes de abastecimiento de agua.

4.2.1. Definiciones básicas en un problema de análisis de redes.

Antes de entrar en la formulación del modelo de análisis hidráulico utilizado, se ha considerado conveniente realizar una serie de definiciones previas que serán de utilidad, empezando por el concepto de *análisis* de una red de distribución de agua.

El análisis de un sistema de distribución de agua consiste, en general, en determinar las alturas piezométricas de todos los nudos y los caudales que circulan por todas las tuberías, dados una serie de datos de los elementos. Estos datos consisten en las características de todas las conducciones (longitudes, diámetros y rugosidades) y de los elementos especiales (niveles iniciales de los depósitos, curvas características de los grupos de bombeo, grado de apertura de las válvulas de regulación, presión de tarado de las válvulas reductoras y sostenedoras, etc.), así como los consumos que se realizan en los nudos y la altura piezométrica (suma de altura de presión y cota) en al menos uno de los nudos del sistema. Como se representó en la

Figura 3.1, se trata de obtener unos resultados a partir de unos datos y un conjunto de ecuaciones que representan a cada elemento (el modelo):

Tabla 3.1. Datos y resultados en un modelo matemático de una red de distribución de agua.

Datos	Resultados
<ul style="list-style-type: none"> • características de todas las conducciones (longitud, diámetro, y rugosidad) • características de todos los elementos especiales • consumos en los nudos • una altura piezométrica de referencia 	<ul style="list-style-type: none"> • caudales que circulan por las tuberías • alturas piezométricas en los nudos

La forma en que se considera la variabilidad del tiempo en el análisis del sistema es la que permite distinguir diferentes tipos de modelos, como ya se comentó en el apartado 2.2.2 de este mismo capítulo.

Si se considera con rigor el funcionamiento de una red de distribución de agua, la existencia de un régimen permanente en el mismo es una situación teórica. Sin embargo, cuando las variaciones de caudal y presión son pequeñas, no conduce a demasiados errores despreciar dichas variaciones y considerar como permanentes las situaciones de funcionamiento en que los valores medios en el tiempo de estas cantidades se mantienen constantes (Iglesias, 2001).

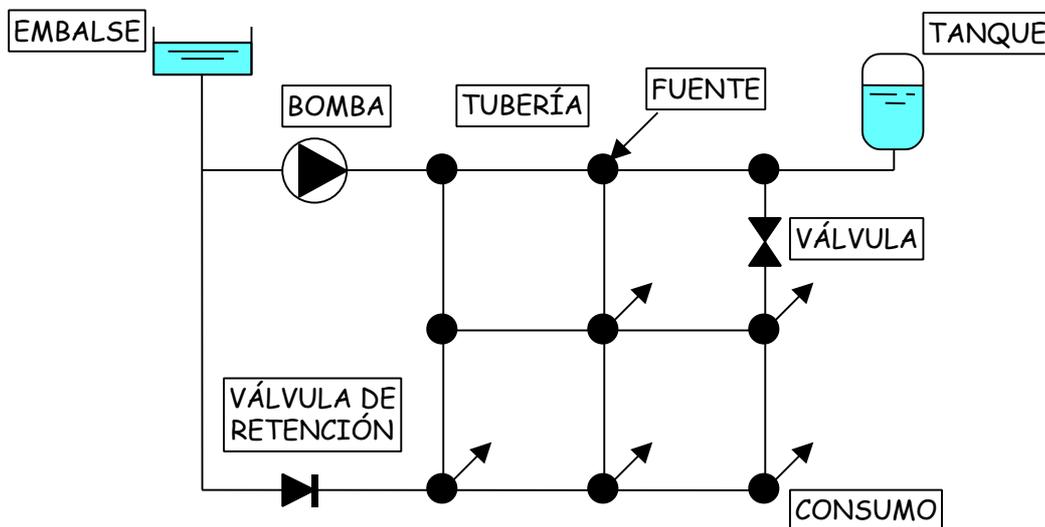


Figura 3.16. Diversos elementos de una red de distribución de agua.

Entrando de lleno en la problemática de estudio, se define una red de distribución como un conjunto de elementos convenientemente conectados entre sí cuya finalidad es conducir el agua desde los puntos de alimentación (en general, pozos y depósitos de

distribución) a los puntos de consumo (edificios, industrias, bocas de riego e incendio, etc.), manteniendo unas buenas condiciones cuantitativas y cualitativas (Figura 3.16).

Cuando se habla de un *elemento* de la red se hace referencia a un componente real de la red, esto es, una válvula, un tramo de conducción (constituido por una sucesión de tubos rectilíneos montados en serie), una bomba, etc., sin unión alguna con el exterior a lo largo de su longitud y cuyo comportamiento hidráulico está perfectamente definido.

Dada la gran cantidad de elementos que constituyen una red resulta impracticable, cuando se pretende proceder a su modelación matemática, identificar cada uno de ellos. Por este motivo se realizan agrupamientos y otras técnicas de simplificación para definir líneas. Estas técnicas se describirán más adelante en este mismo capítulo.

Puesto que ya ha aparecido el concepto de *línea* de la red, conviene proceder a su definición. Una línea de un modelo de red se define como un conjunto de elementos de la misma conectados entre dos puntos, a los cuales se les puede asociar una ecuación constitutiva que permita caracterizar, con la mayor fidelidad posible, el comportamiento global de esos elementos, o sea la relación entre el caudal circulante y la diferencia de alturas piezométricas entre los citados puntos. Dependiendo del grado de abstracción o *esqueletización* que se haga de la red real se tendrán más o menos líneas en el modelo. En sucesivos apartados se entrará de lleno en la problemática de la modelización matemática de cada tipo de elemento, lo que permitirá en definitiva modelar matemáticamente las líneas del modelo.

Una vez agrupados todos los elementos de la red en las correspondientes líneas, se está en condiciones de realizar un esquema de la misma. Los extremos de cada línea serán los nudos del sistema. De esta forma, un sistema de distribución, con cualquier nivel de complejidad, puede esquemáticamente ser representado, a efectos de análisis hidráulico, por un conjunto de *nudos* y *líneas*. Las líneas pueden ser de diversos tipos: tuberías, válvulas, bombas, estructuras de medición y control, etc.

Los *nudos* pueden ser definidos como puntos de la red en los cuales se unen dos o más líneas (nudos de conexión), o puntos en los cuales se efectúa la entrada o salida de caudales al sistema (en el análisis hidráulico, como veremos, los consumos son concentrados en los nudos). Corresponden pues a los lugares donde son aplicadas las condiciones de contorno del problema y es a través de ellos por donde la red se comunica con el exterior.

Además, puesto que los nudos constituyen el punto de unión de varias tuberías, éstos se descomponen habitualmente en nudos propiamente dichos (uniones, consumos o puntos de inyección) y depósitos (depósitos de nivel constante o variable).

En el caso de un nudo que represente un consumo, el valor asignado a éste se corresponde con el caudal demandado por los usuarios a los que abastece para la situación de cálculo analizada. El consumo será generalmente (problema de análisis) un dato del problema, mientras que la presión en el citado nudo será la incógnita a determinar (*nudos de*

altura piezométrica incógnita o nudos de caudal). Una vez conocida ésta será necesario analizar si bajo las condiciones supuestas es posible suministrar ese consumo a los usuarios (pensemos por ejemplo en la imposibilidad de suministrar un consumo normal a un edificio de viviendas que careciese de grupo hidropresor en el caso en que la presión calculada no superase un cierto valor).

Un nudo que simplemente representa la confluencia de dos o más líneas, pero por el que no entra ni sale caudal a la red, puede ser considerado como un nudo de caudal, siendo el valor de éste nulo. Por tanto, éstos no son sino un subconjunto de los anteriores.

El otro tipo de nudos corresponde generalmente a depósitos o puntos de entrada a la red con altura piezométrica conocida. A estos nudos se les denomina *nudos de altura piezométrica conocida o nudos de presión*. En estos, la incógnita es por regla general el caudal que aportan al sistema, si bien puede darse el caso de que reciban caudal (caso de un depósito que se está llenando). En función de las características de los mismos, estos nudos se pueden subdividir a su vez en *embalses* o depósitos de nivel constante y *tanques* o depósitos de nivel variable.

Las líneas se caracterizan por mantener a lo largo de toda su longitud un caudal constante y unas características uniformes (sección y material). Como resultado del proceso de esqueletización previo a la obtención del modelo matemático puede suceder que una tubería tenga consumos intermedios o distribuidos a lo largo de la misma. No existen sin embargo muchos modelos hidráulicos de análisis que consideren este tipo de elementos.

La forma en que están asociadas (topología del sistema) da lugar a clasificar las redes como *ramificadas o malladas*. Generalmente las redes de distribución son de tipo *mixto* ya que presentan mallas y ramificaciones. Una *malla* es un circuito cerrado formado por varias líneas (tiene su origen y final en el mismo nudo) y puede o no contener otros circuitos cerrados en su interior. Se definen las *mallas elementales* como aquellas que no contienen ninguna otra en su interior.

Esta división que se ha hecho de los elementos de una red de distribución es meramente hidráulica, ya que la representación típica de bombas y válvulas en un SIG es la de un punto. Se trata pues de elementos que hidráulicamente han de ser tratados como líneas pero cuya representación gráfica o topológica es habitualmente la de un nudo. Esto supone un problema para realizar la conexión entre el SIG y los modelos hidráulicos de simulación. Macke (2001) lo resuelve mediante el uso de las relaciones direccionales y el concepto de *orientación* visto en el capítulo anterior (topologías).

Este comportamiento es extensible a otros elementos que pueden formar parte de una red. Este es el caso de las fugas, modeladas por algunos autores (Rossman, 2000; Cabrera et al, 1996) como emisores que descargan a la atmósfera a través de un orificio con un determinado coeficiente de pérdidas de carga; o los dispositivos de protección contra incendios (bocas de incendio equipadas, hidrantes y rociadores principalmente)

utilizados entre otros por el programa SARA (Iglesias, 2001). Sin embargo, el análisis de este tipo de elementos de la red se escapan del alcance de la presente Tesis.

4.2.2. Definiciones propias de la teoría de grafos o topología.

Además de los conceptos relativos a la formulación hidráulica del análisis de redes de distribución, para poder analizar algunos de los métodos de resolución que se exponen, es necesario introducir una serie de definiciones relacionados con la teoría de grafos, también llamada en ocasiones topología. Quizás el primer concepto a introducir es el de *topología*, pues además de la propia disciplina que estudia las relaciones de conectividad entre elementos es también uno de los elementos característicos de cualquier SIG vectorial utilizado para el análisis de redes de cualquier naturaleza. Este concepto ya fue descrito someramente en el capítulo 2. Una topología trata con las características de los objetos que permanecen idénticas si el espacio se deforma elástica y continuamente. Así, se puede definir la topología como un conjunto de objetos (nudos, líneas y polígonos) cuya relación principal es la conectividad. Dentro del concepto de topología, existen otros que conviene conocer:

- *Orientación*. En el estudio de redes, existen algunos elementos que restringen la circulación a un único sentido. Es el caso de las calles con sentido único de circulación en redes de tráfico, o las válvulas de retención en el caso más cercano de las redes de distribución de agua. La orientación es la propiedad del elemento que almacena esta característica. Es propio de las líneas (sentido directo o inverso) y de los polígonos (sentido horario o antihorario).
- *Camino*. Se trata de una serie ordenada de líneas de la topología que tienen la propiedad de que colocadas una a continuación de otra y siguiendo el sentido de circulación u orientación de las mismas permiten desplazarse de un nudo a otro de la mencionada topología.
- *Conectividad*. Se trata de otra de las propiedades de las topologías. Una topología es conexa si siempre se puede definir un camino entre cualesquiera dos nudos de la misma. Relacionado con este concepto está también el de *grado de conectividad* de un nudo. Este es el número de líneas que llegan o parten del mismo. Algunos autores, como Pérez et al. (1996) definen el mismo grado de conectividad como el número de líneas que están conectadas al nudo menos uno.
- *Malla o circuito*. Se trata de un subconjunto de una topología definido de forma que existen dos caminos diferentes para unir dos nudos del sistema. Su comportamiento topológico es similar al de los polígonos.
- *Árbol*. Un árbol del sistema es otro subconjunto de la topología que cumple las condiciones siguientes:
 - a) Constituye por sí mismo una topología conexa.
 - b) Contiene todos los nudos de la topología original.

c) No contiene ninguna malla o circuito en su interior.

En definitiva, definido un árbol dentro del sistema, éste tiene la propiedad de que entre dos nudos cualesquiera del mismo se puede definir un único camino. Este es un concepto muy importante, pues se utilizará posteriormente cuando se realice la descripción del método de asignación de cargas a un modelo matemático de detalle.

Topológicamente no es difícil comprobar que si N es el número total de nudos de la topología original, cualquier árbol definido sobre la misma tiene un total de $N-1$ líneas.

En general, una red de distribución de agua constituida por L líneas, N nudos y M mallas elementales verifica la siguiente relación bien conocida de la topología.

$$M = L - N + 1 \quad (3.28)$$

Tanto M como L incluyen a las mallas y líneas ficticias necesarias para resolver el problema. En la expresión (3.28) no es estrictamente necesario que las mallas sean elementales, es decir, que no contengan ninguna otra malla en su interior. Tan sólo es necesario que las ecuaciones correspondientes a las mallas seleccionadas sean independientes entre sí.

4.3. Fases en la elaboración de los modelos matemáticos.

Modelar toda la red, hasta hace unos años, resultaba inviable porque los programas de análisis no podían trabajar con tal cantidad de información, o lo hacían muy lentamente. Con los avances, tanto en hardware como en lo relativo a las técnicas de análisis de redes, el problema de incluir todas las líneas de la red en el modelo ya se ha eliminado. No obstante, la bondad del modelo depende muy directamente de la precisión de los datos de partida. Incluir toda la red en el modelo supone modelar hasta las acometidas de los edificios, cuya información es tan difícil de recopilar como imprecisa.

Por ello, resulta interesante establecer el grado de detalle que se le debe exigir al modelo. Éste va a depender del uso que se vaya a hacer del mismo, y de la precisión de los datos. Si la opción es la de desarrollar un *modelo estratégico de la red*, el grado de detalle se limitará a unas pocas líneas y nudos cuyo comportamiento sea equivalente al de todo el sistema.

En cuanto a los datos de partida, la bondad del modelo va a depender de una manera muy notable de su precisión. Si todos los datos de que se dispone tienen un elevado grado de precisión será posible recurrir a un modelo con un elevado nivel de detalle. Si por el contrario, existe mucha incertidumbre en la información, no tiene sentido ir a un nivel de detalle en el modelo que aporta gran precisión en el cálculo cuando los datos de partida no tienen tal precisión.

Realizar simplificaciones en la red pueden dar mayor bondad al modelo por cuanto la simplificación puede contrarrestar errores de partida. Por ejemplo, se puede conocer el

consumo de un sector de la red, pero desconocer exactamente cómo se distribuye entre cada una de las acometidas. Realizar una simplificación, tomando todo el sector como un único nudo, elimina la incertidumbre sobre la distribución de cargas.

Hay que tener en cuenta que un mayor grado de detalle en el modelo tiene un mayor coste de elaboración. La bondad del modelo debe compensar el esfuerzo económico que realicemos para su elaboración.

El proceso de elaborar un modelo matemático supone recopilar toda la información existente de la red y tratarla para que pueda ser asimilada por los programas de análisis existentes. La dificultad se presenta en las redes en servicio, donde los parámetros con los que se proyectó la red se han ido modificando por el propio funcionamiento de éstas. El conocimiento de qué parámetros, y las circunstancias que hacen que varíen, son fundamentales a la hora de estimarlos. Algunas de las circunstancias que producen la variación son:

- Modificación del diámetro y rugosidad original de las conducciones por depósito de sales, sedimentación, obstrucción, etc.; aumentando las pérdidas de carga.
- Desconocimiento de las pérdidas menores producidas en juntas, codos, tes, reducciones, etc... imposibles de cuantificar.
- Desconocimiento de los estados de carga de la red debido en parte a la propia naturaleza aleatoria de los consumos registrados y a la existencia de caudales no registrados.
- Las mediciones, necesarias como veremos para la fase de ajuste del modelo, están afectadas de errores en los aparatos de medida, en la lectura, y en las fluctuaciones de la variable que se mide.
- Errores en la determinación de la cota en los pozos de producción, depósitos y puntos de consumo.

Todas estas indeterminaciones van a condicionar el proceso que ha de seguirse para la elaboración del modelo matemático de la red en servicio. A continuación se van a describir las sucesivas etapas que conducen a la confección de un modelo:

- a) Recopilación de información.
- b) Esqueletización de la red (obtención de un sistema simplificado a partir del sistema real).
- c) Asignación de cargas.

Tras esta tercera etapa se llega a un *modelo provisional* del sistema, sin calibrar. Después de esto serán necesarias dos etapas más para comprobar la validez del mismo y realizar los ajustes necesarios:

- d) Verificación de este modelo inicial.
- e) Ajuste y calibración del modelo inicial.

Al finalizar esta última etapa se dispondrá ya del *modelo final* de la red, que será conveniente actualizar y reajustar periódicamente con el fin de que no pierda utilidad. A continuación se comentan con más detenimiento las etapas anteriores.

4.3.1. Recopilación de Información.

Uno de los puntos clave en la confección de un modelo matemático, y que puede considerarse como la primera etapa en la elaboración del mismo, es recoger la mayor cantidad posible de datos acerca de la red que se pretende modelar. Consiste en familiarizarse con el sistema a fin de conocer la problemática que presenta. En este sentido, tanto para la construcción del MDT como para la del modelo matemático de una red hará falta disponer de los datos organizados adecuadamente.

La disponibilidad de los datos, así como una herramienta adecuada para realizar el control de calidad de los mismos resulta de suma importancia para lograr un modelo fiable. La información recopilada y procesada se agrupa en:

- Datos cartográficos. Abarcarán los datos más típicos en un SIG. Estos deben incluir, al menos, un MDT o herramientas para construirlo, según se ha explicado al comienzo de este capítulo. Además, resulta muy conveniente disponer de una cartografía urbana de fondo con información de calles, catalogación de los usos del suelo y ubicación de todas las infraestructuras urbanas, con especial atención a las de transporte de agua (abastecimiento y saneamiento).
- Datos descriptivos de la red. Aquí entrarán todos los elementos necesarios para el conocimiento de la red de distribución de agua. Estos elementos son los que se enumeran más adelante en el capítulo 5.
- Datos de abonados. Para aquellas aplicaciones que necesitan un gran nivel de detalle, se recomienda disponer de los datos de las facturaciones de agua potable a los abonados, con tanta antigüedad como sea posible y ligados mediante el SIG a su ubicación exacta, o, al menos, a la acometida de la cual obtienen el suministro.
- Datos de mediciones y actuaciones. Si además se pretende calibrar y actualizar sistemáticamente el modelo será necesario disponer de los registros disponibles de mediciones realizadas en la red, así como la tareas de mantenimiento que hayan sido realizadas sobre la misma.
- Datos topológicos. Además de los datos anteriores, será necesario disponer de información topológica que informe de las relaciones espaciales que hay entre los distintos elementos de la red.

4.3.2. Esqueletización de la Red.

Trabajar con un modelo que recoja absolutamente todos los elementos del sistema de distribución, tal cual se encuentran físicamente, puede resultar un problema difícil de abordar. De hecho, hay una limitación impuesta por la propia estructura de la red y es que

no es posible llegar más allá de la acometida. Será preciso depurar los datos disponibles de manera que se convierta en información útil para ser introducida en el modelo.

Hay cuatro motivos para simplificar o *esqueletizar* la red a la hora de crear un modelo matemático:

- a) La imposibilidad de reflejar absolutamente todos los elementos de la red. De hecho, la primera forma de esqueletización es la sustitución del concepto *tramo* de tubería por *línea* del modelo.
- b) Si la intensidad de los cálculos es considerable (por ejemplo en modelo dinámicos) un número elevado de elementos de la red hace que el tiempo necesario crezca de manera notable.
- c) Un nivel de detalle excesivo impide conocer lo que sucede exactamente. Así, el comportamiento de un abonado aislado se asemeja a una variable aleatoria de la que se conoce la distribución de probabilidades del caudal, pero no el caudal en un determinado momento. Este es uno de los pilares en los que se basa la presente Tesis. El *teorema central del límite* hace que el comportamiento de un gran número de abonados sea más fácil de predecir que el de un abonado aislado.
- d) Por último, la propia naturaleza de la red hace que sea prácticamente imposible representar todos los tipos de elementos que se puedan hallar en ella. En muchas situaciones, será necesario adaptar la modelización de los elementos reales a los elementos previstos en el programa de simulación hidráulica.

La esqueletización de la red consiste, de alguna forma, en este tratamiento de la información, y se puede resumir en una simplificación del entramado de tuberías, y una esquematización de los restantes elementos de la red.

4.3.3. Asignación de cargas.

Este es sin duda el paso más importante y complicado del proceso de modelación. Junto con los datos físicos de la red también son necesarios los datos que podrían definirse como de contorno (o condiciones de contorno). En el caso concreto de los modelos de simulación de redes de abastecimiento de agua potable, la asignación de cargas consiste en la determinación de los caudales inyectados y consumidos en los diferentes elementos de la red. Generalmente, estos elementos son los nudos de inyección o fuentes de suministro para los caudales inyectados y los puntos de consumo para las demandas de caudal.

Dada la importancia que este proceso tiene en el conjunto de la modelación de redes, se ha realizado un estudio detallado del mismo durante la elaboración de la presente tesis. El capítulo 4 de la misma está dedicado íntegramente a la descripción de un método de asignación de cargas a un modelo de distribución de agua basado en tecnología propia de los SIG.

4.3.4. Verificación y calibración del modelo.

Una vez realizadas todas las etapas anteriores es necesario realizar una comprobación del modelo. Pueden existir diversas fuentes de error. Algunos de ellos son fácilmente localizables, mientras que otros no son tan fáciles de detectar.

Por otro lado, los errores pueden ser de tipo objetivo (como por ejemplo los propios derivados de la imprecisión de los aparatos de medida) o subjetivos (como por ejemplo la estimación de la rugosidad interna de las tuberías). A continuación se detalla una lista de las posibles fuentes de error durante la elaboración del modelo.

- Errores objetivos

Todos los errores que tienen carácter objetivo, apenas presentan un problema en lo que a su localización y corrección se refiere. Básicamente derivan de una falta de calidad (o de control de calidad) de los datos aportados. Tenemos varios tipos:

- a) Errores tipográficos.* Básicamente se refiere a permutación u omisión de caracteres y a errores derivados del empleo de juegos de unidades diferentes entre la base de datos y el programa de cálculo.
- b) Error de medida.* La imprecisión de las medidas puede deberse bien a la de los propios aparatos de medida, bien a la falta de actualización de dichas medidas.
- c) Imprecisión de las cotas.* Se refiere principalmente al desconocimiento de la profundidad a la que se hallan las conducciones. En muchas ocasiones, el modelo digital del terreno disponible se refiere a la superficie del terreno, pero se carece de información detallada de la profundidad a la que se hallan las tuberías.
- d) Errores en los planos y mapas.* Los principales errores derivados del manejo de planos son:
 - Planos ambiguos. Al trabajar con planos con distintas edades y elaborados por distintas personas, es frecuente encontrar informaciones contradictorias que deben ser subsanadas antes de validar dichos datos.
 - Escala inadecuada.
 - Planos sin actualizar.
 - Anomalías geométricas. Se refieren en general a anomalías que inciden en la integridad hidráulica de la red: tramos de tubería que aparecen aislados porque se ha olvidado alguna tubería, tramos cruzados donde deberían estar unidos y viceversa, etc.

- Errores subjetivos

Existen otros tipos de error no tan fácilmente resolubles, debido a que los datos no son objetivos y es necesario realizar una estimación. En estos errores, el dato admitido finalmente como válido ha sido decisión del modelador y no ha existido posibilidad de comprobación. Algunos de ellos son los siguientes:

a) Estado interno de las conducciones

Valor del coeficiente de rugosidad de las tuberías.

Efecto de la edad en la rugosidad de las conducciones.

Deterioro de bombas y alteración de las prestaciones de las mismas.

b) Errores en la asignación de cargas

Cuando no se dispone de información exhaustiva de los abonados al servicio es frecuente asignar los consumos por criterios subjetivos como la calle, la ruta de lectura o el sector, en lugar de asignar el consumo directamente en la acometida. También es necesario un cierto nivel de abstracción en la asignación de las pérdidas hidráulicas y en la modulación de dichos consumos. Todos ellos son errores muy frecuentes en la elaboración de un modelo matemático y que son normalmente decisión del modelador.

Para solucionar este tipo de errores es necesario procesar una serie de escenarios para comparar el comportamiento del sistema real con el del modelo. Estas simulaciones deben contrastarse con mediciones realizadas para comprobar la respuesta real y simulada del sistema.

Mediante la verificación se pretende solucionar los errores objetivos. La función de la verificación es prácticamente la de servir de control de calidad de los datos mediante la comparación de los resultados obtenidos con la realidad de la red que se pretende simular. Una vez el modelo se ha verificado para una situación concreta, se puede aceptar como válido. A partir de aquí comienza el proceso de calibración.

La calibración es un proceso mucho más complejo que el de verificación, pues en el anterior es posible comprobar las rectificaciones que se hacen del modelo. Por ejemplo, si en la base de datos aparecen una serie de válvulas cuya posición es normalmente abierta y las mediciones realizadas desmienten tal posición de las válvulas, siempre es posible comprobar *in situ* la verdadera posición de las válvulas. Sin embargo, durante la calibración se van a modificar aspectos como la rugosidad de las tuberías o los coeficientes de modulación del consumo en una tubería, lo cual es más difícil (y en ocasiones incluso imposible) de medir. Por este motivo, como se comentó en el capítulo 2, una cuestión fundamental en el análisis de redes (con ayuda del SIG o sin ella) es la calibración continua de las mismas para considerar en el modelo la evolución de la red con el tiempo.

4.4. Utilización de un SIG para la simplificación de modelos matemáticos de redes de distribución de agua.

En el proceso de esqueletización juega un papel importante el programa de simulación que se va a utilizar. Cada programa admite un número relativamente limitado de elementos distintos de la red. Por ejemplo, si el simulador sólo admite depósitos de nivel variable con sección circular, para modelar un depósito con cualquier otro tipo de sección deberá obtenerse la sección circular equivalente. Por contra, si el programa de

simulación admite depósitos de diferente geometría, no será necesaria esta aproximación. La obtención de la sección circular equivalente en este caso es una simplificación del depósito. Esta limitación de los programas de simulación es especialmente significativa en el caso de las válvulas, ya que casi ninguno contempla todas las tipologías de válvulas existentes.

El método de resolución de las ecuaciones hidráulicas empleado también puede ser importante, sobre todo si se desea limitar el tiempo necesario para el cálculo.

Al final, el modelo estará formado por un conjunto de líneas y nudos. Las líneas se corresponden con la simplificación del entramado de tuberías, y con las bombas y válvulas incluidas en el modelo. Mientras, los nudos son los depósitos, los puntos de consumo o inyección del modelo, y las conexiones de dos o más líneas modelizadas.

Cualquiera que sea el método elegido para realizar la simplificación ha de tenerse en cuenta la integridad del sistema. Así, hay casos en los que, para mantener la conectividad de algunas tuberías de mayor diámetro, es preciso incluir alguna tubería más pequeña. También hay que tener en cuenta que una tubería, que en condiciones normales de operación de red no tiene capacidad importante de transporte, puede llegar a tenerla si, por rotura o fallo, nos vemos obligados a cerrar alguna tubería importante. Teniendo en cuenta que en muchos casos el modelo se utiliza para observar el comportamiento de la red ante estas situaciones, es importante incluir estas tuberías.

Básicamente, se pueden enunciar las siguientes estrategias de esqueletización:

- Esqueletización jerárquica.

Es la forma de esqueletización típica cuando se trabaja con redes sectorizadas. Consiste en crear un modelo estratégico en que cada sector está representado por un nudo único al que se le asigna el consumo de todo el sector. Este consumo viene dado por un caudalímetro que mida la entrada de caudal al sector (si éste existe) o por los consumos de los abonados ubicados dentro de ese sector.

Para trabajar con un mayor nivel de detalle, cada sector dispone de su propio modelo de detalle que parte como dato de las presiones medidas en el nudo anteriormente mencionado, con su correspondiente evolución temporal. Así, lo que en el modelo estratégico es un nudo de consumo, en el modelo de detalle pasa a ser un nudo de presión conocida.

Con la esqueletización jerárquica se evita el cálculo de toda la red para tener información detallada del funcionamiento de un sector concreto.

La integración de esta forma de simplificación en el SIG resulta bastante sencilla, pues no hay en realidad ningún tipo de decisión por parte del usuario. Simplemente, si se ha de trabajar con el modelo de detalle, en primer lugar ha de una simulación con el modelo estratégico a fin de obtener la evolución de las presiones en los puntos de inyección del modelo. Una vez realizada dicha simulación, el propio SIG se encargará

de transferir la serie de presiones obtenida en el nudo y proceder así con el cálculo del modelo de detalle.

- Agrupación de tuberías consecutivas de características homogéneas.

También llamada asociación en serie de tuberías. Consiste básicamente en sustituir tramos independientes de conducciones de características homogéneas (edad, rugosidad, diámetro, material, etc...) por una única línea que las represente.

Para modelos estratégicos, se puede optar por esta solución incluso para tramos de tubería heterogéneos, siendo en este caso necesario determinar un diámetro equivalente para la nueva línea (ver Figura 3.17). Esta opción es rara vez adoptada por llegarse a diámetros no comerciales y por tanto, alejados de la realidad. Ha de tenerse en cuenta que en ocasiones los resultados del modelo serán evaluados por personas ajenas a su elaboración.

En el caso de tratarse de tuberías homogéneas, la única variación sufrida es la longitud del tramo.

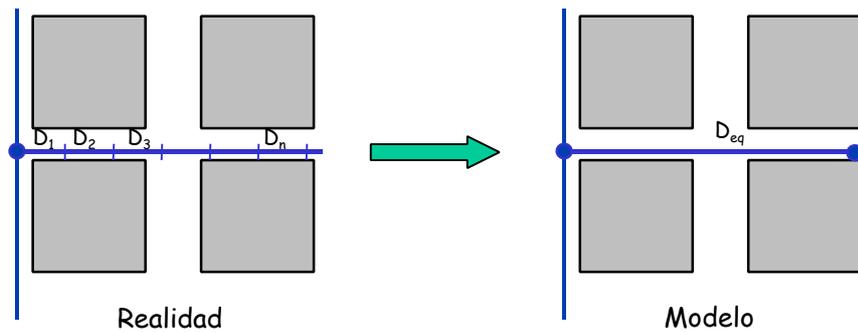


Figura 3.17. Simplificación por asociación en serie de tuberías.

Si se han de agrupar n tuberías de características heterogéneas, la tubería equivalente tendrá una longitud y un diámetro dados por la siguiente expresión:

$$L_{eq} = \sum_{i=1}^n L_i$$

$$D_{eq} = \frac{L_{eq}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{D_i^5}}$$
(3.29)

La integración de este tipo de simplificación en un SIG requiere la definición de algún criterio adicional, como por ejemplo la homogeneidad de algunas o todas las características de las tuberías. Además, se puede incluir como criterio de simplificación un número de abonados o una determinada longitud de tubería. Por ejemplo, se puede limitar el número de abonados simplificados a fin de no desvirtuar demasiado el modelo; o fijar una longitud mínima de los tramos de tubería. De hecho, durante el

cálculo de los modelos de calidad, se ignora el tiempo de viaje en tuberías más cortas de una cierta longitud (Rossman et al., 1993).

- Asociación en paralelo de tuberías.

La asociación en paralelo de tuberías es similar a la agrupación anterior, pero en este caso las tuberías son de características no homogéneas y requiere calcular una longitud y un diámetro equivalentes. Esta forma de simplificación es poco aceptada pues, aunque simplifica notablemente la red, los datos de las tuberías del modelo guardan poca relación con la realidad, lo cual hace que el modelo sea poco legible para un profano en la materia. Su aplicación se limita en muchas ocasiones a calles con doble trazado de tuberías a ambos lados de la calzada.

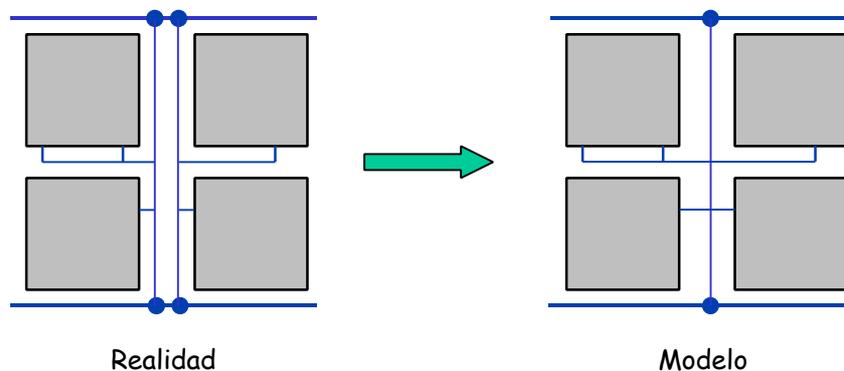


Figura 3.18. Simplificación por asociación en paralelo de tuberías.

- Eliminación de ramificaciones y acometidas.

En estos caso la demanda satisfecha desde la ramificación en un nudo de consumo es conocida. La simplificación consiste en acumular ésta en el nudo que sustituye al que serviría de conexión de la rama con la red principal. En el caso de las acometidas, esto sucede siempre que la acometida sirva a más de un abonado, pues no siempre es posible obtener información de los elementos de la red más allá de dicha acometida.

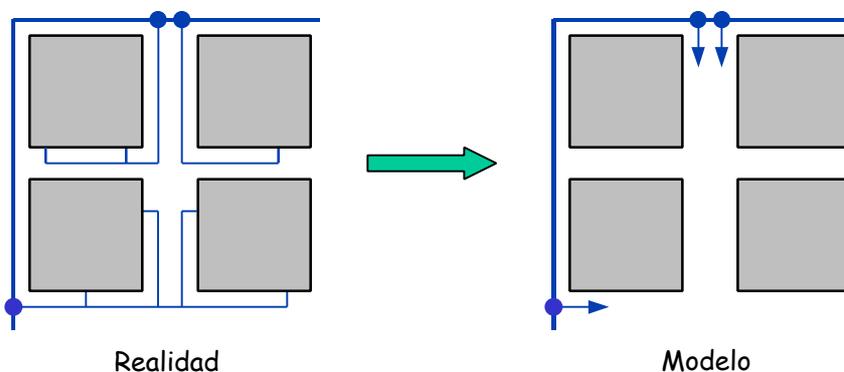


Figura 3.19. Simplificación por eliminación de ramificaciones.

Para la integración en el SIG de este tipo de simplificaciones, además de un criterio de simplificación basado en el número de abonados de la ramificación o el diámetro de

la tubería de mayor diámetro de la misma, también es necesario una comprobación topológica que certifique que una tubería corresponde a una parte ramificada de la red. La gestión de topologías de los SIG de tipo vectorial facilita este tipo de comprobaciones.

- Unificación de nudos próximos.

Cuando dos nudos de la red están muy próximos entre sí, debido a la corta longitud de las líneas que los unen, se observará un mismo valor de presión. Por tanto, la distinción de ambos no aporta información adicional. En estos casos, lo que se hace realmente es eliminar uno de los dos nudos y asociar la tubería que los une con la que llegaba al nudo eliminado. Esta solución es la habitual cuando la simplificación se reduce a la eliminación de las acometidas o se produce el acoplamiento en paralelo de tuberías (por ejemplo, en trazados por ambos lados de la calle).

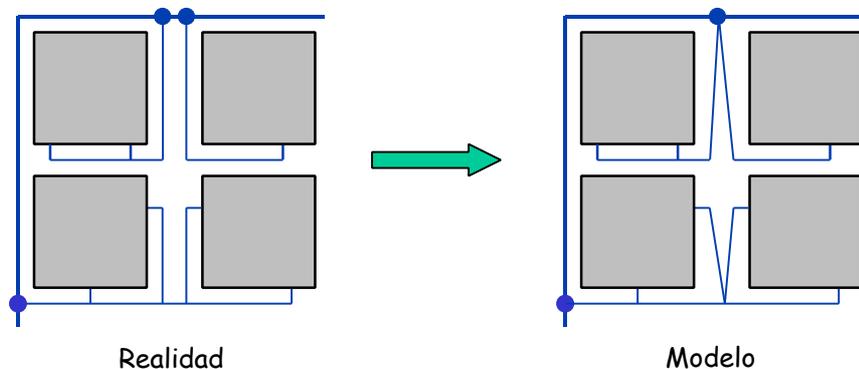


Figura 3.20. Simplificación por unificación de nudos próximos.

Al igual que en el agrupamiento en serie de tuberías, un criterio de longitud máxima y de tamaño mínimo de la tubería que une dos nudos próximos puede ser suficiente para que el SIG ejecute esta simplificación.

- Simplificación por truncamiento.

La simplificación del entramado de tuberías se realiza eliminando aquellas más pequeñas, y sustituyendo las ramificaciones de la red por nudos de consumo. El diámetro a partir del cual se van a eliminar las tuberías depende del tipo de modelo que se esté elaborando y del tamaño de la red. En modelos estratégicos y de planificación sólo se consideran las tuberías principales con mayor capacidad de transporte. En modelos de detalle será necesario contemplar en el modelo tuberías de distribución de pequeño diámetro, pues es donde el agua sufre mayor deterioro en su calidad.

En redes pequeñas las tuberías de $\varnothing 80$ y $\varnothing 100$ pueden tener capacidad de transporte importante, mientras que en una red grande estos diámetros no se contemplan en el modelo pues tienen poca capacidad de transporte (sirven sólo de distribución) frente a otras tuberías de mayor diámetro ($\varnothing 400$, $\varnothing 600$, ...) que puedan existir. Dentro de una misma red puede haber zonas de consumo en los que tuberías de pequeño

diámetro tengan capacidad de transporte importante. Así sucede, por ejemplo, en las zonas más antiguas de la ciudad. Hay que tenerlo en cuenta para no eliminar por sistema las tuberías de pequeño diámetro.

Un buen sistema para integrar esta alternativa de simplificación en un SIG consiste en elaborar un modelo preliminar de detalle y determinar, de todas las tuberías con un diámetro menor que el elegido para el truncamiento, cuáles pueden ser simplificadas a partir de, por ejemplo, la pérdida unitaria que provocan. Esto debe ir acompañado, obviamente, por una comprobación topológica que impida que la eliminación de una tubería deje una parte de la red aislada del resto.

- Tratamiento de consumos uniformemente distribuidos.

En muchas ocasiones, tras una primera asociación de tuberías (en serie o en paralelo) quedan consumos intermedios que están distribuidos a lo largo de las conducciones de una forma más o menos uniforme. En estos casos, la simplificación debe incluir un reparto de caudales que contemple tanto estos consumos repartidos (q_2 y q_3 en la Figura 3.21) como los consumos puntuales (Q_1 en dicha figura).

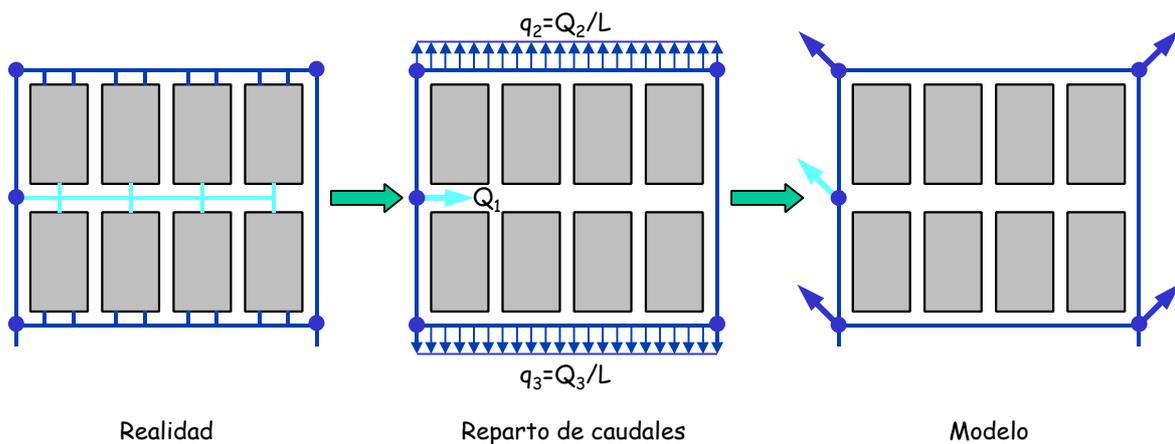


Figura 3.21. Tratamiento de consumos intermedios y uniformemente distribuidos.

Como se acaba de comentar, este tipo de simplificaciones viene frecuentemente unida a las asociaciones en serie. En este caso, el SIG tan sólo ha de ser capaz de repartir adecuadamente los consumos. Pérez (1993) presenta algunas ecuaciones para el reparto de consumos uniformemente distribuidos que resultan de gran utilidad cuando se integra esta simplificación en el SIG.

- Simplificación de los elementos singulares.

La modelación de elementos tales como estaciones de bombeo o depósitos no siempre queda bien resuelta por el simulador hidráulico. Ha de tenerse en cuenta la gran variabilidad que presentan estas instalaciones. Además, en muchas ocasiones la ausencia de datos obliga a simplificar instalaciones complejas. Así, por ejemplo, un depósito que disponga de un llenado por la parte superior a través de una válvula de

boya y un vaciado por la base no es fácilmente representable en la mayoría de los programas de simulación. Una forma sencilla de hacer esta simplificación consiste en sustituir la válvula de boya por una válvula sostenedora de presión tarado a presión atmosférica, tal y como se muestra en la parte superior de la Figura 3.22.

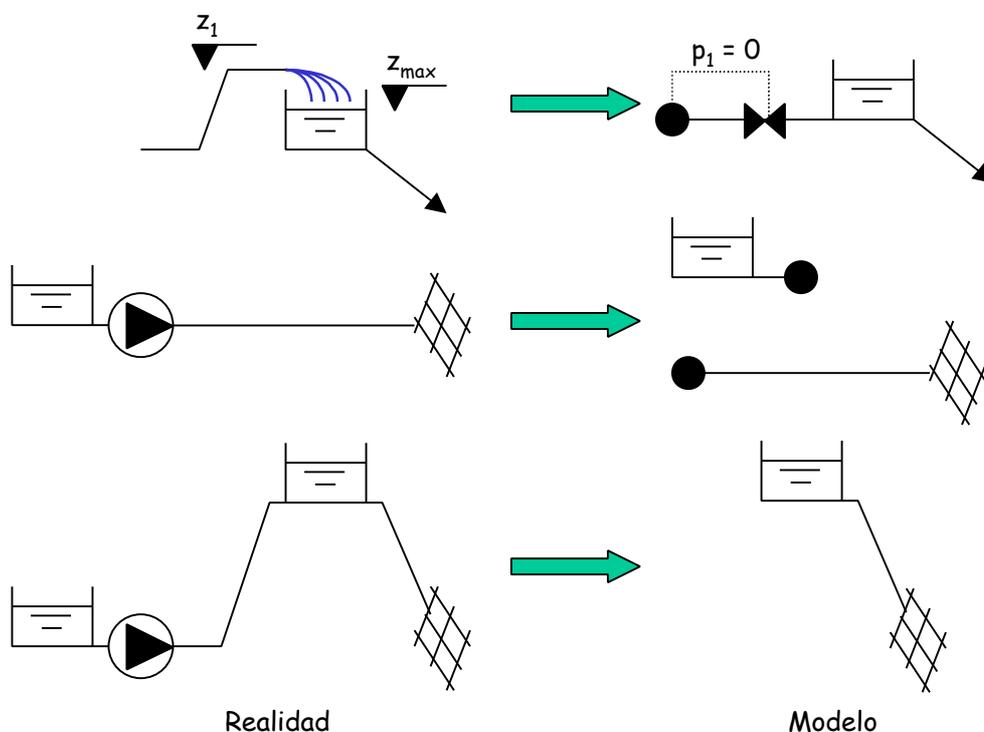


Figura 3.22. Diversas simplificaciones de elementos.

Por otra parte, la esquematización de las estaciones de bombeo implica reproducir el comportamiento de la misma sin tener que llegar a incluir detalladamente todos los elementos que la componen. Para un modelo estático, las estaciones de bombeo se pueden modelar como puntos de inyección o como puntos de consumo de caudal cuyo valor corresponda con el que proporciona la bomba (parte central de la Figura 3.22). En el caso en que el modelo sea dinámico, tal simplificación es más difícil de realizar pues a priori se desconoce el caudal que va proporcionar la bomba ante diferentes situaciones de consumo. Si el bombeo se realiza contra depósito de regulación se puede modelar la estación de bombeo como dicho depósito (tal y como puede apreciarse en la parte inferior de la Figura 3.22). La altura piezométrica en el nudo de impulsión corresponde a la del depósito.

Al contrario de lo que sucede con el resto de las alternativas de simplificación, en este caso la simplificación se hace antes de comenzar la elaboración del modelo. Si se desea integrar la simplificación de modelos en el SIG, se debe tener en cuenta qué programa va a utilizarse para el cálculo hidráulico y elaborar un modelo de datos que contemple sólo los elementos que admite dicho programa. Con esta información, se

deben establecer las equivalencias entre los distintos elementos reales de la red y los elementos reconocidos por el programa. Una vez establecidas estas equivalencias, el SIG ya estará en condiciones de hacer las simplificaciones pertinentes.

4.5. Resolución de las ecuaciones hidráulicas de la red.

El análisis del equilibrio hidráulico de un sistema de distribución de agua comprende dos pasos fundamentales. El primero consiste en la *formulación matemática del problema*, esto es, obtener un sistema de ecuaciones que contenga el comportamiento en la totalidad de los elementos de la red, en el cual el número de incógnitas sea igual al número de ecuaciones independientes. El paso siguiente consistirá en la *resolución del sistema de ecuaciones* resultante utilizando para tal resolución un procedimiento numérico adecuado.

A continuación se describe de manera somera la formulación del módulo de cálculo. Posteriormente se describirá el método del gradiente como herramienta utilizada para la resolución de las ecuaciones. Por último, a partir de esta formulación se propondrá posteriormente un modelo de datos adecuado.

4.5.1. Ecuaciones básicas del flujo en tuberías.

Supóngase que se tiene una red similar a la presentada en la Figura 3.16 con N_Q nudos de conexión o consumos, N_P nudos de altura conocida y L líneas.

El primer conjunto de ecuaciones consiste en un balance energético a lo largo de todas las líneas, es decir, básicamente consistirá en aplicar la ecuación de Bernoulli a lo largo de cada una de las L líneas (principio de conservación de la energía). La forma genérica de modelar una línea que une dos nudos i y j será la que se presenta en la Figura 3.23. En la realidad, los únicos elementos que se ajustan bien a la representación mediante una línea son las tuberías.



Figura 3.23. Representación esquemática de una línea.

La expresión general de la ecuación de una línea es:

$$h_{ij} = H_i - H_j = R_{ij} \cdot Q_{ij} \cdot |Q_{ij}|^{n-1} \quad (3.30)$$

En esta ecuación, el significado de cada término es el que se describe a continuación:

h_{ij} pérdida de carga a lo largo de la línea.

H_i, H_j alturas piezométricas en los nudos i y j respectivamente.

Q_{ij} caudal que circula desde i hasta j .

R_{ij} resistencia hidráulica de la línea y representa la pérdida de carga desde i hasta j .
 n exponente del caudal, utilizado en la ecuación de pérdidas de carga en la tubería.

Como se verá más adelante, esta expresión sólo es válida para tuberías y válvulas, es decir, para elementos resistentes en general. Para incluir las bombas deberá modificarse ligeramente de tal forma que admita ganancia de altura piezométrica.

El segundo conjunto de ecuaciones que deben satisfacerse son las ecuaciones de continuidad para todos los nudos de consumo. Si se tiene un nudo i en una red (ver Figura 3.24) se definen:

Q_{ji} representa el caudal que llega al mismo desde un nudo j .

Q_{ik} el caudal que parte del nudo i hacia un nudo k .

q_i caudal que abandona el sistema (demanda) o ingresa en él a través del nudo i . Este caudal es positivo si es consumido en el nudo y negativo en caso contrario.

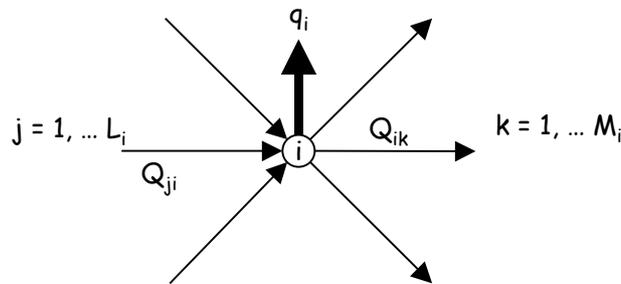


Figura 3.24. Representación esquemática de un nudo.

La ecuación de continuidad quedará, en régimen permanente, como sigue:

$$\sum_{j=1}^{L_i} Q_{ji} - \sum_{k=1}^{M_i} Q_{ik} = q_i \quad (3.31)$$

En los modelos de simulación en período extendido, las ecuaciones se resuelven como si se tratase de un régimen permanente, pero la ecuación de continuidad en los nudos se modifica parcialmente para tener en cuenta la posibilidad de almacenar un volumen de agua entre dos instantes de tiempo. En estos casos, la ecuación (3.31) se define como:

$$\underbrace{\sum_{j=1}^{L_i} Q_{ji}}_{\text{ENTRADA}} - \underbrace{\sum_{k=1}^{M_i} Q_{ik}}_{\text{SALIDA}} = \underbrace{q_i}_{\text{DISIPACION}} + \underbrace{S_i \frac{\Delta H_i}{\Delta t}}_{\text{ACUMULACION}} \quad \forall i \quad (3.32)$$

Cabe por tanto definir dos variables más de los nudos, además del intervalo de tiempo entre los dos instantes calculados, Δt :

S_i sección transversal del nudo i .

H_i altura piezométrica en el nudo i .

La solución hidráulica de la red pasa por resolver el sistema formado por ambos conjuntos de ecuaciones, (3.30) y (3.31). Las condiciones de contorno serán las alturas piezométricas en los nudos de altura conocida (sean de nivel fijo o variable) y los caudales demandados en los nudos de conexión. La solución vendrá dada por todas las alturas H_i y todos los caudales Q_{ij} que satisfacen dichas ecuaciones.

La ecuación (3.31) se conoce también como *primera ley de Kirchoff*. Esta ley es muy utilizada en análisis de redes eléctricas. Manteniendo la analogía con el análisis de redes eléctricas se puede definir también una *segunda ley de Kirchoff* correspondiente a lo que se denomina comúnmente ecuación de una malla. Al igual que sucedía con las líneas, en este caso es necesario dotar a la malla de una orientación o sentido de recorrido. Así, la ecuación de la malla correspondiente a la Figura 3.25 quedará:

$$h_{ab} - h_{bc} + h_{cd} - h_{de} + h_{ea} = 0 \quad (3.33)$$

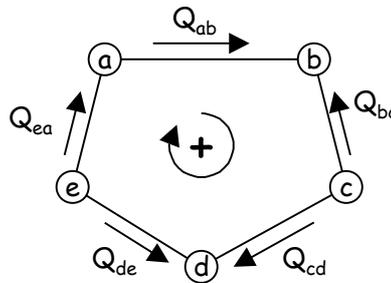


Figura 3.25. Representación esquemática de una malla.

4.5.2. Resolución de la red por el método del gradiente.

Puesto que el modelo utilizado para su integración con el SIG es el EPANET a través de su herramienta de programación *EPANET ToolKit*, a continuación se describe de manera somera el método de resolución empleado por éste para resolver las ecuaciones hidráulicas de la red.

Uno de los métodos de análisis de redes de distribución de agua que en los últimos tiempos ha ganado gran aceptación es el método del gradiente propuesto por Salgado (1988) y modificado parcialmente por Todini y Pilati (1988). Este método es el que utiliza EPANET para resolver las ecuaciones de continuidad y de pérdidas que caracterizan el estado hidráulico de una red de abastecimiento en un punto dado. Aproximaciones similares han sido descritas por Hamam y Brameller (1971) (el *Método Híbrido*) y por Osiadacz (1987) (el *Método nudo-malla de Newton*). La única diferencia entre todos estos métodos es la forma en la que el caudal de los elementos es actualizado tras cada iteración. Para la programación del módulo de cálculo EPANET, Rossman (1993) eligió la aproximación de Todini y Pilati, al ser ésta la más simple. Iglesias (2001) realiza en su tesis la comparación de este método con otros métodos comunes de resolución de redes de

abastecimiento y en ella se concluye que este método es el más rápido para el análisis hidráulico de redes por ordenador.

El método del gradiente plantea la solución al problema como un proceso de minimización sujeto a la restricción de verificar la ecuación de continuidad en cada uno de los nudos de la red. Para ello precisa de una formulación del problema basada en la topología de la red.

La conectividad de la red se define a través de tres matrices, que se describen a continuación:

- a) Matriz de incidencia de líneas y nudos de conexión. Se trata de una matriz que se denominará A_{12} y tendrá dimensiones $L \times N_Q$. Los elementos de la misma vienen dados por:

$$A_{12}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si la tubería } i \text{ finaliza en el nudo } j \\ -1 & \text{si la tubería } i \text{ comienza en el nudo } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

- b) Matriz de incidencia de líneas y nudos de altura conocida. Se trata de una matriz que se denominará A_{10} y tendrá dimensiones $L \times N_p$. Los elementos se definen de manera similar a la anterior:

$$A_{10}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si la tubería } i \text{ finaliza en el nudo } j \\ -1 & \text{si la tubería } i \text{ comienza en el nudo } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

- c) Matriz de incidencia de líneas y mallas. Se trata de una matriz que se denominará A_{13} y tendrá dimensiones $L \times M$. Los elementos de la misma definen si una línea participa en la formación de una malla y si el caudal tiene el mismo sentido de circulación que la malla o no. Así:

$$A_{13}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si la tubería } i \text{ tiene el mismo sentido que la malla } j \\ -1 & \text{si la tubería } i \text{ no tiene el mismo sentido que la malla } j \\ 0 & \text{si la tubería } i \text{ no pertenece a la malla } j \end{cases}$$

Una vez definidas estas matrices topológicas, conviene definir en notación igualmente matricial el conjunto de incógnitas del problema (caudales en las líneas y alturas piezométricas en los nudos de conexión):

$$[Q]=\begin{pmatrix} \vdots \\ Q_{ij} \\ \vdots \end{pmatrix} \quad [H]=\begin{pmatrix} \vdots \\ H_i \\ \vdots \end{pmatrix} \quad [H_0]=\begin{pmatrix} \vdots \\ H_i \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

La matriz $[Q]$ tendrá dimensiones $L \times 1$ y la matriz $[H]$ tendrá dimensiones $N_Q \times 1$. Junto a estas se ha escrito la matriz que recoge las alturas piezométricas de los nudos de altura piezométrica conocida, la matriz $[H_0]$, que tendrá unas dimensiones de $N_p \times 1$. Además, la notación utilizada es la misma que la empleada en la ecuación (3.30).

Por último, se completa la formulación con las matrices correspondientes a la pérdida de cargas en las líneas, h_{ij} , y las demandas en los nudos de conexión, q_i . Manteniendo la misma notación que la empleada en las ecuaciones (3.31) y (3.32) quedará:

$$[h]=\begin{pmatrix} \vdots \\ h_{ij} \\ \vdots \end{pmatrix} \quad [q]=\begin{pmatrix} \vdots \\ q_i \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (3.35)$$

Las dimensiones de estas matrices serán, respectivamente, $L \times 1$ y $N_Q \times 1$.

Resta ahora plantear las relaciones entre las matrices anteriores. Así, por ejemplo, la ecuación de Bernoulli planteada algebraicamente en la ecuación (3.30) para una sola tubería, quedará en forma matricial como sigue:

$$[h]=A_{11} \cdot [Q] \quad (3.36)$$

En esta expresión, A_{11} es una matriz diagonal $L \times L$ donde cada uno de sus elementos tienen como valor:

$$A_{11}(i,j)=\begin{cases} R_i |Q_i|^{n_i-1} & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

En la ecuación anterior se ha modificado ligeramente la notación empleada previamente para la ecuación (3.30). Q_i es ahora el caudal circulante por la línea i , es decir, el i -ésimo elemento de la matriz $[Q]$; R_i es la resistencia hidráulica de la línea i y n_i es el exponente del caudal en la ecuación de pérdidas de carga escogida.

La segunda de las ecuaciones es la ecuación de continuidad, (3.31), y en forma matricial se expresará como:

$$[q] = A_{12}^T \cdot [Q] \quad (3.37)$$

La expresión matricial de las pérdidas de carga en cada línea se podrá expresar como:

$$[h] = A_{12} \cdot [H] \quad (3.38)$$

Esta es la forma matricial de:

$$h_{ij} = H_i - H_j$$

Por último, la ecuación de una malla, expresada en forma matricial quedará:

$$A_{13}^T \cdot [h] = [0] \quad (3.39)$$

Todini, en su Tesis Doctoral del año 1979, plantea el problema de análisis en términos de una optimización, donde la función objetivo a minimizar es:

$$P([Q]) = (A_{11} [Q])^T [Q] \quad (3.40)$$

Como se comentó anteriormente, las restricciones son la ecuación de continuidad en cada uno de los nudos, es decir, la ecuación (3.37).

Todini demuestra que para que se cumplan las condiciones de régimen estacionario deben verificarse la continuidad en los nudos y el balance de energía en las líneas. Esto, en forma matricial compacta y para una red con un único punto de presión conocida, se expresaría como sigue:

$$\left[\begin{array}{c|c} A_{11} & A_{12} \\ \hline A_{12}^T & 0 \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

La principal diferencia entre el método propuesto por Todini y el resto de los métodos existentes hasta entonces consistía en el hecho de que Todini no intentó reducir el tamaño de la ecuación (3.41). Por tanto, las incógnitas eran todos los elementos de la matriz

$$\begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix}$$

Puesto que la ecuación (3.41) no constituye un sistema lineal de ecuaciones (debido a que los elementos de la matriz A_{11} dependen del caudal), ha de recurrirse a un método

iterativo. Todini propone descomponer la ecuación (3.41) en dos (de nuevo balance de energía y conservación de la masa, respectivamente):

$$\begin{aligned} E(Q, H) &= A_{11}[Q] + A_{12}[H] = 0 \\ q(Q, H) &= A_{12}^T[Q] - [q] = 0 \end{aligned} \quad (3.42)$$

Al tratarse de un método iterativo, en una determinada iteración, los valores obtenidos para las ecuaciones (3.42) no tienen por qué ser 0. Si se definen $[Q]^{(k)}$ y $[H]^{(k)}$ como los resultados de caudales en líneas y alturas piezométricas en nudos correspondientes a la k -ésima iteración, los errores cometidos en dicha iteración serán:

$$\begin{aligned} [\delta E]^{(k)} &= A_{11}^{(k)}[Q]^{(k)} + A_{12}[H]^{(k)} \\ [\delta q]^{(k)} &= A_{12}^T[Q]^{(k)} - [q] \end{aligned} \quad (3.43)$$

Puesto que se conoce el valor de E y q , se pueden conocer las variaciones de estas expresiones mediante la derivación de las mismas:

$$\begin{aligned} [dE] &= nA_{11}[dQ] + A_{12}[dH] \\ [dq] &= A_{12}^T[dQ] \end{aligned} \quad (3.44)$$

El método de resolución del gradiente comienza con un valor estimado inicial de caudales en cada tubería que no tiene por qué satisfacer las ecuaciones de continuidad. EPANET comienza con un caudal equivalente a una velocidad de 1 pie/s (el programa EPANET está programado internamente en unidades americanas). Además, precisa de unos valores iniciales de las alturas piezométricas.

A partir de estos valores de la primera iteración (que corresponderían a las matrices $[Q]^{(0)}$ y $[H]^{(0)}$), se calculan los errores cometidos según el conjunto de ecuaciones (3.43). A continuación, se aproximan las variaciones de E y q a partir de los errores anteriores:

$$\begin{aligned} [dE]^{(k)} &= [\delta E]^{(k)} \\ [dq]^{(k)} &= [\delta q]^{(k)} \end{aligned} \quad (3.45)$$

Una vez estimadas las variaciones, se resuelve el sistema lineal de ecuaciones (3.44). El último paso consiste en determinar los valores que toman las matrices $[Q]$ y $[H]$ en la nueva iteración, actualizando los valores iniciales:

$$\begin{aligned} [Q]^{(k+1)} &= [Q]^{(k)} + [dQ] \\ [H]^{(k+1)} &= [H]^{(k)} + [dH] \end{aligned} \quad (3.46)$$

El proceso se repetiría hasta que los errores cometidos tomen valores inferiores al criterio de convergencia establecido.

Este es, a grandes rasgos, el método de resolución empleado por EPANET. Sin embargo, presenta algunas limitaciones que hubo que corregir posteriormente:

- Por una parte, el planteamiento original sólo contemplaba un nudo de altura piezométrica conocida, lo cual no se corresponde con la mayoría de las redes.
- La matriz A_{11} de resistencias hidráulicas tiene una estructura excesivamente rígida, pues no permite combinar en un mismo elemento pérdidas de distinta naturaleza (por fricción y pérdidas menores, por ejemplo) ni permite incluir elementos de aporte de energía (es decir, no admitiría bombas).

Por ello, fue necesario modificar ligeramente el planteamiento (Todini y Pilati, 1988). Por una parte, la ecuación (3.41) se modificó para incluir la posibilidad de varios nudos de altura piezométrica conocida:

$$\left[\begin{array}{c|c|c} A_{11} & A_{12} & A_{10} \\ \hline A_{12}^T & 0 & 0 \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} Q \\ H \\ H_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ - \\ q \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Con esta modificación, también hubo que cambiar el sistema de ecuaciones (3.42) quedando:

$$\begin{aligned} E(Q, H) &= A_{11}[Q] + A_{12}[H] + A_{10}[H_0] = 0 \\ q(Q, H) &= A_{12}^T[Q] - [q] = 0 \end{aligned} \quad (3.48)$$

Por otra parte, para contemplar una mayor flexibilidad de la expresión de las pérdidas en una línea, se modifica la ecuación (3.30) y su equivalente matricial la ecuación (3.36). Así, la ecuación (3.30) quedaría:

$$h_{ij} = H_i - H_j = \frac{R_{ij}}{\alpha_{ij}^{2-n_{ij}}} \cdot Q_{ij} \cdot |Q_{ij}|^{n_{ij}-1} + K_{ij} \cdot Q_{ij} \cdot |Q_{ij}| + \alpha_{ij}^2 \pi_{ij} \quad (3.49)$$

Esta expresión permite contemplar las pérdidas por fricción en tuberías; las pérdidas menores, ya sea en tuberías o en otros elementos (válvulas, principalmente) e incluso la ganancia de altura como consecuencia del funcionamiento de una bomba:

- Tuberías:

$$h_{ij} = R_{ij} \cdot Q_{ij} \cdot |Q_{ij}|^{n_{ij}-1} \quad (3.50)$$

El valor del coeficiente de pérdidas por fricción dependerá de la ecuación de pérdidas utilizada. El programa de simulación EPANET contempla tres posibles ecuaciones para calcular las pérdidas de carga:

Tabla 3.2. Ecuaciones de pérdida de carga empleadas por el programa EPANET.

Fórmula	Coficiente de Pérdidas (R) (*)	Exponente del Caudal (n)
Hazen-Williams	$\frac{10,646 \cdot L}{C^{1,852} D^{4,87}}$	1,852
Darcy-Weisbach	$\frac{8 \cdot f(Re, \epsilon) L}{\pi^2 g \cdot D^5}$	2
Chezy-Manning	$\frac{10,29 \cdot n^2 \cdot L}{D^{16/3}}$	2

(*) Expresiones válidas para unidades del SI.

En las expresiones anteriores C es el coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams, ϵ es la rugosidad interior de la tubería, f el factor de fricción (que depende de ϵ , D , y Q), n el coeficiente de rugosidad de Manning, D el diámetro interior de la tubería, L la longitud de la tubería y Re el número de Reynolds.

- Pérdidas menores en un elemento:

$$h_{ij} = K_{ij} \cdot Q_{ij} \cdot |Q_{ij}| \quad (3.51)$$

Generalmente, las pérdidas menores se expresan como un coeficiente adimensional k_{ij} que multiplica a la energía cinética específica del fluido en el interior de la conducción, función de la velocidad del mismo (v_{ij}). Es el caso de EPANET por lo que será necesario convertir éste:

$$K_{ij} \cdot Q_{ij}^2 = k_{ij} \frac{v_{ij}^2}{2g} \Rightarrow K_{ij} = \frac{8k_{ij}}{g\pi^2 D^4} \quad (3.52)$$

- Bombas:

La curva característica de una bomba girando a su velocidad nominal viene dada por:

$$H = H_0 - A \cdot Q^B \quad (3.53)$$

Si además se contempla la posibilidad de que varíe la velocidad de giro de la misma, la expresión anterior quedará en función de la relación entre la velocidad de giro en un determinado instante y su velocidad de giro nominal, α :

$$H = \alpha^2 H_0 - \frac{A}{\alpha^{2-B}} \cdot Q^B \quad (3.54)$$

Así pues, la modelación de la curva característica de una bomba pasaría por sustituir R_{ij} por A , n_{ij} por B y p_{ij} por H_0 :

$$h_{ij} = \frac{R_{ij}}{\alpha_{ij}^{2-n_{ij}}} \cdot Q_{ij} \cdot |Q_{ij}|^{n_{ij}-1} + \alpha_{ij}^2 \pi_{ij} \quad (3.55)$$

A partir de aquí, se continúa tal y como se ha descrito anteriormente. Con las modificaciones realizadas, la ecuación (3.44) debe modificarse, teniendo en cuenta los nuevos términos. Así, si se aplica un desarrollo en serie de Taylor, tendremos que esta ecuación quedará:

$$\begin{aligned} E^{(k+1)} &= E^{(k)} + \left[\frac{\partial E}{\partial Q} \right] [dQ] + \left[\frac{\partial E}{\partial H} \right] [dH] \\ q^{(k+1)} &= q^{(k)} + \left[\frac{\partial q}{\partial Q} \right] [dQ] + \left[\frac{\partial q}{\partial H} \right] [dH] \end{aligned} \quad (3.56)$$

Las derivadas parciales de la ecuación anterior vienen dadas por:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial E}{\partial Q} \right] &= G & \left[\frac{\partial E}{\partial H} \right] &= A_{12} \\ \left[\frac{\partial q}{\partial Q} \right] &= A_{12}^T & \left[\frac{\partial q}{\partial H} \right] &= 0 \end{aligned} \quad (3.57)$$

En la expresión anterior, G es una matriz diagonal cuyos elementos valen:

$$G_{ij} = n_{ij} R_{ij} |Q_{ij}|^{n_{ij}-1} + 2K_{ij} |Q_{ij}| \quad (3.58)$$

Así, la ecuación (3.56) quedará, en forma matricial, como:

$$\begin{bmatrix} E^{(k)} \\ q^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G & | & A_{12} \\ A_{12}^T & | & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dQ \\ dH \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

De esta ecuación se despejan los diferenciales $[dQ]$ y $[dH]$ y posteriormente, a partir de la ecuación (3.46) se obtiene una nueva solución. Una vez que la solución proporciona valores válidos (con errores menores que la tolerancia impuesta), se procede con el siguiente intervalo de cálculo (siempre que se opte por un cálculo en período extendido). Para este nuevo intervalo de cálculo han de actualizarse las alturas piezométricas de los nudos de altura conocida que admiten variación de nivel, según la ecuación (3.32):

$$H_j(t + \Delta t) = H_j(t) + \frac{q_j(t)}{S_j} \Delta t \quad (3.60)$$

5. Conclusiones

En el presente capítulo se han repasado los principales modelos utilizados como base para la gestión de una red de abastecimiento. En primer lugar, se realizó una introducción al concepto de modelo digital del terreno (MDT) y su aplicación directa en la gestión de los datos estrictamente geográficos en un SIG. Por otra parte, se ha descrito el papel que juega un modelo matemático de la red en la gestión técnica de la misma.

En la primera parte del capítulo se ha hecho un repaso de los principales métodos de almacenamiento de los MDT, así como de algunas metodologías para su construcción. En concreto, de entre todos los métodos descritos se ha optado por la red de triángulos irregulares, pues en todos los casos estudiados se disponía de un conjunto de puntos irregularmente distribuidos y ésta es la estructura que mejor se adapta a estos datos de partida. Para ello, se ha implantado un algoritmo de generación del MDT basado en un método propuesto por Watson para la obtención de la triangulación de Delaunay a partir de un conjunto disperso e irregular de puntos. Dicho algoritmo ha sido parcialmente modificado para aumentar la velocidad de cálculo y facilitar la integración en el SIG.

Como complemento al MDT se ha descrito el algoritmo de teselación para la obtención del mosaico de Thiessen, que corresponde a la estructura dual de la triangulación de Delaunay.

Igualmente, se han revisado los principales algoritmos de interpolación espacial disponibles para su utilización conjunta con los MDT. Estos han sido utilizados posteriormente en la interpolación de cotas durante la generación de los modelos matemáticos de la red de distribución de agua potable.

La segunda parte del capítulo está dedicada a la elaboración de un modelo matemático de una red de agua potable con la ayuda del SIG. En ella, se describen las fases por las que pasa la creación del modelo. De entre todas ellas, las más importantes desde el punto de vista de la integración en el SIG son la simplificación del modelo y la asignación de cargas. En el caso de la primera, se han descrito distintas estrategias de simplificación, destacando aquellos aspectos en los que el SIG puede ayudar e, incluso, ejecutar dicha simplificación. En el caso de la asignación de cargas, el proceso tiene una importancia y una complejidad tal que se ha preferido dedicarle íntegramente el capítulo 4.

Por último, el capítulo se cierra con una descripción somera del método del gradiente como algoritmo de resolución de las ecuaciones hidráulicas de la red. Se ha considerado conveniente la descripción de dicho algoritmo para justificar posteriormente en el capítulo 5 el modelo de datos elegido para almacenar la información correspondiente al modelo matemático de la red.

Capítulo 4.

Asignación de Cargas en un Modelo Matemático

1. Introducción

En el capítulo anterior se han presentado las fases de que consta la elaboración de un modelo matemático de una red de distribución de agua. Quizás la fase crítica en la elaboración de un modelo matemático de una red es la esqueletización del mismo. Sea cual sea la opción de simplificación elegida, siempre ha de estar sujeta a una máxima: es preferible incluir en el modelo una línea de más que eliminar una línea importante en el funcionamiento de la red. Este aspecto es quizás el que más ha dificultado la simplificación sistemática de los modelos por ordenador. También es un argumento, junto a la potencia continuamente creciente de los ordenadores, para evitar este importante proceso en la elaboración de los modelos matemáticos. Sin embargo, incluso si se trata de un modelo de detalle, nunca se llegará hasta el detalle del punto real de consumo, es decir, el aparato que suministra agua al abonado. Es decir, en cualquier caso, siempre va a existir un mayor o menor grado de simplificación en el modelo.

Por tanto, se ha de recurrir a alguna forma de abstracción que permita efectuar un reparto de consumos. Este proceso de reparto de consumos, o *asignación de cargas*, del modelo requiere la utilización de ponderaciones para obtener valores medios tanto en el ámbito espacial como temporal, en lugar de valores puntuales o instantáneos.

Así, puesto que la red se ha simplificado o *esqueletizado*, es frecuente que muchos abonados o usuarios individuales deban asignarse a un mismo nudo de la red. Esto supone en cierta medida una promediación, puesto que los criterios de agrupamiento suelen estar basados en parámetros espaciales, como la calle o la manzana donde reside cada abonado. Del mismo modo, conforme se calcula un modelo, se sigue produciendo una suavización de los consumos, pues las tuberías principales abastecen a un número de usuarios cada vez mayor, abarcando igualmente un área geográfica también mayor.

Por otra parte, si se utilizan modelos estáticos o cuasi-estáticos, se calculan valores medios a lo largo de un intervalo de tiempo y no valores instantáneos. La amplitud del intervalo de cálculo suele estar comprendida entre 1 minuto y 1 hora en la mayoría de los casos. A modo de ejemplo, en la Figura 4.1 se muestra el resultado de unas mediciones realizadas en un edificio de Valencia. En ella se puede comprobar la diferencia existente entre los valores instantáneos medidos mediante el concurso de un *data-logger* o registrador de datos, y el valor del caudal medio obtenido al promediar el volumen total consumido. La diferencia entre unos y otros es extremadamente grande. Esto obliga a

condensar la información disponible de caudal inyectado, promediándola para intervalos de tiempo de esa amplitud, o bien a utilizar valores de facturaciones que en muchos casos serán mensuales e incluso bimensuales. En definitiva, tratamos de obtener una curva de evolución temporal de los consumos, o *curva de modulación* en unos intervalos que rara vez serán los correspondientes a las mediciones. Esta modulación temporal de los consumos hace que los picos de caudal se suavicen. Por ello en el caso de que el objetivo perseguido sea comprobar la respuesta de la red ante situaciones excepcionales, estaremos partiendo de datos que siendo ciertos, no representarían la realidad del consumo en estas situaciones. Aunque no de manera generalizada, la afirmación anterior sí será cierta, al menos en aquellas conducciones de menor tamaño, o mejor dicho, que abastecen a un menor número de abonados. Igualmente, los modelos de detalle son los principales afectados por este problema.

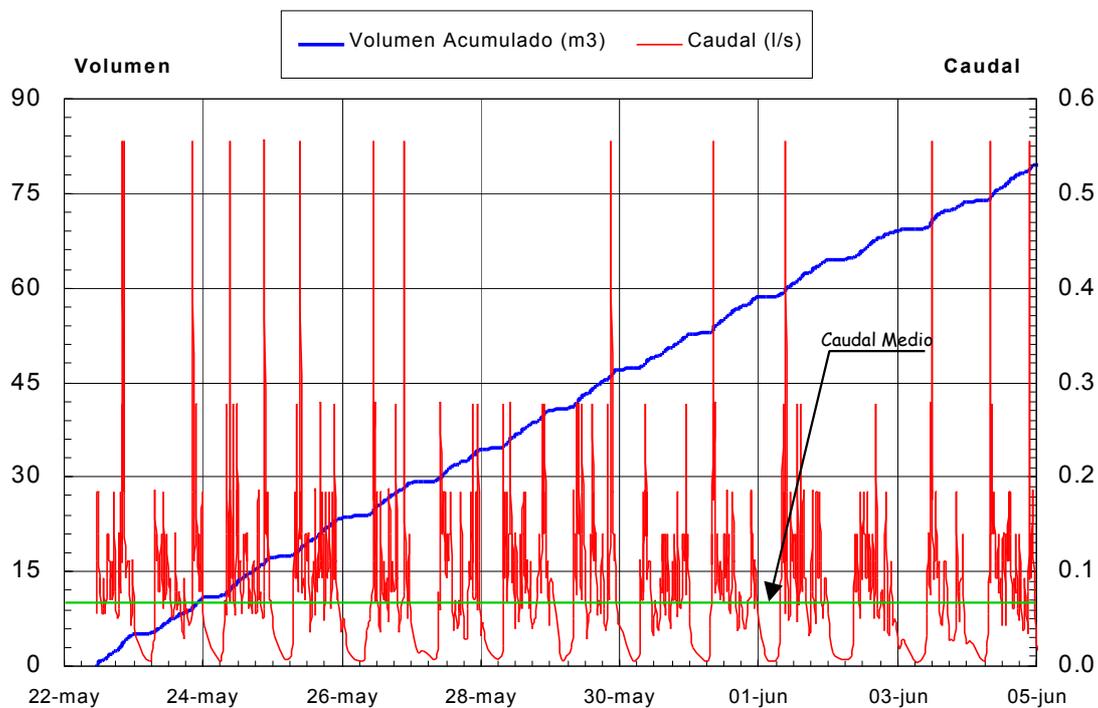


Figura 4.1. Comparación entre caudales almacenados en un registrador y el caudal medio obtenido a partir del volumen acumulado. (Adaptada de Martínez Tortajada, 1998).

En el presente capítulo se propone una metodología para asignar cargas a modelos de detalle. La metodología consta de tres partes bien diferenciadas. La primera parte corresponde a la gestión de abonados, o determinación de los consumos que han de ser satisfechos por la red. En esta primera parte se distinguen dos casos claramente diferenciados:

- cálculo de caudales correspondientes a una situación actual a partir de las bases de datos de abonados y de operación, o

- cálculo de caudales proyectados en un futuro a corto o medio plazo, donde se carece de la información de la facturación de los abonados.

Las técnicas clásicas de asignación de consumos se basan en estos caudales para realizar los cálculos de funcionamiento de la red. Sin embargo, se demostrará que utilizar estos caudales combinados con una curva de modulación da lugar a errores cuando se trabaja con modelos con un alto nivel de detalle.

Por tanto, una vez se tiene una estimación de los consumos demandados, se propone un método para determinar el caudal punta que se puede esperar con una determinada probabilidad en una tubería que abastece a un cierto número de abonados, a partir del tratamiento estadístico de los consumos realizados por cada abonado. Para ello se ha elaborado un método estocástico de predicción de caudales punta a partir de las facturaciones de los abonados y de las características de los aparatos de consumo. Este método será contrastado con mediciones realizadas en la ciudad de Valencia y con datos procedentes de publicaciones en los Estados Unidos. Igualmente se comparará con expresiones empíricas de uso generalizado utilizadas para determinar caudales punta a partir del caudal medio y el número de consumidores satisfechos.

También se realizará un análisis de sensibilidad del modelo respecto a sus principales parámetros de cálculo. De ahí se obtendrá un orden de magnitud del error cometido en el cálculo, así como los parámetros que más afectan en el cálculo de este caudal punta.

Por último se presenta la metodología para la asignación de cargas a un modelo de detalle apoyada con información georreferenciada, basado en los cálculos de caudal punta propuestos. En este método se contemplarán dos posibilidades de trazado de red. Si trata de una red ramificada, el cálculo será directo pues no hay incertidumbre en la dirección que sigue el flujo en cada una de las ramas del modelo. Por otro lado, si se trata de una red mallada, el cálculo resulta iterativo.

2. Análisis de consumos y determinación de caudales medios.

Básicamente, el modelo matemático de una red de distribución de agua tiene dos aplicaciones fundamentales. Estas son analizar la red en su estado actual y predecir el funcionamiento de la misma en escenarios futuros. En el primer caso, el modelo ayuda a la operación de la red, mientras que en el segundo caso se dice que se trata de un modelo de planificación.

En cualquiera de los dos casos, la red de distribución está pensada para satisfacer la demanda de agua en los puntos de consumo de la misma. El planteamiento más habitual en el análisis de una red de distribución de agua potable ha de ser, por tanto, el de disponer de unos nudos de presión conocida (habitualmente los pozos de producción y los depósitos de la red) y otros nudos de caudal conocido, denominados genéricamente nudos de consumo.

Con este planteamiento, los resultados que se esperan conseguir son, de un lado, las presiones en dichos nudos de consumo y, de otra parte, los caudales intercambiados en los depósitos o aportados por cada una de las instalaciones de producción.

Si para analizar la red de abastecimiento se ha optado por la elaboración de un modelo matemático de la misma, será necesario determinar los caudales demandados en cada uno de los nudos de consumo. El problema surge cuando no se tiene información precisa de esta demanda de agua en los puntos de consumo. El proceso por el cual se estiman los consumos en los nudos del modelo matemático se denomina comúnmente *cargar* el modelo o *asignar cargas* al modelo. La asignación de cargas incluye dos procesos simultáneos. Por una parte, se ha de hallar el caudal medio esperado en cada nudo de la red. Además, será necesario realizar una adecuada asignación espacial de dichos consumos, pues durante el proceso de simplificación de la red muchos de los elementos de la misma han sido eliminados.

Otro hecho que ha de tenerse en cuenta para la asignación de consumos es el desigual reparto temporal de los mismos. En función de los objetivos perseguidos por el modelo, este hecho habrá de ser tenido en cuenta de una forma o de otra. Así por ejemplo, en el caso de un modelo arterial para la regulación óptima de la red, lo más importante será tener un conocimiento muy preciso del funcionamiento de la red a lo largo de períodos de tiempo más o menos largos (un día, una semana o un año, por ejemplo). En estos casos, será necesario obtener una curva de modulación de la demanda, es decir, una curva de variación temporal del consumo. Resulta evidente que este tipo de situaciones aconsejan utilizar modelos dinámicos o con simulación en período extendido (también llamados cuasi-estáticos).

Por contra, si el objetivo del modelo es estudiar la vulnerabilidad de la red frente a situaciones excepcionales o simplemente en una situación futura, será necesario disponer de un conocimiento general de la misma en dichas situaciones. Se estudiará por tanto un *escenario probable* de funcionamiento de la red. En estos casos, rara vez se utilizan modelos dinámicos, sino que se utiliza un modelo estacionario con una asignación de cargas basada en unas demandas proyectadas para dicho escenario. Puesto que existe la posibilidad de analizar distintos escenarios, se denomina estado de carga de la red a cada una de las situaciones de consumo reproducidas en cada uno de los escenarios.

A continuación se describen sendos métodos para la determinación de los caudales medios que se han de asignar a un modelo para los casos de un consumo actual o un consumo proyectado. El resultado se corresponde con un estado medio de carga de la red. Para realizar simulaciones estáticas se debe adoptar el estado medio de carga en la red que se produce en el escenario reproducido por dicha simulación. En la simulación dinámica será necesario reproducir la curva de modulación de la demanda en los nudos a lo largo de la simulación.

2.1. Obtención del caudal medio correspondiente a un instante actual.

Cuando se pretende realizar una simulación sobre el estado actual de la red, en general es posible disponer de información sobre caudales. Antes de comenzar con estudio sobre el desglose o clasificación de los consumos, ha de realizarse una primera distinción en función del origen de los datos disponibles. Los datos utilizados para determinar los consumos tienen dos fuentes claramente diferenciadas: volumen inyectado y volumen facturado. Así, mientras que el volumen inyectado se mide en los puntos de inyección (pozos y depósitos de cabecera, principalmente), los volúmenes facturados se miden en el punto de consumo.

El volumen inyectado en la red es generalmente fácil de conocer, pues tan sólo es necesario disponer de caudalímetros o cualquier otro dispositivo de medición de caudales en los puntos de inyección. Sin embargo, obtener el volumen consumido no resulta tan sencillo. En el mejor de los casos, la información disponible no pasará de unos volúmenes facturados con una periodicidad entre mensual y trimestral. Este nivel de detalle que se tiene de ellos resulta insuficiente y rara vez se dispone de la clasificación del usuario o de una descripción del patrón de consumo más allá que la sucesión de lecturas.

La diferencia entre el volumen inyectado y el volumen facturado o contabilizado es el volumen perdido, lo que da lugar a un rendimiento hidráulico de la red lógicamente inferior a la unidad.

En cuanto a la asignación de consumos también se distinguen entre aquellos que son contabilizados y los no contabilizados. Se consideran consumos contabilizados aquellos que son controlados tanto en valor como en ubicación. Fundamentalmente, son los consumos que se registran o facturan al abonado del servicio de distribución. Son consumos no contabilizados aquellos que o bien no se conoce su cuantía o no se conoce su ubicación exacta en la red. Es un caso típico de consumo no contabilizado el de las fugas de agua en la red de distribución.

2.1.1. Consumo registrado y consumo facturado

Como se ha comentado, los consumos registrados se basan en las facturaciones de los abonados al servicio. Sin embargo, ha de hacerse una distinción entre ambos términos. El consumo registrado hace referencia a una cuantificación del mismo, en general mediante el uso de contadores. Sin embargo, el término facturado hace referencia a la cantidad utilizada en la factura. Por ejemplo, si la facturación se basa en valores estimados por el lector y no a diferencia de lecturas entre dos lecturas consecutivas, el consumo será un consumo facturado pero no registrado. También es posible encontrar el caso inverso. Supóngase por ejemplo una red cuya gestión es municipal. Los consumos municipales como riego de parques y jardines que estén dotados de contadores, son consumos efectivamente medidos, es decir, registrados, pero no suelen facturarse.

A pesar de todo lo anterior, el planteamiento tradicional de la asignación de cargas se basa en aceptar que los consumos facturados son consumos medidos. Con la lectura del volumen consumido en el período de facturación se obtiene un consumo medio para dicho período. Este consumo medio se corrige mediante una serie de coeficientes para adaptarlos al estado de carga que se está simulando (punta, valle o una modulación temporal del mismo).

El proceso de asignación de cargas consiste en pasar de este consumo facturado de cada abonado a una demanda media en el nudo del modelo. El método utilizado dependerá de cómo tiene estructurada su información el servicio de abastecimiento. Sin embargo, de forma general se siguen los siguientes pasos (Cesario, 1995):

1. Determinar una curva de demanda. En general se aplicará la misma a toda la red salvo que se disponga de información sobre el comportamiento específico de distintas zonas.
2. Ubicar a cada abonado. A partir de su dirección o su ubicación en el plano, cada abonado ha de ser abastecido desde un punto del modelo de la red. El método tradicional para esta ubicación es el de asignar el abonado al nudo más próximo, ya sea geográficamente (sobre el plano) o hidráulicamente (siguiendo el trazado de las conducciones).
3. Determinar el caudal medio consumido por cada uno de los abonados.
4. Combinar el caudal medio de cada abonado con la correspondiente curva de modulación para obtener el patrón de consumos diario.
5. Sumar en cada nudo de consumo los caudales correspondientes a todos los abonados que han sido asignados al mismo.
6. Asignar el resultado anterior como demanda del nudo correspondiente.

Este proceso es válido para la determinación de un estado de cargas medio. Sin embargo, la demanda instantánea depende de una serie de factores que no suelen estar incluidos en la factura. Estos son, entre otros, el tipo de consumo, calidad o nivel de vida del consumidor, hábitos de consumo, etc. Incluso la estación del año o la climatología hacen variar la demanda instantánea, de ahí la complejidad de realizar una estimación fiable de la misma. Todo ello hace que de un sector de consumo a otro o incluso en nudos de un mismo sector, varíe la demanda instantánea y por tanto el coeficiente de modulación de dicha demanda, definido éste como el cociente entre el caudal instantáneo y el caudal medio de un sector.

En el caso de optar por el modelo dinámico, el proceso de asignación de cargas debe incluir también la caracterización en los nudos de la modulación temporal de la demanda. El proceso de asignación de consumos se completa por tanto dando a cada nudo una curva de modulación estándar que contemple la variación temporal de la demanda instantánea en el nudo.

La modulación de la demanda en los nudos se obtiene, siguiendo un proceso parecido al de asignación de la demanda media, a partir de la modulación de cada uno de los abonados. Por su parte, la curva de modulación de los abonados depende del tipo de

abonado. Se distinguen varios tipos de consumos: domésticos, comerciales, industriales, públicos y riego.

Dentro de cada tipo de consumo se pueden describir distintos subtipos. Así por ejemplo, el consumo doméstico varía con el nivel de vida del abonado, sus hábitos de consumo, número de usuarios de un único servicio, la edad de los usuarios, etc. La curva de modulación estándar varía mucho de unos usuarios a otros. Es conveniente realizar medidas, como se verá posteriormente, tendentes a caracterizar la curva de demanda de consumo doméstico de la red que se vaya a modelar. Además, existen claras diferencias entre el consumo doméstico de tipo urbano (que caracteriza a aquellas viviendas ubicadas en zonas con alta densidad de población y grandes alturas edificadas) y el de tipo residencial o rural, en el que cada vivienda suele disponer de parte de jardín y frecuentemente también, de piscina de uso privado. En este último caso, si bien el patrón de consumo es muy similar al anterior (Cesario, 1995) no sucede lo mismo con el volumen facturado, que es superior en el caso del tipo residencial.

La forma de la curva de modulación de los consumos comercial e industrial está determinada por los horarios de actividad. Dentro de este horario de actividad el consumo es prácticamente constante, mientras que fuera de ellos es nulo. El valor de la demanda instantánea debe ser caracterizado para cada red particular. Las curvas de modulación estándar de cada tipo de consumo varían, a su vez, de días laborables a festivos y con la estacionalidad, lo que debe ser tenido en cuenta a la hora de establecerlas.

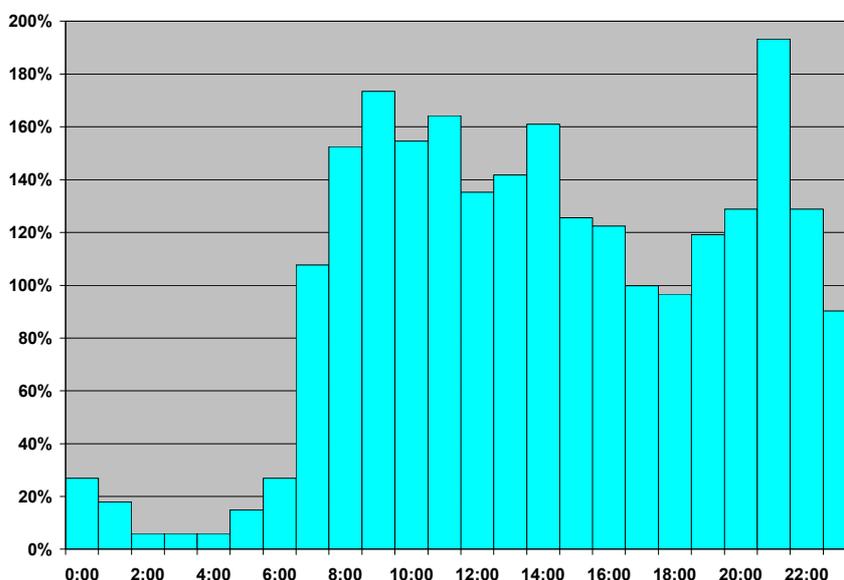


Figura 4.2. Curva de modulación del consumo doméstico típica de la ciudad de Valencia. (Adaptada de Martínez Tortajada, 1998).

Para obtener la curva de modulación en un nudo se parte de la asignación de la demanda media del mismo. Se obtiene además una serie de curvas de modulación medias en función del tipo de uso que el abonado hace del recurso (básicamente, doméstico urbano,

doméstico residencial, comercial, industrial y riego). En función del porcentaje de usuarios de cada uno de los usos considerados, se ponderará la curva de modulación de cada nudo. En la Figura 4.2 se muestra una curva de modulación correspondiente a un uso doméstico urbano obtenida a partir de mediciones realizadas en Valencia (Martínez Tortajada, 1998).

2.1.2. Consumo no registrado

Se consideran consumos no registrado los que quedan fuera de control. Principalmente se consideran como tales los errores de medida de un contador, la ausencia de lectura de los mismos (estimaciones de facturación), las fugas en la red, las acometidas ilegales, las tomas para servicios municipales no registradas, consumo de bomberos en incendios, etc.

Consumos fraudulentos o incontrolados

Corresponden respectivamente a tomas ilegales realizadas sobre la red y consumos de carácter municipal (los riegos antes comentados) sin contador o caudales excepcionales, como aquellos relacionados con la limpieza de calles o caudales de incendios. Los primeros seguirán el mismo patrón de consumos que cualquier consumo doméstico mientras que los segundos son más difíciles de cuantificar en cantidad y en distribución temporal. Por ello, en el caso de los consumos incontrolados es recomendable realizar medición de los mismos, aunque posteriormente no sean facturados.

Errores de medición en contadores

Los errores en la medida del contador pueden producirse tanto por exceso como por defecto. Se puede suponer que en un sector de consumo los errores por exceso se compensan con los de por defecto, por lo que no tendrán excesiva importancia en el proceso de asignación de consumos. Sin embargo, esto último no siempre es cierto. Arregui et al. (1998) exponen un completo estudio para la estimación del error de medición en un parque de contadores. Otra conclusión que se extrae de este estudio es que la modulación de este error es similar a la del consumo doméstico.

En cualquier caso pueden haber zonas donde exista una tendencia clara de los errores en un sentido o en otro. El error en la medida del contador depende de su edad, tipo y calibre, de la calidad del agua en la red y del diámetro de la acometida que lo abastece (depósitos de cal en la tubería). Si existe constancia inequívoca de que en un sector de consumo hay tendencia en uno u otro sentido se procederá a corregir la demanda.

Fugas en la red

En el caso de fugas, su consideración para asignarlas como demanda en el modelo es difícil porque no se conoce ni su valor ni su localización. Cuando una fuga se localiza generalmente es porque tiene cierta importancia y se procede a su reparación, con lo cual desaparece.

En general, el planteamiento utilizado para tener en cuenta las fugas y, por extensión, todos los consumos no registrados ha consistido en corregir la demanda media en el nudo con un coeficiente denominado rendimiento hidráulico de la red. Este es el cociente entre el caudal de agua inyectado a la red en período de tiempo y la demanda media calculada para ese mismo período.

Sin embargo, las fugas tienen un comportamiento muy distinto al de cualquier caudal consumido. Una fuga en la red puede modelarse como una válvula parcialmente abierta que conecta la red con el exterior (Iglesias et al, 1999). El caudal que deja pasar la válvula depende de la diferencia de presiones entre sus extremos. Al estar abierta hacia el exterior, la presión aguas abajo es constante e igual a la presión atmosférica, por lo que la magnitud de la fuga depende del nivel de presiones en la red. Cuanto mayores son las presiones (horas valle de consumo) las fugas también lo son. De igual manera, cuando las presiones en la red son mínimas (horas punta de consumo) el nivel de fugas en la red es también el mínimo.

Buena parte del consumo nocturno corresponde a fugas en la red. Sin embargo no se puede realizar una asignación de fugas en la red a partir de este valor porque, como hemos dicho, el nivel de fugas es mayor por la noche al serlo las presiones en la red. En cualquier caso, la variación diaria de los caudales de fugas es, con diferencia, mucho menos acusada que la variación del consumo facturado, tal y como muestra la Figura 4.3, adaptada de Meneghin (1999). Esta gráfica corresponde a una red con alimentación desde un depósito de nivel constante. En el modelo de la misma, las fugas se han incluido como elementos dependientes de la presión y los caudales asignados corresponden al día de mayor consumo. Se observa que en horas nocturnas el caudal de fugas llega a representar el caudal total consumido mientras que en las horas de mayor consumo éstas apenas representan el 10% del caudal total.

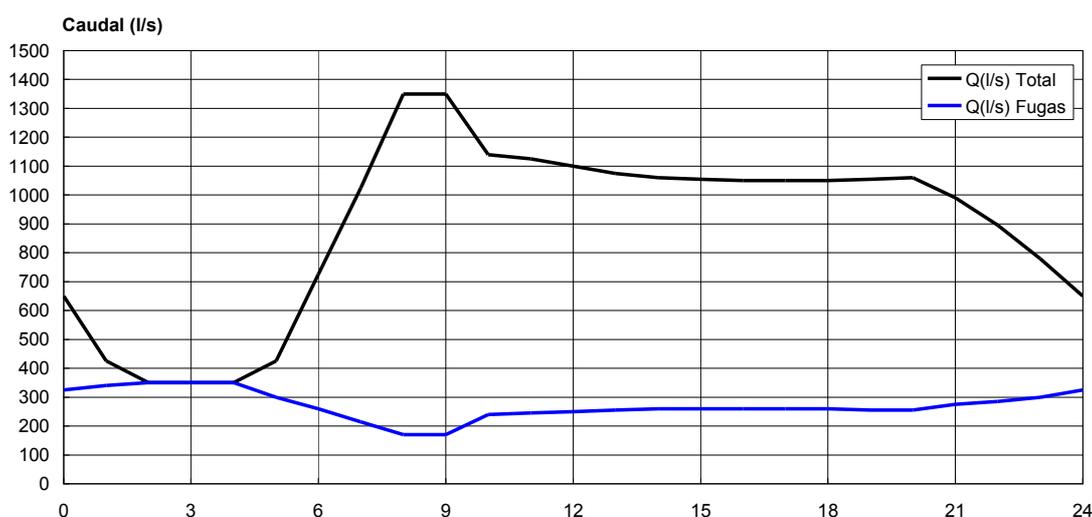


Figura 4.3. Curva de modulación del caudal total y de las fugas en una red (adaptada de Meneghin, 1999).

El principal inconveniente de esta forma de tratar las fugas se deriva de la necesidad de calcular un coeficiente que representa la caída de presión en cada una de las fugas, lo cual es tanto como un coeficiente que debe calibrarse para cada una de las tuberías de la red. Esto hace en la práctica inviable el método en grandes redes.

No obstante, la principal dificultad en la consideración de las fugas en un modelo matemático sigue estando en la imposibilidad de determinar su ubicación exacta, aun cuando se disponga de una estimación de su cantidad. Por ello, en la metodología propuesta se excluye el tratamiento de las fugas de la red durante el proceso de asignación de cargas.

Sin embargo, a pesar de no estudiar con detenimiento las fugas que se producen en la red, éstas han de ser tenidas en cuenta si se desea un nivel de precisión adecuado en el modelo. En este caso, se ha optado por hacer balance de volúmenes, y no de caudales. Así, las fugas se añadirán con posterioridad al proceso de asignación de cargas como volúmenes diarios constantes calculados a partir del rendimiento hidráulico de la red y repartidos en los nudos en función de la importancia relativa de estos, es decir, proporcionalmente al volumen diario demandado por los mismos.

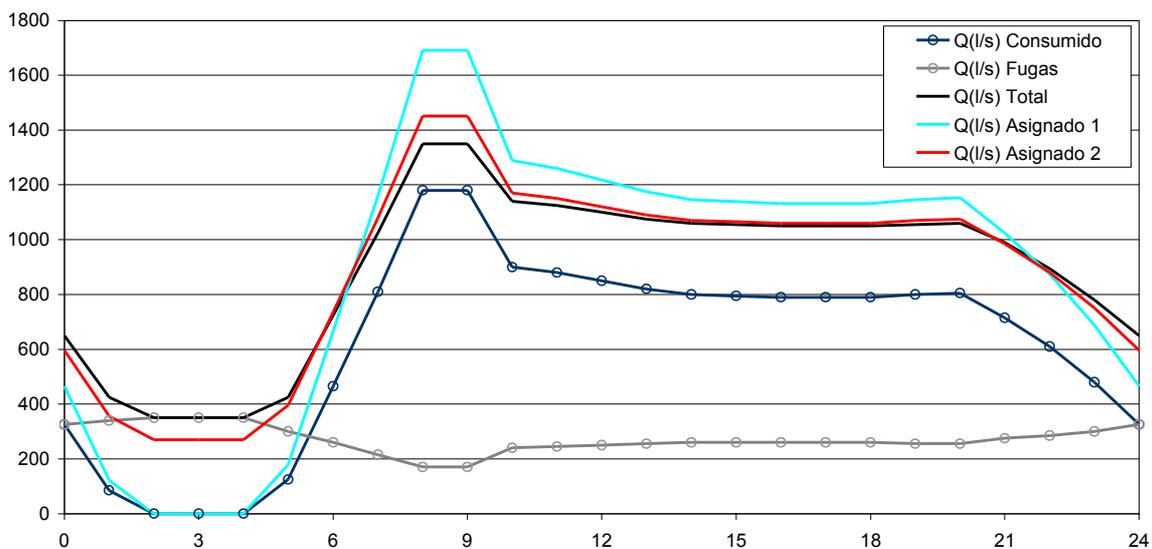


Figura 4.4. Distintas alternativas para la asignación de cargas considerando las fugas (adaptado de Meneghin, 1999).

Tómese como ejemplo el caso anterior, en el cual tanto el caudal de fugas como el caudal total circulante son conocidos. Sobre este ejemplo se han comparado las alternativas de asignación considerando las fugas. El método representado en la Figura 4.4 como caudal asignado 1 (Q Asignado 1) corresponde a la consideración de las fugas como un porcentaje constante del caudal facturado. Con esta forma de contabilizar las fugas se obtienen curvas de modulación más rizadas, esto es, con mayores diferencias entre los caudales en horas punta y caudales en horas valle. Tomando como exactos los caudales

correspondientes al trabajo presentado por Meneghin (1999), el error cuadrático cometido por este procedimiento es del 4,86%. Por el contrario, el método descrito anteriormente y basado en volúmenes diarios (Q Asignado 2) de curvas de modulación mucho más parecidas a las reales, con un error en este caso del 0,29%.

Por todo esto, aunque la consideración de las fugas requeriría un estudio más profundo que contemplase la variación de la presión en la red, una forma aceptablemente precisa de considerarlas es la que se ha comentado y será la que se utilice en el proceso de asignación de cargas.

2.2. Obtención de una estimación del caudal proyectado.

2.2.1. Demandas actuales frente a demandas futuras.

Para la realización de cualquier cálculo hidráulico en una red de distribución el consumo demandado a la red debe ser conocido. Además, este consumo debe ser correctamente asignado, es decir, ubicado en el espacio y distribuido a lo largo del tiempo.

Hasta ahora se ha supuesto que se dispone de los datos fundamentales para dicha asignación. Es decir, se dispone al menos de los datos de facturación de los abonados y de los datos de volumen inyectado en la red. Con estos datos se procede al cálculo del caudal medio demandado en cada uno de los nudos. Si además se tiene acceso a datos de volumen inyectado, es posible incluso hacer una estimación de las pérdidas de agua en la red, mejorando dicha asignación de cargas.

En cuanto a la distribución temporal de dichas demandas, la alternativa tradicional pasará por la utilización de las curvas de modulación y un análisis realizado con cualquier simulador de redes de agua en período extendido.

El planteamiento visto hasta ahora es muy eficaz para realizar un análisis de la red con la finalidad de analizar el funcionamiento de la red en el estado actual. Esto permite utilizar el modelo matemático como herramienta para la toma de decisiones estratégicas, tales como regulación de las estaciones de bombeo, manipulación de las válvulas reguladoras o identificación de necesidades de la red,

Cuando se ha de realizar un modelo, ha de tenerse en cuenta por un lado de qué datos se dispone y por otro lado para qué se va a utilizar el modelo. Como se describió en el capítulo 3, los modelos matemáticos de las redes de distribución de agua admiten múltiples usos según qué criterio se utilice para realizarlas.

Desde el punto de vista de la utilización que se va a hacer del modelo, estos se agrupan principalmente en modelos de análisis, cuyo objetivo es el conocimiento actual de la red, con mayor o menor detalle; y los modelos de diseño o planificación, cuyo misión principal es determinar necesidades futuras de infraestructuras o estrategias a seguir con las infraestructuras actuales. Desde el punto de vista de los datos, la diferencia entre ambos en, por lo general, bastante clara:

- Los modelos de análisis se basan en información actual, lo cual quiere decir que está disponible y el principal problema consiste en obtenerla.
- Los modelos de diseño se basan en eventualidades, como pueden ser una rotura accidental o el crecimiento de la red a causa de una expansión de la zona de servicio.

Salvo excepciones, en el primer caso los datos de demanda son relativamente fáciles de conseguir, aunque sea con una calidad baja. Así, el caudal inyectado se obtendrá de los caudalímetros que pudieren existir. Incluso en el caso de que éstos no existan, su obtención pasará por instalar algunos de ellos en los puntos de inyección de agua en la red. Por otra parte, los datos de volumen consumido se pueden obtener de los registros de facturaciones. Estos últimos suelen tener una mala calidad, pues se trata de mediciones que se realizan con una periodicidad bimensual en la mayor parte de los casos, por lo que sólo aporta información sobre el caudal medio consumido. En cualquier caso, para determinar el comportamiento medio de la demanda es suficiente y, de hecho, es la vía de obtención de datos de caudal más extendida.

Sin embargo, hay ocasiones en que los datos necesarios para la asignación de cargas no están disponibles o resultan de difícil adquisición. Es el caso de modelos correspondientes a abastecimientos donde no se realiza una medición del caudal o del volumen consumidos. Esta última es una posibilidad tristemente frecuente en abastecimientos de pequeñas poblaciones.

Por otra parte, los modelos utilizados para la planificación de la red a corto o medio plazo deben trabajar con demandas futuras que han de ser estimadas. Dicho de otra forma, han de trabajar con unas cargas o consumos del modelo que no hay ninguna posibilidad de medir. En estos casos, la ausencia de estos datos obliga a utilizar estimaciones o predicciones estadísticas para determinar el caudal que se demanda en cada nudo. Para encarar el problema de la modelación de una red de la cual se desconocen los consumos es necesario disponer de información adicional a la propia de la red. Esta información incluye (Cabrera et al., 1996):

- Mapa de usos del suelo (por ejemplo a partir de un Plan General de Ordenación Urbana).
- Densidad de población por zonas, barrios o distritos.
- Altura máxima edificable de cada parcela.
- Zonas de uso industrial y tipos de industria.
- Históricas de consumos en aquellas zonas donde éstos estén disponibles.
- Previsiones de crecimiento de población y de aumento de la demanda de agua.
- Futuras ampliaciones urbanas.

En el caso del diseño de redes, además de desconocerse el volumen facturado, también es frecuente que el propio trazado de la red forme parte del problema.

Como se puede observar, gran parte de la información antes detallada tiene un carácter mixto geográfico y alfanumérico. El SIG ha demostrado ser una herramienta muy eficaz en la utilización de datos geoestadísticos en otros campos de la ingeniería y la idea es utilizarlo en este caso.

Cesario (1995) propone una relación de los pasos a seguir para realizar la asignación de cargas cuando se pretende trabajar con caudales proyectados. Partiendo de la definición de área de servicio como el área que debe ser abastecida por la red objeto de estudio, los pasos se pueden resumir en:

1. Establecer el área de servicio a la cual se pretende extender el estudio.
2. Determinar el tipo de uso que va a tener cada una de las distintas parcelas en que se puede dividir el área de servicio.
3. Estimar unos consumos medios unitarios (por unidad de superficie o por habitante) para cada uno de los usos del suelo definidos anteriormente.
4. Determinar relaciones tales como la que existe entre el consumo del día de mayor consumo y el consumo medio o entre el máximo consumo y el consumo medio. Este último se denominará *coeficiente de punta*. Estas relaciones permitirán estudiar la red en distintos escenarios.
5. Crear o definir la red localizando los nudos de consumo.
6. Dividir el área de servicio en pequeñas porciones abastecidas desde cada uno de los nudos. Esta división se realiza habitualmente siguiendo criterios de proximidad geográfica.
7. Determinar el caudal de cada una de estas áreas asignadas a cada nudo como suma de los caudales correspondientes a cada uno de los usos del suelo.
8. Ubicar las demandas en los nudos del modelo y proceder con el cálculo.

Aunque los pasos anteriores fueron en su día sólo una propuesta, la aparición de los Sistemas de Información Geográfica permite hoy en día automatizar este proceso. A continuación se describe el método propuesto para esta forma de asignación de cargas al modelo.

2.2.2. Método para estimar el caudal en una red con ausencia de datos.

El método propuesto para determinar el consumo por nudo consiste, básicamente, en reducir la asignación de cargas a un cálculo de la demanda media por unidad de superficie y determinar la porción de superficie abastecida por cada nudo del modelo. Puesto que sea cual sea el planteamiento del problema, se desconocerá el número de abonados o habitantes abastecidos por cada nudo, no tiene sentido trabajar sobre una base de consumo per cápita, aunque este valor es relativamente fácil de determinar en un abastecimiento a partir de un análisis estadístico del archivo histórico de consumos.

En lugar de esto, es preferible determinar una demanda media por hectárea basada en los tipos de uso del suelo y la superficie que ha de ser cubierta por cada nudo. Para este tipo de asignación de consumos, la utilización de los SIG vectoriales resultan de gran ayuda gracias a las herramientas de gestión de topologías.

A continuación, será necesario decidir el trazado de las nuevas conducciones que han de ser construidas. En esta fase es necesario tener en cuenta que no se podrá llegar a un excesivo nivel de detalle, pues realmente no se conoce en detalle cuántas acometidas serán instaladas. En cualquier caso, el problema del trazado óptimo ha sido suficientemente estudiado en el entorno de un SIG. Si se tiene en cuenta como restricción que el trazado de las conducciones debe discurrir por el viario, evitando las zonas edificables; se trata de un problema de camino más corto para unir puntos a través de topologías de red. Algunos autores como Costelloe et al. (2001) lo resuelven con criterios multiobjetivo de longitud y costes de manera eficiente. Sólo hay que combinar la red existente con la cartografía urbana disponible y la topología de usos del suelo antes comentada. A partir de aquí, definidos unos criterios de trazado y unos puntos de partida, el problema se reduce a encontrar el mejor camino siguiendo los ejes de calle que puedan unir los puntos de partida y los puntos de consumo.

Supóngase que se dispone de una porción de terreno dentro del área de servicio de la que se quiere hacer una planificación de cara a un desarrollo futuro de la red (Figura 4.5 a).

De ella se conoce su plan de ordenación urbana, es decir, el uso al que se debe destinar cada porción del suelo. El primer paso consistirá en definir una topología de polígonos que recoja la clasificación de los usos del suelo. Esta topología incluirá datos básicos de los polígonos, como su área, junto con otros datos más específicos que se utilizarán posteriormente para la estimación de los caudales (Figura 4.5 b).

Una vez completado el trazado de la red (Figura 4.5 c), se crea una segunda topología de polígonos basada en el principio de proximidad a un nudo del modelo. Esta topología es, básicamente, un mosaico de Thiessen construido a partir de los nudos del modelo como elementos generadores. El resultado se muestra en la Figura 4.5 d).

Si a partir de aquí se realiza una operación de superposición de ambas topologías, el resultado es una división del área servida por cada nudo en función del tipo de uso (Figura 4.5 e). En dicha figura pueden distinguirse los nuevos nudos creados (que aparecen en color negro) y los nudos existentes previamente (en color azul). En la misma figura, se observa que las nuevas zonas que han de ser suministradas no tienen porqué ser abastecidas por nuevas tuberías, sino que algunas pueden ser cargadas a tuberías ya existentes. Por ello, posteriormente se deberá realizar un análisis conjunto del funcionamiento de las nuevas conducciones y las ya existentes.

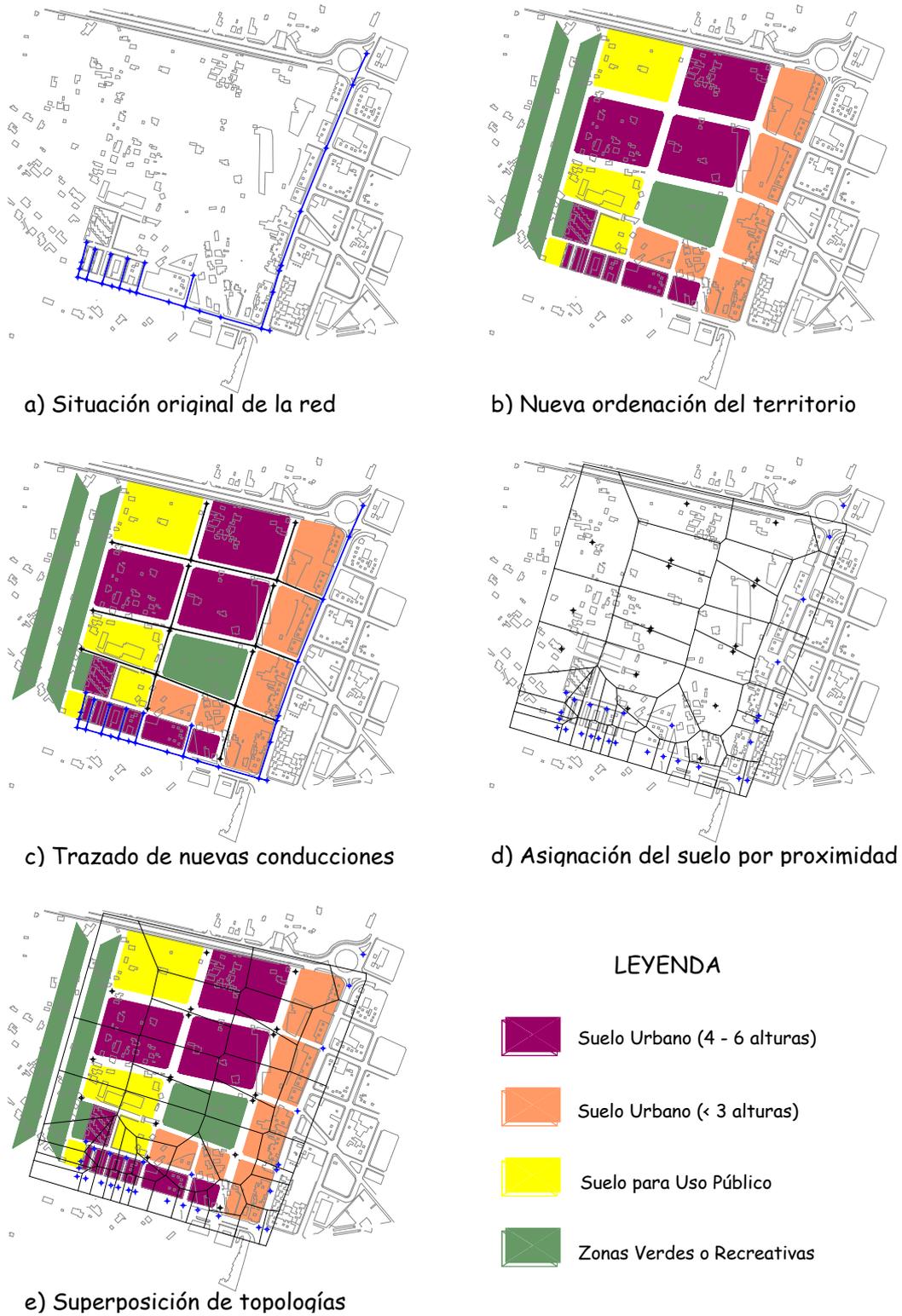


Figura 4.5. Pasos para la determinación de caudales proyectados (adaptado de Martínez Solano et al., 2002).

En cuanto a la determinación de consumos, para cada uno de los diferentes usos del suelo se ha de extraer (bien a partir de registros históricos, bien a partir de ratios) un factor

que representa el consumo medio por hectárea. De esta forma, la demanda estimada para un determinado nudo X podrá calcularse según:

$$Q_X = \sum_i q_i \cdot A_i \tag{4.1}$$

siendo:

- Q_X = consumo total estimado en un nudo,
- q_i = consumo unitario por unidad de superficie para un determinado uso del suelo,
- A_i = superficie destinada a cada uno de los usos del suelo dentro del área servida por el nudo X .

Una vez se han estimado estos consumos, ya se podrá proceder con el cálculo, ya sea el dimensionamiento de las nuevas conducciones o el análisis de la red en un escenario futuro.

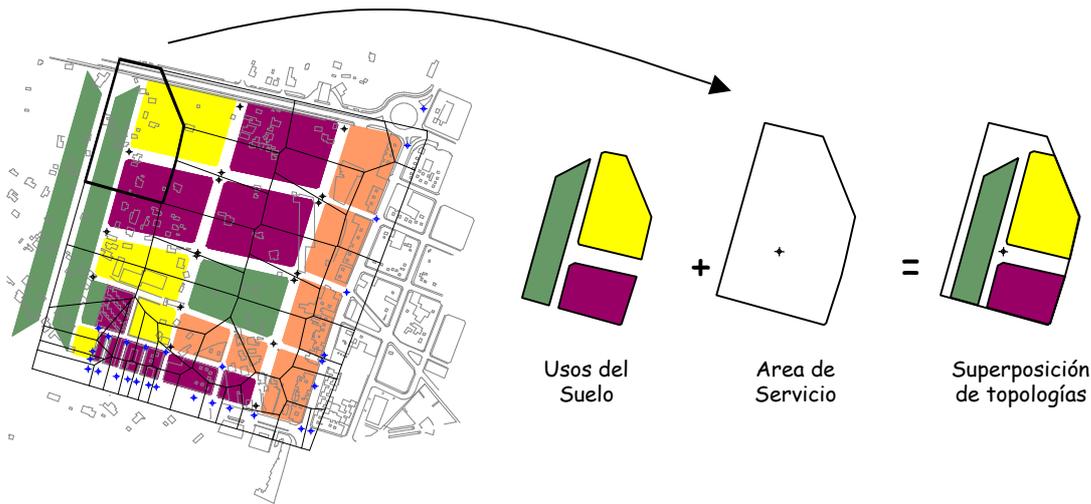


Figura 4.6. Operación de superposición de topologías.

Un método similar se presenta en Van der Walt y Johnson (1999). Este trabajo presenta un sistema de planificación estratégica de abastecimientos en Sudáfrica basado en el SIG. En dicho sistema, se obtiene la evolución de la población a partir de los datos demográficos almacenados en la correspondiente base de datos. Además, de la base de datos de abonados se obtiene la tendencia de los consumos en función del tipo de abonado. Por último, combinando ambos parámetros se obtiene un consumo proyectado para un futuro a corto plazo y se realiza la evaluación de la capacidad de la red, tal y como se halla en la actualidad y se determinan los cuellos de botella de la misma y las posibles soluciones.

Métodos similares se han descrito en Elgy et al. (1996) para estimar la demanda de agua en meses de verano en la red de abastecimiento de Birmingham (Reino Unido).

También es una metodología utilizada para la determinación de caudales aportados por cuencas de drenaje a una red de alcantarillado. Es el caso del trabajo realizado para la red de Castellón por el Grupo Mecánica de Fluidos (2001b), donde se utilizó el SIG para la delimitación de las subcuencas de drenaje en una población caracterizada por la ausencia de pendientes importantes. En este caso, la dotación no dependía del número de abonados o de la catalogación del uso del suelo, sino de la intensidad de lluvia registrada.

3. Técnicas de asignación de cargas.

En el apartado anterior se ha repasado el procedimiento para determinar, por una parte, el caudal medio por abonado; y por otra parte los caudales en los nudos cuando no existen datos de facturación. Sin embargo, una vez que se tiene los caudales medios por abonado, estos han de ser asignados a los correspondientes nudos. Si el modelo no ha sido simplificado, el proceso de asignación resulta un proceso muy sencillo. Sin embargo, si el modelo ha sido simplificado, el grado de simplificación del mismo influye en la mayor o menor dificultad del procedimiento de asignación de cargas.

A continuación se presentan algunos métodos de asignación de cargas comúnmente utilizados.

3.1. Asignación de consumos unitarios por calle.

Este método de asignación de cargas aparece descrito, entre otros en García-Serra (1984). Para la implantación de este método es necesario utilizar al menos tres bases de datos distintas: una de abonados, otra de infraestructuras y otra que recoja los datos del modelo matemático.

El proceso se inicia identificando cada una de las tuberías y calculando la porción de longitud de las mismas que transcurren por cada calle. Esta información se guardará en la base de datos de infraestructuras.

Con la base de datos de los abonados es posible determinar por una parte el volumen consumido por cada uno. Esto, junto con la información almacenada de la dirección, permite obtener el consumo por calle. Operando con la base de datos de infraestructuras anterior, se determinará el consumo unitario por metro de calle. Como se ha calculado previamente la longitud de cada tubería que discurre por la calle, multiplicando por el consumo unitario, se obtiene el consumo por tubería.

Por otra parte, durante el proceso de simplificación de la red se ha debido elaborar una base de datos que recoja qué tuberías se han simplificado, cuáles se mantienen y qué relación hay entre ellas. Con esta información y el consumo por tubería real de la red, utilizamos esta base de datos de esqueletización de la red para pasar el consumo por tubería de la red a consumo por línea del modelo.

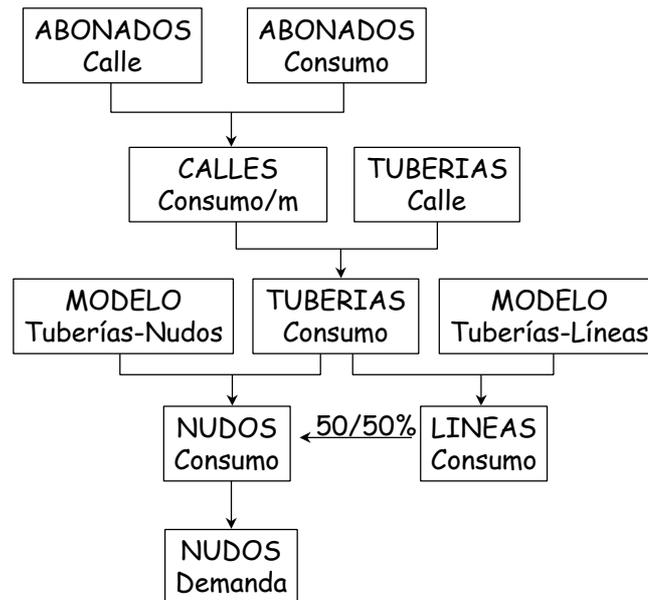


Figura 4.7. Esquema de asignación de cargas basada en los consumos unitarios por calle.

Puesto que en la mayoría de programas disponibles comercialmente para la resolución de redes los únicos elementos que admiten caudales como dato son los nudos, los consumos de línea se reparten entre los nudos extremos y se suman a los consumos de nudos para obtener la demanda.

En la Figura 4.7 se puede ver el esquema que relaciona las diferentes bases de datos de este proceso. La asignación por consumos unitarios le aporta además mayor precisión al proceso de asignación, pues tiene en cuenta el reparto real por las tuberías de la red.

3.2. Asignación por derivaciones de líneas y nudos.

Este método se ha aplicado con éxito en redes tales como la de Valencia (López Patiño, 1994), lo cual da idea de su adecuación a grandes redes. El proceso de asignación va a consistir en: calcular los consumos por calles relacionando la base de datos de abonados (en la que se conoce además del volumen facturado, la localización de la acometida de la que se sirve el abonado) con la base de datos de calles. En esta última, con el fin de evitar ambigüedades, cada calle se codifica mediante un número único. De cada calle se conoce a qué sector de consumo del modelo pertenece. En general, estos sectores deben ser determinados por el modelador y se hacen coincidir con las mallas principales de la red. De esta forma, se puede obtener el consumo total de cada sector sumando el de todas las calles que pertenecen al mismo.

La particularidad de este método de asignación de cargas viene dada porque ahora se crean dos nuevas bases de datos: una con las de derivaciones de línea (ramificaciones interiores que se han eliminado y cuyos consumos se han de asignar a una línea) y otra con las derivaciones de los nudos (en este caso, el nudo de conexión de la línea con la malla permanece en el modelo y es éste el que recibirá el caudal durante el proceso de asignación).

Cada una de ellas contienen todas las derivaciones que, de las líneas y nudos que cierran la malla, parten hacia el interior del sector de consumo, con su respectiva sección.

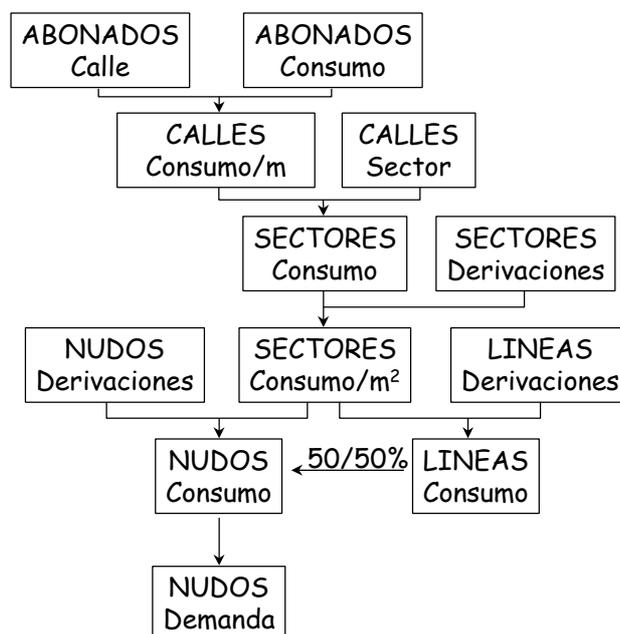


Figura 4.8. Esquema de asignación de consumos por derivaciones.

Se calcula una sección equivalente de derivación hacia el sector sumando las capacidades de transporte de cada derivación. Dividiendo el consumo total en el sector por la sección equivalente de paso, se calcula una velocidad media de circulación por cada derivación. Multiplicando la sección de cada derivación por la velocidad media de circulación se obtiene un caudal extraído por cada una de las derivaciones.

A continuación han de sumarse los caudales derivados por cada línea que cierra la malla y repartirlos al 50% entre los nudos extremos. En los nudos se suma el caudal derivado desde ellos al que le llega del reparto del caudal derivado por las líneas, obteniendo la demanda total en el nudo.

En la Figura 4.8 se puede observar como se relacionan las diferentes bases de datos del esquema de asignación. El proceso de asignación por derivaciones tiene en cuenta el reparto real de consumos dentro del sector y por ello posee mayor precisión que la asignación por sectores que se va a describir a continuación. Sin embargo, también se trata de un método más complejo que sólo se justifica si el tamaño de la red es suficientemente grande.

3.3. Asignación por mallas del modelo

Una descripción de este método se puede encontrar en la elaboración del modelo estratégico de la red de agua potable de Jávea en Alicante (Martínez Solano, 1994).

El proceso consiste en sumar el consumo de todos los abonados que quedan dentro de un determinado sector, que se hacen coincidir con las mallas del modelo, obteniendo el

consumo total del sector y luego repartirlo en partes iguales a los nudos que cierran la malla. La demanda en el nudo se obtiene sumando el consumo asignado de cada malla a la que pertenece el nudo.

Para su aplicación a la red de Jávea se estableció un criterio para aislar aquellos consumos que por su volumen se pueden considerar suficientemente influyentes en el comportamiento de la red. Estos se agruparon bajo la denominación de *consumidores importantes*.

En este caso se manejan tres bases de datos: la base de datos de abonados, en la que además de la facturación se incluye el sector de consumo al que pertenece el abonado; la base de datos de sectores, en la que se incluyen los nudos que pertenecen a cada sector, y la base de datos del modelo propiamente dicha que recoge tanto las tuberías como los nudos donde se totaliza la demanda de los mismos.

Para automatizar el proceso se utilizaron bases de datos relacionales que permiten, mediante lenguaje de programación (SQL), diseñar aplicaciones que relacionan y operan con los datos que las componen. Esto permitió incorporar las pérdidas volumétricas dentro del proceso de asignación de cargas, convirtiendo los consumos netos en los nudos en consumos totales. En la Figura 4.9 se observa cómo quedaría de modo esquemático el proceso de asignación de cargas por sectores.

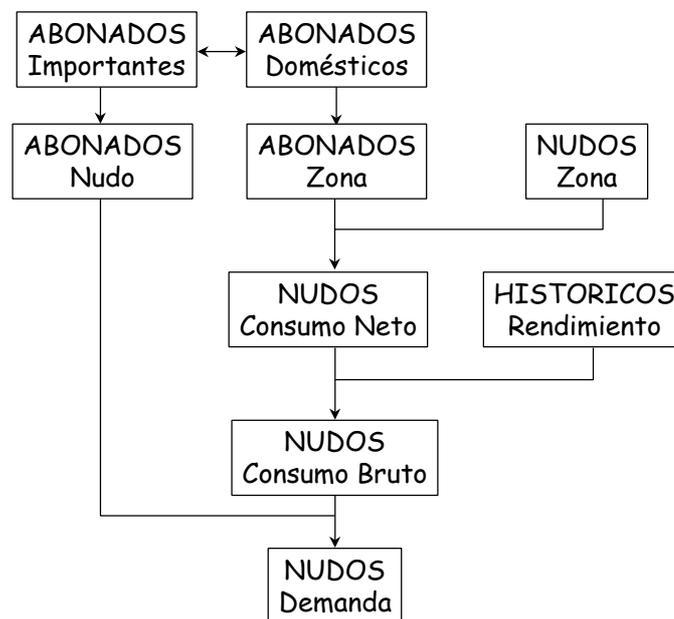


Figura 4.9. Esquema de asignación de consumos por mallas del modelo.

3.4. Asignación punto a punto.

Con la llegada de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), aparece la posibilidad de vincular cada abonado a una posición geográfica concreta. Esto facilita enormemente el proceso de asignación de cargas. En este caso, aunque la aproximación

tradicional sería la de asignar cada abonado a un nudo de forma manual, el procedimiento automático ya ha sido implantado con éxito en el modelo de la red de la Cooperativa Valenciana de El Plantío y La Cañada (Gascón, 2001).

El proceso es muy sencillo y consiste en relacionar cada abonado con un nudo del modelo, y asignar su consumo a dicho nudo.

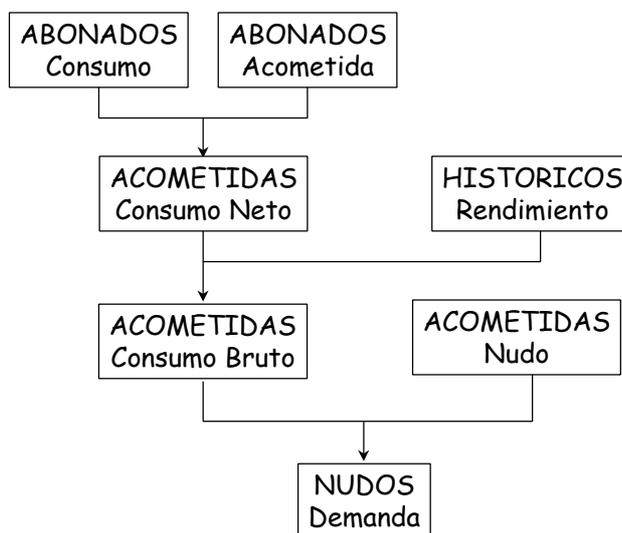


Figura 4.10. Esquema de asignación de cargas punto a punto.

Si la información no está vinculada a un SIG, el procedimiento es ligeramente más complicado. La asignación en el caso de una red ramificada es inmediata, pero en el caso de una red mallada, en la que a priori no se sabe cómo se distribuyen los caudales por las tuberías, se hace a criterio del modelador. Se busca siempre relacionarlo con un nudo cercano, o con el nudo que se puede considerar que abastece al abonado. La demanda en el nudo se obtiene sumando todos los consumos asignados al mismo.

Es un proceso que si se hace correctamente resulta bastante fiable, pero que es muy tedioso porque hay que realizarlo punto a punto si no se dispone de todos los datos en un SIG. Se manejan tan sólo la base de datos de abonados, en la que está su consumo facturado, y otra de consumos en los nudos.

La principal diferencia entre este proceso y los anteriores cuando consiste en que éste la asignación de cargas se realiza automáticamente antes de empezar la simplificación. Esto supone una ventaja importante, pero este método tiene un inconveniente igualmente importante debido precisamente a su simplicidad.

Si se trata de aplicar en un entorno SIG, la simplificación del modelo requiere un esfuerzo adicional que no requiere un modelo de detalle. Esto supone una tentación que llevaría a la utilización del modelo de detalle para cualquier fin y esto presenta problemas. Supóngase que se trata de estudiar una conducción en cuyo extremo final sólo existiese un abonado correspondiente a un consumo doméstico. Una dotación para consumo doméstico está en el rango comprendido entre 300 y 1000 litros por abonado y día (entre 150 y 250

litros por habitante y día). Para ese volumen de facturación, el caudal medio resultante en dicha conducción sería de aproximadamente 0,2 y 0,7 l/min. Este sería el orden de magnitud del consumo que se emplearía como dato de la demanda en el extremo de la conducción en un modelo estratégico. Sin embargo, la Norma Básica de Instalaciones Interiores de Suministro de Agua (NIA, 1975), de obligado cumplimiento, fija unos caudales mínimos por aparato de consumo doméstico entre 6 y 18 l/min. Es decir, si el objetivo de un modelo de detalle es calcular la instalación en el momento de mayor consumo, con el uso del caudal medio se obtendrán caudales claramente insuficientes, por no decir incluso imposibles en la instalación.

Uno de los objetivos de este capítulo es demostrar que un modelo de detalle utilizado con conceptos propios de un modelo estratégico pierde gran parte de su utilidad, debido al hecho de tener que contemplar cada abonado individualmente en el modelo, perdiendo la posibilidad de promediar consumos incontrolados y curvas de modulación. Además, se propone un método para determinar la probabilidad de ocurrencia de un determinado caudal en función de las facturaciones y la caracterización de los aparatos de consumo. Este último cálculo facilitará la construcción de modelos matemáticos en un entorno SIG para ambos usos: estratégico y de detalle.

4. Estudios previos realizados para determinar el caudal punta en una instalación.

4.1. Introducción a la naturaleza estadística del consumo instantáneo de agua.

Tal y como se ha descrito en el apartado anterior, el sistema de gestión de abonados realiza una asignación de cargas a los nudos del modelo basada en la demanda media por abonado. A partir de esta demanda media se realizan una serie de correcciones para tener en cuenta por una parte las pérdidas de agua en la red y por otra la variación temporal de los consumos.

Sin embargo, este planteamiento ha sido tradicionalmente utilizado para el análisis global de redes, esto es, para adquirir un conocimiento del funcionamiento de la red en su conjunto. Dicho de otra forma, este planteamiento se ha mostrado adecuado para la asignación de cargas a modelos estratégicos. Sin embargo, si se pretende elaborar un modelo matemático para comprobar, por ejemplo, el cumplimiento de los estándares de servicio en los puntos de consumo, esta forma de asignación de cargas muestra algunas deficiencias.

Tómese como ejemplo el estudio de un abonado aislado. Si dicho abonado se ajusta a un patrón de consumo correspondiente a un uso doméstico tendrá una demanda media en torno a 1000 l/día. Esta demanda dará como resultado un caudal medio de 0,012 l/s. Por otra parte, este caudal es muy inferior al que produce un grifo abierto que está en torno a

0,2 l/s según datos aportados por las Normas Básicas para las Instalaciones Interiores de Suministro de Agua (NIA, 1975). Dicho de otra forma, cuando se activa un grifo, el caudal consumido es aproximadamente 17 veces mayor que el caudal medio estimado a partir de las facturaciones de dicho abonado. Sin embargo, es precisamente en el momento en que dicho grifo se ha activado cuando se desea conocer las condiciones del consumo, y la realidad es que en ese momento el consumo es 17 veces mayor que el asignado.

Es decir, cuando se trabaja en conducciones con un pequeño número de abonados asignados, el caudal medio no representa la realidad del consumo, pues realiza en realidad una media entre un caudal nudo correspondiente a los instantes en que el grifo permanece cerrado y un caudal mayor cuando dicho grifo permanece abierto. Siguiendo con el ejemplo anterior, si se acepta un caudal constante para dicho grifo cuando éste está abierto, el caudal medio implica que el 95% del tiempo el grifo permanecerá cerrado, mientras que el otro 5% (es decir, 1 hora y 12 minutos) permanecerá abierto. Sin embargo, es precisamente en ese 5% del tiempo cuando se producen las condiciones que se han de estudiar. Si en lugar de estudiar un sólo grifo se estudiaran dos, el reparto variaría hasta un 90,25% del tiempo con ambos grifos cerrados, 9,5% con un grifo activo y 0,25% con ambos grifos abiertos.

Esto ha hecho que para redes pequeñas e instalaciones en el interior de edificios no sea posible realizar este tipo de asignación de consumos. Se establece pues una diferencia clara entre el cálculo de redes (con caudales medios y curvas de modulación) y el cálculo de instalaciones interiores (con caudales instantáneos).

El problema surge en las redes con escasa población o redes muy extensas con una densidad de población muy baja para la cual existen grandes longitudes de tubería para un número relativamente pequeño de habitantes. Este problema también surgirá para modelos con un elevado nivel de detalle que hagan que el comportamiento individual de un abonado tenga repercusión directa en el comportamiento de los elementos de la red que se encuentran cerca de él.

Con este planteamiento, es necesario dividir el comportamiento del abonado en dos situaciones: el abonado no consume y el caudal demandado es nulo o el abonado consume y sí que existe demanda de caudal (ver Figura 4.11). El problema se centrará entonces en determinar por una parte qué probabilidades hay de que el abonado realice un consumo (frecuencia de consumo), cuánto durará dicho consumo (duración) y cuál será el caudal consumido por el mismo (intensidad de consumo). Estas variables (intensidad, duración y frecuencia) pueden representarse mediante tres variables estadísticas de las cuales dos son independientes y la otra dependerá de aquéllas. Este concepto, habitual en otros campos de la hidráulica con incertidumbre en los datos (básicamente, en el cálculo de caudal debido a precipitaciones) ha sido recientemente introducido en el estudio de detalle de los abastecimientos de agua urbanos (Buchberger y Wells, 1996).

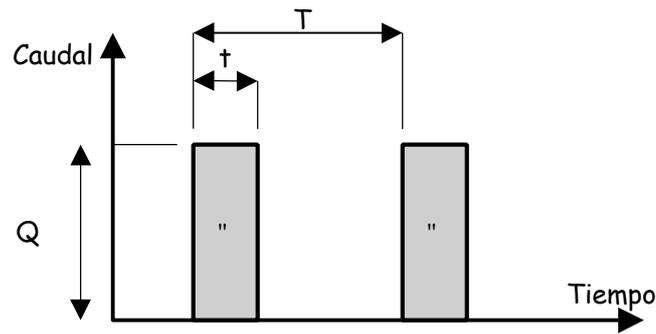


Figura 4.11. Esquema de un consumo. Un aparato servidor sirve un cierto caudal Q durante un tiempo de servicio t , consumiendo un volumen total " .

El primer autor que hace referencia a la naturaleza estadística del consumo de agua por parte de los abonados es Hunter, quien en 1940 para diseñar las instalaciones interiores en edificios introdujo el concepto de *unidad de descarga* como caudal medio que aporta un determinado aparato cuando está en marcha. Así, para el diseño de las instalaciones utilizaba el volumen de una unidad de descarga y el tiempo medio de utilización de un aparato para determinar un caudal máximo esperado con un determinado margen de confianza.

Desde entonces, muchos autores han intentado mejorar este planteamiento básico combinando el análisis estadístico y las mediciones de caudal instantáneo. A continuación se describen brevemente algunos de los estudios más recientes en este campo. Básicamente, estos métodos se pueden descomponer en aquellos basados en repetición de situaciones basadas en la probabilidad o en determinación de correlaciones entre caudal medio, caudal máximo y número de abonados efectuadas a partir de mediciones.

4.2. Métodos basados en la formulación probabilística.

4.2.1. Estudios realizados en Inglaterra por Butler y Graham (1995)

A partir de un planteamiento similar al de la Figura 4.11, se define la probabilidad p de uso de un aparato como el porcentaje de tiempo que éste está en marcha, es decir,

$$p = \frac{t}{T} \tag{4.2}$$

A partir de aquí, se asume una distribución binomial del número de aparatos puestos en marcha simultáneamente de tal manera que la probabilidad de que n aparatos estén simultáneamente en marcha de una población total de N vendrá dada por:

$$p(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} p^n (1-p)^{N-n} \tag{4.3}$$

Este trabajo concluye, asumiendo un comportamiento idéntico de todos los aparatos se obtendrá el caudal medio en un nudo con N aparatos conectados a él y la correspondiente función de probabilidad.

Como aplicación concreta de este método, el autor realiza una aplicación a una pequeña red de saneamiento en Edenbridge, al sudeste de Inglaterra. Se eligió un pequeño sector de la red con 317 viviendas y 770 habitantes censados, y realizando mediciones a lo largo de 110 días entre diciembre de 1988 y abril de 1989. Al tratarse de una red de saneamiento, no se controló el caudal consumido, por lo que se ajustó el modelo a los resultados medidos en varios puntos de la propia red.

Posteriormente, Jankovic-Nišić et al. (2001) ampliaron el trabajo midiendo en la red de agua potable de la misma población los consumos domésticos para tener en cuenta la variación de estos. Además, se midieron los caudales inyectados en ese sector a fin de corregir el efecto de las fugas. La principal revisión que se hizo del trabajo fue la de sustituir el caudal constante en cada aparato por una distribución estadística del caudal. La función de probabilidad acumulada, también llamada curva de caudales clasificados, obtenida es la mostrada en la Figura 4.12.

Con este planteamiento, se procedió a la generación de múltiples escenarios de consumo igualmente probables. Cada escenario implicaba una hipótesis de consumo para cada abonado en función de la probabilidad de ocurrencia expresada en la ecuación (4.2) y un caudal aleatorio según la función de distribución antes comentada. El resultado de estos escenarios se cargó en el modelo y se calculó con la ayuda del programa EPANET.

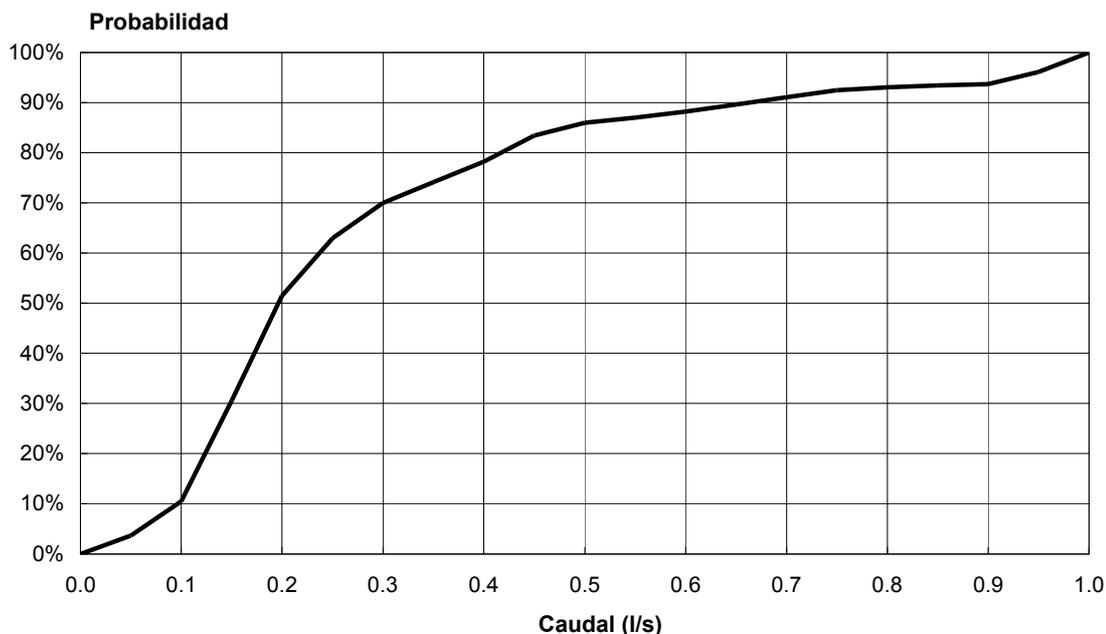


Figura 4.12. Curva de caudales clasificados para una vivienda según Jankovic-Nišić et al. (2001)

La conclusión final a la que llega el estudio después de procesar múltiples escenarios obtenidos aleatoriamente fue que la incertidumbre en los resultados de presión en los nudos de la red y caudales en las líneas era mayor cuanto menor era el número de abonados que dependían de dichos elementos.

4.2.2. Estudio realizado en España por Arregui (1998)

Un trabajo similar se ha desarrollado recientemente en España. Arregui (1998) propone en su Tesis Doctoral un método para determinar la probabilidad de que se genere un caudal de cierta intensidad en una vivienda. El objetivo de esta Tesis es el de determinar el tipo de contador que habría de instalarse en cada vivienda para minimizar el error del mismo. En esencia, el objetivo es el mismo que el perseguido en el presente capítulo: determinar el cálculo del caudal máximo en el momento de mayor consumo de modo que la probabilidad de ocurrencia de dicho caudal sea inferior a un determinado valor.

El estudio presentado por Arregui se basa en el análisis de mediciones realizadas en viviendas y los estructura en tres fases. La primera consistió en la captación de datos en tres municipios de la Comunidad Valencia (Benicassim, Valencia y Castellón) con medidas en un total de 45 viviendas, todas ubicadas en edificios de más de tres plantas y a lo largo de períodos de tiempo comprendidos entre 11 y 21 días.

Con estos resultados, procede al desarrollo de la segunda fase. En ella, se construyen las curvas de consumos clasificados, que representan el reparto porcentual del consumo en diferentes rangos de caudal. Para la construcción de estas curvas se discriminaron los eventos de consumo, esto es, los instantes en los que se producía el consumo. Dicho de otra forma, se individualizaron los consumos y se calculó el volumen consumido durante cada consumo. A continuación, se clasificaron los caudales demandados en cada consumo en una serie de rangos de caudal y se calculó la probabilidad que se produzca un consumo con un caudal de un determinado rango en función del volumen total aportado por los caudales de dicho rango. Posteriormente, para cada rango se determinó la importancia relativa de dicho volumen en el conjunto del volumen diario consumido en cada vivienda.

La última fase del estudio consistió en el análisis estadístico de los resultados y la propuesta de metodología para la determinación del caudal máximo. Para ello se aisló por un lado la probabilidad de que se produzca un consumo en una vivienda y por otro la cuantificación de dicho consumo, es decir, la distribución estadística de caudales en la vivienda. Para la determinación de la probabilidad de que una vivienda entre n esté consumiendo se utilizó un modelo estadístico de tipo binomial. Evidentemente, si la vivienda no consume, el caudal es cero. A continuación se determinó a partir de las curvas de consumos acumulados la distribución de probabilidades del caudal demandado por dicha vivienda.

Dado que no existían suficientes mediciones, se optó por la realización de una simulación del tipo Monte-Carlo, esto es, repeticiones aleatorias de sucesos (hasta 1.000.000 de repeticiones) con las que se obtuvieron muestras de consumos y por análisis estadístico de estas muestras se obtuvo la frecuencia relativa de cada caudal.

La utilización de este método para la determinación del caudal máximo en una conducción se ha descartado por dos motivos que lo hacen poco aconsejable para el estudio de las redes de distribución de agua.

4.3. Métodos empíricos utilizados para la determinación del caudal punta.

Con el fin de completar el estudio realizado con otras mediciones, además de las realizadas por Arregui y Butler et al. se han estudiado distintas soluciones basadas en mediciones realizadas. En concreto, se presentan las curvas de consumos clasificados publicada en el año 1993 por Bowen et al. para la American Water Works Association (AWWA, 1993), obtenida también a partir de las mediciones realizadas en 709 viviendas repartidas en toda la geografía de los EE.UU. Además, se presentan también otras correlaciones entre el caudal medio demandado y caudal punta esperado obtenidas a partir del análisis estadístico de consumos.

4.3.1. Mediciones realizadas por la American Water Works Association (AWWA).

La curva de consumos clasificados publicada en el año 1993 por Bowen et al. para la American Water Works Association (AWWA, 1993) se ha obtenido a partir de las mediciones realizadas en 709 viviendas repartidas en toda la geografía de los EE.UU.

Para poder hacer la comparación ha de tenerse en cuenta la forma en que ambos estudios han sido realizados. Tanto Arregui como Bowen et al. parten de datos experimentales y realizan un análisis de los consumos a partir de las mediciones realizadas, es decir, sólo se tratan en estos estudios los instantes en que se produce un consumo. Sin embargo, en el método adoptado, se contempla la posibilidad de que una vivienda no esté demandando consumo, lo cual es un hecho bastante habitual.

Para poder realizar una comparación gráfica de todos los datos disponibles obtenidos a partir de mediciones, se han debido tratar las curvas obtenidas para eliminar los momentos en que no hay consumo en la vivienda y promediar la distribución de caudales en los momentos en que éstos se producen y no a lo largo de todo el día. De esta forma obtenemos la curva de probabilidad acumulada cuando se está produciendo un consumo en la vivienda,

Por otra parte, ha sido necesario realizar unos análisis estadísticos de los resultados de Arregui y de la AWWA para obtener los parámetros necesarios para implantar el método propuesto. En concreto, se trata de obtener la caracterización de los aparatos de consumo, es decir, su media y su varianza. Los resultados de este análisis se presentan en

la Tabla 4.1 junto con otros datos extraídos de otros estudios. Entre estos últimos se incluye un estudio debido a Maddaus (1987) y utilizado por Buchberger y Wu (1995) y otro realizado por el propio Buchberger para validar el modelo propuesto (Buchberger y Wells, 1996). Este último hace una importante distinción entre aparatos determinísticos (con un comportamiento idéntico cada vez que se utilizan) y aparatos aleatorios (con un comportamiento variable).

Tabla 4.1. Comparación del caudal aportado por un aparato doméstico.

	a (Media del caudal)	s (Desv. típica)	Fugas domésticas
Maddaus, 1987	11,0 l/min	4,5 l/min	0,03 l/min
Buchberger, 1996	8,78 l/min	6,28 l/min	< 0,47 l/min (*)
Ap. Determinísticos	16,95 l/min	2,10 l/min	
Ap. Aleatorios	6,65 l/min	5,25 l/min	
AWWA, 1993	20,67 l/min	16,48 l/min	0 (**)
Arregui, 1998	8,05 l/min	5,32 l/min	< 0,3 l/min (***)

(*) Tras el análisis estadístico de las mediciones se descartaron todos los consumos con un caudal inferior a 0,47 l/min o un volumen inferior a 0,02 l.

(**) Durante las mediciones realizadas por la AWWA, cuando se detectaron consumos anormalmente importantes a bajos caudales se procedió a la localización de fugas en la instalación.

(***) El valor de las fugas calculado por Arregui difiere mucho de unas viviendas a otras, pero en ningún caso rebasa los 0,3 l/min.

En dicha tabla también se comparan las conclusiones acerca de las fugas. Puesto que los cuatro estudios corresponden a mediciones de campo, todos incluyen las fugas en sus resultados. Sin embargo, la AWWA presenta resultados sesgados, pues en aquellas viviendas en las que se detectaron consumos excesivamente elevados a caudales bajos fueron revisadas para eliminar las posibles fugas que pudieran existir en las mismas. En cualquier caso, en cuanto a los datos adoptados para el comportamiento de los aparatos, se observa que los datos utilizados en los estudios consultados no difieren demasiado entre sí. Sin embargo, sí se notan diferencias significativas entre las mediciones nortamericanas y las realizadas en España.

4.3.2. Arizmendi (1991).

Además de las mediciones anteriores, también se ha buscado comparar el método propuesto con otras expresiones empíricas halladas en la bibliografía. Así, para el cálculo del caudal máximo (sobre todo en aplicaciones de diseño de conducciones) son bastante conocidas las expresiones debidas a Arizmendi (1991):

$$Q_p = K_p \frac{N \times D}{86400} \tag{4.4}$$

En esta expresión, Q_p es el caudal máximo para el diseño (caudal punta en l/s), N es la población total servida por la tubería, D es la dotación (en l/habitante.día) y K_p es un coeficiente corrector para obtener el caudal punta. La dotación se fija en torno a 250 l/habitante.día con un número de habitantes por vivienda entre 4 y 5 (quizás una cifra elevada hoy en día). Por otro lado K_p toma los valores mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 4.2. Valor del coeficiente de punta K_p según Arizmendi.

Número de viviendas servidas	K_p
Hasta 50	10
Entre 50 y 250	5
Entre 250 y 500	3,5
Entre 500 y 1500	2,5
Más de 1500	2

Este valor del coeficiente de punta K_p se puede ajustar a una función del número de viviendas servidas según la expresión:

$$K_p = \frac{68,6}{\sqrt{N}} + 0,39 \quad (4.5)$$

4.3.3. Lingereddy et al. (1998)

Por otra parte, Lingereddy et al (1998) proponen expresiones empíricas basadas en mediciones para el cálculo del caudal máximo doméstico. Así, para una tubería que sirva a N viviendas, dicho caudal máximo de diseño tendrá la forma genérica:

$$Q_p = A \cdot N + B \sqrt{N} + C \quad (4.6)$$

En esta expresión, los coeficientes A , B y C se obtienen a partir de datos de campo. En concreto, se aportan valores de dichos coeficientes propuestos por el Departamento de Agricultura de Iowa (para usos eminentemente rurales) y por el Departamento de Sanidad de Mississippi. En la tabla siguiente se presentan dichos valores:

Tabla 4.3. Valores típicos para el ajuste de la ecuación (4.6) (para Q_p expresado en l/min).

	A	B	C
Iowa (1)	1,1355	15,14	26,50
Iowa (2)	-1,0333	37,02	-1,93
Mississippi	0,9160	27,25	18,24

En este caso, la ecuación anterior es utilizada principalmente para diseño aunque los autores del estudio proponen un método para su utilización en el análisis de redes ramificadas.

Este trabajo supone el punto de partida para el método que se propondrá a continuación. Sin duda se trata de un trabajo riguroso y exhaustivo cuya única laguna está en limitar el trabajo a redes ramificadas y proponer para las partes malladas de la red un cálculo global de dicho caudal punta para, posteriormente, determinar un coeficiente corrector que será aplicado a los consumos de los nudos ubicados en dicha parte mallada de la red. El método que se desarrolla a continuación pretende extender la idea a cualquier tipo de red, independientemente de su topología.

4.3.4. Ayuntamiento de Valencia (1995)

El *Manual de Normalización de los Elementos de Saneamiento de la Ciudad de Valencia* de una expresión para la determinación del caudal punta para el diseño de colectores de aguas residuales. Esta expresión está basada, no obstante, en el consumo de agua potable. En este caso, la dotación queda expresada por unidad de superficie (D en l/s.ha), y no en función del número de habitantes. La expresión para el caudal punta (Q_p expresado en l/s) viene dada por:

$$Q_p = K_p \cdot D \cdot A \tag{4.7}$$

Dicho Manual adopta valores de la dotación basados en el tipo de uso del suelo y la superficie (en ha) ocupada para la determinación de los caudales de aguas residuales:

Tabla 4.4. Dotaciones de aguas residuales según el uso del suelo para Valencia.

Uso del suelo	D (l/s.ha)
Areas urbanas	1,2
Areas residenciales	0,6
Uso industrial	7,5 a 15

En este mismo manual, se aporta otra expresión para el cálculo del valor del coeficiente de punta (K_p) a partir del propio caudal medio:

$$K_p = 3,697 \cdot (D \cdot A)^{-0,07333} \tag{4.8}$$

5. Modelo estocástico para la determinación del caudal máximo de una línea.

Los métodos descritos basados en repeticiones hacen un tratamiento de la probabilidad de que una vivienda consuma o no como una variable aleatoria binomial. Este tratamiento es válido para el estudio de caudales en edificios con un número de viviendas que rara vez superará las 10. Sin embargo, en el caso de una red de distribución completa con un número de aparatos muy elevado y en general desconocido, la distribución aleatoria que mejor se ajustaría sería la distribución de Poisson que, como es bien sabido, es una función derivada de la binomial cuando la población (numero de aparatos en este caso) tiende a infinito y la probabilidad de que uno en concreto esté en marcha es muy pequeña.

Por otra parte, se busca un algoritmo matemático ágil y preciso que permita su integración en un Sistema de Información Geográfica y que permita aprovechar los datos de éste. Ninguno de los métodos propuestos (Arregui o Butler) dispone de una función explícita de la probabilidad de que se produzca un determinado caudal. Esto obliga a la obtención de dicha función por repeticiones sucesivas y aleatorias de un número suficientemente alto de simulaciones.

Ambos métodos comparten una característica: la necesidad de individualizar los consumos con el fin de caracterizarlos. Para ello, deben realizarse unas mediciones con aparatos que permitan medir caudales en intervalos de tiempo muy cortos (en torno a los 10 segundos) y en una muestra amplia del conjunto de las viviendas.

En cuanto a los estudios empíricos, todos tienen en común el carácter particular, es decir, existen diferencias entre ellos debidas a la localización geográfica del abastecimiento estudiado. Su utilización pasaría por realizar estudios previos similares cuya vigencia espacial o temporal está muy acotada.

Por todo ello, para realizar la asignación de cargas en un modelo de detalle se propone un método estadístico que determina la distribución de las probabilidades de que se produzca un caudal en una línea. El método lo plantean por primera vez Buchberger y Wu (1995) utilizando como datos de partida el consumo medio facturado junto con el conocimiento de los aparatos que forman parte de una vivienda media. A partir de estos datos, desarrollan un modelo estocástico basado en la teoría de colas para determinar una función que proporcione la probabilidad de que un determinado caudal no sea superado en una determinada conducción. A partir de esta función, es posible obtener un caudal *punta* de diseño de tal forma que la probabilidad de que dicho caudal no sea excedido no supere un cierto valor.

Este planteamiento es bastante habitual en otros campos de la Hidráulica, como la prevención de avenidas o la determinación del caudal de diseño en colectores de evacuación de aguas pluviales. Es equivalente a definir como riesgo la probabilidad de que

dicho caudal se supere durante un cierto período de tiempo y calcular las conducciones basándose en una cierta fiabilidad hidráulica.

El proceso de consumo de agua sería el siguiente: un usuario decide que va a utilizar un aparato, lo pone en marcha durante un cierto tiempo y el aparato aporta un cierto caudal durante todo el tiempo que está en marcha (ver Figura 4.11). Las condiciones de este proceso aproximan bastante a las de un proceso de crecimiento de una población. En esta analogía, la población es el número de aparatos que están en marcha en un determinado instante y el nacimiento se produce cuando un usuario demanda un servicio al aparato. La vida de un aparato será el tiempo medio de servicio del mismo y cuando el usuario finaliza el uso del aparato, éste último se cerrará, lo que constituiría su muerte.

Antes de entrar en la formulación del método de determinación de los caudales, conviene recordar las nociones estadísticas básicas de la teoría de líneas de espera y los procesos de crecimiento de poblaciones que se van a utilizar.

5.1. Aproximación a la teoría de líneas de espera.

Sea un conjunto de objetos con una característica común que se pueden encontrar en una serie de estados posibles. Un *proceso markoviano* es aquel en que cada uno de los objetos del conjunto debe estar necesariamente en uno de los estados posibles y en el cual la probabilidad de que un objeto cambie de un estado a otro durante un intervalo de tiempo depende sólo del estado inicial y el estado final.

Así por ejemplo, en el caso del consumo de agua en una vivienda, el conjunto de objetos será el número de aparatos que pueden suministrar agua (grifos, duchas, cisternas, etc.) y los estados posibles serán activo (el aparato está suministrando agua) e inactivo. El proceso que estudie la activación o no de un aparato es un proceso markoviano.

El hecho de conocer si un aparato está activo o no, por sí solo, no aporta demasiada información. Sería necesario conocer cuántos aparatos están en marcha en un determinado momento. De esta manera se podrá comparar el número de aparatos activos con el número de individuos de una *población* en la cual la activación de un nuevo aparato se puede asimilar a un *nacimiento* mientras que el cierre del mismo será equiparable a su *muerte*. En este caso, el proceso consiste en un proceso de crecimiento de población donde sólo existen dos estados posibles: vivo o muerto (aparato activo o inactivo). Para que este proceso de crecimiento de población sea markoviano, la única restricción será que la probabilidad de que un aparato se active o se detenga no dependa de cuántas veces se ha activado o desactivado con anterioridad. A continuación se describe la teoría que estudia los procesos de crecimiento de población.

Si se admite que tanto la probabilidad de que en un determinado instante se produzca un nacimiento como la probabilidad de que se produzca una muerte son independientes del número de aparatos en marcha en ese instante, el proceso se convierte en un proceso poissoniano de nacimiento-muerte. Esto permite, por ejemplo, que se pueda

activar un aparato incluso si no había ninguno en marcha, lo cual es habitual. Este tipo de procesos son los habituales en la teoría de colas. En un proceso poissoniano de nacimiento-muerte tanto el tiempo medio entre nacimientos (llegadas de usuarios) como el tiempo medio entre muertes (tiempo de servicio de un aparato) siguen sendas distribuciones exponenciales. Además, la distribución de los patrones de nacimiento (llegada de usuarios) y de muerte (tiempo medio de uso de los aparatos) permanecen constantes independientemente del tamaño de la población (número de aparatos que haya en marcha en ese momento).

Si se denomina $N(t)$ a la población o número de aparatos que estarían en uso en un determinado instante, la probabilidad de que el tamaño de esta población sea exactamente n será:

$$P_n(t) = P[N(t) = n] \quad ; \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.9)$$

El tamaño de dicha población en un instante posterior $t + Dt$ vendrá dado por los cambios (nacimientos o muertes) que tengan lugar durante el período Dt :

$$P_n(t + \Delta t) = \underbrace{P_n(t)}_{\text{Sin cambios}} + \underbrace{I \cdot \Delta t \cdot P_{n-1}(t)}_{\text{Un nacimiento}} - \underbrace{(I + nm) \cdot \Delta t \cdot P_n(t)}_{\text{Un nacimiento y una muerte}} + \underbrace{(n+1)m \Delta t \cdot P_{n+1}(t)}_{\text{Una muerte}} + o(\Delta t) \quad (4.10)$$

En la expresión anterior, la probabilidad de que en un instante la población sea n vendrá dada por la suma de probabilidades de las distintas opciones:

- En el instante t la población era n y en el intervalo Dt no ha habido ni nacimientos ni muertes.
- En el instante t la población era $n-1$ y en el intervalo Dt sólo se ha producido un nacimiento.
- En el instante t la población era n y en el intervalo Dt se ha producido un nacimiento y una muerte.
- En el instante t la población era $n+1$ y en el intervalo Dt sólo se ha producido una muerte.
- Cualquier otra opción que lleva a una población de n individuos en el instante $t + Dt$. Esta opción será poco probable para intervalos de tiempo pequeños:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} o(\Delta t) = 0 \quad (4.11)$$

En la ecuación (4.10) I es la tasa de nacimientos o llegadas y m la tasa de muertes o, lo que es lo mismo, $1/m$ es la duración media de uso de cada aparato.

Las ecuaciones de Kolmogorov vienen dadas por la variación de la población cuando el intervalo considerado es infinitesimal, es decir, por la derivada con respecto al tiempo de $P_n(t)$:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_n(t + \Delta t) - P_n(t)}{\Delta t} = \frac{dP_n(t)}{dt} \quad (4.12)$$

Puesto que en este tipo de procesos los patrones de llegada (nacimiento) y finalización del servicio (muerte) permanecen constantes, pasado un tiempo se alcanzará un equilibrio. Así, cuando se alcance el equilibrio se tendrá la denominada *probabilidad de estado estable*:

$$P_n = \lim_{t \rightarrow \infty} P_n(t) \quad ; \quad \frac{dP_n}{dt} = 0 \quad (4.13)$$

Si se alcanza el equilibrio, la ecuación (4.12) debe anularse, llegándose a una ecuación de balances:

$$\begin{aligned} -I \cdot P_0 + mP_1 &= 0 \quad ; n = 0 \\ I \cdot P_{n-1} - (I + nm) \cdot P_n + (n+1)mP_{n+1} &= 0 \quad ; n > 0 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Admitiendo que la población puede ser ilimitada, la solución a esta ecuación viene dada por:

$$P_n = P_0 \left(\frac{I}{m} \right)^n \frac{1}{n!} \quad (4.15)$$

En esta última expresión, la probabilidad de que la población carezca de individuos (P_0) se calcula a partir de la imposición de que la suma de las probabilidades sea la unidad. Así,

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{I}{m} \right)^i \frac{1}{i!}} = \frac{1}{\sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{I}{m} \right)^i \frac{1}{i!}} \quad (4.16)$$

Es posible definir además el *factor de utilización* como el número medio de llegadas de usuarios dividido por el tiempo medio de servicio:

$$r = \frac{I}{m} \quad (4.17)$$

Con esta definición y sustituyendo el valor de P_0 se obtiene la probabilidad de que la población quede estabilizada en θ individuos:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^{\infty} r^i \frac{1}{i!}} = e^{-r} \quad (4.18)$$

Se observa que esto es posible si y sólo si el factor de utilización es menor de 1. Con esto, la expresión (4.15) se convierte en la función de probabilidad de una variable aleatoria de Poisson de parámetro r :

$$P_n = \frac{r^n e^{-r}}{n!} \quad (4.19)$$

Esta será por tanto la probabilidad de que una población se estabilice en n individuos. En el caso de la teoría de líneas de espera, esto equivale a que haya n aparatos ocupados cuando no hay límite para el número total de aparatos disponibles.

La conclusión es que si se tiene una línea de espera con patrón de llegadas distribuido exponencialmente y tiempos de servicio distribuidos igualmente de forma exponencial, el proceso que representa el crecimiento de la población, entendiendo por ésta el número de aparatos en servicio, tiene una distribución de Poisson de parámetro r . Si el número de aparatos se puede considerar ilimitado, estamos ante un proceso poissoniano M/M/ ∞ .

5.2. Modelo de Poisson para el caudal en una tubería.

El modelo que se ha elegido para determinar los caudales punta en una tubería está basado en un estudio realizado por Steven Buchberger y Lin Wu en 1995. En dicho estudio, los autores proponen un modelo estocástico para modelar el consumo instantáneo en una vivienda basándose en la teoría de colas descrita anteriormente. Posteriormente, generalizan dicho modelo para una tubería que abastece a un determinado número de viviendas, proporcionando un método eficaz de determinar los caudales punta para el estudio en detalle del comportamiento de una red en escenarios en los que el caudal sea máximo.

La aplicación que se hace en dicho trabajo es la determinación del tipo de flujo (laminar, turbulento o de transición) en una línea terminal de una red de distribución. Este dato se utiliza posteriormente para estudiar el fenómeno de difusión molecular en las paredes de la tubería para la aplicación de los modelos de calidad del agua. Sin embargo, el método queda incompleto, pues en las conclusiones se determinan las principales limitaciones del mismo:

- El modelo propuesto no está contrastado mediante mediciones.

- Se aplica únicamente a una tubería que suministra agua simultáneamente a varias viviendas.
- Sólo considera consumos domiciliarios.

El estudio parte de la caracterización de un consumo doméstico en una vivienda, mediante tres variables: intensidad de consumo (o caudal), duración del mismo y frecuencia de uso del recurso. Durante el desarrollo de la Tesis se ha contrastado este método con distintas mediciones efectuadas en España, los Estados Unidos y el Reino Unido. Además, se ha extendido el método a redes completas, y no exclusivamente a tuberías aisladas.

5.3. Distribución del caudal consumido en una vivienda.

Considérese el consumo en una vivienda como el evento en el que uno o varios de los aparatos se pone en marcha con un caudal constante y una duración determinada. Dicho de otra forma, un consumo se puede representar como un pulso rectangular con una intensidad aleatoria (que corresponde al caudal proporcionado por un aparato) y una duración también aleatoria (ver Figura 4.11). Con esta representación de un consumo, entra dentro de lo posible que dos o más aparatos estén en marcha en un determinado momento.

En este proceso de consumo ya aparecen las tres variables aleatorias:

- **Frecuencia.** La frecuencia, patrón de llegada de usuarios, será la probabilidad de que un usuario decida consumir agua en un determinado instante. Este proceso aleatorio es asimilado a una variable aleatoria de distribución exponencial y parámetro λ . El tiempo medio entre llegadas de usuarios será $1/\lambda$.
- **Duración.** El tiempo que el usuario mantiene en marcha el aparato elegido para consumir. En este caso, la hipótesis adoptada es la de que la duración del consumo sigue una distribución exponencial, con una duración media $1/\mu$.
- **Intensidad.** La intensidad es el caudal aportado por un aparato doméstico durante un uso concreto. Este caudal seguirá una distribución aleatoria genérica, aunque lo más sencillo es asumir que un aparato da un caudal que sigue una distribución normal.

Las condiciones del consumo se aproximan bastante a un proceso cliente-servidor como el descrito en el punto anterior, donde el usuario es el cliente que demanda un servicio y el aparato es el servidor que proporciona dicho servicio, empleando un tiempo medio determinado para atender al cliente. En el ámbito del estudio, es lógico pensar que un cliente que se propone demandar un servicio (un usuario decide utilizar un grifo), si el servidor está ocupado (si el grifo lo está) no haga cola, sino que regrese un poco más tarde. Así, se asumirá que el número de aparatos es ilimitado, o lo que es lo mismo, lo suficientemente grande como para que no se formen colas. Por tanto se dan las condiciones para considerar este proceso como un proceso poissoniano del tipo $M/M/\infty$.

Si se llama N_j al número de aparatos puestos en marcha en una vivienda j , N_j sigue la distribución de una variable aleatoria de Poisson con parámetro r_j , es decir, es $PS(r_j)$. La probabilidad de que haya n aparatos funcionando simultáneamente en una vivienda será, según (4.19):

$$P_j(n) = P(N_j = n) = \frac{r_j^n e^{-r_j}}{n!} \quad (4.20)$$

Una vez que tenemos determinada la probabilidad de que n aparatos estén en funcionamiento, el siguiente paso estará encaminado a determinar la función de distribución del caudal consumido en una vivienda.

Sea Y_i el caudal aportado por el aparato i . Y_i tendrá una determinada distribución continua de media a_i y varianza s_i^2 . Si $Y(n)$ es la suma de los caudales aportados por n aparatos que demandan agua de la red simultáneamente:

$$Y(n) = \sum_{i=0}^n Y_i \quad (4.21)$$

En los cálculos que siguen a continuación, no se tiene en cuenta el efecto de las fugas en esta distribución de caudales. Por tanto, todo el caudal demandado en una vivienda se deberá única y exclusivamente al suministrado por los aparatos que estén en marcha en su interior. Es decir, si no hay aparatos en marcha, no se producirá caudal:

$$Y(0) = Y_0 = 0 \Rightarrow Y(n) = \sum_{i=1}^n Y_i \quad (4.22)$$

Además, si se admite que todos los aparatos tienen la misma distribución de caudales, es decir, que la media $a_i = a$ y la varianza $s_i^2 = s^2$, la distribución de la variable $Y(n)$ tendrá una media na y una varianza ns^2 . La función de distribución acumulativa para el caudal aportado por n aparatos funcionando simultáneamente, $Y(n)$, será:

$$G(q, n) = P[Y(n) \leq q] \quad (4.23)$$

A continuación se va a estudiar el caso en el que se tiene una rama j que abastece a una única vivienda. El caudal en esa rama se representará con la variable Q_j . Para realizar este cálculo ha de tenerse en cuenta el hecho de que el caudal aportado por n aparatos es una variable aleatoria con una distribución determinada $G(q, n)$. Se admite que esta distribución es independiente de la vivienda, pues todos los aparatos se comportan igual. Por otra parte, el propio número de aparatos puestos en marcha en un determinado momento también es una variable aleatoria con distribución de Poisson de parámetro r_j , tal y como se vio en (4.20). El factor de utilización en la vivienda j será, por tanto, r_j . En este

último caso, la variable N_j sí dependerá de la vivienda. Así, el caudal Q_j será igualmente una variable aleatoria:

$$P_{j,n} = P[N_j = n]$$

$$Q_j = \sum_{i=0}^{\infty} Y_i \quad \text{con } n \geq 0 \quad (4.24)$$

siendo Y_i un variable aleatoria independiente. Por tanto, Q_j tendrá una distribución compuesta de Poisson. Los momentos de esta variable serán:

- Valor medio de Q_j :

$$E(Q_j) = \sum_{i=0}^{\infty} E[Y(i)] P_{j,i} = \sum_{i=0}^{\infty} i a_j \cdot \frac{r_j^i e^{-r_j}}{i!} = r_j a_j \sum_{i=1}^{\infty} \frac{r_j^{i-1} e^{-r_j}}{(i-1)!} = r_j a_j \sum_{i=0}^{\infty} \frac{r_j^i e^{-r_j}}{i!} = r_j a_j \quad (4.25)$$

Para el supuesto de que todos los aparatos se comportan igual se llega a:

$$E(Q_j) = r_j a \quad (4.26)$$

En la expresión anterior, r_j es el factor de utilización de la vivienda j , es decir, el número medio de llegadas de usuarios dividido del tiempo medio de servicio, y a es el caudal medio por aparato, entendiendo que todos los aparatos se comportaran igual.

- Varianza de Q_j :

$$\text{var}(Q_j) = E(Q_j^2) - E^2(Q_j) = [\rho_j (\alpha_j^2 + \sigma_j^2) + \rho_j^2 \alpha_j^2] - [\rho_j^2 \alpha_j^2] = \rho_j (\alpha_j^2 + \sigma_j^2) \quad (4.27)$$

- Función de distribución acumulada para Q_j :

$$F(q) = P(Q_j \leq q) = \sum_{i=0}^{\infty} P[Y(i) \leq q] P_{j,i} = \sum_{i=0}^{\infty} G(q, i) \cdot \frac{r_j^i e^{-r_j}}{i!} \quad (4.28)$$

Obsérvese que tanto en la media como en la función de distribución se extiende el sumatorio de probabilidades a la posibilidad de que el número de aparatos fuese ilimitado.

5.4. Distribución del caudal en una conducción que abastece a varias viviendas simultáneamente.

Supóngase ahora que se pretende estudiar el caudal en una rama que abastece a varias viviendas simultáneamente, en lugar de abastecer a una sola vivienda. Aparece una

nueva variable a tener en cuenta, el número de viviendas abastecidas, m . Esto implicaría que el caudal acumulado en dicha rama, Q_m^* sería la suma de los caudales aportados por cada una de las viviendas:

$$Q_m^* = \sum_{j=1}^m Q_j \quad (4.29)$$

Estos cálculos se complican rápidamente conforme aumenta el número de viviendas a considerar. Sin embargo, el cálculo se simplifica ligeramente si el uso que se hace del recurso es uniforme, es decir, en el supuesto de que sólo se satisfagan consumos domésticos. En este caso, es posible admitir que las m viviendas son independientes entre sí y que todas tienen un comportamiento como el descrito hasta ahora. Así, puesto que la distribución de Poisson tiene la propiedad aditiva, si se define N_m^* como una variable que recoge el número total de aparatos activos para las m viviendas abastecidas por la tubería objeto de estudio (número de viviendas que reciben agua, directa o indirectamente de dicha tubería), se tendrá:

$$N_m^* = \sum_{j=1}^m N_j \quad (4.30)$$

De lo visto para una sola vivienda, $N_j = \text{PS}(r_j)$, siendo el factor de utilización de la vivienda j . Si se considera que la tasa de llegadas de usuarios en una vivienda I_j es constante a lo largo del tiempo para un determinado aparato, el proceso será un proceso homogéneo. Si por el contrario dicha tasa es dependiente de la hora del día en la cual se esté realizando el estudio, el proceso es no homogéneo. En cualquier caso, el tiempo medio de servicio sí se puede considerar constante a lo largo del tiempo.

Se estudia en primer lugar el proceso homogéneo. Como suma de variables de Poisson, la propia N_m^* también seguirá una distribución de Poisson con parámetro:

$$r_m^* = \sum_{j=1}^m r_j \quad (4.31)$$

Además, según la ecuación (4.19), la probabilidad de que haya n aparatos en marcha en el conjunto de las m viviendas será:

$$P(N_m^* = n) = P_m^*(n) = \frac{(r_m^*)^n e^{-r_m^*}}{n!} \quad (4.32)$$

En la ecuación anterior es evidente que para $m = 1$ quedaría:

$$\rho_1^* \equiv \rho_j \quad ; \quad P_1^*(n) \equiv P_j(n) \quad (4.33)$$

La tasa media de llegadas o de puesta en marcha de aparatos en el total de las m viviendas sería de igual forma:

$$I_m^* = \sum_{j=1}^m I_j \quad (4.34)$$

Es posible admitir que los aparatos de todas las viviendas tienen un comportamiento similar (duración e intensidad del consumo según una misma distribución). Sin embargo, es un hecho que las dotaciones en todas las viviendas no son iguales y, de hecho, las facturaciones así lo corroboran. Por tanto, en el caso de una conducción sirviendo a m viviendas, los caudales de servicio no se suman, sino que han de ponderarse mediante un coeficiente de ponderación r_j :

$$m_m^* = \sum_{j=1}^m r_j m_j \quad (4.35)$$

Obviamente, la suma de los coeficientes de ponderación ha de ser 1:

$$\sum_{j=1}^m r_j = 1$$

Si se define un coeficiente global de utilización para las m viviendas de tal manera que:

$$r_m^* = \frac{I_m^*}{m_m^*} \quad (4.36)$$

Igualando (4.31) y (4.36) se comprueba que

$$r_j = \frac{r_j}{r_m^*} \quad (4.37)$$

La interpretación de la expresión anterior es que el coeficiente de ponderación r_j es igual al cociente entre el número medio de aparatos activos en la vivienda j y el número medio de aparatos activos en el bloque formado por las m viviendas situadas aguas abajo de la tubería considerada.

Supongamos ahora que Y_j es la variable aleatoria que representa el caudal de cualquier aparato en la vivienda j . Como ya se ha comentado, se asume que Y_j es

independiente del tipo y número de aparatos. Además se distribuye aleatoriamente con media \mathbf{a}_j y varianza \mathbf{s}_j^2 . Ahora, Y_m^* será la variable aleatoria que recoge el consumo ponderado de un aparato ubicado en cualquiera de las m viviendas servidas por la tubería:

$$Y_m^* = \sum_{j=1}^m r_j Y_j \quad (4.38)$$

La media de Y_m^* será, admitiendo que todos los aparatos se comportan igual:

$$E[Y_m^*] = \sum_{j=1}^m r_j \mathbf{a}_j = \mathbf{a} \quad (4.39)$$

Y si finalmente se define $Y_m^*(i)$ el consumo acumulado por i aparatos suministrando agua de manera simultánea en el conjunto de las m viviendas se tendrá:

$$Y_m^*(i) = \sum_{j=0}^i Y_m^* \quad (4.40)$$

donde $Y_m^*(0) = (Y_m^*)_0 = 0$ puesto que si no hay aparato no hay consumo. La expresión (4.40) ha de interpretarse como la suma de i caudales dados por otras tantas variables aleatorias.

Sea $G_m^*(q, i)$ la función de distribución acumulada para la variable aleatoria $Y_m^*(i)$:

$$G_m^*(q, i) = P[Y_m^*(i) \leq q] \quad (4.41)$$

La principal diferencia entre $Y_m^*(i)$ y Q_m^* ambos es que $Y_m^*(i)$ se corresponde con el caudal acumulado cuando hay exactamente i aparatos activos, mientras que para el cálculo de Q_m^* el número de aparatos activos viene representado por la variable aleatoria N_m^* . Pues bien, este caudal Q_m^* vendrá dado por:

$$Q_m^* = \sum_{j=1}^m Q_j = \sum_{i=0}^{N_m^*} Y_m^* \quad (4.42)$$

La ecuación (4.42) se puede interpretar de dos formas distintas:

$$Q_m^* = \sum_{j=1}^m Q_j$$

Q_m^* es la suma de los caudales aleatorios proporcionados por cada una de las m viviendas situadas aguas abajo. En este caso m es constante.

$Q_m^* = \sum_{i=0}^{N_m^*} Y_m^* = Y_m^*(N_m^*)$ Q_m^* es la suma de N_m^* caudales aleatorios aportados por un número aleatorio N_m^* de aparatos.

Puesto que estamos asumiendo que todas las viviendas actúan de manera independiente entre sí, la media y la varianza de Q_m^* serán la suma de las m medias y de las m varianzas, respectivamente:

$$E(Q_m^*) = E\left[\sum_{j=1}^m Q_j\right] = \sum_{j=1}^m E(Q_j) = \sum_{j=1}^m \mathbf{r}_j \mathbf{a}_j \quad (4.43)$$

O bien,

$$E(Q_m^*) = E\left[\sum_{i=0}^{N_m^*} Y_m^*\right] = E(Y_m^*)E(N_m^*) = \left(\sum_{j=1}^m r_j \mathbf{a}_j\right) \mathbf{r}_m^* = \sum_{j=1}^m (r_j \cdot \mathbf{r}_m^*) \mathbf{a}_j = \sum_{j=1}^m \mathbf{r}_j \mathbf{a}_j \quad (4.44)$$

En esta última, a partir de $\mathbf{r}_m^* = \mathbf{r}_j / r_j$ queda el mismo valor que en (4.43), tal y como era de esperar.

En cuanto a la varianza:

$$\text{var}(Q_m^*) = \text{var}\left[\sum_{j=1}^m Q_j\right] = \sum_{j=1}^m \text{var}(Q_j) = \sum_{j=1}^m \mathbf{r}_j (\mathbf{a}_j^2 + \mathbf{s}_j^2) \quad (4.45)$$

O análogamente,

$$\text{var}(Q_m^*) = \text{var}\left[\sum_{i=0}^{N_m^*} Y_m^*\right] = \text{var}(Y_m^*)E(K_m^*) = \left[\sum_{j=1}^m r_j (\alpha_j^2 + \sigma_j^2)\right] \rho_m^* = \sum_{j=1}^m \rho_j (\alpha_j^2 + \sigma_j^2) \quad (4.46)$$

Puesto que la expresión de la función de distribución acumulada obtenida a partir del planteamiento empleado para las expresiones (4.43) y (4.45) es difícil y costosa de calcular, se utilizará el segundo planteamiento:

$$F_m^*(q) = P(Q_m^* \leq q) = \sum_{i=0}^n P(N_m^* = i) P[Y_m^*(i) \leq q] = \sum_{i=0}^n P_m^*(i) G_m^*(q, i) \quad (4.47)$$

En este caso, $q \geq 0$ y n será el número total de aparatos en el conjunto de las m viviendas.

5.5. Modelo propuesto para la estimación de caudales máximos.

Para el cálculo de los caudales máximos en las líneas se ha utilizado el modelo anterior con algunas hipótesis adicionales. El problema que se pretende resolver corresponde al caso de una tubería alimentando varias residencias considerando que sus consumos son independientes no homogéneos, es decir, patrones de llegada de clientes dependientes del instante de tiempo en que se calcule el caudal. Aquí, se busca pues, calcular la *vulnerabilidad hidráulica* del sistema. El objetivo es determinar la probabilidad de que a lo largo de un intervalo de tiempo el caudal que circule por la conducción sea superior a uno dado.

Buchberger y Wu llegan a la conclusión de que todo lo desarrollado para pulso no homogéneo de Poisson sólo sirve para comprobar que, si en un intervalo de tiempo suficientemente grande se mantiene constante el número de aparatos puestos en marcha (lo que se ha llamado probabilidad de estado estable), las ecuaciones deducidas para el caso homogéneo son igualmente válidas para unos parámetros variables con el tiempo. Por tanto, para el caudal en una tubería que alimenta a m viviendas se tendrá:

$$E[Q_m^*(t)] = \sum_{j=1}^m r_j(t) a_j$$

$$\text{var}[Q_m^*(t)] = \sum_{j=1}^m r_j(t) (a_j^2 + s_j^2) \quad (4.48)$$

En la expresión (4.47), conforme aumenta el número de viviendas abastecidas aumentará también el número de aparatos, por lo que es posible considerar n prácticamente infinito en muchos de los casos. A efectos de cálculo, el límite se fijará mediante un criterio de convergencia, eliminando todos los términos a partir de un determinado valor de i para el cuál la probabilidad empieza a ser despreciable.

Por tanto, la función de distribución acumulada, es decir, la probabilidad de que en un instante t el caudal circulante por la tubería $Q_m^*(t)$ sea menor o igual que uno determinado q , vendrá dada por la expresión:

$$F_m^*(q, t) = P[Q_m^*(t) \leq q] = \sum_{i=0}^{\infty} G_m^*(q, i) P_m^*(i, t) \quad (4.49)$$

En esta última expresión, se tiene:

$G_m^*(q, i) = P[Y_m^*(i) \leq q]$	Probabilidad de que el caudal aportado por i aparatos en funcionamiento en un determinado instante t no supere el valor de referencia q .
$P_m^*(i, t) = P[N_m^*(t) = i]$	Probabilidad de que en un determinado instante t haya exactamente i aparatos en funcionamiento.

5.5.1. Distribución del caudal aportado por un aparato.

En la ecuación (4.49) se asumirá que todos los aparatos de todas las viviendas que demandan agua a la línea objeto de estudio tienen una misma distribución genérica de probabilidades. Esta hipótesis se ha ido aplicando en varios puntos a lo largo del desarrollo anterior. Así, se ha definido la probabilidad de que el caudal aportado por i aparatos que se encuentren en funcionamiento en un determinado instante no supere el valor de referencia q como:

$$G_m^*(q, i) = P[Y_m^*(i) \leq q]$$

Por los mismos motivos que en la ecuación (4.49) se ha extendido el sumatorio hasta infinito, se ha asumido que los aparatos de una vivienda tienen un comportamiento similar que sigue una distribución normal. En virtud del *Teorema Central del Límite*, la suma de n variables con idéntica distribución tiende a una variable normal cuando n tiende a ∞ . Esto será por tanto válido para un número de aparatos suficientemente grande. La distribución normal adoptada tendrá media \mathbf{a} y varianza \mathbf{s} , es decir, $Y_i = N(\mathbf{a}, \mathbf{s})$ para cualquier aparato. Así, a partir de las ecuaciones (4.39) y (4.40) y de las propiedades de la función normal se puede deducir que $Y_m^*(i) = N(i\mathbf{a}, i\mathbf{s})$.

Por tanto, la expresión de $G_m^*(q, i)$ quedará:

$$G_m^*(q, i) = P[X \leq x] \tag{4.50}$$

siendo X una variable aleatoria con distribución normal estándar: $X = N(0, 1)$ y

$$x = \frac{q - i\mathbf{a}}{i\mathbf{s}} \tag{4.51}$$

La utilización de la distribución normal a través de la función $G_m^*(q, i)$ presenta algunas singularidades que se han de resolver. La primera se da cuando se calcula para $i = 0$, es decir, en el supuesto de que no haya ningún aparato activo. En este caso, el caudal circulante por la conducción será nulo y, por tanto inferior a q . Por otra parte, la función normal admite el cálculo de probabilidades para caudales menores de cero, lo cuál también está fuera de toda lógica. La probabilidad de que el caudal circulante por una línea sea cero, cuando hay al menos un aparato en marcha ha de ser nula. Por ello se han adoptado estos valores lógicos para estos casos:

$$G_m^*(q, 0) = 1 \quad \text{para } q \geq 0$$

$$G_m^*(0, i) = 0 \quad \text{para } i \geq 1$$

El comportamiento de los aparatos se ha de determinar, por tanto, mediante mediciones y ajustando los caudales obtenidos a una variable normal.

5.5.2. Determinación del factor de utilización.

La probabilidad de que en un determinado instante haya exactamente i aparatos en funcionamiento viene dado por una variable que sigue una distribución de Poisson con tasa de llegadas igual al factor de utilización. Así, para un bloque de m viviendas:

$$P_m^*(i, t) = \frac{\rho_m^*(t)^i e^{-\rho_m^*(t)}}{i!} \quad \text{para } i > 0$$

$$P_m^*(i, t) = e^{-\rho_m^*(t)} \quad \text{para } i = 0 \quad (4.52)$$

Para calcular esta probabilidad será necesario conocer el factor de utilización del conjunto formado por las m viviendas en un determinado instante, $\mathbf{r}_m^*(t)$. Como se ha demostrado, para calcular este valor se necesita el factor de utilización de cada una de las viviendas en un instante determinado, $\mathbf{r}_j(t)$.

Además, el caudal medio para una vivienda según el método descrito viene dado por Q_j . Por otro lado, tal y como se muestra en la Figura 4.11, el consumo durante un cierto tiempo t de un aparato que aporta un caudal Q es un volumen. Conocidos el volumen facturado en una vivienda (obtenido de forma general a partir de las facturaciones) y el valor medio del caudal para un aparato cuando éste ha sido puesto en marcha, \mathbf{a} (obtenido por mediciones tal y como se comentó en el apartado anterior), es posible determinar el factor de utilización para cada vivienda:

$$E(Q_j) = \frac{\forall}{86400} = \mathbf{a} \mathbf{r}_j \Rightarrow \mathbf{r}_j = \frac{E(Q_j)}{\mathbf{a}} \quad (4.53)$$

En esta expresión, \forall representa el volumen facturado. El caudal medio $E(Q_j)$ se ha calculado suponiendo que corresponde a un uso continuo a lo largo de todo el día (86400 segundos). Si además se dispone de datos de mediciones que hayan podido ser realizadas en el interior de la red se puede determinar un patrón temporal de consumos (denominado *curva de modulación*, ver Figura 4.2), de tal forma que en un determinado instante t el factor de utilización de una vivienda j será:

$$\mathbf{r}_j(t) = c(t) \cdot \mathbf{r}_j \quad (4.54)$$

donde $c(t)$ es el coeficiente asignado a los consumos según la curva de modulación empleada en el instante t .

Por tanto, el factor de utilización conjunto de las m viviendas se calculará según la siguiente expresión:

$$\mathbf{r}_m^*(t) = c(t) \frac{\sum_{j=1}^m E(Q_j)}{\mathbf{a}} \quad (4.55)$$

La utilización de $c(t)$ sólo tiene sentido en el caso en el que se quieran estudiar escenarios extremos en función del tiempo. Es necesario recordar que se está determinando la probabilidad de que el caudal se estabilice (probabilidad de estado estable) en un intervalo de tiempo dado.

A modo de resumen, se concluye que mediante este método es posible determinar el caudal punta en una tubería que abastece a m viviendas con una cierta probabilidad si se conocen:

- $E(Q_j)$ caudal medio de consumo para la vivienda j . Se determinará a partir de las facturaciones.
- \mathbf{a}, \mathbf{s} media y varianza respectivamente del caudal entregado por un aparato.
- P probabilidad de que el caudal circulante por la tubería no supere el caudal punta calculado, q . Este último dato es un parámetro susceptible de ser modificado. Guarda relación con el riesgo que queramos asumir o la fiabilidad hidráulica que pretendamos tener en el sistema.

Estos son los parámetros con los que habrá de calibrarse el modelo.

5.5.3. Modificaciones realizadas para acelerar el cálculo.

En los apartados anteriores se ha presentado el método para realizar el cálculo del caudal punta en una determinada conducción. Sin embargo, las ecuaciones presentadas presentan ciertos problemas cuando se implementan en el SIG en forma de tiempos de cálculo excesivamente largos debido sobre todo al carácter iterativo de la mayor parte de los cálculos.

En la Figura 4.13 se muestra el diagrama de flujo de la rutina principal de cálculo. En él es posible observar dos bucles importantes. El primero corresponde a la iteración para comprobar que el caudal punta en la línea se corresponde con la probabilidad de ocurrencia P fijada previamente. Dado que no es posible un cálculo directo (es decir, a partir de la probabilidad calcular el caudal) es necesario obrar de manera inversa, determinando la probabilidad de ocurrencia de cada caudal y procediendo por iteraciones según el método de la bisección.

El segundo bucle corresponde al propio cálculo de la probabilidad, pues se trata, según lo visto en la ecuación (4.49), de una serie infinita que será necesario interrumpir cuando los nuevos términos que se añadan dejen de ser significativos.

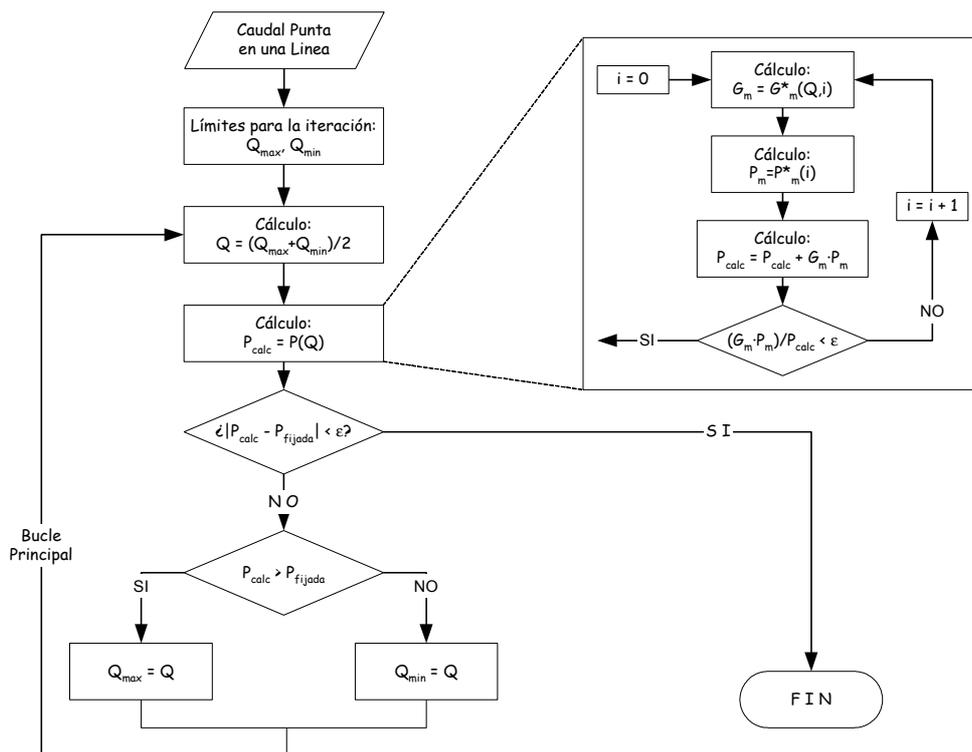


Figura 4.13. Diagrama de flujo para el cálculo del caudal punta en una línea.

Por último, la determinación de cada uno de los sumandos de la serie anterior también llevan aparejados unos cálculos complicados. Por un lado, la función de probabilidad normal no es inmediata de calcular:

$$G_m^*(q, i) = P[X \leq x] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-2t} dt \tag{4.56}$$

Esta integral se ha resuelto mediante el método del trapecio tomando una anchura del intervalo de integración de 0,01. Por otra parte, para evitar los límites infinitos de la integración, se ha partido del punto medio, teniendo en cuenta que $P[X \leq 0] = 0,5$. Además, se han despreciado los extremos de tal manera que $P[X \leq -4] \approx 0$ y $P[X \leq 4] \approx 1$.

La otra limitación importante está en el cálculo de la ecuación (4.52), dado que es necesario calcular un factorial que tiende rápidamente a infinito. Además, desde un punto de visto estrictamente informático, la factorial es una operación de números enteros y, si se adoptan enteros para su cálculo, se produciría un desbordamiento para números mayores de 13. Esto se ha resuelto teniendo en cuenta la propia definición de probabilidad de una variable de Poisson:

$$P_m^*(i + 1, t) = \frac{\rho_m^*(t)^{i+1} e^{-\rho_m^*(t)}}{(i + 1)!} = \frac{\rho_m^*(t)^i e^{-\rho_m^*(t)}}{i!} \cdot \frac{\rho_m^*(t)}{i + 1} = \frac{\rho_m^*(t)}{i + 1} \cdot P_m^*(i, t) \quad \text{para } i > 0 \tag{4.57}$$

Esta modificación evita tener que calcular P^*_m cada vez, sustituyendo dicho cálculo por un simple producto. Además, con esto se ha conseguido reducir el tiempo de cálculo y aumentar el número de viviendas para las cuales se puede realizar el cálculo. Téngase en cuenta que el método debe aplicarse a redes de abastecimiento completas.

5.6. Comparación de los resultados obtenidos con estudios previos.

5.6.1. Comparación con mediciones realizadas.

En la Figura 4.14 se comparan algunas curvas de consumos clasificados consultadas en la bibliografía con las estimaciones obtenidas tras la aplicación del método descrito en apartados anteriores. En concreto, se trata de la curvas obtenidas por Arregui (1998) a partir de las mediciones realizadas en Valencia, la publicada por Bowen et al. en el año 1993 correspondiente a un informe de la AWWA y la publicada más recientemente por Jankovic-Nišić et al. (2001) y correspondiente a medidas realizadas en Inglaterra.

Todas estas curvas se han acompañado de las correspondientes estimaciones utilizando el método propuesto utilizando como parámetros la media y la desviación típica de los caudales aportados por los aparatos, y tomando en cada caso las dotaciones diarias calculadas. Así, la curva designada como Estimación 1 corresponde a la curva de consumos clasificados que se obtendría con los datos medidos por Arregui en Valencia, mientras que la Estimación 2 corresponde a una curva análoga, pero en este caso obtenida a partir de los datos correspondientes al estudio publicado por Bowen et al. Por último, la estimación 3 se corresponde con la curva de caudales clasificados obtenida por Jankovic-Nišić et al. (2001).

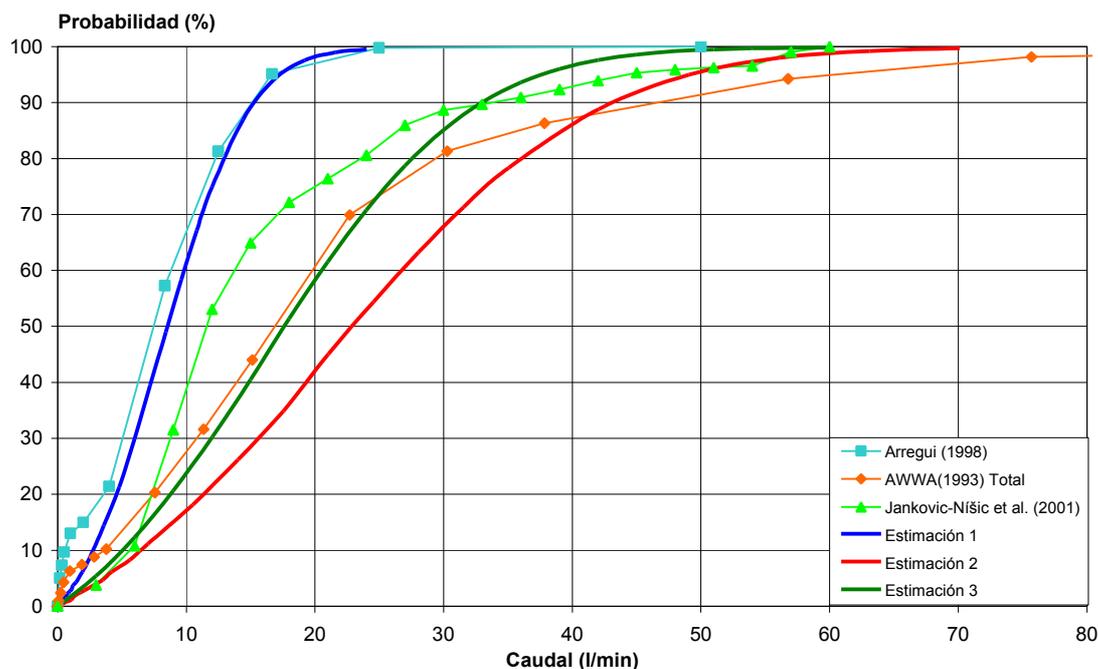


Figura 4.14. Comparación en la curva de demanda agregada de caudales para distintos estudios.

Por último, la Tabla 4.5 presenta un resumen de los parámetros utilizados en el ajuste de las estimaciones 1, 2 y 3. En dicha tabla se muestran los valores del caudal medio por aparato, la desviación típica obtenida a partir de los datos publicados y el consumo medio diario por vivienda.

Tabla 4.5. Datos utilizados para la comparación de resultados.

	a (Media del caudal)	s (Desv. Típica)	Dotación media
Arregui, 1998 Estimación 1	8,05 l/min	5,32 l/min	315,1 l/viv·día
AWWA, 1993 Estimación 2	20,67 l/min	16,48 l/min	454,9 l/viv·día
Jankovic-Nišić et al., 2001 Estimación 3	15,96 l/min	12,47 l/min	417,6 l/viv·día

En la figura anterior se puede comprobar que las seis gráficas son bastante similares. Aún así, se observan ciertas diferencias cuyas causas se describen a continuación.

En primer lugar existe una tendencia similar en las gráficas propuestas por Arregui y en el estudio realizado por la AWWA en la zona de caudales bajos, tendencia que no comparten las estimaciones realizadas. El motivo se deriva de la presencia de fugas en las mediciones que no se han contemplado en las estimaciones realizadas. Como ya se comentó anteriormente, la probabilidad de que exista caudal cuando no hay ningún aparato en marcha se ha fijado artificialmente en 0, mientras que la presencia de una fuga sí permitiría esta posibilidad. Así, por ejemplo, la probabilidad de que se produzca un caudal menor de 0,3 l/min es del 3% aproximadamente en el estudio de la AWWA, del 7% en la curva de Arregui y de menos del 1% en las curvas calculadas. La explicación está precisamente en las fugas. Las viviendas estudiadas por la AWWA tienen fugas de cuantía menor por el hecho de que las fugas mayores fueron subsanadas durante el estudio. El estudio de Arregui representaría una distribución típica de caudales en un edificio de Valencia que incluye las fugas, mientras que las estimaciones admiten que no existen fugas.

En la gráfica correspondiente al estudio de Jankovic-Nišić se ha realizado mediante análisis de consumos domiciliarios, exentos de fugas. Sin embargo, en este estudio la masa muestral no es representativa (5 viviendas en detalle y caudalímetros instalados en colectores de desagüe de aguas residuales). Por ello, la curva obtenida resulta más irregular y el ajuste no es del todo bueno. Sin embargo, este estudio es, de todos los analizados, el único enfocado al análisis de caudales en las redes y no a la identificación de patrones de consumo doméstico.

En la comparación entre los datos disponibles y las estimaciones realizadas, se observa un ajuste extraordinariamente bueno entre los datos deducidos de las mediciones realizadas por Arregui y las estimaciones realizadas a partir del análisis estadístico de dichas mediciones, salvo en el rango de caudales bajos por los motivos comentados anteriormente. En cuanto a la comparación con los datos del estudio realizado por al AWWA, se observa una mayor discrepancia. En el propio análisis de los resultados, la AWWA introduce algunos de los motivos. Por una parte, el análisis corresponde a viviendas de dos tipos: unifamiliares (con jardín) y multifamiliares (en edificio). Evidentemente, el caso de las viviendas unifamiliares introduce un elemento que no contempla el modelo, que es el uso de aspersores programados para funcionar automáticamente. Esto hace que se produzcan caudales grandes a unas horas determinadas y no regidos por comportamientos estadísticos. Además, aumenta el consumo diario.

Por último, el objetivo del estudio de la AWWA era demostrar el efecto del tamaño de la vivienda y su tipología en la curva de consumos acumulados de la misma. Este comportamiento no hace sino confirmar que sería necesario adaptar el modelo a este tipo de comportamientos incluyendo la posibilidad de incorporar las fugas o los consumos programados automáticamente.

En cualquier caso, ha de tenerse en cuenta que el método descrito para el cálculo de los caudales punta asume un número ilimitado de aparatos, por lo que su validez disminuye con el número de viviendas.

5.6.2. Comparación con otros métodos empíricos.

A continuación se contrastan las fórmulas empíricas descritas con anterioridad con resultados de la propuesta de cálculo de caudales punta. En este caso, la representación corresponde a la variación del coeficiente de punta con el número de viviendas. Además, se ha hecho la distinción entre las fórmulas utilizadas en Estados Unidos y las expresiones utilizadas en España. Esta distinción guarda relación con las conclusiones extraídas en el apartado anterior. Los patrones de consumo y las características de la viviendas en ambos países son muy diferentes por lo que compararlos entre sí no tiene demasiado sentido.

En la comparación realizada para los Estados Unidos (correspondiente a las fórmulas proporcionadas para los estados de Iowa y Mississippi, Figura 4.15) se observa un comportamiento parecido para un número bajo de viviendas. Sin embargo, conforme aumenta el número de éstas, el ajuste disminuye. Ha de tenerse en cuenta que corresponden a fórmulas para el diseño de instalaciones de abastecimiento en zonas rurales, muy dispersas y en general con pocas aglomeraciones. Por ello, para un número grande de viviendas el coeficiente de punta tiende a la unidad, lo cual se ha demostrado que no es cierto.

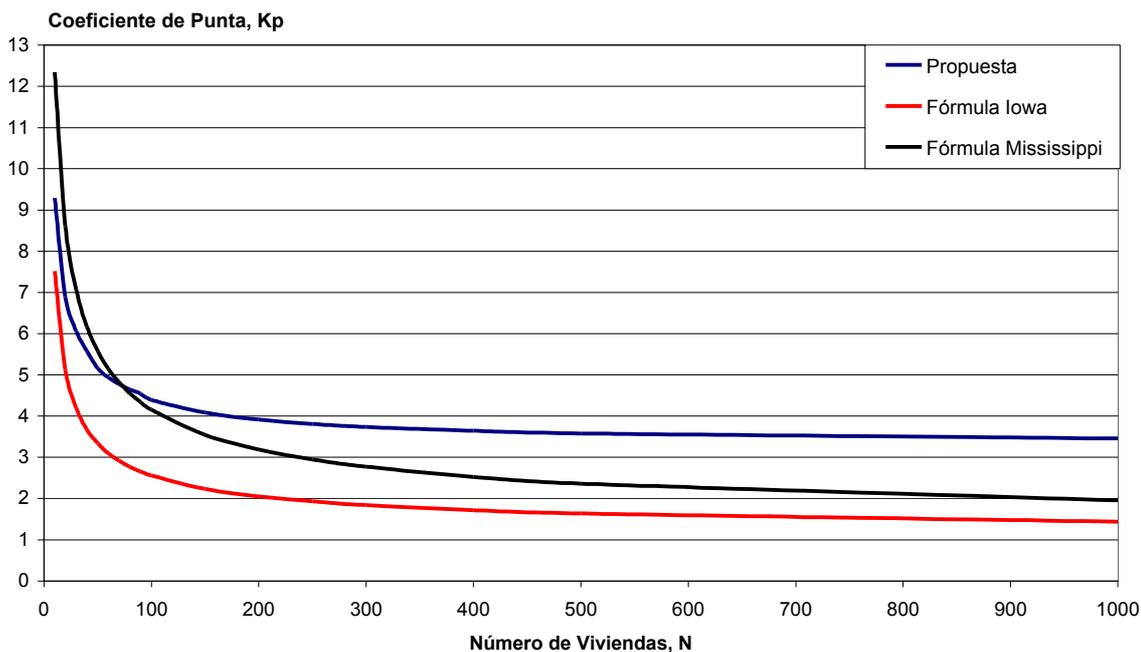


Figura 4.15. Comparación entre el método propuesto y otras fórmulas de determinación del coeficiente de punta propuestas en EE.UU.

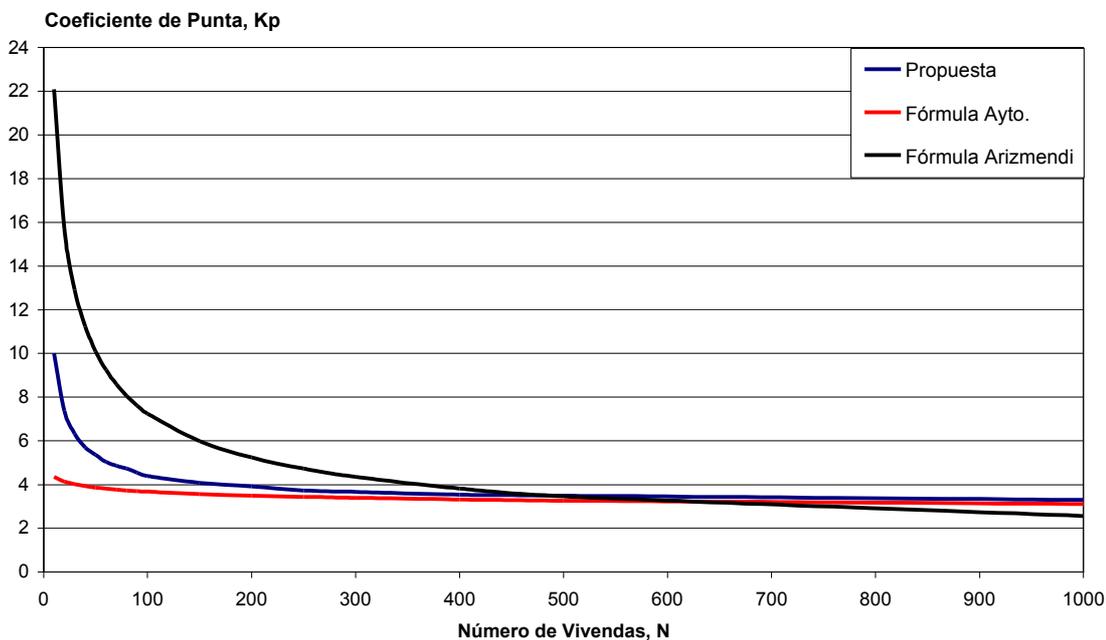


Figura 4.16. Comparación entre el método propuesto y otras fórmulas de determinación del coeficiente de punta utilizadas comúnmente en España.

En el caso de las comparaciones con expresiones utilizadas en España (Figura 4.16), al margen del coeficiente de punta de 2,4 propuesto en la NTE-IFA, se observa un mejor comportamiento para un número de viviendas alto. Esto se debe principalmente a

que se trata de expresiones recomendadas para aglomeraciones urbanas. De hecho, la fórmula propuesta por el Ayuntamiento de Valencia da valores del coeficiente de punta muy bajos para un número de viviendas pequeño, pero es prácticamente coincidente con la fórmula obtenida a partir de los valores propuestos por Arizmendi a partir de 100 viviendas.

En definitiva, el método propuesto se ajusta relativamente bien en el contexto de consumos urbanos y para un número de viviendas abastecidas suficientemente alto.

5.6.3. Conclusiones.

Como conclusión general de las comparaciones realizadas se tiene que el método propuesto para la determinación del caudal punta se ajusta bastante bien a las mediciones realizadas tanto en España como en Estados Unidos, lo cual es una buena medida de su bondad. Por otra parte, al compararlo con expresiones empíricas utilizadas en diversos lugares para el cálculo del caudal punta de diseño se observa un comportamiento general análogo.

La utilización de este método para la determinación del caudal punta esperado en un punto de la red requiere la elección de unos parámetros de ajuste (básicamente comportamiento de los aparatos) que representen bien la realidad. Además, hay una componente aleatoria que hace que el resultado obtenido dependa del nivel de seguridad (o de riesgo) que se desee asumir. En todos los ajustes realizados anteriormente se está trabajando con una probabilidad del 99,9% de que el caudal punta calculado no sea excedido.

6. Análisis de sensibilidad

En el apartado anterior se ha contrastado la validez que tiene el modelo estocástico de predicción de consumos extremos propuesto, si se ajustan bien los parámetros. En el método comentado hay una serie de datos que se obtienen directamente del SIG. Es el caso del número de viviendas abastecidas y el caudal medio demandado por éstas. Por otra parte, el funcionamiento de los aparatos no es posible conocerlo con certeza a menos que se realicen mediciones en todos y cada uno de los puntos de consumo.

Puesto que la utilización mayoritaria de un modelo es el apoyo a la toma de decisiones, los resultados obtenidos por el modelo deben incluir de alguna manera la incertidumbre de los mismos (Garrote, 2002).

A continuación se realiza un análisis de la sensibilidad que tienen los resultados del modelo ante la variación de cada uno de los parámetros. En ella se verá, por un lado, el comportamiento global de la función encargada de calcular el coeficiente de punta frente a cada uno de ellos. Por otro lado, se determinará cómo se transmite el error en cada uno de los datos al resultado del cálculo. Para ello se ha definido una función de sensibilidad que vendrá dada por la expresión:

$$S = \frac{\Delta y / y}{\Delta x / x} \quad (4.58)$$

En la expresión anterior y representa la variable calculada (en este caso, el coeficiente de punta) mientras que x será cada uno de los parámetros analizados.

Se estudiará el caso de una determinada línea del modelo a la que se le quiere aplicar un método de asignación de cargas en situaciones extremas basado en el modelo estocástico anterior. Los parámetros que se han de tener en cuenta serán:

- Número de viviendas servidas por la rama.
- Caudal medio de consumo para cada vivienda.
- Comportamiento medio de los aparatos de cada vivienda.
- Probabilidad de ocurrencia del suceso extremo que se pretende simular.

Para cada caso, se fijarán unas variables y se comprobará el efecto de las demás en los resultados del cálculo. Como caso de referencia se tomará el presentado por Maddaus (1987). Esto implica una dotación alta (1000 l/viv.día = 0,694 l/min), un comportamiento de los aparatos con caudal medio de 11 l/min y una varianza en dichos caudales de 4,5 l/min. Sobre esta base, se irán realizando las sucesivas modificaciones en los parámetros.

6.1. Efecto del número de viviendas en la curva de caudales acumulados.

En primer lugar se estudia el efecto que tiene el número de viviendas servidas por la línea en cuestión. Se mantendrá una dotación idéntica en todas las viviendas servidas, así como un comportamiento común de todos los aparatos de la vivienda. Como se verá más adelante, el número de viviendas servidas por una tubería, cuando ésta pertenece a una red mallada, no es inmediato de obtener. Por tanto, ha de tenerse en cuenta la posibilidad de cometer un error en el número de viviendas.

A continuación, se van a representar las curvas de demanda agregada para un número distinto de viviendas servidas, desde 1 hasta 2000. En la Figura 4.17 se muestra el resultado de la aplicación del cálculo de caudales extremos.

A parte del lógico desplazamiento de la curva hacia caudales mayores conforme aumenta el número de viviendas servidas, se pueden hacer algunas observaciones de interés:

- a) Para un número pequeño de viviendas servidas, la probabilidad de que el consumo sea muy bajo o nulo es alta. Así, para 1 sola vivienda, existe un 94% de probabilidad de que la vivienda no demande caudal. Este efecto ya se comentó en la comparación con las mediciones realizadas en Valencia (Arregui, 1998) y en los Estados Unidos (AWWA, 1993).

- b) A partir de 100 viviendas servidas, las probabilidades de no tener nada de caudal caen por debajo del 1%. Esto hace que a partir de 100 viviendas las curvas obtenidas sean prácticamente iguales, con la única salvedad de que se desplacen progresivamente hacia caudales mayores.
- c) En todos los casos, aparece una tendencia asintótica hacia la certeza (100% de probabilidad) sin alcanzarse ésta. Sin embargo, en las curvas para 100 viviendas o más se observa que a partir de una probabilidad en torno al 99% se reduce la sensibilidad de ésta al caudal, pues se necesitarán incrementos de caudal cada vez mayores para un mismo incremento de la probabilidad.

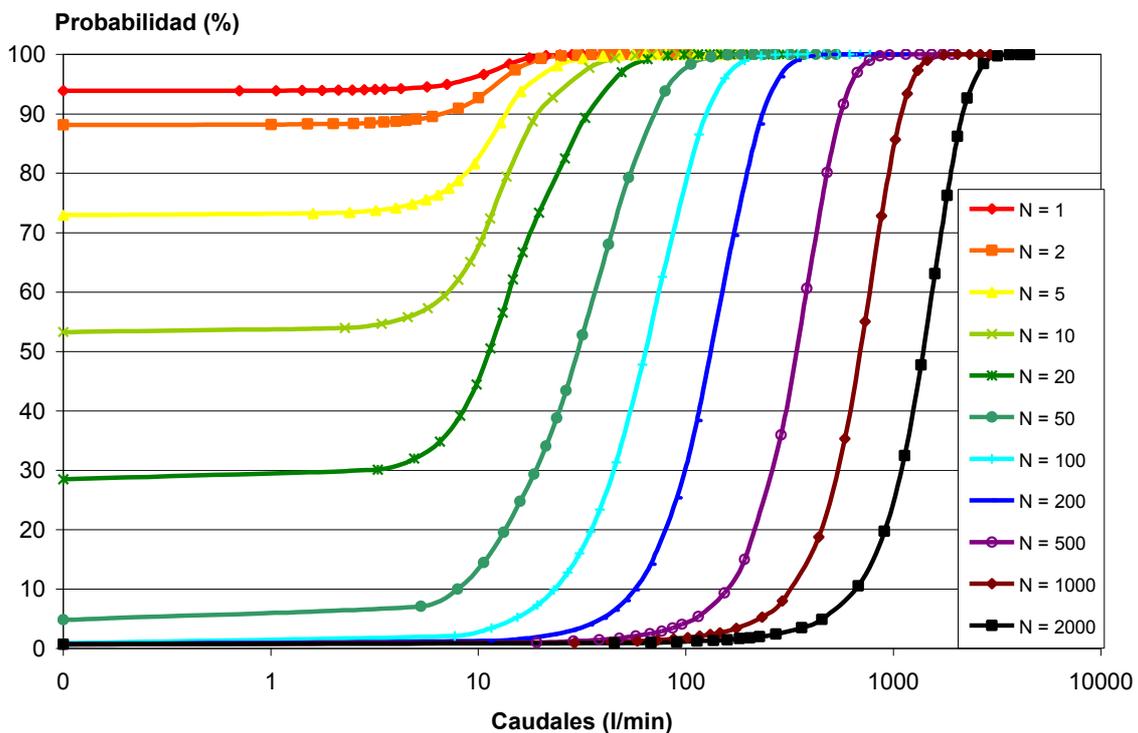


Figura 4.17. Probabilidad de no excedencia de caudales en función del número de viviendas abastecidas, N .

6.2. Efecto de la dotación media

Un parámetro muy importante es la dotación media por vivienda. Ya se observó que dotaciones grandes no sólo desplazan las curvas de demandas agregadas hacia mayores caudales, sino que también modifican su forma. Así pues, merece la pena observar cómo variará el caudal máximo que se puede esperar en una línea en función del caudal medio en esa misma línea. Este caso representa el problema más típico con el que habrá de enfrentarse el modelador de la red para un estudio de emergencias: los datos disponibles serán en muchas ocasiones las facturaciones de los abonados en esa línea y de ellas habrá de obtenerse el caudal máximo en la misma.

Se opta por una representación del *coeficiente de punta* en función del número de viviendas para distintas dotaciones medias de las mismas. Este coeficiente de punta se ha definido como:

$$K_p = \frac{Q_p}{E(Q)} \tag{4.59}$$

Puesto que Q se ha definido como una variable aleatoria, Q_p será el caudal máximo que se puede esperar en la conducción para que exista una cierta probabilidad P de que no se supere. Es decir, Q_p deberá satisfacer:

$$P(Q < Q_p) = P \tag{4.60}$$

En esta expresión, y a la vista de la Figura 4.17 se ha tomado $P = 0,999$, pues se trata de un valor suficientemente alto en términos de fiabilidad (menos del 0,1% de probabilidad de que se exceda el caudal). En la Figura 4.18 se observa el efecto que tienen tanto el número de viviendas como la dotación media de las mismas en el coeficiente de punta en una línea. Se observa que existe una tendencia asintótica hacia un coeficiente $K_p = 2$, valor que podría suponer el mínimo para poblaciones muy grandes.

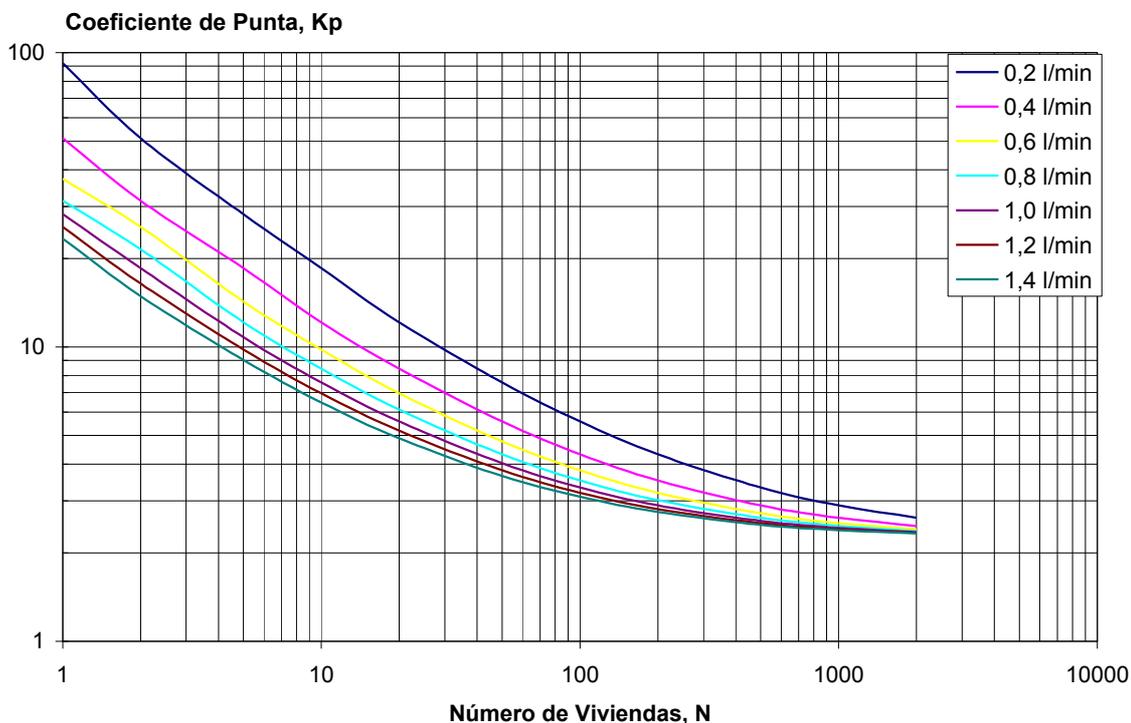


Figura 4.18. Variación del coeficiente de punta en función del número de viviendas.

En la Figura 4.19 se observa que para un número de viviendas pequeño, la dotación o caudal medio por vivienda es muy decisivo en el coeficiente de punta. Por el contrario,

para un número de viviendas mayor ($N > 100$ viviendas), este coeficiente apenas varía con el caudal medio por vivienda.

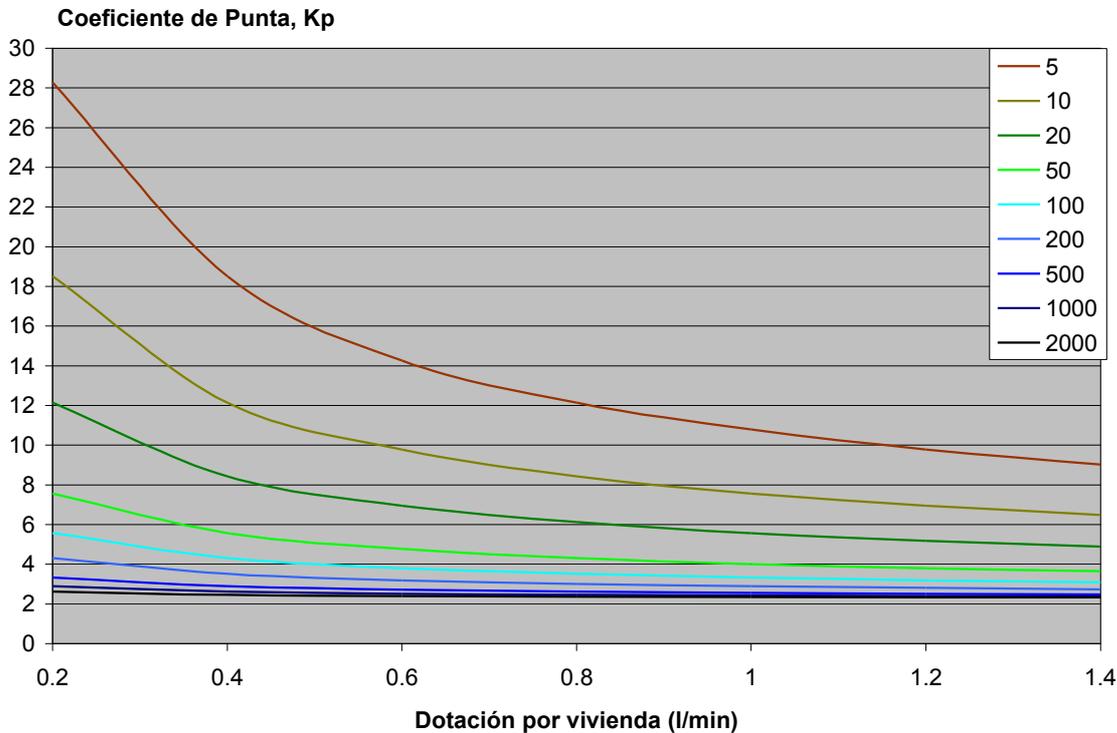


Figura 4.19. Variación del coeficiente de punta en función del caudal medio por vivienda.

De las figuras anteriores se deriva una conclusión especialmente importante para el desarrollo del método propuesto. Se puede observar que el coeficiente de punta para, por ejemplo, 10 viviendas con un caudal medio de 0,8 l/min es el mismo que el coeficiente de punta de 20 viviendas con un caudal medio por vivienda de 0,4 l/min. Es decir, el caudal punta depende exclusivamente del caudal medio de la tubería, y no del número de viviendas o el caudal medio por vivienda exclusivamente. Esto ya se podía intuir de la expresión (4.55), pues como se observa el factor de utilización para m viviendas es función de la suma de los caudales medios de las m viviendas, pero no depende para nada del número de viviendas implicadas. Esto sólo se cumplirá en el caso de que se asuma (como es el caso) que la distribución de los caudales por aparatos es igual en todas las viviendas.

Para completar este estudio se ha representado la sensibilidad S dada por la ecuación (4.58) de ambos parámetros. En la Figura 4.20 se puede observar que conforme aumenta el número de viviendas, el efecto de un posible error en la estimación del caudal medio por vivienda sobre el coeficiente de punta va disminuyendo. Así por ejemplo, para una tubería que alimente a 1000 viviendas, una oscilación del 10% en la dotación se traducirá en una oscilación de apenas el 0,1% en el coeficiente de punta aproximadamente.

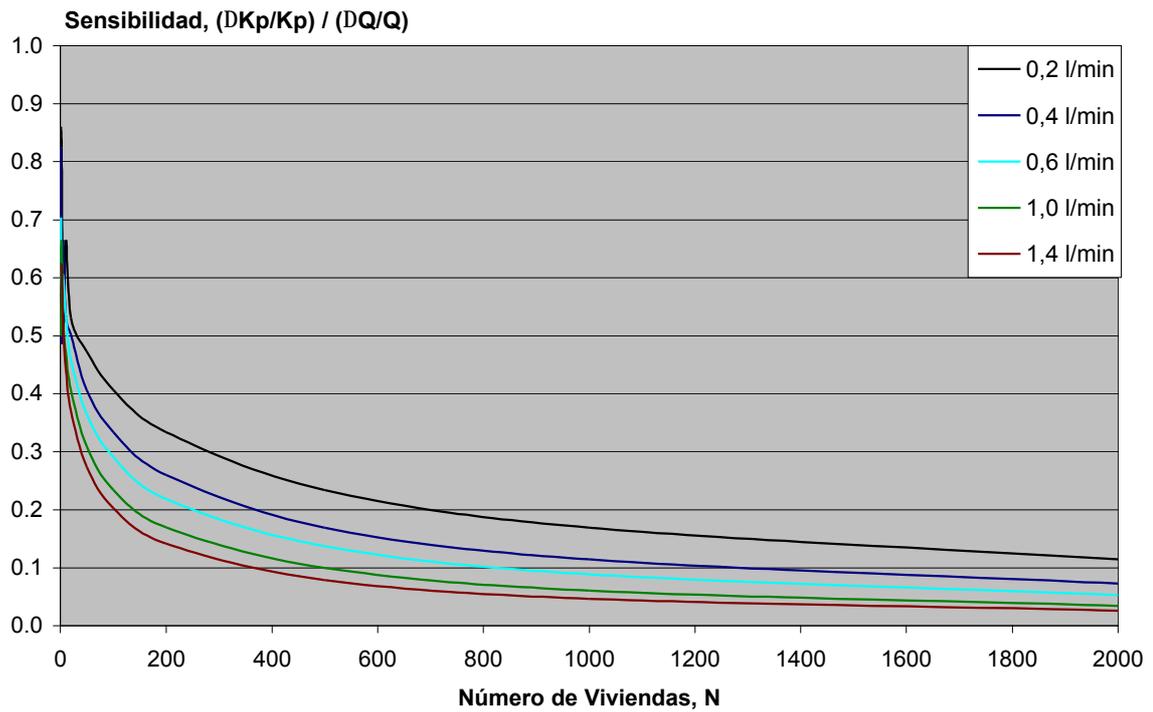


Figura 4.20. Sensibilidad del coeficiente de punta frente al caudal medio de una vivienda.

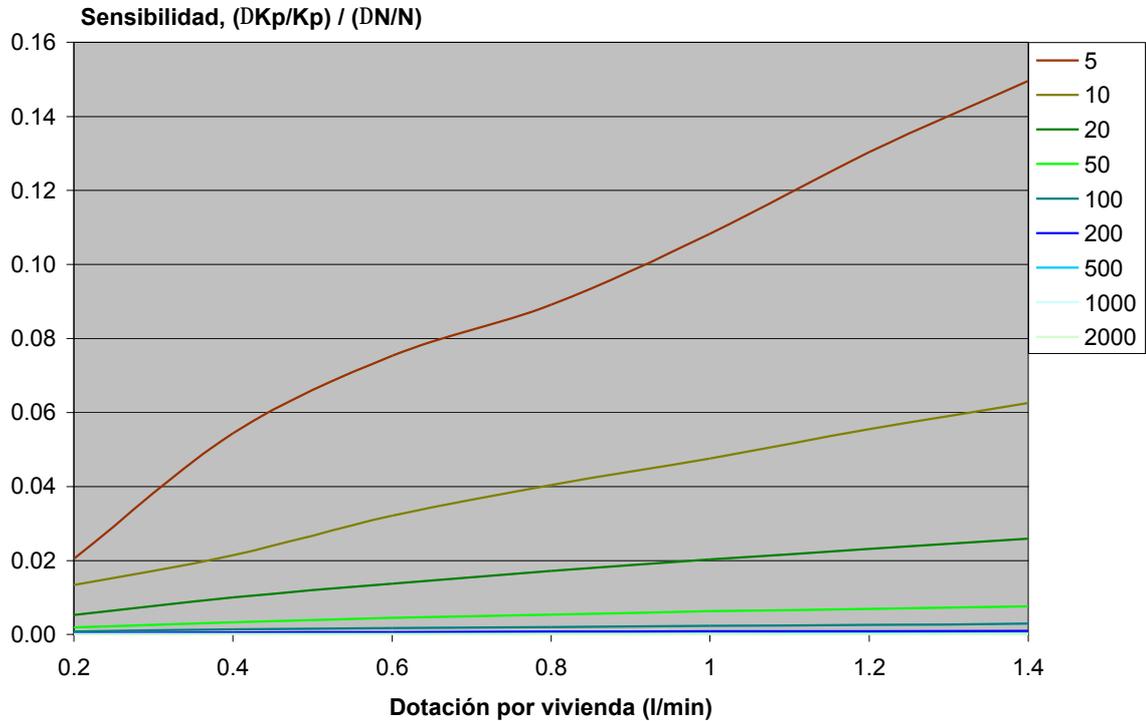


Figura 4.21. Sensibilidad del coeficiente de punta frente al número de viviendas servidas.

Por otra parte, como era de esperar, para un número de viviendas suficientemente alto, el coeficiente de punta apenas variará. Sin embargo, cuanto mayor es la dotación, mayor es el efecto de una imprecisión en el número de viviendas sobre el valor del coeficiente de punta. Esto queda patente en la Figura 4.21. En cualquier caso, se observa que a partir de 100 viviendas este parámetro apenas afecta al coeficiente de punta. Por ello, en la mayoría de los casos, la aproximación de que toda la red está sometida a un mismo coeficiente de punta es una solución perfectamente válida cuando se trabaja con modelos estratégicos.

6.3. Efecto de la tipología de los aparatos de consumo.

El último parámetro que ha de tenerse en cuenta en el análisis del método propuesto es el más decisivo. Este se debe principalmente a que es un parámetro que ha de ser medido para su calibración y esta medida no es la habitual en un abastecimiento. Hasta ahora se han tratado parámetros como el número de viviendas (cuyo cálculo es inmediato en redes ramificadas y casi inmediato en redes malladas) o el caudal medio, que es el dato medido por excelencia (realmente el volumen consumido en un determinado período, pero su conversión a caudal medio es inmediata). Sin embargo, para ajustar el comportamiento de los aparatos es necesario realizar mediciones como las realizadas en Estados Unidos (AWWA,1993) o por Arregui en 1998.

A continuación se presentan sendas gráficas en las que se puede observar el efecto del caudal medio entregado por un aparato (Figura 4.22) y la desviación típica (Figura 4.23) de dicho caudal.

En este caso es curioso observar cómo se combina el efecto del número de viviendas con cada uno de estos parámetros. Así, a mayor número de viviendas suministradas, menor diferencia entre los coeficientes de punta obtenidos para distintos caudales medios por aparato. Sin embargo, si se estudia el efecto de la desviación típica se observa que el coeficiente de punta es mayor cuanto mayor es la desviación típica de dicho caudal, independientemente del número de viviendas abastecidas.

Por otra parte, si se compara ahora el efecto de la incertidumbre en cada uno de los parámetros se observa que a mayor número de viviendas y menor caudal por aparato, menor es la repercusión de una variación de éste en el coeficiente de punta (Figura 4.24). En el caso de la desviación típica, conforme aumenta ésta o el número de viviendas, también aumenta la repercusión sobre el coeficiente de punta (Figura 4.25).

En cualquier caso, se observa que en todos los casos la sensibilidad está por debajo de 0,5 si se estudia la media del caudal y por debajo de 1 si se estudia su desviación típica. La interpretación de este hecho es que en ningún caso los cálculos realizados aumentan el error cometido en la estimación de los parámetros. Un valor de sensibilidad de 1 significa que un determinado error relativo en el parámetro estudiado provoca un error relativo exactamente igual en el coeficiente de punta.

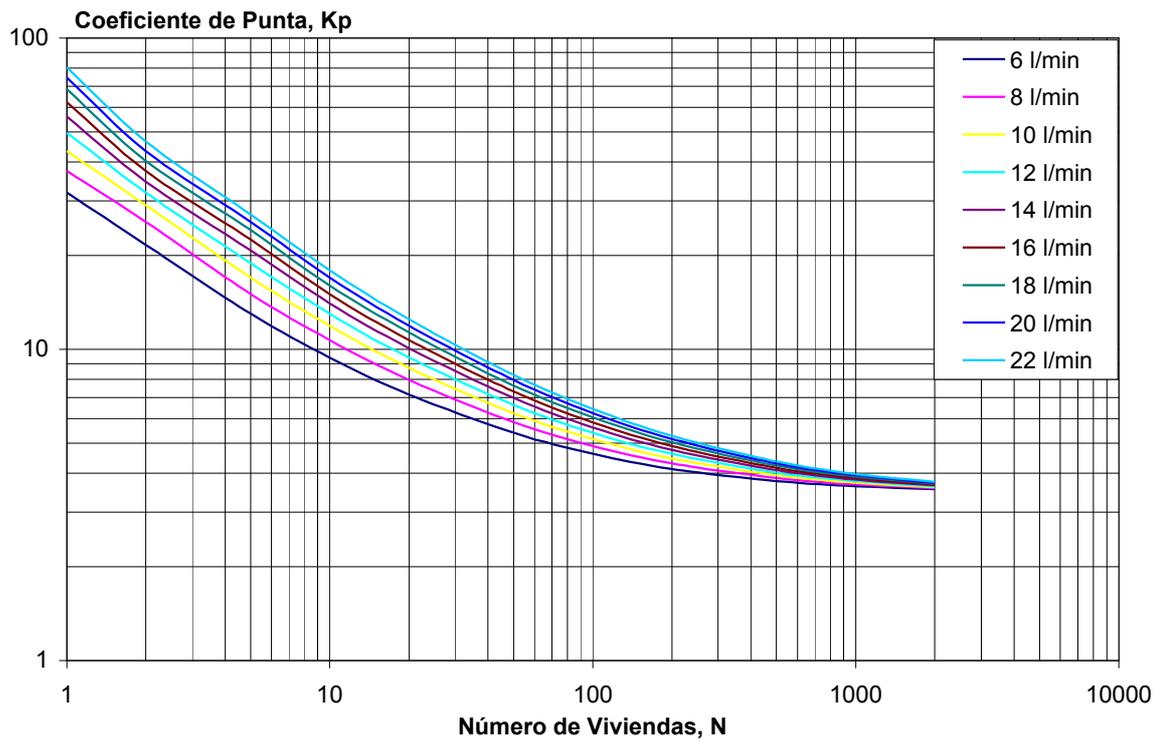


Figura 4.22. Variación del coeficiente de punta en función del caudal medio por aparato abastecido.

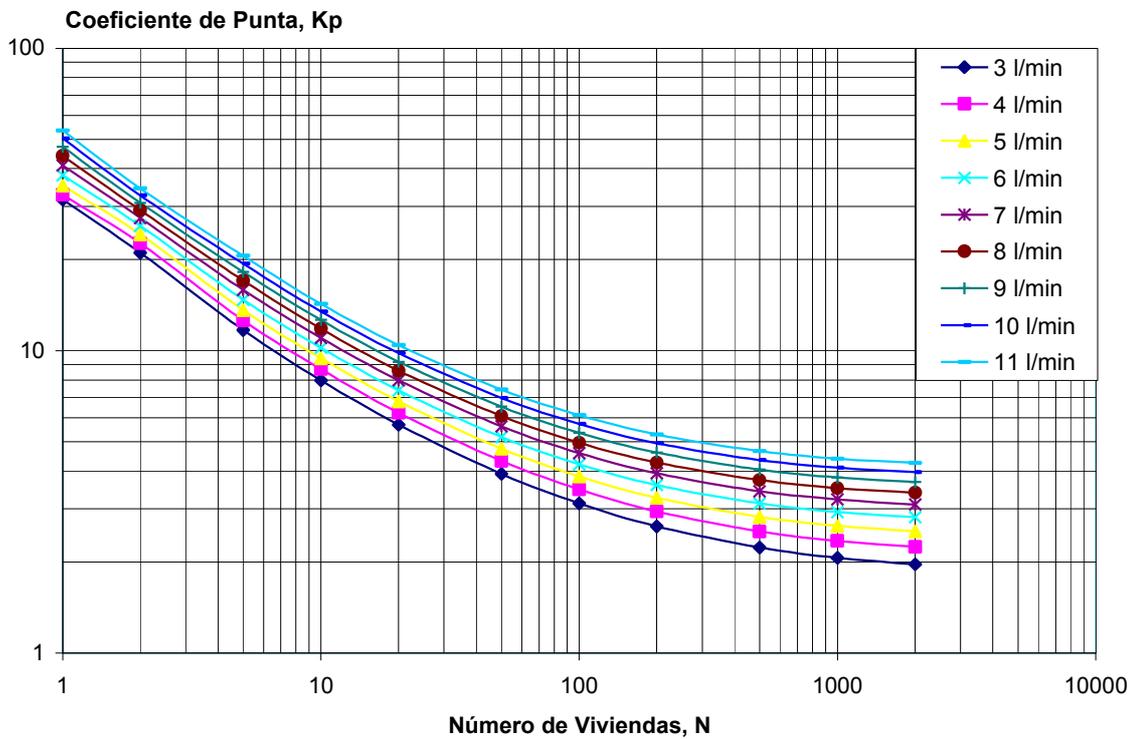


Figura 4.23. Variación del coeficiente de punta en función de la desviación típica del caudal por aparato.

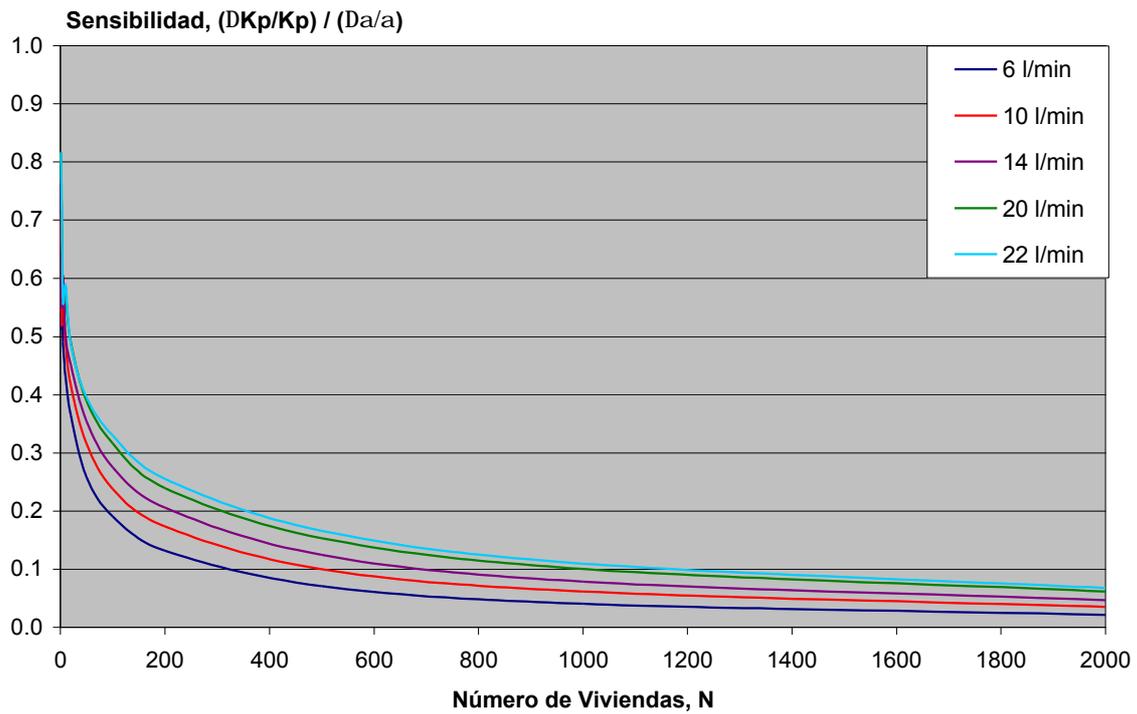


Figura 4.24. Sensibilidad del coeficiente de punta frente al caudal medio de un aparato.

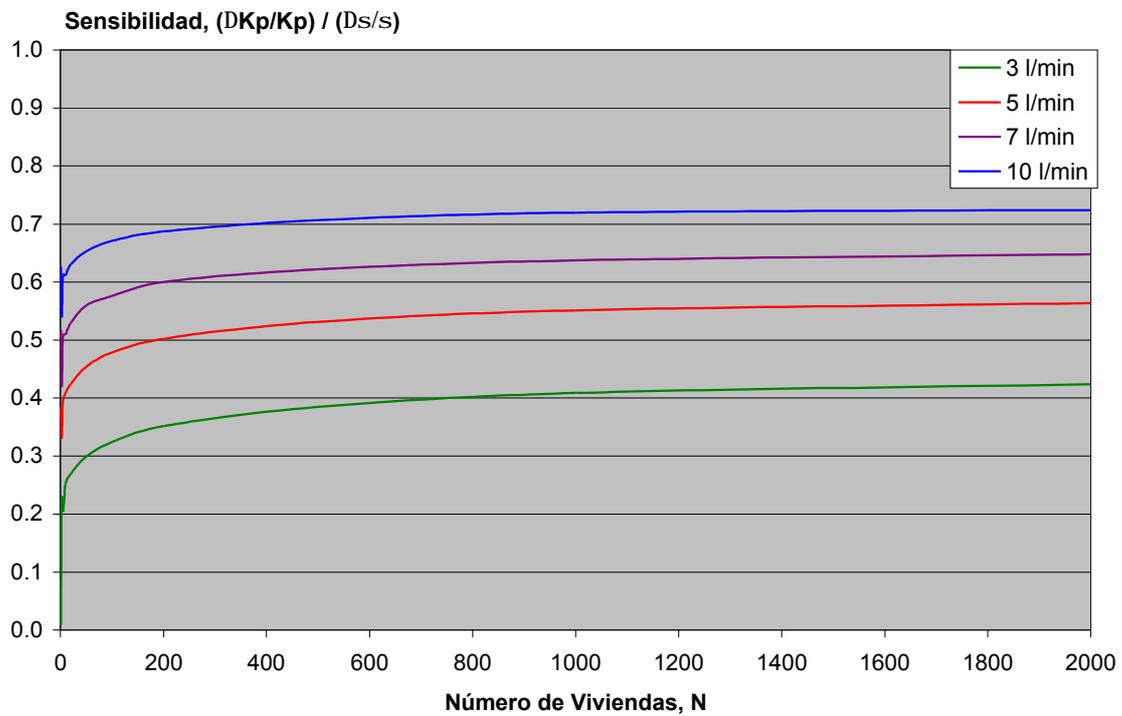


Figura 4.25. Sensibilidad del coeficiente de punta frente a la desviación típica del caudal de un aparato.

6.4. Conclusiones extraídas.

A modo de conclusión de este análisis se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Como era de esperar, el parámetro que más afecta al coeficiente de punta es el número de viviendas. Así, se nota una gran diferencia entre trabajar para pequeñas comunidades y trabajar en grandes abastecimientos. En líneas generales, se observa que para más de 1000 viviendas abastecidas, apenas hay variación en el coeficiente de punta. Esto hace que para grandes abastecimientos y modelos estratégicos de la red, se puede admitir que el coeficiente de punta es prácticamente igual para todo el abastecimiento, tal y como proponen Lingereddy et al. (1998) para redes malladas.
- El otro parámetro que afecta de manera importante al caudal punta es el propio caudal medio o dotación de la vivienda. No obstante, del estudio comparado de este parámetro y el anterior se concluye que lo que realmente afecta al coeficiente de punta es el caudal medio circulante por la línea objeto de estudio. Como ya se comentó en la Figura 4.19, el coeficiente de punta varía con el valor del producto entre la dotación media por vivienda y el número de viviendas abastecidas por la línea.
- El comportamiento de los aparatos tiene cierta repercusión en el caudal punta, como se puede deducir de las figuras 4.22 y 4.23. En ambas figuras se observa que cuando el número de viviendas abastecidas supera las 200, la repercusión que tienen estos parámetros sobre el coeficiente de punta es mínimo, especialmente si se compara con el número de viviendas o la demanda media en las mismas.
- Como última conclusión, destacar que son precisamente aquellos datos más fáciles de obtener los que más influyen en el caudal punta, mientras que el comportamiento de los aparatos (que precisa de medidas individualizadas para cada vivienda o al menos para cada uso del agua) tiene una repercusión menor, por lo que la utilización de valores extrapolados de estudios previos puede ser una opción aceptable para redes de tamaño medio y grande. Sin embargo, una imprecisión cometida en la estimación de la desviación típica afecta más al coeficiente de punta que cualquier otro error cometido. Además, este hecho se acentúa conforme aumenta el número de viviendas, aunque este aumento sea asintótico.

7. Procedimiento para la asignación de cargas a un modelo de detalle.

7.1. Planteamiento general.

A continuación se describe el planteamiento general del cálculo utilizado para la determinación de caudales punta en instalaciones. El procedimiento complementa cualquiera de los procedimientos tradicionales de asignación de cargas expuestos en el

punto 3 de este mismo capítulo. Si el objetivo del modelo consiste en alcanzar un conocimiento del funcionamiento general de la red (objetivo que como ya se comentó corresponde al de los modelos estratégicos), no será necesario calcular los caudales punta que se podrían alcanzar en condiciones excepcionales. Por tanto, este método se utilizará para el análisis de modelos de detalle de la red.

De todo lo anterior se deduce que el primer dato necesario es el de las facturaciones de cada abonado. Con éstas se determinarán los caudales medios asignados a cada nudo. A partir de aquí, el cálculo se complicará más o menos en función de si la red es mallada o ramificada. Más adelante se describirá con más detenimiento cada uno de los casos, apoyando ambas explicaciones con un ejemplo. De momento, se van a describir las líneas generales del método. En la Figura 4.26 se presenta un flujograma general del proceso de cálculo.

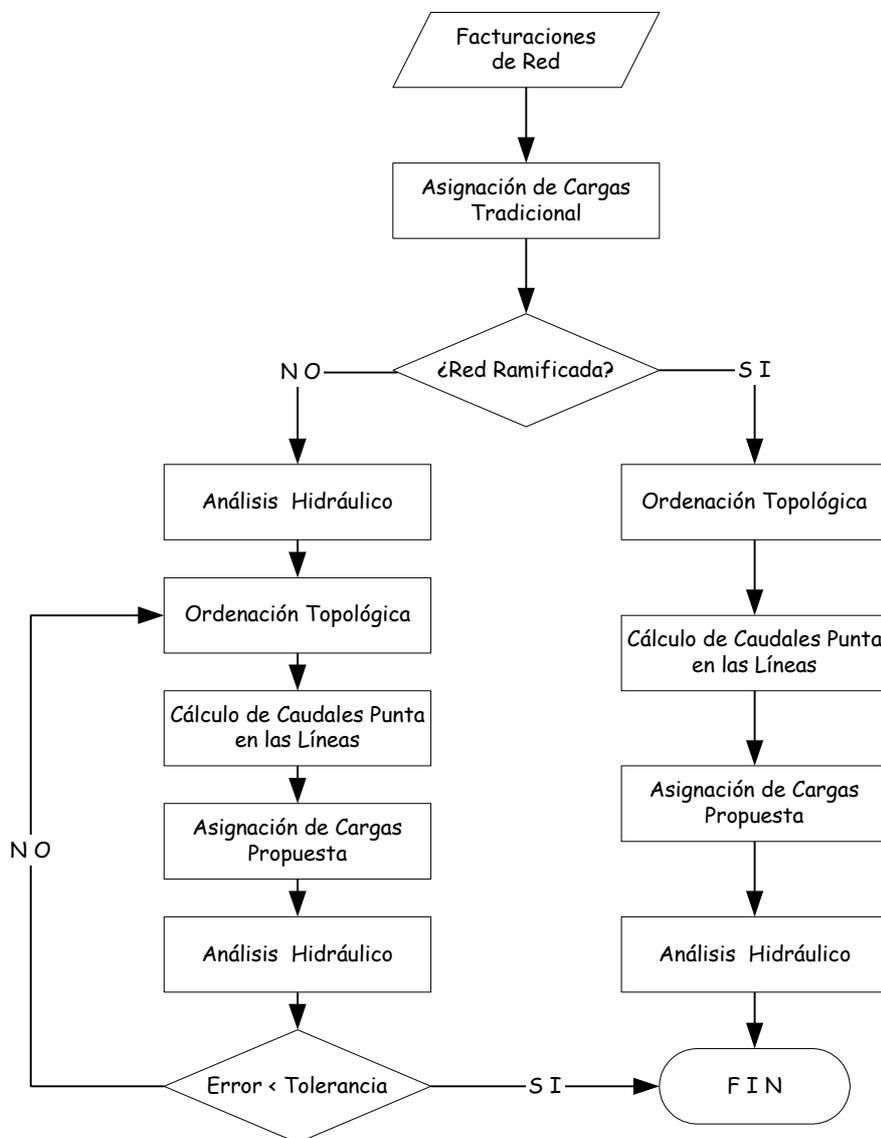


Figura 4.26. Flujograma para la implantación de la asignación de cargas en modelos de detalle en una red de distribución de agua.

Como se ha visto, para determinar el caudal punta esperado con una determinada probabilidad de ocurrencia es necesario disponer, de una parte, del caudal medio consumido por cada vivienda y, de otra parte, de una estimación del comportamiento de los aparatos instalados en la propia vivienda.

El primer dato es fácilmente deducible a partir de las facturaciones de agua potable. Sin embargo, el segundo dato no es tan sencillo de obtener. Para conseguirlo, es necesario realizar un programa de mediciones para ajustar los resultados mediante métodos estadísticos a una distribución, que en el caso propuesto sería la distribución normal. La alternativa a estas mediciones pasa por la comparación con instalaciones similares donde se hayan realizado dichas mediciones.

Una vez se dispone de estos datos, será necesario determinar el nivel de probabilidad para el que queremos realizar el cálculo. En los modelos de detalle, como ya se dijo, interesará conocer el funcionamiento de la red en situaciones extremas en todos los puntos de la misma. Así pues, es necesario fijar la probabilidad de que ocurra tal situación extrema.

La principal dificultad para aplicar este método en redes malladas viene motivada por la incertidumbre que hay en las conducciones sobre la dirección que llevará el caudal en ellas. De hecho, Lingireddy et al. (1998) culminan un brillante trabajo sobre estimación de caudales punta en tuberías de distribución de agua aceptando para las zonas malladas de la red un valor constante del caudal punta y repartiéndolo por igual entre todos los nudos pertenecientes a la malla. Lo que se persigue con este trabajo es extender los esfuerzos realizados en redes ramificadas a las redes malladas, que son, paradójicamente, las más abundantes.

Para poder trabajar con las redes malladas será necesario conocer la dirección del caudal en cada tubería. Puesto que el caudal en las líneas es el resultado del análisis hidráulico, en el caso de las redes malladas se ha de empezar realizando un análisis hidráulico tradicional. Este cálculo preliminar ha de respetar la ecuación de continuidad en los nudos para una hipótesis de caudales consistente en, por ejemplo, la de caudales medios facturados en cada nudo a partir de la asignación de cargas realizada. Una vez terminado dicho cálculo, se dispondrá de una *estimación* de la dirección del agua en cada tubería.

Según se ha descrito, para determinar el caudal punta en una rama de la red será necesario, por tanto, conocer exactamente el número de abonados abastecidos por dicha rama. Para ser más exactos, será necesario conocer el caudal medio consumido por dichos abonados. En redes ramificadas esto es prácticamente inmediato, pues todas las ramas de la red tienen un único sentido de circulación del caudal. Sin embargo, en el caso de redes malladas este cálculo se complica y ha de recurrirse a la iteración para determinar el sentido correcto de circulación del caudal. Una vez determinados el número de viviendas abastecidas por una tubería, el cálculo del caudal punta se hará a partir del método representado de manera esquemática en la Figura 4.13.

A continuación se describen tanto el algoritmo utilizado para la ordenación topológica como ambos cálculos del caudal punta correspondientes a red ramificada y red mallada. Se parte de una situación en la que ya se ha procedido a un primer cálculo según un método de análisis tradicional (cumpliendo la ecuación de continuidad en los nudos).

7.2. Ordenación Topológica de la red.

Una vez realizado el cálculo hidráulico correspondiente a caudales medios se tiene, para cada línea, un caudal que será positivo si mantiene la orientación predefinida para la línea y negativo si el sentido de circulación es el inverso al de la orientación almacenada en el SIG. A partir de aquí se procederá con la *ordenación topológica* de las conducciones en función de su orientación. Esta ordenación consiste en los siguientes pasos:

- a) Para cada una de las tuberías, se comprueba si el caudal resultado del cálculo es positivo o negativo. Este último caso se interpreta como que el caudal sigue una dirección inversa a la supuesta durante la digitalización y, por tanto, esto debe ser corregido. Así, si el caudal es positivo se deja la conducción como está, pero si es negativo se invierte la definición de los nudos extremos: el que aparecía como nudo inicial pasa a ser nudo final y viceversa.
- b) Una vez corregidas las anomalías que pudiere haber en la orientación de las conducciones, se procede a rellenar las matrices de adyacencia. Cada nudo contará con sendos vectores, uno con las conducciones que aportan agua al nudo y otro con las conducciones que parten de dicho nudo. Durante esta fase se han de hacer las comprobaciones que se comentan en el Capítulo 5 para validar las líneas virtuales (bombas y válvulas). Una vez concluido este paso se tendrá toda la información sobre conectividad almacenada en los nudos.
- c) El siguiente paso consistirá en la ordenación topológica propiamente dicha. Para determinar el número de viviendas que abastece cada tubería ha de empezarse por los nudos extremos y recorrer la red en sentido inverso acumulando progresivamente el número de viviendas. Como se ha comentado, lo que realmente interesa es tener el dato del caudal que circulará por la conducción cuando el caudal demandado por cada vivienda sea el caudal medio. Ha de tenerse en cuenta que este consumo medio se ha cargado en los nudos, por lo que son éstos los que guardan también la información sobre el consumo de las viviendas que reciben agua del nudo en cuestión. El resultado de esta ordenación topológica es establecer un orden de cálculo de los nudos y, por consiguiente, de las conducciones.
- d) Los depósitos son, por su propia definición, nudos extremos por los que el agua entra o sale de la red. Por lo tanto éstos se marcarán como últimos nudos en ser calculados. Aquí, hablar de un nudo calculado significa que, si se sigue el orden topológico descrito, el caudal punta de todas las conducciones situadas aguas abajo del mismo ya ha sido calculado.

- e) Para los nudos de consumo, se utiliza un algoritmo recursivo, denominado algoritmo de *búsqueda en profundidad* (Sedgewick, 1995). El objetivo de dicho algoritmo es establecer el orden de cálculo de los diferentes elementos de la red. Este algoritmo se describirá un poco más adelante.
- f) Una vez se ha establecido el orden de cálculo, se procede a determinar el caudal medio circulante por cada conducción. Este servirá ya de base para la determinación del caudal punta.

El algoritmo de búsqueda en profundidad consiste en *visitar* uno por uno los N nudos que tiene una topología de red. Para cada nudo, se comprueban todos los nudos conectados directamente a él. Si alguno de estos nudos no ha sido *visitado* aún, se vuelva a llamar a la función para *visitarlo*. Si, por el contrario, todos los nudos situados aguas debajo de él ya han sido *visitados* éste será el siguiente nudo en ser calculado. Es decir, se le asigna al nudo el orden de cálculo y se marca como nudo *visitado*. El algoritmo se ha modificado ligeramente para adaptarlo a una topología orientada, ya que la definición inicial no requiere orientación de las ramas de la topología.

Como se ha comentado, el paso previo a la ordenación topológica es la construcción de sendas listas de adyacencias para los nudos de la red. Una de ellas guardará los nudos extremos de las líneas que llegan al nudo considerado. La otra será análoga, pero guardará una referencia a los nudos extremos de las líneas que parten del mismo nudo considerado. El hecho de trabajar con estas listas de adyacencia en lugar con una única matriz de adyacencia se debe a motivos de velocidad de cálculo. Puesto que en redes malladas se han de realizar cálculos iterativos que consumen mucho tiempo, la utilización de una matriz de adyacencia obliga a recorrer cada vez todos los elementos de la matriz, mientras que las listas de adyacencia, combinadas con la programación orientada a objetos por la que se ha optado, permiten un acceso directo sólo a los nudos conectados al que se está visitando. Esto hace que el tiempo de cálculo, que para el caso de la matriz de adyacencia es proporcional al número de nudos que tiene la red al cuadrado.

Sea una colección de objetos de la clase nudo que se desea ordenar. La orientación se ha almacenado en listas de adyacencia para cada nudo de la forma que se acaba de comentar. Así, habrán de ordenarse cada uno de los N nudos. Para ello se define una propiedad Orden para cada uno de los nudos que podrá almacenar tres tipos de valores distintos:

- 0 significa que el nudo aún no ha sido visitado
- -1 el nudo está siendo visitado en estos momentos
- > 0 orden en que debe calcularse el nudo

El algoritmo ha de comenzar pues con un recorrido sistemático de todos y cada uno de los nudos:

Comienza Ordenar

Para cada Nudo desde $n = 1$ hasta N

Si $\text{Nudo}(n).\text{Orden} = 0$ entonces $\text{Visitar}(\text{Nudo } n)$

Siguiente Nudo n

Termina Ordenar

Así, para cada nudo pueden suceder dos cosas. Si el nudo no ha sido visitado, se deberá visitar en ese mismo instante. La otra posibilidad es que sí haya sido visitado, pasando entonces al siguiente nudo.

Cuando se visita un nudo, se recorre una de las matrices de adyacencia, según sea el objetivo perseguido por la ordenación. Así, en el caso que se está estudiando, interesará calcular primero los nudos situados en los extremos de la red, entendiendo por extremos aquellos nudos que no tienen ningún otro aguas abajo. Por tanto, se ha escogido trabajar con las listas de los nudos situados aguas abajo. Básicamente, el pseudocódigo de la función *visitar* antes comentada quedará como sigue:

Comienza Visitar(Nudo n)

$\text{Nudo}(n).\text{Orden} = -1$

Para cada Nudo i aguas abajo

Si $\text{Nudo}(i).\text{Orden} = 0$ entonces $\text{Visitar}(\text{Nudo } i)$

Siguiente Nudo i

$\text{Nudo}(n).\text{Orden} = \text{Ultimo}$

$\text{Ultimo} = \text{Ultimo} + 1$

Termina Visitar

Obsérvese que la función *visitar* lo que hace básicamente es determinar el orden de cálculo de cada nudo, dato que se guarda en la propiedad Orden del nudo. Así, si se entra en la función con un nudo que no tiene ningún otro aguas abajo, automáticamente ese nudo toma el siguiente orden de cálculo, guardado en la variable Ultimo, y ésta incrementa en uno su valor. Por contra, si el nudo con que se entra en la función si tiene más nudos aguas abajo, la función comprobará si ese nudo ya está ordenado ($\text{Orden} > 0$) y, si no lo está ($\text{Orden} = 0$), procederá a visitarlo.

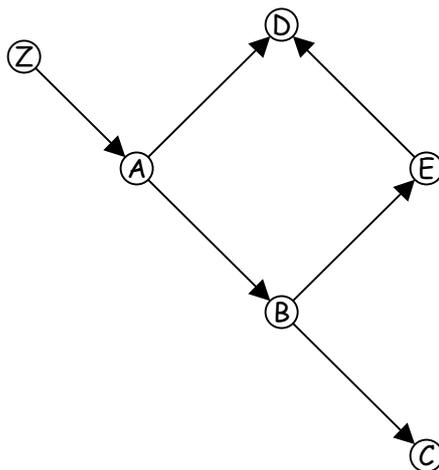


Figura 4.27. Ejemplo de topología orientada.

La ordenación acabará cuando todos los nudos tengan un orden de cálculo asignado. Para comprender mejor el método de ordenación, se aplicará al ejemplo de la Figura 4.27. En ella, las listas de adyacencia para los nudos situados aguas abajo, según las orientaciones representadas en la figura serán:

Nudo	Lista (Nudos Aguas abajo)
A	B, D
B	C, E
C	
D	
E	D
Z	A

Aunque el orden en que estarán guardados los nudos en la base de datos se puede admitir que es aleatorio, supóngase que mantiene un orden alfabético. Esto implicará que la función Ordenar comenzará por el nudo A, teniendo al inicio un valor de 1 para la variable Ultimo. Obviamente, el nudo A aún no ha sido visitado, por lo que se procede a visitarlo. Se recurre a su lista de adyacencia (de nuevo se asume ordenada por orden alfabético).

En primer lugar aparecerá el nudo B, que tampoco ha sido visitado. De nuevo se llama a la función Visitar para visitar el nudo B y de nuevo nos encontramos con su lista de adyacencia. El nudo B tiene aguas abajo a los nudos C y E, que tampoco han sido visitados. Ha de llamarse, de forma recursiva, a la función Visitar por tercera vez (primero fue para el nudo A, después para el B y ahora para el C). Sin embargo, todavía no se ha salido de ninguna de estas funciones. Cuando se visita el nudo C se llega a que éste no tienen ningún otro nudo aguas abajo según las orientaciones de las que se ha partido. Por tanto, este nudo será el que reciba el orden 1, abandonando la función Visitar correspondiente.

Al abandonar esta función suceden dos cosas importantes: la primera es la actualización de la variable *Ultimo* a 2 y la segunda es que se devuelve el control a la función *visitar* desde la que se le llamó. Si se recuerda, se llamó a *Visitar C* desde *Visitar B*, por lo que ahora tocará seguir recorriendo la lista de adyacencias del nudo B, dando paso al nudo E (segundo de la lista de adyacencias de B). Como E tampoco ha sido visitado aún, se llama de nuevo a la función *Visitar* y, de nuevo, tenemos tres instancias de dicha función abiertas. El proceso se repite, recorriendo ahora la lista de adyacencias de E, en la que sólo hay un nudo: el nudo D. Hasta ahora, el nudo D tampoco ha sido visitado, por lo que se procede a visitarlo.

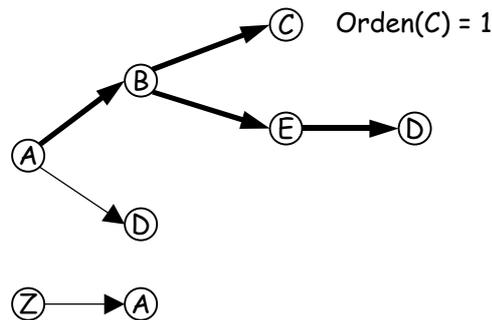


Figura 4.28. Arbol de búsquedas tras visitar el nudo E. En trazo grueso aparecen las visitas realizadas hasta ese momento.

Si se hace un repaso a la situación actual (Figura 4.28), se tiene que la función *Visitar A*, permanece abierta, pues aún no se han ordenado todos los nudos situados aguas abajo (ni B ni D están aún ordenados). Lo mismo sucede con la función *Visitar B* (E no está ordenado) y *Visitar E* (D aún no está ordenado). Como D no tiene ningún otro nudo aguas abajo, será el siguiente en el orden (en este caso orden 2, y *Ultimo* pasará a valer 3). Con D visitado, E ya no tiene ningún otro nudo aguas abajo, por lo que toma el orden 3, y *Ultimo* se actualiza a 4. Idéntica suerte correrá el nudo B, que ya tiene ordenados sus dos nudos situados aguas abajo, C y E, por lo que adoptará el orden 4. Ya sólo queda abierta la función *Visitar A*, pero como el siguiente nudo situado aguas abajo de A es el D y ya había sido visitado (tomando el orden 2), A toma el siguiente orden y cierra la última de las funciones *Visitar* abiertas.

El último paso sería visitar el nudo Z y, como el nudo A que es el que está aguas abajo, ya fue visitado, el nudo Z toma el orden correspondiente y así terminará la ordenación topológica. Por tanto, el orden de cálculo propuesto por este algoritmo de ordenación sería: C, D, E, B, A y, por último, Z.

7.3. Aplicación a redes ramificadas. Cálculo directo.

El cálculo de los caudales punta en una red ramificada, al igual que sucede con el problema de diseño de este tipo de redes, es un problema sencillo. Esta simplicidad se deriva del hecho de que tanto el número de abonados abastecidos como los consumos

demandados en cada nudo se obtienen directamente a partir de la propia asignación de cargas. En las redes ramificadas el sentido de circulación del caudal por las líneas es único, por lo que no hay problemas con la orientación de las mismas.

Para describir el proceso de cálculo en una red ramificada, se acompaña la explicación de un ejemplo. Sea la red de la Figura 4.29, con cinco nudos de consumo y un único nudo de alimentación. En dicha figura aparecen reflejados tanto el número de abonados abastecidos como los consumos demandados en cada nudo, asumiendo una dotación media por abonado de 1 l/min (360 l/hab·día y una ocupación de 4 habitantes por vivienda).

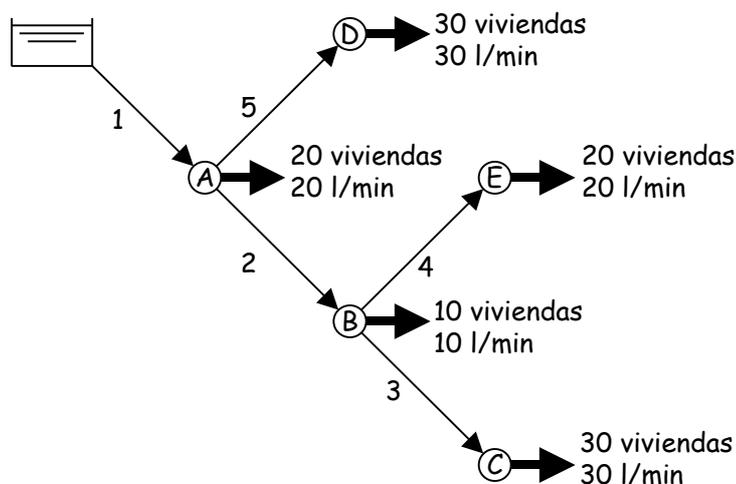


Figura 4.29. Red ejemplo de aplicación a una red ramificada.

Como ya se ha comentado, en el caso de las redes ramificadas el cálculo es directo, pues los sentidos de circulación obtenidos tras el cálculo inicial son los sentidos de circulación definitivos. La ordenación topológica en este caso dará como resultado que los nudos de la red se deben calcular en el orden C-E-B-D-A, lo que corresponde a un orden de cálculo de las tuberías 3-4-2-5-1, siendo estos números los identificativos de cada rama. Por tanto, el caudal medio que circulará por cada una de las ramas será, siguiendo el orden anterior:

$$\begin{aligned}
 Q_3 &= Q_C = && 30 \text{ l/min} \\
 Q_4 &= Q_E = && 20 \text{ l/min} \\
 Q_2 &= Q_B + Q_3 + Q_4 = && 60 \text{ l/min} \\
 Q_5 &= Q_D = && 30 \text{ l/min} \\
 Q_1 &= Q_A + Q_2 + Q_5 = && 110 \text{ l/min}
 \end{aligned}$$

Con estos caudales, el siguiente paso sería el de realizar mediciones a fin de determinar la media y la varianza del caudal aportado por los aparatos. Además, será necesario elegir una probabilidad de ocurrencia antes de proceder al cálculo del caudal punta. Por ejemplo, si se toma una probabilidad de 0,999 (0,1% de probabilidad de que el

caudal en la red exceda el que se va a calcular, o lo que es lo mismo, este caudal sólo se producirá 1'30" al día) y una distribución de caudal en los aparatos normal con media 8 l/min y varianza 5 l/min, es decir, $N(8, 5)$ con los parámetros expresados en l/min, se tendrán los siguientes caudales punta en la red:

$$Q_3 = Q_C = 158,1 \text{ l/min}$$

$$Q_4 = Q_E = 120,7 \text{ l/min}$$

$$Q_2 = Q_B + Q_3 + Q_4 = 260,9 \text{ l/min}$$

$$Q_5 = Q_D = 158,1 \text{ l/min}$$

$$Q_1 = Q_A + Q_2 + Q_5 = 420,9 \text{ l/min}$$

Aparte de su propio carácter demostrativo sobre la aplicación del método de determinación de caudales máximos probables, este simple ejemplo sirve para constatar la diferencia que puede haber en los caudales instantáneos en comparación con los caudales medios que se pueden derivar de las facturaciones. En el desarrollo de esta Tesis, se utilizará esta forma de determinación de caudales máximos para la asignación de cargas a modelos de detalle. Sin embargo, esta forma de determinar caudales máximos en una conducción puede servir de base para el diseño de redes de agua potable asistido por un SIG.

7.4. Aplicación a redes malladas. Cálculo iterativo.

Para el caso de una red mallada, el cálculo se complica un poco, pues el sentido de circulación del agua ya no está definido de antemano. En la Figura 4.26 se muestra el diagrama de flujo que se ha seguido para el cálculo de los caudales. La primera fase consiste en un cálculo según los métodos tradicionales de asignación de cargas en modelos estratégicos de redes de distribución de agua. Al tratarse realmente de un modelo de detalle, el proceso de asignación de cargas será similar al descrito en la Figura 4.10. Una vez realizada esta asignación, se procede a un primer cálculo hidráulico de la red. En este primer cálculo, las asignaciones y los caudales calculados en las líneas verificarán la ecuación de continuidad. A continuación se entra en el bucle principal del proceso.

A partir de los resultados del análisis anterior se procede a una ordenación topológica de la red. Esta ordenación tiene un doble objetivo:

- En primer lugar, se pretende ordenar las conducciones de tal manera que los caudales sean siempre positivos. Recuérdese en el algoritmo de cálculo devuelve caudales positivos si la orientación de la línea es coincidente con la dirección del flujo y caudales negativos en caso contrario.
- En segundo lugar, se pretende conocer cuántos abonados reciben agua de cada tubería. Este es el objetivo principal, pues como se ha comentado, la asignación depende del número de abonados abastecidos y del caudal demandado por éstos.

7.4.1. Determinación del número de abonados abastecidos.

Una vez ordenada la red, se han de determinar los abonados que reciban agua de cada conducción. Un abonado recibe agua de una conducción si existe un camino que respete la orientación de la misma que una la conducción con el nudo de consumo al cual se le ha asignado dicho abonado en el proceso de asignación punto a punto comentado en el párrafo anterior. A partir del número de abonados abastecidos por cada conducción (y, por consiguiente, del caudal acumulado por los mismos) se puede determinar el coeficiente de punta que se tiene en la misma, tal y como se ha ido describiendo a lo largo de este capítulo. Este coeficiente de punta se aplicará al caudal medio de cada conducción para obtener un caudal punta en la misma.

Aquí ha de tenerse presente el hecho de que, aunque una conducción suministre agua a N viviendas, en una red mallada no todo el caudal consumido por éstas circulará por dicha conducción, sino que lo hará sólo una parte del mismo. Esto es, una vivienda puede ser abastecida por dos conducciones y el comportamiento de la misma ha de afectar a ambas, pero el caudal ha de repartirse entre las mismas. Así, el caudal punta calculado para una determinada conducción dependerá no sólo del número de viviendas abastecidas por ésta, sino también de cuánto caudal proporcione la conducción. Sea un nudo X cualquiera de la red mallada, con L_X líneas que aportan agua al mismo y otras M_X líneas que parten de él, tal y como se muestra en la Figura 4.30.

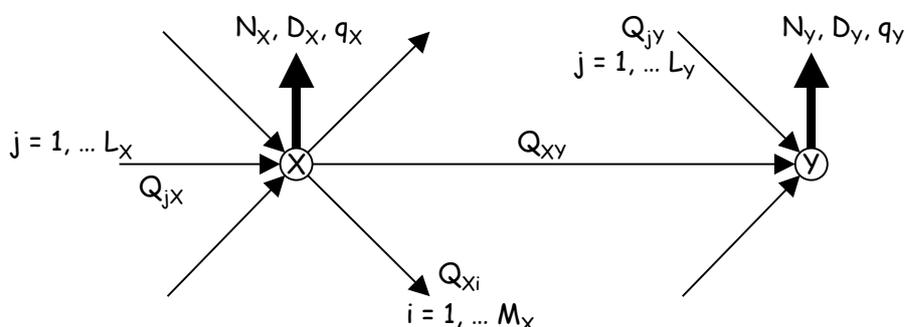


Figura 4.30. Esquema del balance de caudales y notación utilizada en un nudo.

Según esta figura, cualquier nudo que reciba agua de las tuberías que parten del nudo X , también recibirá agua de las tuberías que llegan a X . Sin embargo, la determinación de estos nudos no es tan sencilla como ir sumando los abonados de los nudos aguas abajo y los abonados propios. Si se hiciese así, si existen varios caminos que conectan un determinado nudo con otro, los abonados del primero se acumularían en el segundo tantas veces como caminos distintos se puedan definir. Por ello hay que recurrir de nuevo bien a las matrices de adyacencia, bien al concepto de *componentes conexas*.

Se define como componente conexa el subconjunto de una determinada topología que recoge todos los elementos a los que se puede llegar siguiendo los nudos y las líneas de la topología inicial y respetando sus respectivas orientaciones. De nuevo aquí se ha

preferido huir de las matrices de adyacencia por el carácter iterativo de los cálculos. En lugar de esto, se trabajará para cada nudo de la topología con un vector que recogerá todos los nudos que forman parte de la componente conexa del nudo inicial.

Así para un determinado nudo X , el número acumulado de abonados será la suma de los abonados de todos los nudos que se encuentren en su componente conexa. De la misma forma, el coeficiente de punta de todas las líneas que llegan a dicho nudo X se calculará como si el caudal medio en dicha línea fuese el caudal correspondiente al consumo de todos los abonados contenidos en la componente conexa de dicho nudo.

7.4.2. Cálculo del caudal punta en cada línea.

Tras el cálculo hidráulico se obtiene como resultado un caudal para cada línea. Así, una línea que une dos nudos i y j tendrá un caudal Q_{ij} . Para cualquier línea, el caudal punta calculado vendrá dado por la expresión:

$$Q_{P,ij} = K_{P,ij} \cdot \frac{Q_{ij}}{\sum_{k=1}^{L_j} Q_{kj}} \cdot q_{P,j} \quad (4.61)$$

En esta expresión y siguiendo la notación presentada en la Figura 4.30, se tiene que:

$Q_{P,ij}$ caudal punta en la línea que une los nudos i y j .

$K_{P,ij}$ coeficiente de punta correspondiente a la línea que une los nudos i y j .

Q_{ij} caudal calculado en la línea que une los nudos i y j .

$q_{P,j}$ caudal acumulado en el nudo j .

L_j conjunto de nudos con conexión directa con el nudo j mediante una línea y topológicamente situados aguas arriba del mismo.

Supóngase que se quiere calcular el caudal punta en la línea XY de la Figura 4.30. Sea Q_{Xi} el caudal de cada una de las líneas salientes y Q_{jX} el caudal de cada línea entrante. Si q_X es el caudal asignado como demanda en el nudo X , según la notación mostrada en la Figura 4.30 se ha de cumplir:

$$\sum_{j=1}^{L_X} Q_{jX} = \sum_{i=1}^{M_X} Q_{Xi} + q_X \quad (4.62)$$

La interpretación del balance anterior es sencilla: es simplemente la ecuación de continuidad. En ella, M_X y L_X son sendos conjuntos de nudos con conexión directa con el nudo X mediante una línea y topológicamente situados respectivamente aguas abajo y aguas arriba del mismo.

Por otra parte, como ya se comentó en el apartado anterior, $K_{P,jX}$ es un coeficiente de punta idéntico para las L_X líneas que llegan al nudo X . Puesto que todos los abonados situados aguas abajo del nudo X y los propios abonados cargados en el nudo X son abastecidos en mayor o menor medida por *todas* las líneas que llegan a dicho punto, las L_X líneas que llegan al nudo X tendrán exactamente el mismo valor del coeficiente de punta. En cualquier caso, posteriormente se deberá calcular un caudal punta distinto en cada una en función de la contribución que ésta tenga en la alimentación de los nudos.

Así, según el método expuesto en el apartado 3.5, se tendrá que el factor de utilización para cualquiera de esas L_X líneas que llegan al nudo X será:

$$\rho_m^* = \frac{D_X + \sum_{i=1}^m D_i}{\alpha} \quad (4.63)$$

En esta expresión, D_i es la demanda calculada en cada nudo a partir de las facturaciones de los abonados mientras que m es el conjunto de nudos que forman parte de la componente conexas del nudo X .

Con este factor ρ_m^* , se calculará un caudal punta para cada nudo de tal forma que se cumpla la probabilidad de ocurrencia P . Así para todas las líneas que llegan a X este caudal, que se denominará $Q_{P,jX}$ vendrá será tal que verifique:

$$\begin{aligned} Q_{P,jX}/P[q \leq Q_{P,jX}] &< P \\ P[q \leq Q_{P,jX}] &= \sum_{k=0}^{\infty} G_m^*(Q_{P,jX}, k) \frac{(\rho_m^*)^k e^{-\rho_m^*}}{k!} \end{aligned} \quad (4.64)$$

Una vez calculado este caudal punta, se ha de determinar el coeficiente de punta que se utilizará para todas las líneas:

$$K_{P,jX} = \frac{Q_{P,jX}}{D_X + \sum_{i=1}^m D_i} \quad (4.65)$$

En el cálculo de $K_{P,jX}$ (que será el mismo para las L_X líneas que llegan al nudo X) el caudal utilizado para determinar el factor de utilización será la suma de los caudales demandados por los m nudos que forman parte de la componente conexas de X . Esto tiene una importante implicación en el cálculo: mientras no haya un nuevo cambio en la orientación que implique a su vez una alteración de la componente conexas de X , de las conducciones los valores de los coeficientes de punta se mantendrán constantes. Dicho de otra forma, si durante las distintas iteraciones no se produce ninguna alteración de la dirección del flujo en las líneas, el valor del coeficiente de punta permanecerá inalterado.

Una vez determinado el coeficiente de punta de cada línea, será necesario determinar el caudal acumulado hasta esa línea para poder determinar el caudal punta estimado en la misma. Por caudal acumulado en un nudo se entiende la demanda media acumulada en ese nudo teniendo en cuenta un reparto según los caudales previamente calculados.

El caudal acumulado constará básicamente de dos términos. Por una parte el propio caudal medio demandado en el nudo X . Resulta obvio que este caudal es satisfecho exclusivamente por las líneas que aportan agua al propio nudo X . Por otra parte, de los M_X nudos situados aguas abajo de X , parte de su demanda será cubierta por líneas procedentes del propio nudo X y parte será satisfecha por el resto de las líneas que llegan a cada uno de esos nudos. Así, si se considera un nudo i situado aguas abajo de X , la aportación de dicho nudo i al caudal acumulado en X será:

$$\frac{Q_{Xi}}{L_j} \cdot q_{P,i} \quad \forall i = 1, \dots, M_X$$

$$\sum_{j=1} Q_{ji}$$
(4.66)

Así, para el nudo X el caudal acumulado vendrá dado por:

$$q_{P,X} = D_X + \sum_{i=1}^{M_X} \left(\frac{Q_{Xi}}{L_j} \cdot q_{P,i} \right)$$
(4.67)

Por ello, si tras el cálculo resulta para una determinada línea de llegada al nudo un coeficiente de punta $K_{P,jX}$, el caudal punta en dicha línea $Q_{P,jX}$ se calculará teniendo en cuenta cuál es el reparto de caudales en el nudo X que se está considerando, según la expresión (4.61).

Una vez calculado éste, el siguiente paso será ajustar las demandas en los nudos para forzar que en la nueva iteración que se vaya a realizar, el caudal en las líneas sea lo más cercano posible al calculado en la ecuación (4.61) teniendo en cuenta que el cálculo hidráulico obliga a cumplir la ecuación de continuidad.

7.4.3. Determinación de las demandas a cargar en cada nudo.

El último paso en cada iteración será determinar las demandas que hay que aplicar a cada nudo para que se verifique dicho caudal punta. Esto es necesario porque el programa de análisis hidráulico sí precisa que se cumpla la condición de continuidad en los nudos, por lo que las demandas en éstos serán ficticias, y no las reales que se asignaron mediante el método punto a punto.

Esta asignación de cargas se hará a partir de los cálculos anteriores según un balance de caudales que debe corregir las diferencias que se produzcan al aplicar la ecuación de continuidad con los caudales punta que se han calculado. Este nuevo caudal demandado en el nudo X , q_X , tiene, obviamente, un carácter artificial y vendrá dado por:

$$q_X = \sum_{j=1}^{L_X} Q_{P,jX} - \sum_{i=1}^{M_X} Q_{P,Xi} \quad (4.68)$$

Con esta nueva asignación de cargas ya se estará en condiciones de afrontar un nuevo cálculo hidráulico. Tras él, se calculará el error cometido entre los resultados obtenidos y los resultados previstos. Si éste excede un cierto margen de error o tolerancia, se deberá repetir la operación corrigiendo el reparto de los caudales en las conducciones.

En este caso, el error medio en cada iteración se ha definido como la raíz cuadrada de la suma de los errores cuadráticos medios cometidos en cada una de las líneas, dividida entre la demanda total de los N nudos de consumo:

$$ECM = \frac{\sqrt{\sum_{i,j=1}^N (Q_{P,ji} - Q_{ji})^2}}{\sum_{k=1}^N q_k} \quad (4.69)$$

En esta ecuación, $Q_{P,ji}$ es el caudal punta esperado en la línea que une los nudos i y j , Q_{ji} es el caudal obtenido en la simulación para esa misma línea y q_k es el caudal asignado como demanda al nudo k .

7.4.4. Ejemplo de cálculo de caudales punta en redes malladas.

A continuación se describe mediante un segundo ejemplo el proceso iterativo para cálculo de caudales punta en redes malladas. Para ello se ha escogido una sencilla red que contiene una única malla. A pesar de su sencillez, servirá para ilustrar el método antes comentado.

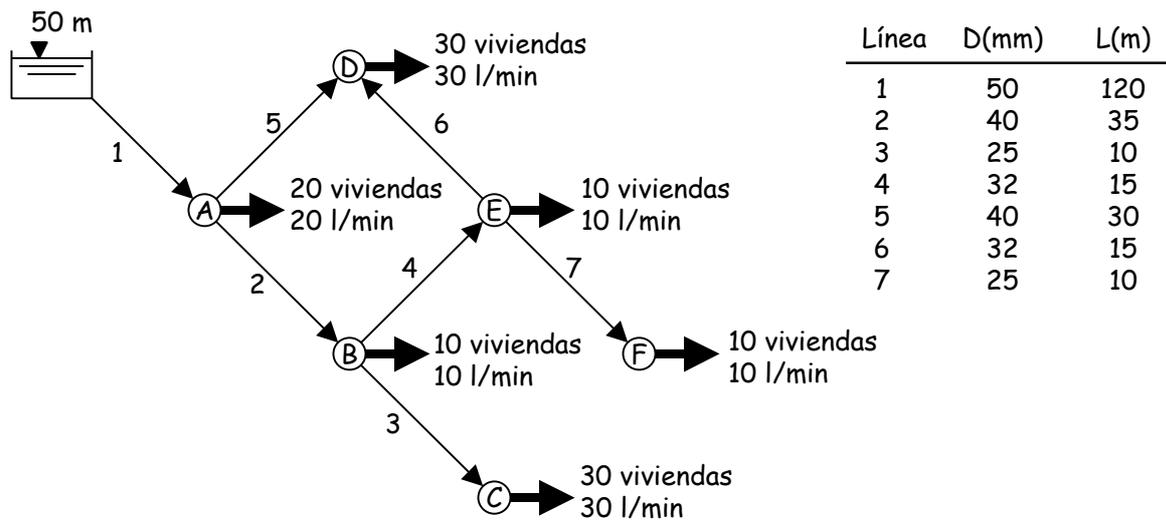


Figura 4.31. Red ejemplo de aplicación a una red mallada.

Para este ejemplo se supondrá que el depósito de alimentación está situado a 50 metros de altitud y los nodos de consumo a cota 0. Además, se admite una rugosidad de 0,1 mm en todas las tuberías.

Siguiendo el flujograma presentado en la Figura 4.26, con estos datos se ejecuta un primer análisis hidráulico tradicional, cuya finalidad es determinar el sentido de circulación de los caudales en la red. Obviamente, si posteriormente se van a modificar los datos, se pueden modificar igualmente estos sentidos de circulación. Por eso es necesario operar de manera iterativa. Los resultados de la primera iteración se presentan en la Tabla 4.4 y en la Figura 4.32:

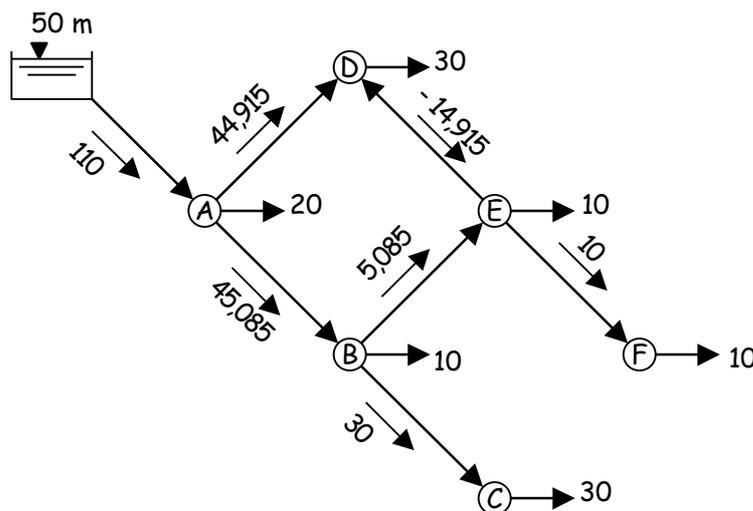


Figura 4.32. Caudales (expresados en l/min) en nodos y líneas tras el análisis hidráulico inicial.

Tabla 4.4. Resultados del análisis hidráulico inicial.

Datos		Caudales	
Nudos	Q_d (l/min)	Tubería	Q (l/min)
A	20	1	110,000
B	10	2	45,085
C	30	3	30,000
D	30	4	5,085
E	10	5	44,915
F	10	6	- 14,915
		7	10,000

En cada iteración, se obtiene el reparto de caudales por cada tubería. Estos caudales son los que han de servir para calcular el caudal punta esperado por dicha tubería. En la tabla siguiente se presentan los resultados obtenidos para el cálculo hidráulico previo. El caudal calculado Q es, en este caso, el correspondiente al caso en el cual los nudos demandaran el caudal medio obtenido a partir de las facturaciones. Con dicho caudal y los mismos parámetros utilizados en el apartado anterior (probabilidad de superar el caudal punta del 0,1% y distribución normal de caudales en los aparatos con media 8 l/min y varianza 5 l/min) se determina el caudal punta. Simultáneamente, se corrigen las orientaciones de las tuberías que pudieren conducir a caudales negativos (en sentido inverso al utilizado en la introducción de los datos).

En este ejemplo, la tubería 6 se ha definido para ir desde el nudo E al nudo D, pero el resultado del cálculo contradice esa definición (pues da un caudal negativo para esta línea) y el caudal va desde D hasta E. Durante la ordenación este hecho ha de ser corregido, cambiando por tanto la orientación inicialmente asignada a la línea 6. Una vez realizada la ordenación topológica, se procede a calcular el coeficiente de punta para cada conducción. Posteriormente se calculará el caudal punta correspondiente.

A modo de ejemplo se realiza a continuación el cálculo detallado para la primera iteración. Se comenzará calculando los caudales acumulados en cada uno de los nudos tal y como se ha descrito en apartados anteriores. El resultado de la ordenación propone empezar con el nudo F, para seguir por los nudos C, E, D, B y A.

Obsérvese que el orden del cálculo ha de ser necesariamente el que marca la ordenación topológica. Así, por ejemplo, para el cálculo del caudal acumulado en el nudo B, es necesario disponer de los caudales acumulados en los nudos C, E y F.

Tabla 4.5. Caudales acumulados en los nudos en la primera iteración del ejemplo propuesto.

Nudos	Componente Conexa	D_i (l/min)	$Q_{P,i}$ (l/min)
F	F	10	$Q_{P,F} = 10$
C	C	30	$Q_{P,C} = 30$
E	E, F	10	$Q_{P,E} = 20$
D	D, E, F	30	$Q_{P,D} = 30 + \frac{14,915}{5,085 + 14,915} \cdot 20 = 44,915$
B	B, C, E, F	10	$Q_{P,B} = 10 + \frac{30}{30} \cdot 30 + \frac{5,085}{5,085 + 14,915} \cdot 20 = 45,085$
A	A, B, C, D, E, F	20	$Q_{P,A} = 20 + \frac{44,915}{44,915} \cdot 35,085 + \frac{45,085}{45,085} \cdot 54,915 = 110$

Una vez calculados los caudales acumulados en los nudos, el siguiente paso será calcular los coeficientes de punta y el caudal punta esperado en cada línea. Este último se calculará con el coeficiente punta calculado y los caudales acumulados anteriores según la ecuación (4.61). Para el cálculo del coeficiente de punta será necesario conocer también el caudal acumulado en cada línea, o lo que es lo mismo, la demanda acumulada por toda la componente conexa del nudo situado en el extremo aguas abajo de la misma. En la Tabla 4.6 se muestran tanto los coeficientes de punta como los caudales punta correspondientes a los cálculos presentados en la Tabla 4.5.

Tabla 4.6. Coeficientes de punta y caudales punta para cada una de las líneas tras la primera iteración.

Tubería	N (viviendas)	K_P	Q_P (l/min)
1	110	3,8276	421,040
2	60	4,4048	198,589
3	30	5,2705	158,115
4	20	6,0401	30,713
5	50	4,5972	206,483
6	20	6,0401	90,088
7	10	7,9639	79.639

A continuación se detalla el cálculo del caudal punta de cada tubería. Resulta evidente que las tuberías 3 y 7 son ramificadas, al tener un único extremo final. Por tanto,

el cálculo de estas dos conducciones será inmediato. Además, tras la ordenación topológica, éstas deben aparecer en primer lugar, siendo indiferente si primero se calcula la tubería 3 y después la 7 o viceversa. Así, para estas conducciones, el caudal medio acumulado es el correspondiente a la demanda media de sus nudos extremos, esto es, 30 l/min en el caso de la tubería 3 y 10 l/min para la tubería 7. Con los parámetros con los que se está trabajando, los coeficientes punta serán, respectivamente, 5,2705 para la tubería 3 y 7,9639 para la tubería 7. Obsérvese de nuevo el efecto que tiene el número de viviendas en los coeficientes punta.

Siguiendo el orden establecido, a continuación aparecerán, también indistintamente, las tuberías 4 y 6. Ambas tuberías aportan agua a la tubería 7. Por ello, hasta que esta última no esté calculada, no se puede proceder con aquéllas. Se estudiará la tubería 6, entendiéndose que el cálculo de la tubería 4 se haría de manera análoga.

El primer problema que aparece con esta tubería 6 es el hecho de que el resultado del cálculo hidráulico proporciona un caudal negativo, lo cual obliga a cambiar la orientación de ésta. Según la orientación proporcionada por la simulación, la tubería 6 abastece directamente a los consumidores ubicados en el nudo E y a los del nudo F a través de la tubería 7. Aunque estos consumos no son completamente aportados por esta tubería, sí es cierto que cualquier evento que tenga lugar en cualquiera de estos dos nudos afectará necesariamente al caudal en esta tubería. Así pues, la tubería 6 abastece a 20 viviendas y el coeficiente de punta para 20 viviendas será de 6,0401. La tubería 4, que comparte el extremo final con la tubería 6, también tendrá, por tanto, el mismo coeficiente de punta.

En cuanto al caudal punta, éste se calculará como el producto del coeficiente de punta anterior por el caudal medio que daría esta tubería si se mantuviese el reparto de caudales que ha proporcionado el cálculo hidráulico. En este caso, el caudal medio correspondiente a las 20 viviendas abastecidas es de 20 l/min. Sin embargo, este caudal ha de ser suministrado entre las tuberías 4 y 6. Los resultados de la simulación hidráulica arrojan un reparto de 5,085 l/min procedentes de la tubería 4 y los otros 14,915 procedentes de la tubería 6. Así, por tanto, el coeficiente de punta deberá multiplicar al caudal total abastecido (20 l/min) corregido con la relación de consumo correspondiente:

$$Q_{P,6} = K_{P,6} \cdot \frac{Q_6}{Q_4 + Q_6} \cdot q_{P,E} = 6,0401 \cdot \frac{14,915}{5,085 + 14,915} \cdot 20 = 90,088 \text{ l/min} \quad (4.70)$$

De forma similar, se obtendría el caudal punta para la tubería 4 en esta primera iteración:

$$Q_{P,4} = K_{P,4} \cdot \frac{Q_4}{Q_4 + Q_6} \cdot q_{P,E} = 6,0401 \cdot \frac{5,085}{5,085 + 14,915} \cdot 20 = 30,713 \text{ l/min} \quad (4.71)$$

una vez calculadas las tuberías 4 y 6, las siguientes según la ordenación topológica realizada serían las tuberías 2 y 5, también de manera indistinta. A continuación se detallan los cálculos correspondientes a la tubería 2 a partir de los resultados obtenidos. Dicha tubería aporta agua a los nudos B, C, E y F, es decir, a los nudos que forman parte de la componente conexas de B tras realizar la ordenación topológica. Esto supone un caudal medio demandado de 60 l/min. Por tanto, según la ecuación (4.55), ρ_m^* será:

$$\rho_m^* = \frac{60}{8} = 7,5$$

Tras realizar los cálculos pertinentes para $P = 0,999$ se llega a que el coeficiente de punta para esta tubería será $K_{P,2} = 4,4048$. Con este coeficiente de punta, y según la ecuación (4.61) se obtendrá el caudal punta esperado en la línea 2. En este caso, la tubería 2 es la única que abastece al nudo B, por lo que no ha lugar a corregir el caudal con ninguna relación de consumo:

$$Q_{P,2} = K_{P,2} \cdot \frac{Q_2}{Q_2} \cdot q_{P,B} = 4,4048 \cdot \frac{45,085}{45,085} \cdot 45,085 = 198,589 \text{ l/min} \quad (4.72)$$

Con estos caudales punta se calculan las nuevas demandas en los nudos según la ecuación (4.68) vista anteriormente. Así, por ejemplo, la nueva demanda en el nudo B vendría dada por:

$$q_B = \underbrace{(Q_{P,2})}_{\text{ENTRANTE}} - \underbrace{(Q_{P,3} + Q_{P,4})}_{\text{SALIENTE}} = 198,589 - (158,115 + 30,713) = 9,761 \text{ l/min} \quad (4.73)$$

Una vez calculados, se procederá a un nuevo cálculo hidráulico, hasta que los caudales de las líneas procedentes del análisis hidráulico coincidan con los caudales punta calculados o bien el error medio cometido en el conjunto de todas las tuberías no supere una cierta tolerancia. En esta primera iteración, el error cometido asciende a 169134,7, claramente inadmisibles tratándose de un error en tanto por uno.

Si los caudales procedentes del cálculo hidráulico son todos positivos, los coeficientes de punta no variarán. A continuación se presentan todos los resultados obtenidos hasta que se alcanza el resultado final. En este ejemplo, son necesarias un total de seis iteraciones para alcanzar dicho resultado.

Tabla 4.7. Resultados de la 1ª Iteración.

Demanda en los nudos		Caudales calculados en las líneas		Caudales punta
Nudos	q _d (l/min)	Tubería	Q (l/min)	Q _p (l/min)
A	15,97	1	421,04	421,04
B	9,76	2	205,21	203,42
C	158,12	3	158,12	158,12
D	116,39	4	37,33	37,33
E	41,16	5	199,86	201,44
F	79,64	6	83,47	83,47
		7	79,64	79,64
Error				5,71

Tabla 4.8. Resultados de la 2ª Iteración.

Demanda en los nudos		Caudales calculados en las líneas		Caudales punta
Nudos	q _d (l/min)	Tubería	Q (l/min)	Q _p (l/min)
A	16,28	1	421,04	421,04
B	7,96	2	204,46	204,26
C	158,12	3	158,12	158,12
D	117,98	4	38,69	38,69
E	41,16	5	200,36	200,56
F	79,64	6	83,47	83,47
		7	79,64	79,64
Error				0,175

Como se puede observar tras estas primeras iteraciones, la reducción en el error cometido es muy importante. Esto se debe principalmente al hecho de que no ha habido que corregir ninguna orientación de las tuberías, cosa que sí ocurrió en el primer caso.

Tabla 4.9. Resultados de la 3ª Iteración.

Demanda en los nudos		Caudales calculados en las líneas		Caudales punta
Nudos	q _d (l/min)	Tubería	Q (l/min)	Q _p (l/min)
A	16,22	1	421,04	421,04
B	7,66	2	204,46	204,41
C	158,12	3	158,12	158,12
D	118,25	4	38,69	38,69
E	41,16	5	200,36	200,41
F	79,64	6	82,11	82,11
		7	79,64	79,64
Error				$5,38 \times 10^{-3}$

Tabla 4.10. Resultados de la 4ª Iteración.

Demanda en los nudos		Caudales calculados en las líneas		Caudales punta
Nudos	q _d (l/min)	Tubería	Q (l/min)	Q _P (l/min)
A	16,22	1	421,04	421,04
B	7,60	2	204,45	204,44
C	158,12	3	158,12	158,12
D	118,30	4	38,73	38,73
E	41,16	5	200,37	200,38
F	79,64	6	82,07	82,07
		7	79,64	79,64
Error				1,65×10 ⁻⁴

Tabla 4.11. Resultados de la 5ª Iteración.

Demanda en los nudos		Caudales calculados en las líneas		Caudales punta
Nudos	q _d (l/min)	Tubería	Q (l/min)	Q _P (l/min)
A	16,22	1	421,04	421,04
B	7,59	2	204,44	204,44
C	158,12	3	158,12	158,12
D	118,31	4	38,74	38,74
E	41,16	5	200,37	200,38
F	79,64	6	82,06	82,06
		7	79,64	79,64
Error				5,00×10 ⁻⁶

Tabla 4.12. Resultados de la 6ª Iteración.

Demanda en los nudos		Caudales calculados en las líneas		Caudales punta
Nudos	q _d (l/min)	Tubería	Q (l/min)	Q _P (l/min)
A	16,22	1	421,04	421,04
B	7,59	2	204,44	204,44
C	158,12	3	158,12	158,12
D	118,31	4	38,74	38,74
E	41,16	5	200,38	200,38
F	79,64	6	82,06	82,06
		7	79,64	79,64
Error				< 1×10 ⁻⁶

Tras esta sexta iteración se observa que todos los resultados hidráulicos del caudal prácticamente coinciden con los valores del caudal punta calculados por el método

propuesto, lo que significa que el cálculo se podría dar por terminado. Los resultados de caudales tras finalizar el cálculo se muestran en la Figura 4.33.

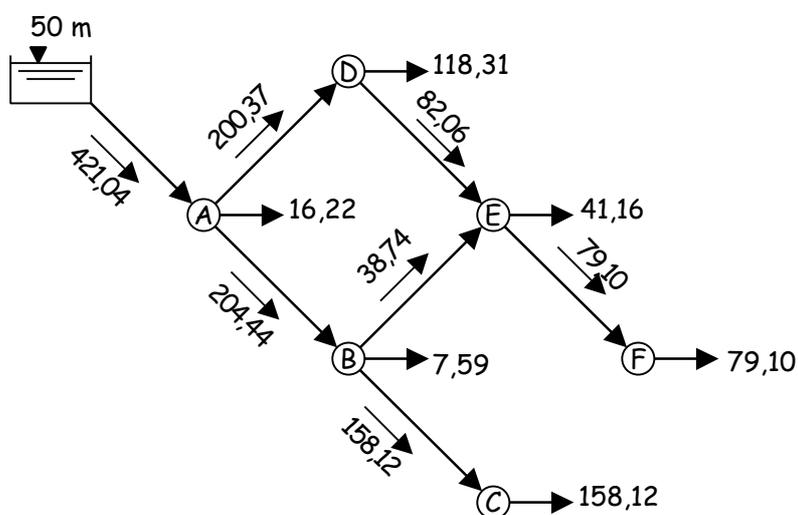


Figura 4.33. Caudales circulantes (en l/min) por la red del ejemplo tras finalizar el cálculo.

8. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado una metodología para realizar la asignación de cargas en un modelo matemático utilizando la capacidad de manejo de datos de un SIG.

Se ha comenzado haciendo un repaso de las tendencias actuales en asignación de cargas a modelos matemáticos. En concreto, se ha descrito el papel que puede jugar el sistema de gestión de abonados de un SIG como proveedor de datos para el modelo matemático. También se han expuesto las ventajas y, sobre todo, los inconvenientes de la asignación de cargas basada en los consumos medios derivados de las facturaciones y posterior aplicación de curvas de modulación para contemplar la variación temporal de dichos consumos.

Para el supuesto en que sea preciso trabajar con caudales proyectados para un futuro a corto o medio plazo, se ha propuesto un método basado en el SIG para la estimación de los caudales en ese escenario.

Puesto que el objetivo de la Tesis pasa por realizar una modelación completa de la red, una de las dificultades que entraña este objetivo es la necesidad de trabajar con redes con un nivel de detalle superior al recomendado para modelos matemáticos. Esto hace que el comportamiento individual de cada abonado pueda llegar a ser importante en el funcionamiento de partes de la red situadas en sus extremos. En este sentido, se ha intentado paliar este hecho considerando el comportamiento individual de cada abonado en aquellos casos en que sea necesario observar el funcionamiento de la red puntos extremos.

En concreto, se han presentado dos aportaciones dirigidas a conocer el caudal máximo que nos podemos encontrar en cualquier punto de la red con una determinada

probabilidad de ocurrencia. A partir del estudio de una red ramificada, se he descrito una metodología para determinar el caudal punta en una tubería a partir de una distribución estadística del caudal basada en la intensidad, la duración y la frecuencia de los consumos individuales de cada abonado que se abastece de la propia tubería.

Por último, se ha extendido este método al caso del estudio de una red mallada correspondiente a un modelo de detalle.

Así pues, se han cubierto las tres etapas básicas en la asignación de demandas:

- a) Ubicación de cada abonado a un nudo de la red de forma automatizada, bien sea por criterios geográficos, bien por criterios hidráulicos.
- b) Determinación del caudal medio demandado por un abonado y asignación de caudales medios a cada nudo del modelo, tanto si se dispone de datos de facturaciones como si no.
- c) Asignación de la variación temporal del consumo, tanto en el caso de redes arteriales, mediante curvas de modulación, como en redes de detalle, mediante el cálculo del caudal punta en cada una de sus líneas.

Capítulo 5.

Modelo de Datos

1. Introducción

En el capítulo 2 se comentó que para el estudio de un sistema de abastecimiento de agua potable era necesario manejar gran cantidad de información clasificada principalmente en tres grandes grupos:

- información geográfica y cartográfica sobre abonados e infraestructuras,
- información sobre los abonados, y
- descripción física de las infraestructuras o elementos constitutivos de la red.

Puesto que de la información geográfica y cartográfica anterior, el dato que más interesa durante la elaboración del modelo matemático de una red de agua potable es la posición geográfica de cada elemento, ha sido necesario desarrollar un algoritmo para la obtención del modelo digital del terreno y la interpolación de la cota altimétrica. Este algoritmo se describió en la primera parte del capítulo 3. En ese mismo capítulo se ha descrito un algoritmo de teselación derivado de aquél. Por su parte, en el capítulo 4 se ha presentado un método para la asignación de cargas en el modelo matemático de una red de distribución de agua.

Sin embargo, tanto el MDT desarrollado como el programa de cálculo hidráulico de análisis necesitan *alimentarse* de datos para poder proporcionar sus resultados. Además, puesto que ambos modelos se van a implantar en un entorno SIG, estos datos habrán de ser enfocados a un sistema gestor de bases de datos georreferenciados de tal forma que se optimicen las capacidades de aquel.

Uno de los objetivos de la presente Tesis es la integración del modelo de análisis de redes en un entorno SIG y esto implica que, además de los datos, también han de tenerse en cuenta los resultados que proporcione el programa de análisis hidráulico en la estructura de datos.

Por último, como cualquier otro sistema gestor de bases de datos, el SIG deberá poseer ciertas herramientas de análisis de los resultados anteriores.

Desde un punto de vista del análisis de sistemas, se tiene un sistema gestor de bases de datos con capacidad para tratar la componente espacial de los mismos, el cual debe servir de proveedor de datos para el MDT, para la generación del modelo de la red y para la conexión con el programa hidráulico de simulación. Puesto que *a priori* se trata de sistemas independientes entre sí, para garantizar un funcionamiento óptimo de ls

conexiones entre estas herramientas será necesario describir adecuadamente las estructuras de las bases de datos utilizadas, de tal manera que una persona ajena al desarrollo de las mismas sea capaz de obtener el máximo partido de ellas. Esta es la base de la interoperabilidad entre sistemas y se consigue mediante los correspondientes modelos de datos.

En este capítulo se exponen los modelos de datos correspondientes a las tres categorías de información en el análisis de una red de abastecimiento:

- Modelo de datos para el modelo digital del terreno, útil como ya se ha comentado tanto para la obtención e interpolación de las cotas de los distintos elementos como para la asignación de consumos en redes de futura construcción o con carencia de facturaciones.
- Modelo de datos para los abonados. Este deberá almacenar tanto los datos espaciales referentes a ubicación (tanto geográfica como topológica) como los datos alfanuméricos como la clasificación de los usuarios según su perfil de consumo o el volumen de agua facturada.
- Modelo de datos de los elementos de la red. Sin duda éste es el más importante, pues ha de recoger toda la información que se ha de utilizar para la construcción del modelo matemático de la red, los datos para el análisis hidráulico del mismo y los resultados obtenidos del anterior análisis. Además, como se verá posteriormente, presenta algunas dificultades que han debido ser subsanadas antes de culminar el proceso de integración entre el SIG y el modelo hidráulico.

El objetivo de este capítulo es el de describir los datos utilizados, la representación espacial y las relaciones que se han establecido entre ellos para implantar la modelación de redes descrita hasta ahora.

2. Fundamentos de la modelación de datos.

2.1. Introducción al concepto de interoperabilidad.

Los programas de SIG más modernos incorporan interfaces de usuario para entrada, salida y representación de datos espaciales muy potentes. Si se han de desarrollar nuevas herramientas y aplicaciones, existen hasta cuatro formas de integración de las rutinas de análisis espacial en el SIG. Estas van desde la aplicación aislada, en que no existe una integración como tal, sino una extracción de datos del SIG a través de uno o varios ficheros hasta la aplicación embebida en el propio SIG, donde no se puede hablar estrictamente de aplicación externa. En medio quedan las dos alternativas más frecuentes hoy en día: la integración abierta, en la que la aplicación trabaja con una base de datos derivada de la información existente en el SIG, pero independiente de él; y la integración cerrada, en la que la aplicación consulta directamente la base de datos del SIG.

La integración abierta obliga a extraer los datos de la base de datos y convertirlos en un formato interpretable por la aplicación. Esto obliga a realizar un esfuerzo extra. Por ello, las rutinas desarrolladas a lo largo de esta Tesis se han realizado siguiendo una integración cerrada utilizando tecnología COM (*Component Object Model*). La tecnología COM es una forma de programación que facilita la interoperabilidad entre sistemas permitiendo la comunicación directa entre diferentes aplicaciones. Una característica importante de esta tecnología es que, al menos en teoría, es independiente de la plataforma y del lenguaje de programación (Ungerer y Goodchild, 2002). Sin embargo, obliga a realizar una descripción de los componentes de la aplicación.

La principal implicación de esto es que se ha de tener en cuenta la posibilidad de compartir la información disponible en el SIG con aplicaciones externas. Por ello, se ha de elaborar un modelo de datos que permita conocer cómo se ha codificado la información en el SIG y cómo se utiliza dicha información en las distintas aplicaciones realizadas. Existen diversos métodos de elaborar un modelo de datos, aunque en este caso se ha optado por uno compatible con los estándares proporcionados por el *Open GIS Consortium* que permita implantar todo lo desarrollado en cualquier sistema, independientemente de la plataforma elegida.

La solución adoptada para el problema de la integración de los distintos componentes de un SIG se basará en la abstracción y representación de los mismos utilizando el estándar UML (*Unified Modeling Language*) como forma de intercambio de datos y de metadatos.

Ungerer y Goodchild (2002) presentan la tecnología COM como la herramienta que permitirá generar librerías de aplicaciones espaciales válidas para sistemas abiertos.

2.2. Necesidad de documentar los datos.

Antes de proceder con la descripción de cada uno de los modelos de datos correspondientes a las distintas clases de información que se han de manejar, se ha considerado procedente hacer una breve introducción al concepto de *metadatos* como forma eficaz de intercambio de datos.

Un SIG engloba información espacial y alfanumérica. Para la implantación eficiente han de tenerse en cuenta dos aspectos importantes (Hernández, 1995):

- a) Por un lado, ha de documentarse suficientemente la información que se va a utilizar posteriormente.
- b) Por otra parte, ha de adoptarse la estructura de datos más adecuada para la gestión de esa información.

De estos aspectos, el primero es cubierto por la modelación conceptual de los objetos a representar. En el caso de las características geográficas, este papel es el que

realiza el modelo digital del terreno. En cuanto a la red de distribución de agua, ésta es la misión del modelo matemático.

En cuanto al segundo aspecto, su objetivo es el de diseñar la estructura concreta de datos que se presenta como más eficaz para codificar la información. Al tratar con información espacial o georreferenciada han de tenerse en cuenta las peculiaridades que diferencian a este tipo de datos del resto. Por una parte, disponen de una componente espacial que incluye información geométrica (principalmente la ubicación geográfica y la forma del objeto representado) y relaciones espaciales con otros objetos (definidas a través de las topologías). Por otra parte, también disponen de información temática (esto es, atributos alfanuméricos).

La complejidad de los datos espaciales hace que la estructura de datos más adecuada y más utilizada para su gestión sea la que Healey (1991) bautiza como *estructura híbrida*. Esta estructura se basa en la organización de la componente espacial de los datos en una base de datos orientada a objetos, mientras que la información temática queda almacenada en bases de datos relacionales.

En el caso del estudio de redes de distribución de agua, se trabajará en un dominio espacial plano. Esto significa que la componente espacial de cualquier dato estará definida en dos dimensiones, quedando la cota o elevación en muchos casos como un atributo alfanumérico más.

Junto a la complejidad de los datos espaciales aparece otra característica común a todos ellos que complica igualmente su intercambio. Esta es la dependencia de los datos espaciales de la aplicación para la cual han sido utilizados. Aparecen así distintos formatos de gestión (principalmente los ya comentados vectorial y matricial) y de almacenamiento de la información (formatos específicos de cada programa gestor de bases de datos georreferenciadas). Incluso el sistema geográfico de referencia cambia. En función del lugar geográfico donde se hayan creado o adquirido los datos geográficos se utilizarán distintos sistemas de coordenadas geográficas. Esta variabilidad en los formatos complica las tareas de intercambio de la información espacial precisamente en un momento histórico en que Internet pone a disposición de toda la comunidad los medios técnicos para compartir dicha información.

Surge así la necesidad de crear protocolos que hagan posible el intercambio de información y se acuña el término *metadatos* (del griego *meta-*, cambio o característica). El término *metadatos* surge para describir información relativa a los datos, esto es, las características de un conjunto de datos. Básicamente, los metadatos son datos acerca de los datos. Un ejemplo sencillo que ayudará a entender la importancia de los metadatos es la leyenda de un plano. Una leyenda es una forma de metadatos. Incluye información acerca del autor del plano, la escala a la que ha sido representado, la fecha en que fue realizado, la proyección utilizada e incluso la simbología relativa a diversos objetos en el plano. Sin la

leyenda, el plano contendrá en esencia la misma información, pero los datos contenidos en el mismo perderían gran parte de su valor.

Taylor (2000) describe seis beneficios derivados de la utilización de los metadatos:

1. Ayudar a la organización y mantenimiento de los datos en cualquier organización, recortando los gastos destinados a este aspecto.
2. El desarrollo de un programa coordinado de metadatos evita la duplicación de esfuerzos al disponer de un catálogo de disponibilidad de datos.
3. Cualquier usuario puede localizar rápidamente los datos que puedan resultar de su interés.
4. El agrupamiento de los metadatos se apoya en los procedimientos actuales de gestión e la información y a la vez los refuerza.
5. La documentación de metadatos proporciona una mayor disponibilidad de datos geoespaciales.
6. Los proveedores de datos pueden publicar sus datos y favorecer la compatibilidad de los mismos con las necesidades de sus posibles clientes. Este hecho tiene repercusiones directas en el intercambio y el comercio electrónico de datos a través de Internet.

2.3. Introducción a la modelación de datos espaciales.

Al trabajar en un entorno SIG, los datos que se manejan tienen características geográficas (básicamente sus coordenadas) y características alfanuméricas. Como ya se ha mencionado, un MDT puede servir para representar la altitud del terreno, pero también cualquier otra variable que se pueda vincular a una posición en el espacio. Además, cualquier información (y en especial la información con una componente geográfica o información georreferenciada) necesita ser intercambiada de manera eficiente, independientemente de la plataforma en que haya sido desarrollada.

Puesto que en la mayoría de las ocasiones, la información georreferenciada es creada por personal distinto del usuario final, es necesario que el intercambio de información sea lo más completo y preciso posible. Surge así la necesidad de normalizar dicha información georreferenciada.

El comité técnico 211 (dedicado a la información geográfica) de la Organización Internacional para la Normalización (ISO) ha creado un borrador de una nueva norma sobre la transmisión de información georeferenciada (ISO, 2000). En dicho borrador aparece el concepto de *metadatos*, así como una metodología para el intercambio de los mismos. Además, también se recomienda el uso del lenguaje UML (del inglés *Unified Modelling Language*) para la representación esquemática de los datos.

El lenguaje UML fue propuesto por Booch et al. (1999) y se ha adoptado como forma estandarizada de modelización de datos para el desarrollo de software por el Object

Management Group (OMG) en 1994. Posteriormente, y como se acaba de comentar, será el lenguaje de referencia para la modelización de datos para la ISO. Según esta última organización, los beneficios de este tipo de representación del modelo de datos son varios:

- a) Proporciona al autor de dichos datos una información adecuada sobre los mismos para su posterior utilización.
- b) Facilita la organización y gestión de los metadatos propios de los datos georreferenciados.
- c) Permite a usuarios distintos del autor de los datos la utilización de los mismos de manera eficiente, gracias al conocimiento de sus características básicas.
- d) Facilita la obtención, intercambio y reutilización de los datos georreferenciados.
- e) Permite evaluar al usuario final de los datos cuáles serán de utilidad y cuáles no.

La representación UML ofrece con frecuencia una forma de representar visualmente los elementos que intervienen en una aplicación desarrollada sobre un sistema de información geográfica. Un diagrama de entidad-relación (E/R) presenta de manera concisa una panorámica de las clases definidas. Sin embargo, para un mayor nivel de detalle, sería necesario recurrir a sistemas de representación más específicos, como los diagramas de aplicación (Cox et al. 2001). A continuación se describe a grandes rasgos la esencia la representación de un modelo de datos mediante diagramas entidad-relación o UML.

2.3.1. Representación de entidades.

El elemento fundamental del lenguaje UML, en torno al cual se construye el mismo es la *entidad* o *clase*. En general, se utiliza la palabra *entidad* para el objeto real a representar y *clase* u *objeto* para la representación en el SIG. Cualquier fenómeno geográfico está caracterizado por tres componentes básicas: espacio, tiempo y atributos. Así, para describir una entidad geográfica, Friis-Christensen (2001) establece que se deben considerar los siguientes aspectos:

- Ubicación y extensión. Localización geográfica y extensión en coordenadas de un sistema de referencia específico.
- Valores temáticos. Cada entidad debe poseer varios atributos.
- Extensión temporal. Hace referencia la fecha de creación de la entidad y su período de validez.
- Geometría. Cada entidad debe estar representada mediante una estructura geométrica o topológica (punto, línea o polígono).
- Identificativo. De cara a la interacción con las distintas aplicaciones, cada entidad debe tener un identificativo único.

- Papel. Es el encargado de establecer la conexión entre el mundo real y la representación gráfica. Un mismo objeto real puede jugar distintos papeles en función de la representación que tenga. Dicho de otra forma, el papel de una entidad real depende de cada aplicación.

Además de esta información, una clase está también compuesta por un comportamiento, esto es, por unas funciones o *métodos* que le permite relacionarse con el resto de clases. La representación clásica una clase es la que se presenta en la Figura 5.1.



Figura 5.1. Representación de una clase en un diagrama UML.

Los atributos se definen a su vez en función del tipo de dato que lo constituye, que puede ser alfanumérico (texto, real, entero, binario, etc.) o espacial (punto, línea, etc.). En cuanto a los métodos, es necesario indicar el número de argumentos, el tipo de éstos y el tipo de resultado proporcionado por el método.

2.3.2. Representación de relaciones.

Este es sin duda el hecho diferenciador de este lenguaje. El lenguaje UML pretende representar no sólo los datos, sino también las relaciones que existen entre ellos. La relación básica es la asociación. Una asociación representa cualquier tipo de relación entre clases. De hecho, en muchas ocasiones un atributo se puede representar también como una asociación a una clase esa misma información.

En una asociación, debe especificarse también qué *papel* juega cada uno de los extremos. También debe especificarse la dirección que tienen las relaciones. Por último, también ha de especificarse la *cardinalidad* de cada una de las clases relacionadas. Si no se señala ningún papel, se entenderá que la relación es idéntica en ambos sentidos. En cuanto a la cardinalidad, sirve para señalar cuántos elementos de cada clase toman parte en la relación.

Tómese como ejemplo la definición de punto como objeto de naturaleza espacial. En el capítulo 2 se dijo que, en función de cómo se defina, se estará ante un objeto geográfico (si la definición se realiza a través de una enumeración explícita de las coordenadas de sus extremos) o un objeto topológico (si la definición consiste en sendas referencias a sus puntos extremos. En el primer caso, las coordenadas son propiedades definidas como atributos, mientras que en el segundo caso cada punto extremo será una clase que mantendrá una asociación con la línea. En la Figura 5.2 a) se muestra la representación de un línea como objeto geométrico, con las coordenadas expresadas como atributos, mientras que en la Figura 5.2 b) se muestra la definición de la línea topológica,

con una asociación a sendas clases que representan sus punto extremos. En este caso, la cardinalidad es claramente 2, un punto en cada extremo.

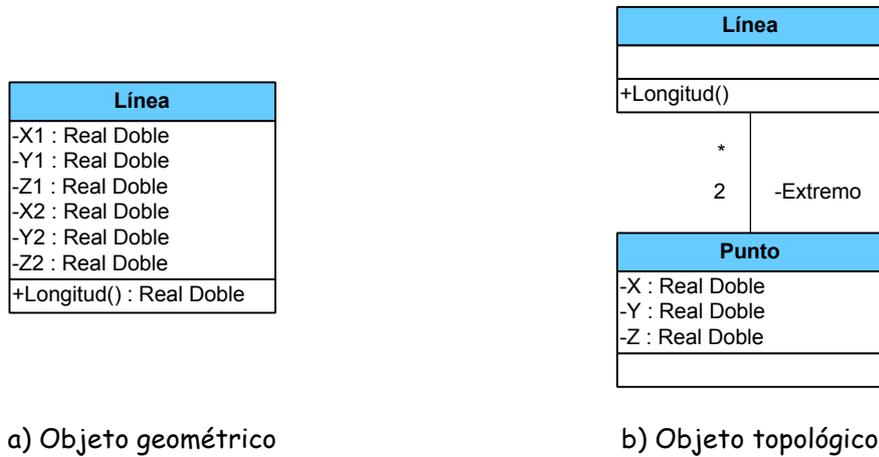


Figura 5.2. Diagramas de definición UML para una línea.

Aparte de este tipo de relaciones, existen otras tres clases de relación más específicas. La primera de ellas es la *generalización*. Se trata de una relación entre una clase genérica (superclase) y una o varias clases más específicas (subclases). En una red de agua potable, por ejemplo, éste podría ser el caso de las válvulas como clase genérica, compuesta de clases más específicas, como válvulas de regulación, de retención, de alivio, etc. En la Figura 5.3 se presenta la representación de este tipo de relaciones según las convenciones del lenguaje UML.

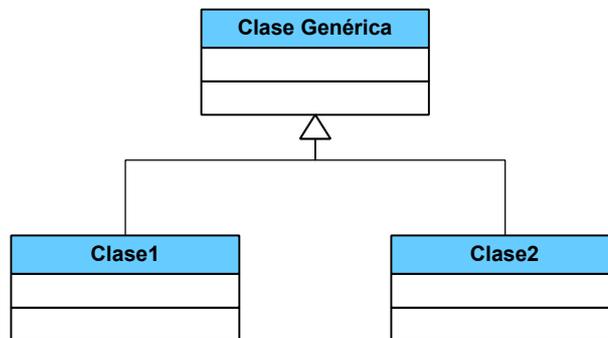


Figura 5.3. Representación UML de una generalización.

Por último nos quedan las relaciones de pertenencia o continencia, es decir, las que regulan las relaciones entre un continente y uno o varios contenidos. La primera de ellas es la *composición* en cuya representación se incluye el tipo de relación y el papel que juega cada una de las clases. Si la clase continente se borra, se borrarían todas las clases contenidas en ella.

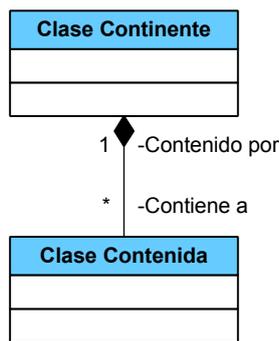


Figura 5.4. Representación UML de una composición.

Por último, otro tipo de relación continente-contenido es la *agregación*. En este caso, cualquier parte de la clase continente (más general) forma parte también de la parte más particular. Aquí, si se borra la clase continente, permanecerá la clase contenida. Un caso típico es el de los conjuntos de selección obtenidos como resultado de una consulta espacial. En ellos, la supresión de la consulta no implica la desaparición de los objetos consultados.

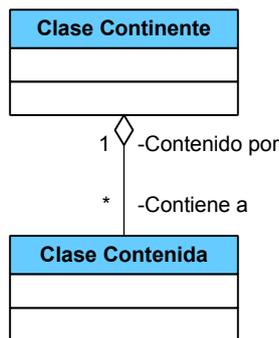


Figura 5.5. Representación UML de una agregación.

2.4. Clases espaciales simples.

Para terminar con esta breve introducción a la modelación de datos espaciales se presenta un esquema de las clases espaciales utilizadas en cualquier sistema de información geográfica. Según el Open GIS Consortium, organismo que pretende proporcionar un sistema de acceso y gestión global de la información geográfica, las clases se pueden clasificar en clases temáticas y clases espaciales. Estas últimas se subdividen a su vez en (OGC, 1999):

- Clases simples. Clases cuyas características geométricas se describen mediante geometrías simples que se pueden definir con coordenadas en dos dimensiones. En una clase simple, la curva es tratada como una sucesión de segmentos rectilíneos.
- Clases compuestas. Son clases compuestas clases definidas por composición a agregación de una o varias clases simples.

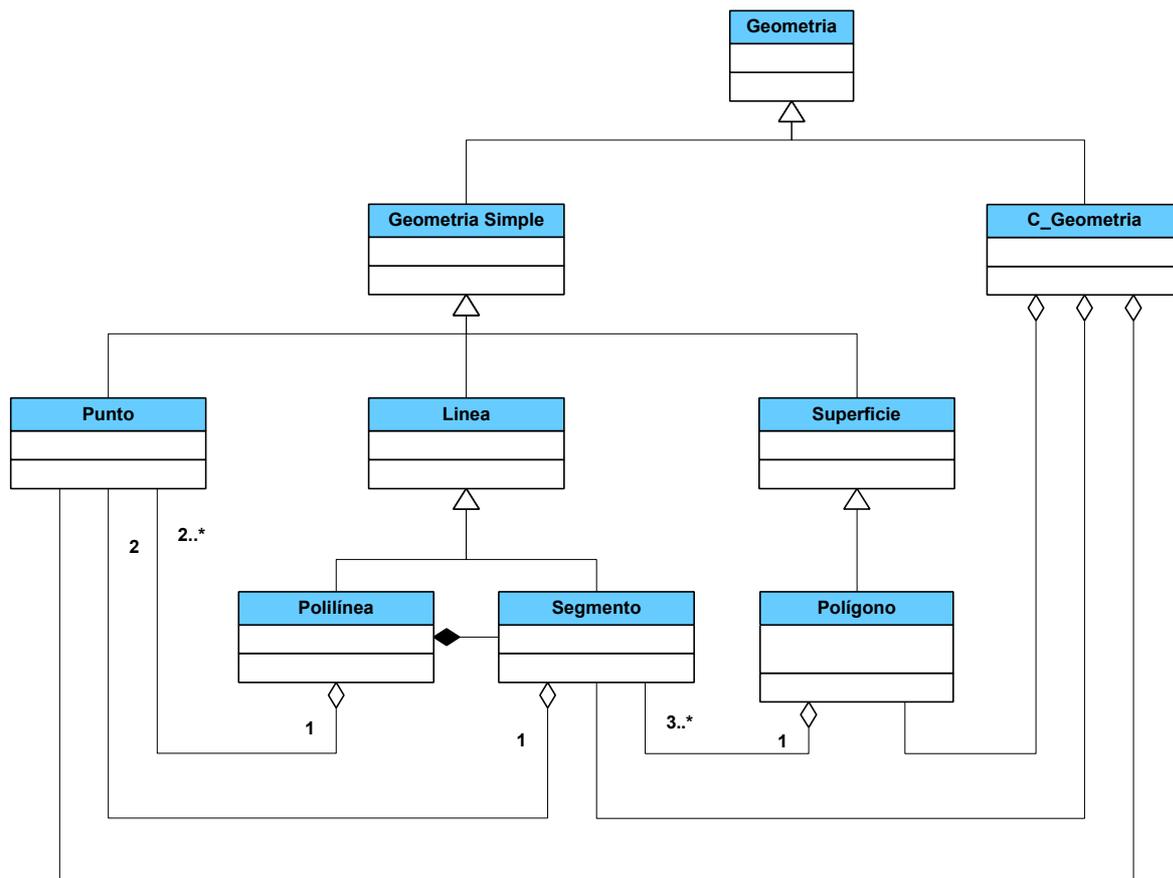


Figura 5.6. Modelo general de datos para geometrías simples en un SIG (adaptada de Cox et al., 2001).

Aunque estas clases simples muestran cierta dificultad para representar una realidad tridimensional, ya se ha comentado que en la utilización de los SIG para la modelación de redes de agua potable es habitual trabajar en dos dimensiones empleando la cota como atributo. De ahí que todo el planteamiento que sigue se apoye en estas clases simples.

Básicamente, son clase simples el punto (definido por sus coordenadas), la línea (ya sea a partir de una serie de coordenadas o como sucesión de segmentos rectilíneos) y la superficie, definida como una colección de polígonos. A partir de estas clases simples, se pueden establecer relaciones de agregación. Así, por ejemplo, un segmento tendrá dos puntos extremos y un polígono tendrá al menos tres segmentos que representen cada una de sus aristas. La Figura 5.6 representa de manera muy sencilla el modelo de datos que hace un SIG de estas clases. En esta figura se observa igualmente la definición de una clase compuesta como una colección de varias clases simples.

3. Modelo de datos para el modelo digital del terreno.

El primer modelo desarrollado en esta Tesis ha sido el modelo digital del terreno basado en la triangulación de Delaunay. A continuación se describe con un poco más de detalle la organización que se ha hecho de los datos necesarios en el SIG. En esta estructura de datos se incluye también la poligonización de Thiessen o de Voronoi, pues se

ha utilizado posteriormente en la estimación de caudales a partir de mapas de uso del suelo en ausencia de datos de facturación y guarda una estrecha relación con la red de triángulos irregulares, al ser una estructura dual.

3.1. Topología de puntos.

Como ya se ha comentado en la introducción al algoritmo de Watson, la triangulación es un método eficaz de representación cuando se dispone de un conjunto de puntos irregularmente repartidos en un plano. Los datos que dan origen a la triangulación en el SIG se almacenan en una topología de puntos discreta (no llena todo el espacio, sino sólo una serie de lugares, los ocupados por los puntos). Esta topología se forma a partir de una colección de objetos de punto (clase Punto en la Figura 5.7).

La clase Punto se ha definido mediante una estructura geométrica simple, en este caso, un punto. Puesto que, como se ha dicho, el modelo de datos se está desarrollando con una componente espacial bidimensional, la tercera coordenada Z es realmente un atributo alfanumérico que será el valor para el cual se está realizando el MDT. El atributo alfanumérico será imprescindible si se va a utilizar el MDT para realizar interpolaciones de las cotas o de cualquier otra variable puntual, pero se puede obviar en caso contrario.

3.2. Triangulación de Delaunay.

La red de triángulos irregulares se conforma a partir de la topología de puntos descrita en el apartado anterior. Esta constituye, por tanto, un conjunto generador de la triangulación. La triangulación, a diferencia de la topología de puntos, es una topología de polígonos continua que no deja huecos en su dominio, o porción del espacio que ocupa. Esta topología consta de triángulos que, junto a las propiedades propias de los polígonos, como el perímetro y el área, almacena los datos del circuncentro (de nuevo un punto del espacio) y un circunradio (un valor numérico positivo).

Cada triángulo cuenta con un método que calcula el centro del círculo circunscrito (circuncentro) y el radio del mismo (circunradio). Este método no precisa argumentos. Una de las ventajas de la programación orientada a objetos es que si un método está dentro de la definición de una clase, los datos utilizados en el mismo pueden ser los propios de esa clase y en ese caso no es preciso especificarlos como argumentos de la función.

Además, también tiene otro método o función de interpolación, que tiene recibe como argumento un punto externo cualquiera y que devolverá un valor numérico de una variable en ese punto a partir de la interpolación dentro del propio triángulo. Obsérvese que para poder interpolar un punto según el método de la distancia inversa, es preciso conocer previamente qué triángulo contiene al punto objeto de interpolación. Por ello, la topología que recoge toda la triangulación de Delaunay (constituida en la clase C_Delaunay) posee igualmente una función de localización del punto cuyo resultado es el triángulo donde aquel está incluido.

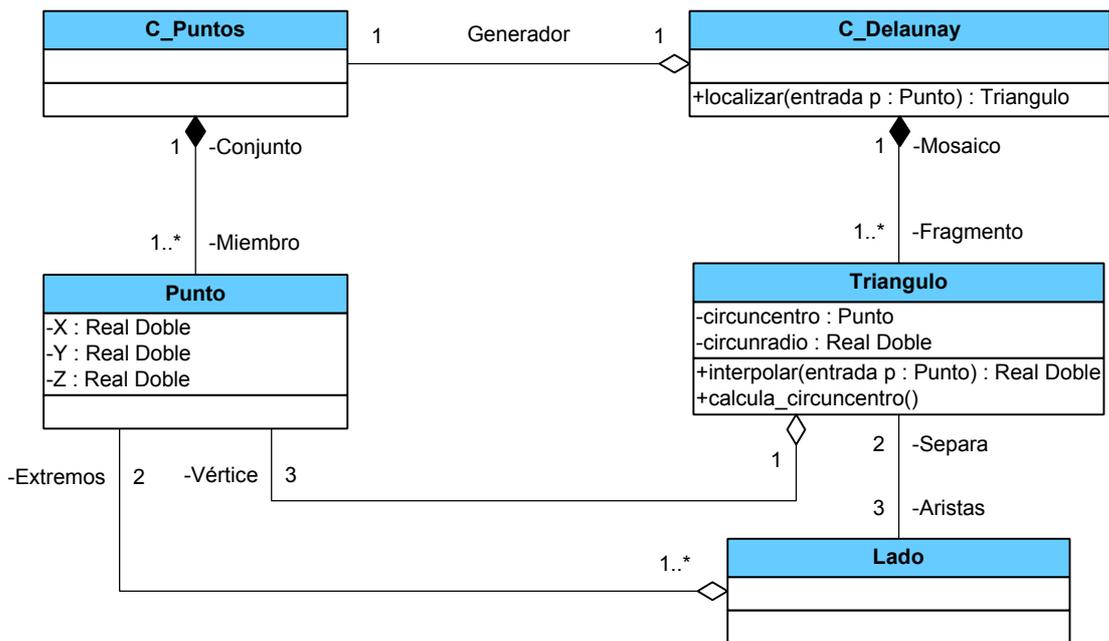


Figura 5.7. Modelo de datos para una red de triángulos irregulares (triangulación de Delaunay).

Entre los elementos de ambas topologías existe así mismo una relación. La topología de puntos comentada anteriormente sirve como base para la generación de la triangulación, tal y como se explicó en el capítulo 3. Por su parte, los elementos individuales de cada una de estas colecciones también mantienen relaciones. Un triángulo tiene tres vértices, mientras que cada vértice puede pertenecer a más de un triángulo. El hecho de que la relación sea del tipo agregación se debe a que, para formar un triángulo, deben existir los tres vértices, ya que estos constituyen su definición geográfica. Sin embargo, el borrado de un triángulo no debe significar el borrado de los vértices, pues estos tienen otras funciones, además de las de ser vértices del triángulo borrado.

En la elaboración del modelo digital del terreno se ha utilizado una tercera clase, Lado, que se utilizará posteriormente para la obtención del mosaico de Thiessen. Cada lado se ha definido a partir de sus puntos extremos y separa dos triángulos. Por ello la relación con la clase Punto es de agregación (si desaparecen los puntos extremos se pierde la definición del lado) pero la asociación con los triángulos es simple: los triángulos se han definido a partir de tres puntos, y los lados se han derivado posteriormente de esta definición.

En la Figura 5.7 se muestra el modelo de datos según la representación UML propuesta por el comité técnico de la norma ISO para la triangulación de Delaunay.

3.3. Mosaico de Thiessen.

Al igual que en el caso de la triangulación de Delaunay, el mosaico de Thiessen o de Voronoi también constituye una topología continua de polígonos. Cada polígono está formado por una sucesión de lados y éstos, a su vez, unen sendos puntos extremos. Se trata

pues de sendas relaciones de agregación entre puntos y lados primero y entre los lados y el polígono después. Además, la topología que recoge el mosaico de Thiessen tiene una relación de dualidad con la triangulación de Delaunay: dada una triangulación, el mosaico obtenido es único y viceversa, para cada mosaico de Thiessen hay una y sólo una triangulación.

Junto a estas relaciones cuya función es básicamente la definición del mosaico, el polígono tiene un atributo alfanumérico que representa la dotación o el consumo en esa parcela de terreno. Esta dotación, definida como un consumo unitario por unidad de área, combinada con la propia superficie ocupada por el polígono, proporcionará el consumo proyectado para ese polígono cuando se desconozcan los datos de facturación de los abonados incluidos en dicho polígono.

Por otro lado, el centro del polígono (que se ha de corresponder con alguno de los vértices que dieron lugar a la triangulación de Delaunay) es otro objeto importante en el mosaico. Para el cálculo del área, el método correspondiente sumará las áreas de cada uno de los triángulos formados por la unión de dicho centro con cada uno de los vértices del polígono. Además, este punto es realmente el que ha dado lugar a todo el mosaico pues, como se describió en el capítulo 3, el mosaico de Thiessen sólo es posible obtenerlo a partir de una triangulación de Delaunay, y el centro de los polígonos constituyen el conjunto generador de la triangulación. Por último, este centro del polígono será el punto de consumo donde habrá que cargar la demanda del polígono antes de proceder al cálculo hidráulico.

En la Figura 5.8 se muestra el modelo de datos utilizado para la implantación de la triangulación de Delaunay.

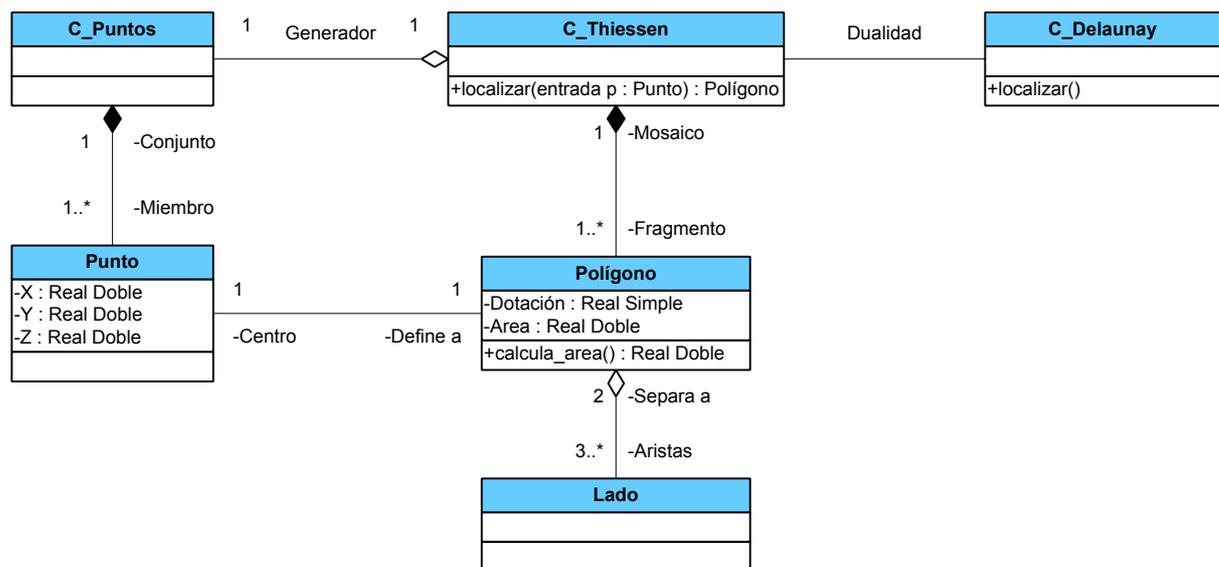


Figura 5.8. Modelo de datos del mosaico de Thiessen.

4. Modelo de datos para la gestión de abonados.

Las bases de datos para la gestión de abonados deben servir, según el esquema general de organización del SIG para su aplicación a un abastecimiento, para dos funciones principalmente:

- Por una parte, deben permitir la facturación del volumen consumido, así como la gestión de averías, avisos y reclamaciones. Para ello es necesario de disponer de datos personales de cada abonado (dirección, teléfono de contacto y datos bancarios principalmente, aunque sin excluir otros datos que puedan resultar de interés).
- Por otra parte, estas bases de datos deben ser accesibles desde los servicios técnicos de operación y explotación de la red a fin de obtener patrones de consumo para cargar el modelo o para proceder a estrategias de gestión de fugas basadas en el método de los caudales mínimos nocturnos.

Puesto que todo el trabajo desarrollado hasta ahora se ha enfocado a la integración y explotación de un modelo matemático en un entorno SIG, es esta segunda función la que interesa a la hora de desarrollar el modelo de datos.

Como es bien sabido, uno de los principales problemas de la regulación de los abastecimientos de agua potable se deriva de la naturaleza de sus usuarios. Un abonado tiene un consumo que se podría calificar de aleatorio, por cuanto sus pautas de consumo dependen de un gran número de variables.

Cuando una población es abastecida, el caudal inyectado a la red no va a ser constante, sino que nos vendrá impuesto por los usuarios en base a sus necesidades, continuamente cambiantes en función de múltiples factores. En particular, la fluctuación del consumo a lo largo del día depende fundamentalmente de que éste sea laborable o festivo, aunque influyen también las condiciones climáticas.

También el consumo medio diario varía con los meses del año y de un año para otro. De hecho, existen estudios (Bowen et al., 1993) que ponen de manifiesto que los consumos medios de cada mes se ven afectados por los hábitos de las personas, y también por las condiciones de temperatura, humedad, pluviometría e incluso dependen del tipo de vivienda del propio abonado.

Pues bien, para el análisis de una red de abastecimiento es necesario conocer no sólo el volumen consumido, sino también la variación del consumo en la red a lo largo del tiempo. Esta variación se conoce como curva de modulación y en la mayoría de los casos sólo es posible estimar estadísticamente unos valores probables de funcionamiento.

Lee Cesario (1995) clasifica la gestión de estos datos en dos categorías: obtención de demandas (caudales solicitados en los nudos de un modelo matemático) para la simulación de un instante actual o manipulación de las facturaciones para obtención de previsiones de demanda a corto o medio plazo. En cualquier caso, resulta evidente que los

datos procedentes de las facturaciones de los abonados son un parámetro muy importante en el análisis de redes.

Para ajustar el modelo de datos al uso que de estos datos se va a hacer, se han dividido los datos en dos bases de datos relacionadas mediante un código único para cada abonado. Así, en una base de datos se tendrá la información de carácter personal (direcciones, teléfonos, etc.) y en otra base de datos se almacenarán las facturaciones y cualquier otro dato que pueda resultar de interés para la asignación de cargas que se ha descrito en el capítulo 4. Aquí sólo se describirá esta segunda base de facturaciones, por ser ésta la que se utilizará para la asignación de cargas en la conexión realizada entre el SIG y el modelo hidráulico de cálculo.

Los abonados al abastecimiento se agrupan en una colección (representada en la Figura 5.10 como **C_Abonados**). Cada registro de esta tabla representa un abonado y será tratado durante la operación de asignación de cargas al modelo como un objeto con sus correspondientes atributos. En la definición de la colección de los abonados se han contemplado tres métodos u operaciones básicas que afectarán a toda la colección. Por una parte están los métodos básico de añadir o eliminar un elemento de la colección. Estas dos operaciones se corresponden con las operaciones de dar de alta o de baja un determinado usuario. Junto a éstas, también se ha definido la operación de asignación de cargas, en la que básicamente se convierte el volumen facturado de los abonados en un determinado momento designado por un parámetro que se corresponderá con la fecha correspondiente a dicho asignación y cuyo resultado será un caudal medio en el nudo de consumo al cual se haya asignado cada abonado. En el método de asignación de cargas se ha observado que un nudo puede abastecer a un número indeterminado de abonados. Por ello, la asignación de cargas se hace simultáneamente para toda la colección de abonados, y no individualmente.

Cada elemento de la colección, representado por la clase **Abonado** tendrá, como cualquier dato georreferenciado, atributos alfanuméricos y atributos espaciales. Los atributos alfanuméricos que se han considerado (a parte de los datos personales ya comentados anteriormente) son, básicamente:

- Frecuencia. Recogerá la frecuencia de lectura del contador y se medirá en meses (generalmente serán recibos bimensuales).
- Habitantes. Número de ocupantes que tiene la casa (si se trata de un consumo domiciliario), habitaciones de hotel, superficie en tiendas o industrias, etc...Se utiliza básicamente a efectos estadísticos para la estimación de caudales a medio plazo.
- Tipo. Descripción del tipo de consumidor. Se clasifican en cinco grandes tipos de consumidores: domésticos, riegos, públicos, industriales y servicios.
- Subtipo. Descripción más detallada del tipo de consumidor. Por ejemplo, un abonado del tipo doméstico se puede clasificar en función del tipo de vivienda (piso en edificio, unifamiliar adosado, chalet con parcela, chalet con parcela y piscina, etc...). Tanto el

tipo como el subtipo de abonado son importantes para determinar los patrones de consumo anuales y diarios.

- Patrón. Patrón anual de consumos, es decir, todo el histórico de consumos del abonado. Una alternativa en función de la aplicación que se vaya a hacer del modelo sería guardar sólo un patrón medio anual. Este no es un dato sino una sucesión de valores de caudales facturados, bien ordenados en distintos campos de la base de datos, bien almacenados en tablas independientes. Sin duda, éste es el dato más importante para la obtención de la demanda de cada abonado. Por la forma en que trabaja EPANET, se contempla la posibilidad de trabajar con un número pequeño de patrones de consumo, por lo que este atributo guardará una referencia al patrón que más se ajusta al abonado en cuestión.
- Volúmenes. Junto a estos datos, se ha habilitado un matriz que recogerá la serie temporal de volúmenes facturados, que han de servir, por una parte, para estimar la demanda para un caso concreto o para hacer proyecciones estadísticas del consumo a corto o medio plazo.

Además de estos atributos, la clase **Abonado** se completa con un método que calculará la demanda media de ese abonado en función del volumen consumido entre dos lecturas consecutivas. Este método es llamado desde la función de asignación antes comentada para toda la colección.

Junto a estos datos alfanuméricos, cada abonado debe estar referido a un lugar en el espacio, esto es, ha de estar georreferenciado. En el modelo de datos propuesto, esto se consigue mediante dos localizaciones. Por una parte, para una gestión eficaz de los abonados, a partir de la dirección se obtiene su localización geográfica. En este caso la entidad espacial a la cual aparece vinculado cada abonado es un punto del espacio. Según la definición que se hizo en el capítulo 2, se trataría de un objeto geográfico definido a través de sus coordenadas.

Sin embargo, para el trabajo con modelos hidráulicos, es más importante si cabe las relaciones de adyacencia entre entidades que la posición en sí misma. Como ya se ha comentado, cualquier método de análisis de redes, y el método del gradiente en particular, requiere la definición de matrices topológicas que almacenen esta información. Por este motivo, junto a la localización geográfica anterior, también se trabaja con una localización topológica. En este caso, la entidad espacial a la que se vincula el abonado es un nudo de la red de distribución, que es el que le abastece.

Sea cual sea la técnica utilizada para la simplificación de modelos, lo cierto es que algunas (o muchas) de las tuberías representadas en el modelo de realidad que incorpora el SIG desaparecerán en el modelo matemático de la red. Sin embargo, los abonados que consumen directamente de éstas deben ser asignados a otros puntos de consumo que sí permanezcan en el modelo. No es cuestión ahora de revisar los procesos de asignación de

cargas, pues ya se hace en el capítulo siguiente. Sin embargo, sea como fuere, lo cierto es que los abonados tendrán una ubicación topológica que dependerá de la configuración de la red y que puede variar con ésta.

Si bien ya se comentó la diferencia entre objeto geográfico y objeto topológico en el capítulo anterior, se plantea a continuación un ejemplo de doble localización de un abonado tras un proceso de simplificación de una red para obtener un modelo matemático de la misma.

Supóngase que se tiene el modelo de realidad de la red completa presentada en la parte izquierda de la Figura 5.9. En ella se nos muestra a cuatro abonados ubicados en la localización geográfica marcada por su dirección postal. Como se comentó, una de las fases de la elaboración del modelo matemático es la simplificación del mismo. En este caso se asume una simplificación sencilla basada en la eliminación de tuberías de distribución de pequeño diámetro que constituyan ramificaciones de la red principal. Tras las simplificaciones pertinentes, el modelo matemático quedaría como se muestra en la parte derecha de la misma figura. En dicho modelo, los abonados anteriores, aunque permanecen físicamente en el mismo sitio (ni su dirección ni su ubicación geográfica se han modificado), han sido asignados al punto de donde partían la tuberías de distribución simplificadas.

Esta estrategia de utilizar una doble ubicación de cada abonado permite agilizar el trabajo con distintos tipos de modelos. Así, un mismo abonado se podrá utilizar con un modelo de detalle o con otro estratégico sin más que modificar su ubicación topológica.

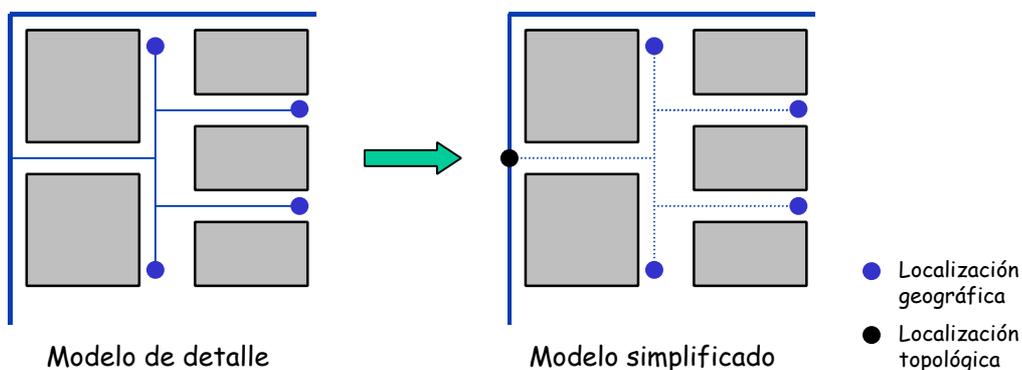


Figura 5.9. Diferencia entre localización geográfica y localización topológica de un consumo.

Por último, se contempla también en el modelo de datos de abonados la posibilidad de trabajar con redes sectorizadas. Cuando se trabaja con este tipo de redes, es habitual encontrar un caudalímetro a la entrada de cada sector de tal manera que es posible conocer el comportamiento dinámico del caudal consumido en el mismo. Así, si completamos la información del caudal inyectado en el sector con las facturaciones del mismo se puede obtener un rendimiento volumétrico de cada sector que se utilizará posteriormente para corregir las demandas calculadas de tal forma que se verifique el balance de caudales.

Además, también permitirá extrapolar de alguna forma la curva de modulación del sector a los nudos de consumo del mismo. Esta información será tanto más útil cuanto más aislado esté el sector, siendo el caso ideal aquel en que el sector tiene un único punto de alimentación.

Por todo ello, se ha definido una colección de sectores (**C_Sectorización**) que engloba a todos y cada uno de los sectores definidos en la red. Esta sectorización incluye una función de localización por la que, dada una geometría cualquiera, devuelve como resultado una referencia al sector en el que se encuentra. Además, cada individuo de la colección, representado por la clase **Sector** recoge en sus atributos todas las cuestiones comentadas en el párrafo anterior:

- Patrón. Al igual que sucede con los abonados, será una referencia a una curva de modulación almacenada en base de datos aparte.
- Rendimiento. Determina el rendimiento hidráulico medio del sector, y deberá calcularse a partir del cociente entre caudal inyectado y caudal medido.
- Caudal Mínimo Nocturno (CMN). Si se va a utilizar el modelo como un método de detección de fugas basado en la técnica de los caudales mínimos nocturnos descrita en el capítulo 2, será necesario disponer de un valor del CMN para cada uno de los sectores.
- Aislado. Se trata simplemente de una variable binaria que determina si el sector está hidráulicamente aislado (con un único punto de conexión con el resto de la red) o no. Este dato es importante en el cálculo tanto del rendimiento como del caudal mínimo nocturno.
- Caudal medido. Será una matriz que recogerá la serie histórica de caudales medidos. Este dato debe ser vinculado a una base de datos mayor, pues deberá almacenar los registros del caudalímetro (si lo hay). Dado que la cantidad de datos recogidas puede ser extraordinariamente grande en función del tipo de caudalímetro, es recomendable conservar aquí datos con poca antigüedad y almacenar el resto en lugar aparte.

Resulta evidente que cada sector debe contar con sendas funciones que permitan el cálculo tanto del rendimiento hidráulico del mismo como del CMN a partir de los atributos descritos anteriormente. En la Figura 5.10 se muestra un esquema completo del modelo de datos utilizado para la gestión de los abonados desde el punto de vista de la creación y manipulación de modelos matemáticos de redes.

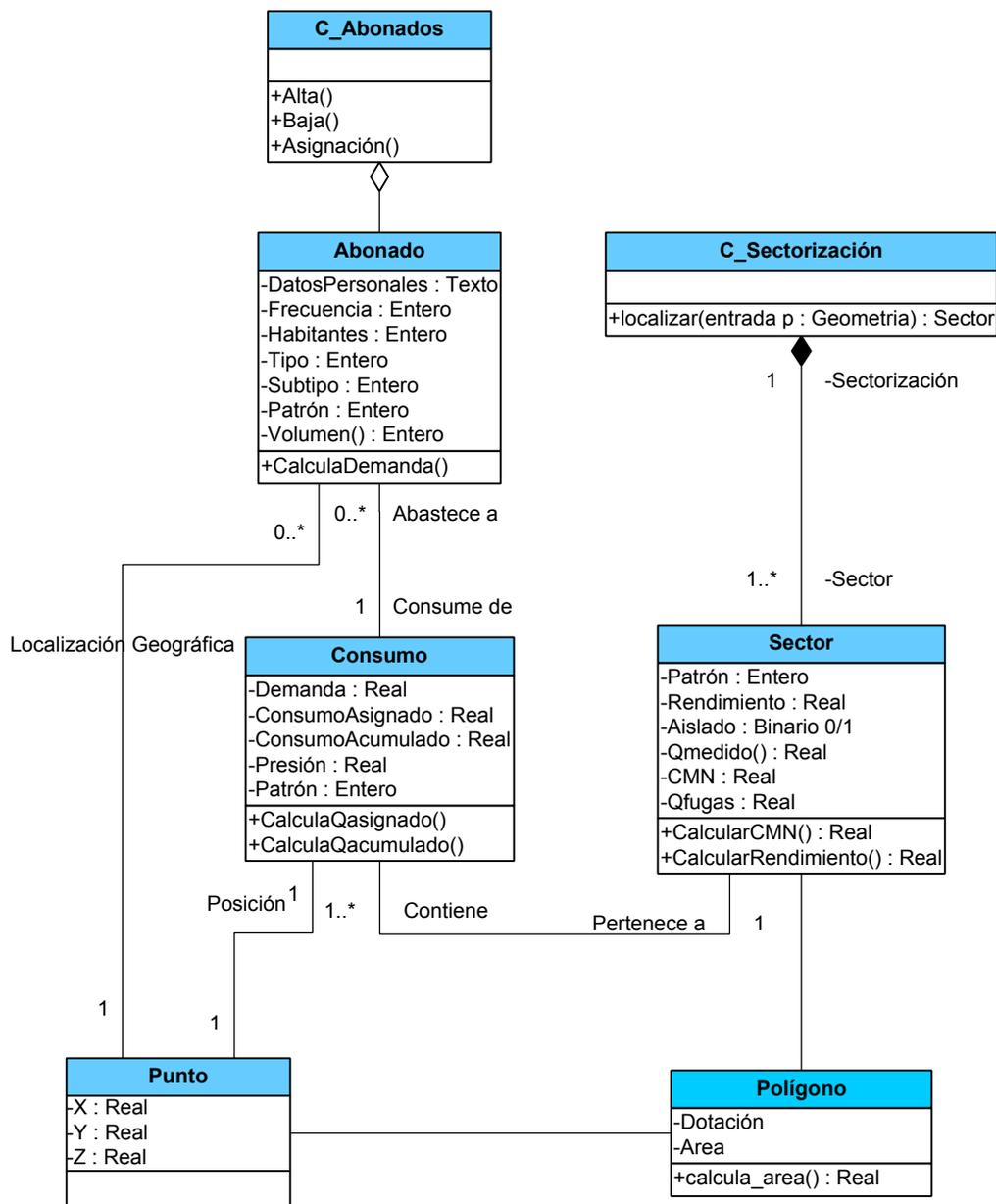


Figura 5.10. Modelo de datos para la gestión de los abonados.

5. Modelo de datos para los elementos de la red.

5.1. Estructura general de los datos.

Sin duda, esta es la parte central de toda la aplicación desarrollada para la modelización y cálculo de redes en el entorno del SIG. Esta aplicación se ha denominado genéricamente SIG_EPA. Las letras EPA hacen referencia a la Environmental Protection Agency pues, como ya se comentó previamente, se ha adoptado su modelo EPANET, en su versión *EPANET ToolKit* para programadores (Rossman, 2000) como motor de cálculo hidráulico.

El programa EPANET necesita para su ejecución dos conjuntos de datos claramente diferenciados. Estos constituyen el esqueleto principal de todo el modelo de datos. Por una parte, en la aplicación que se ha desarrollado se han englobado dentro de una clase denominada **Entorno** los datos relativos a la configuración del cálculo. Por otra parte se encuentra la descripción de la propia **Red**, que será en realidad el resultado de todo el proceso de modelización de los elementos de la red real (Figura 5.11).

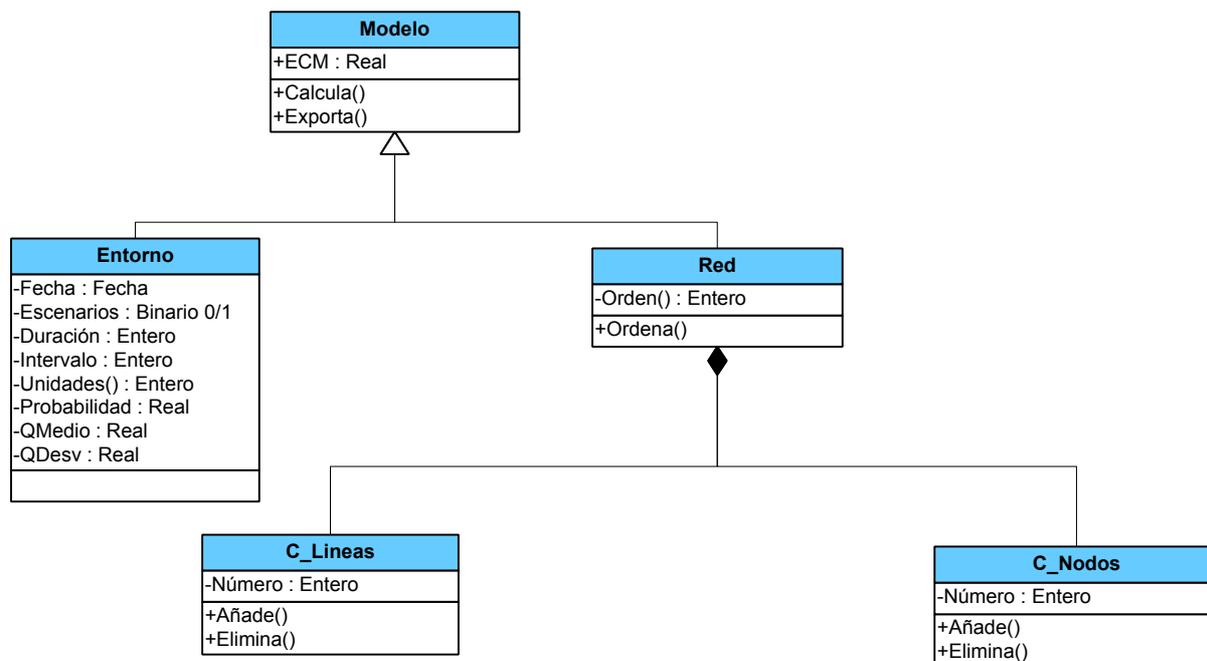


Figura 5.11. Clases principales de un modelo matemático.

La clase **Entorno** debe incluir información sobre:

- Fecha. Para identificar las condiciones en que se realizaron los cálculos se incluye la fecha a la que corresponde el propio cálculo. Esta fecha permitirá, por ejemplo, identificar si se están calculando condiciones correspondientes a invierno o a verano, y si se trata de un consumo real (si la fecha es pasada o presente) o proyectada (con fecha correspondiente al futuro). Además, en el primer caso, la fecha se utilizará para realizar la asignación de cargas tal y como se mostró anteriormente en la Figura 5.10.
- Escenarios. Hará las veces de *bandera*, es decir, un código binario que servirá para indicar si se trata de una simulación por escenarios (por ejemplo, para cálculo con caudales punta o con CMN) o si, por el contrario, se trata de una simulación en período extendido, para la cual será necesario utilizar curvas de modulación.
- Duración. En el caso que el atributo anterior señale una simulación en período extendido, este atributo guardará la duración de tal simulación.
- Intervalo. Guarda relación con el atributo anterior y almacena el intervalo de cálculo de la simulación. El programa EPANET permite trabajar con intervalos distintos para la

curva de modulación y para la simulación. En este caso, el intervalo de la curva de modulación será un atributo de la propia curva.

- **Unidades.** Consistirá en una matriz de números enteros que recogerá las unidades empleadas para cada uno de los distintos parámetros, evitando tener que trabajar forzosamente en un sistema de unidades concreto. Los cambios de unidades se realizan internamente.
- **Caudal medio por aparato y desviación típica del mismo.** Estos datos se utilizarán como parámetros en el proceso estadístico empleado para determinar el coeficiente de punta en cada línea y el caudal punta.
- **Probabilidad.** Para la simulación por escenarios, probabilidad de ocurrencia del escenario modelado. Este atributo se utilizará indistintamente tanto si el escenario es el descrito en la Tesis de caudales punta como si se opta por un modelo de detección de fugas basado en el método de los caudales mínimos nocturnos.

A este modelo de datos del entorno del modelo se les pueden añadir otros atributos, como la densidad utilizada para el cálculo, la viscosidad del fluido o el tipo de análisis de la calidad realizado. Sin embargo, en el desarrollo de esta Tesis se acepta que se trabaja con agua en condiciones normales (valores por defecto utilizados por el propio EPANET) y no se ha contemplado el análisis de la calidad del agua.

Junto a la información relativa al entorno en el cuál se ha desarrollado el modelo matemático, la otra componente es la propia red. Sin duda, ésta es la clase principal del modelo. Como cualquier programa de simulación hidráulica, EPANET interpreta una red de distribución de agua como un conjunto de líneas conectadas entre sí por sus extremos, denominados genéricamente nodos. Así pues, una red se compone de dos colecciones de objetos: **C_Líneas** y **C_Nodos**, tal y como se muestra en la Figura 5.11.

También durante la descripción del método para determinar los caudales punta se ha descrito una forma de ordenar topológicamente la red a fin de realizar el cálculo. Por tanto, la clase **Red** tiene como atributo únicamente una matriz que recoge el orden que ha de seguirse para después de cada cálculo para determinar el caudal punta en las líneas. Para obtener este orden, la red también debe incorporar un método realice la ordenación topológica descrita en el capítulo 4 y cuyo resultado serán las referencias a cada uno de los nudos y que se guardarán en la matriz anterior.

Para entrar en el detalle de cómo se almacena la red ha de tenerse en cuenta la abstracción que el módulo de cálculo hace de cada elemento de la misma. Según el modelo hidráulico adoptado, son nudos los puntos de consumo (nudos de conexión) y los puntos de inyección o almacenamiento (nudos de altura piezométrica conocida) bien como embalses (con altura constante a lo largo del tiempo, bien como depósitos (con altura variable en función de su nivel de llenado).

Son líneas, siempre según la concepción de EPANET, las tuberías, las bombas y las válvulas (independientemente de qué tipo de válvula se trate).

Sin embargo, esta división entre líneas y nudos es meramente hidráulica y atiende a la concepción interna que el programa hace de dichos elementos. Si bien una válvula efectivamente es un elemento con una entrada (nudo inicial) y una salida (nudo final), cuando se intenta digitalizar en un SIG carece de la magnitud que, geográficamente hablando, caracteriza a una línea: una longitud. Bien es cierto que una válvula posee una longitud, pero con las escalas de trabajo habituales, en la práctica su representación queda reducida a un punto y, de hecho, se tratará como tal. Se plantea pues un problema, pues existe una serie de elementos de la red que se han de representar en el SIG como entidades puntuales, pero en su conexión con un modelo hidráulico de análisis han de ser tratados como líneas. Macke (2001) resuelve el problema mediante el uso de las topologías y las relaciones direccionales entre los elementos, es decir, haciendo uso del concepto de orientación visto en el capítulo anterior.

A continuación se estudia el comportamiento de cada uno de los elementos topológicos e hidráulicos que componen una red considerados por EPANET. Los primeros se han clasificado, en nodos y líneas de la topología. Los segundos, en entidades puntuales; entidades lineales y pseudolíneas o entidades lineales con representación gráfica puntual. Este estudio se completa con el consiguiente modelo de datos de cada elemento hidráulico considerado individualmente y su tratamiento conjunto como entidad en el SIG.

5.2. Entidades topológicas.

Las entidades topológicas, u objetos topológicos, ya se definieron en el capítulo 2. Entre otros atributos, almacenarán toda la información sobre la conectividad. Para el caso de una red de distribución de agua, son dos: el nodo y la línea.

5.2.1. Nodo

Reúne todos los atributos topológicos compartidos por los nudos de la red. La clase genérica denominada **Nodo** recoge los atributos comunes a todas las entidades hidráulicas puntuales. En la clase **Nodo** se almacenarán los datos espaciales correspondientes a su ubicación geográfica (ubicación en el espacio) y topológica (a partir de las matrices de conectividad que se explicaron en los capítulos 3 y 4). Estos atributos comunes están todos relacionados con la topología. Aparecen así la lista de adyacencia de las tuberías situadas aguas arriba (*LineasUW*) y aguas abajo (*LineasDW*), así como la componente conexa y el orden de cálculo utilizados en el cálculo de los caudales punta. El modelo se completa con una función que calcula las conectividad después de cada iteración, lo que implica la modificación de los cuatro atributos anteriores.

5.2.2. Línea

Las líneas guardarán, entre otros atributos, las referencias a sus nodos extremos. En la Figura 5.16 se ha expresado esta referencia como una asociación 1 a 2 con los nodos. Esto significa que una línea estará asociada topológicamente con dos nodos, que serán sus extremos. Además de esta información, vital para la construcción de la red, también se almacenarán los resultados devueltos por EPANET para cualquier línea. En este caso, para evitar la redundancia de información, sólo se almacenará el caudal, pudiéndose determinar la pérdidas mediante un método que las evalúe como diferencia de alturas piezométricas entre los nodos extremos asociados.

Junto a esta información básica, las líneas también han de permitir la gestión de los caudales punta según el método expuesto en el capítulo anterior. Por ello, cada línea tendrá dos atributos que guardarán el caudal calculado por EPANET y el caudal punta estimado para la misma. Como el cálculo de la red para escenarios de caudales punta es un cálculo iterativo que requiere la actualización del caudal punta en cada iteración, la clase *Línea* se completa con sendos métodos para el cálculo del caudal punta y de puesta a cero de los datos de caudales.

5.3. Entidades puntuales.

Básicamente, se consideran tres tipos distintos de nudos: nudos de consumo o de conexión, embalses o depósitos de nivel constante y tanques o depósitos de nivel variable. Todos ellos tienen en común el estar representados gráficamente mediante un punto. Además, todos tienen un dato en común: la cota o elevación sobre el nivel del mar. La ecuación más completa que caracteriza cualquier elemento puntual j es la ecuación de continuidad (5.1), que expresaremos como sigue:

$$\sum_i Q_{ij} - q_j = S_j \frac{\Delta H_j}{\Delta t} \quad (5.1)$$

En esta ecuación, el significado de los distintos términos es:

- Q_{ij} caudal que circula desde el nudo i hasta el j . Este caudal es positivo si es de llegada al nudo y negativo en caso contrario.
- q_j caudal que abandona el sistema (demanda) o ingresa en él a través del nudo j . Este caudal es positivo si es consumido en el nudo y negativo en caso contrario.
- S_j sección transversal del nudo j .
- H_j altura piezométrica en el nudo j .
- Δt incremento de tiempo de cálculo, utilizado en simulación en período extendido (modelo cuasi-estático).

Todos estos elementos tienen componentes comunes. Sin embargo, su comportamiento hidráulico difiere en cada uno de los distintos tipos de nudos vistos. A continuación se describen las peculiaridades de cada uno de ellos.

5.3.1. Nudos de consumo y conexiones

Los nudos de consumo son puntos en la red donde se unen los elementos lineales. También se utilizan para representar los puntos por donde entra o sale el agua de la red. La información básica que se requiere para las uniones consiste en posición (coordenadas X, Y, Z) y el caudal demandado (que será positivo si es caudal consumido y negativo si se trata de caudal inyectado).

Durante el cálculo su comportamiento viene representado por la ecuación de continuidad (5.1). En esta ecuación el término se anula en el lado derecho de la igualdad al no poseer este tipo de elementos ninguna capacidad de almacenamiento ($S_j = 0$). El resultado que se obtiene de los nudos de consumo a lo largo de toda la simulación es la altura piezométrica (H_j) o energía interna por unidad de masa del fluido. De ésta se deriva también la presión restando la cota.

Por tanto, el modelo de datos básico, según la descripción de nudo de consumo deducida del programa EPANET se ha recogido en una clase **Consumo**. Puesto que el modelo de datos ha de permitir la integración entre el cálculo hidráulico y la metodología propuesta para la asignación de cargas, cada nudo de consumo ha de almacenar los siguientes atributos:

- **Demanda facturada.** Recogerá el resultado del proceso de asignación de cargas descrito para el sistema de gestión de abonados. Corresponderá al caudal medio obtenido para cada nudo a partir del volumen facturado en un determinado intervalo entre lecturas del contador.
- **Consumo asignado.** La diferencia entre este dato y el anterior es que éste es el que se pasa como demanda al programa de cálculo. En el caso de un cálculo en período extendido los datos serán coincidentes, pero en el caso de una simulación por escenarios el consumo asignado será el que se describió en la ecuación (4.65) del capítulo anterior.
- **Consumo acumulado.** También viene derivado del algoritmo de cálculo para caudales punta. En este caso, esta variable recogerá el consumo medio demandado por todos los abonados que consumen de cualquiera de los nudos de consumo que se encuentren en la componente conexas del nodo en el cual se halla el nudo de consumo.
- **Presión.** Es el resultado obtenido tras el cálculo hidráulico.

Puesto que tanto el caudal acumulado como el caudal asignado deben actualizarse en cada iteración, cada nudo de consumo debe tener una función que realice ambos cálculos.

5.3.2. Tanques o depósitos de nivel variable.

Los tanques son depósitos con capacidad de almacenamiento, por lo que el volumen almacenado en los mismos varía de un instante a otro. Además, como consecuencia de esto, el nivel del agua en los mismos variará en función del llenado o vaciado del mismo. Los datos necesarios para este tipo de elementos son la cota de la solera del tanque (z), la sección transversal del mismo (A), los niveles máximo (H_{max}) y mínimo (H_{min}) del agua en su interior y un nivel inicial para comenzar los cálculos. La ecuación de continuidad en este caso quedará exactamente como se ha representado en la expresión (5.1) y los resultados que se obtendrán serán el nivel del agua (calculado como presión, p) y el caudal de entrada (o salida) al tanque, q . En la Figura 5.12 se presenta un esquema con la representación de todos estos atributos. Para un detalle del modelo de datos, véase la Figura 5.16.

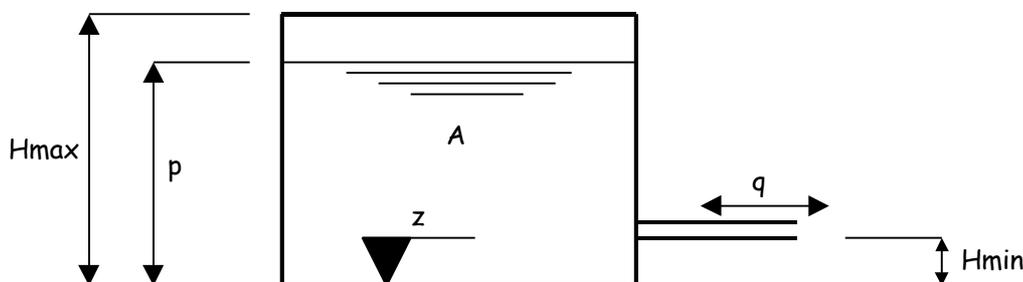


Figura 5.12. Esquema de un depósito con los datos necesarios para su modelización.

5.3.3. Depósitos de nivel constante o embalses.

Los depósitos son nudos que representan una fuente externa con capacidad infinita en comparación con el consumo del sistema. También pueden representar un sumidero igualmente inmenso. Son utilizados para modelar lagos, ríos, acuíferos subterráneos y conexiones con otros sistemas. Incluso también se utilizan para representar puntos de inyección de caudal a través de bombas de pozo de las que lo único que se conoce es la lectura del manómetro a la salida.

La principal característica de un depósito de nivel constante es que su carga hidráulica o altura piezométrica se mantiene constante durante el cálculo, es decir, es un dato. Si se trata de un depósito, la altura piezométrica será igual a la cota por encima del nivel del mar de la lámina de agua. Si el depósito por el contrario representa un punto de conexión con otra red (por ejemplo, para el estudio de sectores de la red), la altura piezométrica será la del punto de conexión, igual a la cota de dicho punto más la presión en el mismo.

Ya que el depósito es un punto frontera de la red, su altura no puede verse afectada por lo que ocurra en el resto del sistema. A pesar de todo, es posible variar su altura con el tiempo si le asignamos un patrón de tiempo para representar el caso ya comentado de un punto de conexión con otra red no modelada.

En los depósitos, la ecuación representativa es también la ecuación de continuidad pero con una diferencia con los nudos de conexión: en este caso el caudal consumido o aportado por el nudo es resultado del cálculo y no dato. Además, la variación de altura piezométrica es nula al ser ésta constante, por lo que la ecuación quedaría igual que en el caso anterior, con un cero en el lado derecho de la igualdad.

5.4. Elementos lineales

Una línea es un elemento que une dos puntos. Por tanto, la principal característica de los elementos lineales es su representación gráfica como línea o *vector*, con un nudo inicial y otro nudo final. Hidráulicamente, una línea viene representada por la ecuación de conservación de la energía o ecuación de Bernoulli:

$$H_i - H_j = f(Q_{ij}) \quad (5.2)$$

En esta ecuación,

H_i, H_j alturas piezométricas en los nudos i y j respectivamente.

Q_{ij} caudal que circula desde i hasta j .

$f(Q_{ij})$ función del caudal Q_{ij} que representa la pérdida o ganancia de carga desde i hasta j .

La forma genérica de modelar una línea que une dos nudos i y j será la que se presenta en la Figura 5.13. En la realidad, los únicos elementos que se ajustan bien a la representación mediante un línea son las tuberías.



Figura 5.13. Modelación de una línea.

Para una tubería, la expresión (5.2) queda como:

$$f(Q_{ij}) = r \cdot Q_{ij}^n + m \cdot Q_{ij}^2 \quad (5.3)$$

Aquí,

r coeficiente de pérdidas de carga por fricción.

n exponente del caudal, utilizado en la ecuación de pérdidas de carga en la tubería.

m coeficiente de pérdidas menores.

El valor del coeficiente de pérdidas por fricción dependerá de la ecuación de pérdidas utilizada. El programa de simulación EPANET contempla tres posibles ecuaciones para calcular las pérdidas de carga, las cuales se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Parámetros de las ecuaciones de pérdidas de carga utilizadas por EPANET.

Fórmula	Coefficiente de Pérdidas (r) (*)	Exponente del Caudal (n)
Hazen-Williams	$\frac{10,646 \cdot L}{C^{1,852} D^{4,87}}$	1,852
Darcy-Weisbach	$\frac{8 \cdot f(Re, \epsilon) \cdot L}{\pi^2 g \cdot D^5}$	2
Chezy-Manning	$\frac{10,29 \cdot n^2 \cdot L}{D^{16/3}}$	2

(*) Expresiones válidas para unidades del SI.

En las expresiones anteriores C es el coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams, ϵ es la rugosidad interior de la tubería, f el factor de fricción (que depende de ϵ , D , y Q), n el coeficiente de rugosidad de Manning, D el diámetro interior de la tubería, L la longitud de la tubería y Re el número de Reynolds.

De modo general, los datos necesarios en una tubería son la longitud, el diámetro y la rugosidad de la misma (que será diferente según la ecuación de pérdidas empleada. Adicionalmente se pueden necesitar las pérdidas menores o localizadas, bien a través del coeficiente m antes mencionado, bien como una expresión de la velocidad del fluido en el interior de la conducción (v_{ij}):

$$m \cdot Q_{ij}^2 = K \frac{v_{ij}^2}{2g} \Rightarrow m = \frac{8K}{g\pi^2 D^4} \tag{5.4}$$

En esta expresión, K es un coeficiente para cuantificar las pérdidas menores como una fracción de la energía cinética del fluido.

A estos datos, impuestos por la utilización del programa EPANET, habrá que añadir aquellos necesarios para el cálculo de la red para un escenario correspondiente a caudales punta. Sin embargo, estos cálculo se basan en la conectividad y, al igual que se ha hecho con los nodos, se ha creado una clase Línea que recoja todos los atributos y funciones que tengan que ver con la conectividad.

En definitiva, la tubería como tal sólo almacenará los datos propios de una tubería, dejando de lado las conexiones topológicas y el resultado del cálculo para las tuberías, que será el caudal que circula por ellas.

5.5. Elementos hidráulicos lineales con representación gráfica puntual.

5.5.1. Tratamiento general

Antes de entrar en el modelo de datos propiamente dicho, se revisará la solución propuesta por Macke (2001) para facilitar la representación de las bombas y las válvulas como puntos o nodos de una topología en el SIG sin que ello impida utilizarlas como elemento hidráulico lineal en EPANET. Son, por tanto, líneas virtuales.

Conceptualmente la solución encontrada presenta una importante diferencia con respecto al modelo de datos utilizado en EPANET. En EPANET tanto las bombas como las válvulas necesitan que se incluya su orientación, es decir, llevan implícito el sentido de circulación del caudal a través de ellas. Sin embargo, en el SIG este concepto es propio de las líneas, no de los nudos. Puesto que en el SIG los nudos no suelen almacenar la orientación en los nudos, se plantean dos alternativas para resolver este problema. La primera pasa por añadir a la información almacenada en el modelo de datos del SIG la información sobre la orientación de cada una de estas líneas virtuales. Eso conlleva un incremento en el espacio necesario para guardar la información. La otra alternativa consiste en realizar un pretratamiento de la información y recoger la información sobre orientación.

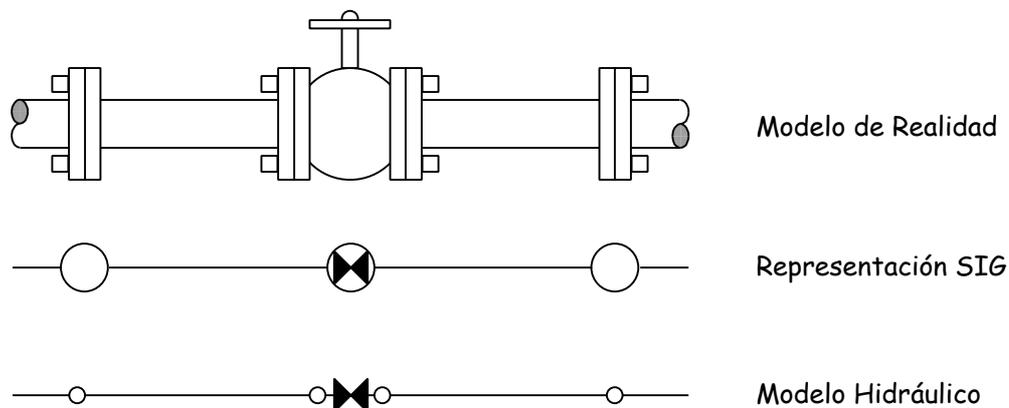


Figura 5.14. Transición de una válvula desde el modelo de realidad hasta el modelo hidráulico.

Cuando se trata de representar ciertos elementos en el SIG, como es el caso de bombas y válvulas, éstos se representan como puntos (ver Figura 5.14). Si bien hidráulicamente hablando tienen características propias de las líneas (el caudal es el resultado del cálculo, existe un gradiente de alturas piezométricas entre la entrada y la salida, etc.) tienen una carencia que los distingue de éstos: no tienen longitud y carecen, por tanto, del concepto de tiempo de recorrido. En este sentido, sobre todo para su representación gráfica, el punto es el objeto que mejor los representa. Sin embargo, si se crea en el SIG una topología de red, los nodos (puntos) no contienen información sobre la orientación, mientras que los elementos como la bomba tiene una orientación clara (sólo

permite impulsar en un sentido). Esta es la principal dificultad al pasar de los datos SIG al modelo hidráulico. Este problema se puede resolver de dos formas:

Solución 1: almacenar para cada nodo de la topología la información sobre la orientación del elemento en cuestión.

Solución 2: realizar un tratamiento previo de los datos del SIG antes de crear el modelo hidráulico, aprovechando la información sobre la orientación almacenada en las líneas de la topología.

La segunda solución parece la más adecuada pues no requiere el almacenamiento de información adicional. Además, el pretratamiento de la información es igualmente necesario para comprobar la conectividad o para llevar a cabo el método de asignación de cargas a un modelo de detalle, como se verá más adelante en esta Tesis.

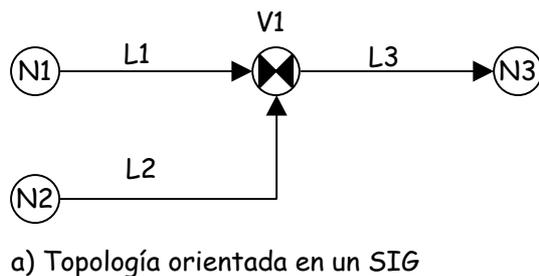
Macke (2001) propone dos condiciones en los datos para el tratamiento de estas *líneas virtuales* o *pseudolíneas*:

1. Cada línea virtual debe tener un índice de conectividad 2, es decir, debe estar conectada a dos líneas.
2. Las dos líneas que se conectan con la línea virtual deben estar orientadas de la misma forma, es decir, una línea de llegada y otra de salida.

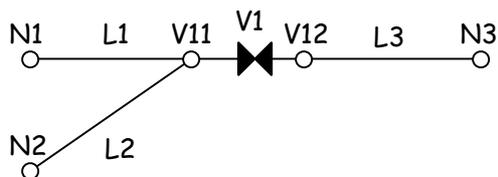
Sin embargo, estas condiciones resultan poco flexibles a la hora de realizar simplificaciones en el modelo hidráulico, pues obliga a que cualquier bomba o válvula deben estar necesariamente acompañadas de un tramo de tubería a ambos lados del elemento en cuestión. Como estas condiciones no son realmente necesarias, se ha impuesto una única condición para validar una línea virtual: debe tener al menos una línea aguas arriba y otra línea aguas abajo. Así el proceso de transición del SIG al modelo hidráulico se realizará como sigue (ver Figura 5.15):

1. Comprobación del número y orientación de las líneas conectadas a la línea virtual para su validación.
2. Creación de dos nuevos nudos que representen los dos extremos de la línea virtual.
3. Creación del elemento hidráulico (válvula o bomba) representado por la línea virtual.
4. Redefinición de la topología incluyendo las modificaciones anteriores.

Con este proceso, se consigue convertir un punto del SIG en una línea con inicio y final en el modelo hidráulico que se realiza de la red.



a) Topología orientada en un SIG



b) Modelo matemático de la red

Figura 5.15. Utilización de las orientaciones para la creación de entidades lineales con representación gráfica puntual.

5.5.2. Válvulas

Para el cálculo de las válvulas es necesario incorporar como mínimo dos datos: el diámetro de la misma y el coeficiente de pérdidas de ésta cuando su grado de apertura es el que se desea simular. Si además de esto, la válvula debe hacer otras funciones, como actuar como válvula de retención, por ejemplo, esto también debe quedar registrado en la base de datos del modelo matemático. De manera general, las pérdidas en una válvula vienen representadas por la función:

$$H_i - H_j = K \frac{v_{ij}^2}{2g} \tag{5.5}$$

Sin embargo, esta expresión sólo se verifica para las válvulas de regulación, es decir, aquellas que se accionan para ser abiertas en mayor o menor medida, pero cuyo accionamiento depende de circunstancias externas al funcionamiento del modelo (un operador, un SCADA, etc.). Sin embargo, existen otro tipo de válvulas cuyo funcionamiento depende de los resultados que aporte la simulación hidráulica. A continuación se hace un breve repaso de éstas.

Los diferentes tipos de válvulas que incluye EPANET son:

- Válvulas Reductoras de Presión (VRP). Las VRPs limitan la presión en un punto de la red de tuberías. EPANET diferencia tres estados en los que puede trabajar:
 - parcialmente abierta (es decir, activa) para mantener una presión aguas abajo siempre que la presión aguas arriba sea superior a esta,

- totalmente abierta cuando la presión aguas arriba está por debajo de la de tarado, y
- cerrada, si la presión aguas abajo es superior a la presión aguas arriba, para impedir el flujo inverso.
- Válvulas Sostenedoras de Presión (VSP). Las VSPs mantienen una presión determinada en un punto específico de la red de tuberías. EPANET diferencia modos de funcionamiento:
 - parcialmente abierta para mantener una presión de tarado aguas arriba cuando la presión aguas abajo es menor,
 - totalmente abierta si la presión aguas abajo es superior a la de tarado, y
 - cerrada si la presión aguas abajo es superior a la presión aguas arriba para impedir el flujo inverso.
- Válvulas de Rotura de Carga (VRC). Las VRCs fuerza a que la caída de presión en la válvula sea siempre un valor predeterminado. El caudal que atraviesa la válvula puede ir en ambas direcciones. Las VRCs no son mecanismos físicos verdaderos pero pueden usarse para modelizar situaciones donde exista un aumento de presión particular conocido.
- Válvulas de Control del Caudal (VCQ). Las VCQs limitan el caudal a un valor específico. El programa mostrará un mensaje de advertencia si el caudal no se puede mantener sin un aporte de presión en la válvula (es decir, el caudal no se podrá mantener con la válvula totalmente abierta).
- Válvulas de Regulación. Las válvulas de regulación representan simulan una válvula parcialmente cerrada ajustando adecuadamente el valor del coeficiente de pérdidas menores. Normalmente los fabricantes proporcionan una relación entre el grado de cierre de la válvula y el coeficiente de pérdidas resultante.
- Válvulas de Propósito General (VPG). Las VPGs se utilizan para representar un elemento con un comportamiento diferente y una relación caudal – pérdidas que no abarcan las fórmulas hidráulicas estándar. Se utilizan para modelizar turbinas, pozos de aspiración, fugas o válvulas preventivas contracorriente reductoras de caudal.

Cada tipo de válvula tiene un parámetro de consigna (representado en el modelo por el atributo Tarado) que define su punto de operación. Este atributo de tarado será la presión para las VRPs y las VSPs, la pérdida de carga en las VRCs, el caudal para las VCQs, el coeficiente de pérdidas para las válvulas de regulación, y la curva pérdida-caudal para las VPGs.

Aunque el programa EPANET no contempla las válvulas de compuerta y las válvulas de retención, que cierran o abren completamente las tuberías, en el modelo de

datos se ha creído conveniente incluirlas. Así, las válvulas de compuerta o todo-nada, se modelan como válvulas de regulación, con un coeficiente de pérdidas igual al asignado cuando la válvula está completamente abierta. En cuanto a las válvulas de retención, también se incluyen en el modelo de datos. Cuando se realice la exportación de los datos para su cálculo en EPANET, se asignará a una tubería equivalente con una longitud mínima.

Así, la clase **Válvula** definida tiene los siguientes atributos:

- Diámetro. El diámetro efectivo de paso de la misma. En caso de ausencia de datos fiables, se puede utilizar el diámetro nominal de la válvula.
- Coeficiente de pérdidas. El coeficiente de pérdidas correspondiente a la válvula cuando está completamente abierta.
- Tipo. Se consignarán las siglas correspondientes a cada tipo de válvula, de acuerdo con EPANET.
- Tarado. El valor de consigna, según los criterios descritos en función del tipo de válvula.

5.5.3. Bombas

Las bombas son dispositivos que aportan energía a un fluido incrementando su carga hidráulica. La característica más importante para una bomba es su curva característica (relación entre la altura y caudal de la bomba). Esta curva característica viene dada por:

$$H_{ij} = \alpha^2 \cdot H_0 - r \cdot \alpha^{2-n} \cdot Q_{ij}^n \quad (5.6)$$

Puesto que en la ecuación (5.6) H_{ij} representa una **pérdida** en la ecuación de Bernoulli, la altura **aportada** por la bomba debe llevar el signo negativo.

Los resultados esperados son el caudal y la carga o aumento de presión aportados por la bomba. En una bomba, el caudal fluye unidireccionalmente dentro de ella, por lo que en el caso de que el análisis hidráulico dé como resultado un caudal negativo en la misma, la bomba se cierra, actuando como una válvula de retención.

También se puede considerar la variación de velocidad de las bombas, la cual puede fijarse y modificarse según valores marcados por una curva de modulación propia.

En resumen, las bombas vendrán representadas por los siguientes atributos:

- Altura que proporciona la bomba a válvula cerrada, H_0 .
- Coeficiente correspondiente al caudal en la curva característica, n .
- Velocidad relativa de giro de la bomba, a .
- Patrón. Un número entero que marque la curva de modulación para las velocidades de giro de la bomba.

5.6. Modelo de datos conjunto.

En la Figura 5.16 se muestra el diagrama de entidades y relaciones completo utilizado para la integración del cálculo hidráulico del modelo de una red de distribución de agua en el SIG encargado de su gestión. En este modelo se encuentran claramente diferenciados los tres niveles de información en que se podrían dividir los datos:

- Información topológica: almacenada básicamente en las clases **Línea** y **Nodo** y sus correspondientes colecciones **C_Líneas** y **C_Nodos**.
- Información geográfica: almacenada en el propio sistema de información geográfica como objetos de las clases **Segmento** y **Punto**.
- Información temática, de carácter principalmente hidráulico, en el resto de las clases definidas hasta ahora.

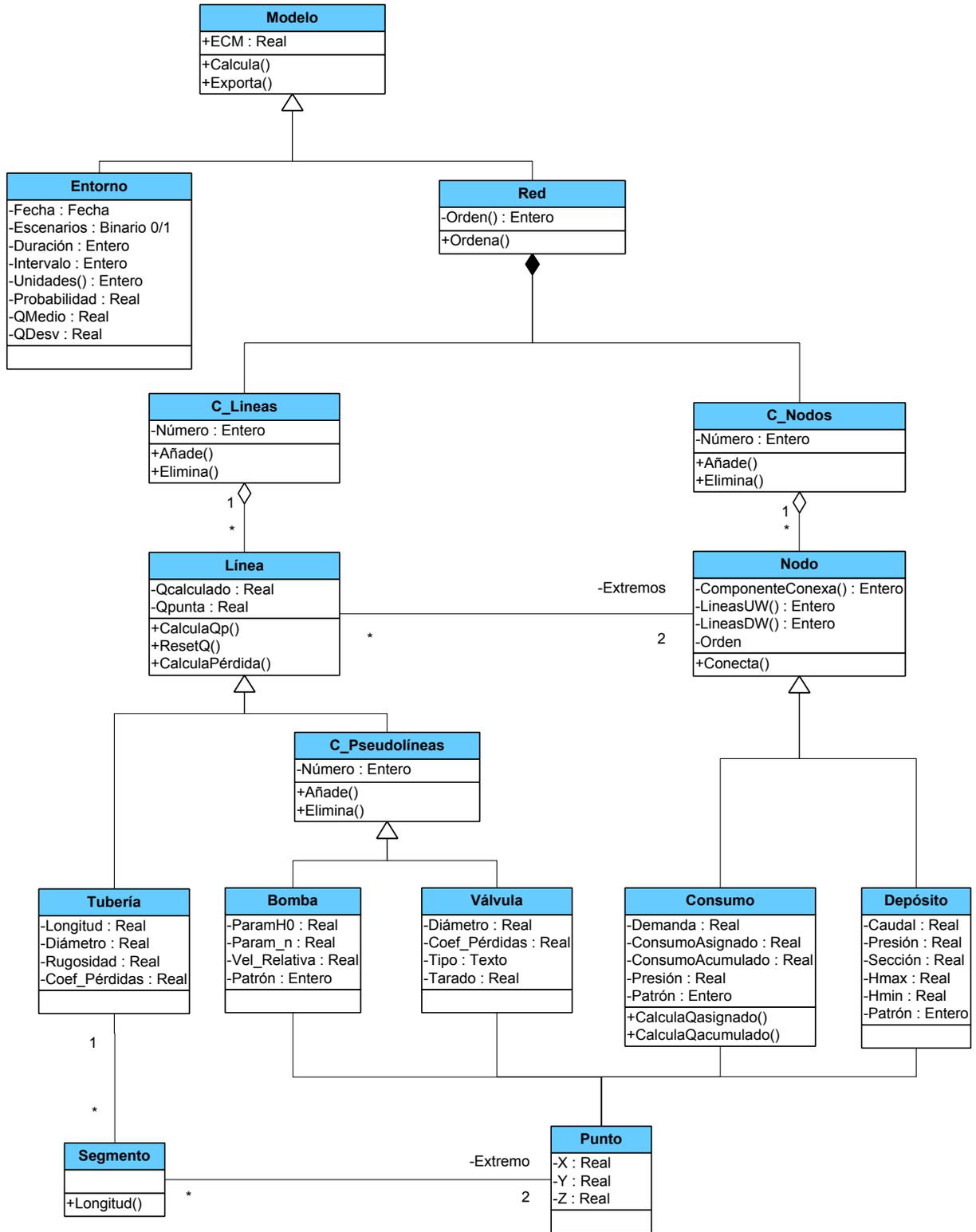


Figura 5.16. Modelo de datos completo para el cálculo hidráulico.

6. Conclusiones

En este capítulo se ha concretado la estructura de la base de datos que ha de servir como punto de partida para la generación del MDT y la elaboración del modelo matemático de la red.

Se ha realizado un repaso a las nuevas tendencias en la generación de aplicaciones para análisis espacial, introduciendo los conceptos de interoperabilidad y metadatos. También se han descrito brevemente las bases de la tecnología COM como forma de creación de aplicaciones que permitan la integración en un SIG independientemente de la plataforma o el programa elegido. A continuación, se han establecido las bases de la representación UML como lenguaje estándar para la descripción de aplicaciones y estructuras de datos. Se ha elegido esta forma de representación porque sigue las recientes recomendaciones tanto del Open GIS Consortium (OGC, 1999) como de la International Standard Organisation (ISO, 2000).

Tras las definiciones anteriores, se ha presentado un modelo de datos que ha de servir para organizar racionalmente toda la información de la red en sus aspectos geográfico, topológico y temático.

En primer lugar se ha presentado una estructura que completa el algoritmo presentado para la creación de un modelo digital del terreno basado en una red de triángulos irregulares. Así mismo, se ha incluido la posibilidad de extraer de dicho MDT el mosaico de Thiessen, utilizado para estimar caudales proyectados cuando se desconocen los datos de facturación. Tanto esta estructura de datos como las siguientes están basadas en la aproximación orientada a objetos, al ser esta la nueva tendencia en cuanto a almacenamiento y gestión de las bases de datos.

A continuación se ha expuesto la estructura de la base de datos de abonados. En la definición de esta estructura de datos ya se han incluido en la misma los métodos necesarios para que puede ser utilizada con el fin de realizar la asignación de cargas en el modelo matemático según el procedimiento descrito en el capítulo 4 de esta misma obra.

Por último, se ha presentado una completa estructura de datos para la creación del propio modelo matemático y su posterior utilización con un programa de cálculo hidráulico. La estructura de datos presentada es altamente flexible y permite el cálculo hidráulico en régimen permanente y cuasi-permanente (simulación en período extendido). Además de estos cálculos, que podrían calificarse de tradicionales en los modelos matemáticos de redes, el modelo de datos ha sido completado para contemplar otras utilidades de los modelos matemáticos de redes, como la comprobación del funcionamiento con caudales punta o con caudales mínimos nocturnos. El primero de los casos, que constituye una de las principales aportaciones a esta Tesis, ha sido el más detallado en este capítulo.

Capítulo 6.

Caso de Aplicación: Modelación de la red de distribución de agua potable de la Cooperativa Valenciana de El Plantío y La Cañada

1. Introducción

Como aplicación directa de todo lo expuesto a lo largo de la Tesis se presenta un estudio realizado sobre la red de distribución de agua potable de la Cooperativa Valenciana de El Plantío y La Cañada. Dicho estudio es el resultado de un convenio de colaboración suscrito entre el Grupo Mecánica de Fluidos de la Universidad Politécnica de Valencia y dicha Cooperativa. El objetivo general del estudio ha sido la elaboración de un Plan Director de la red de abastecimiento gestionada por la Cooperativa.

Por el momento la red de abastecimiento estudiada no presenta síntomas evidentes de escasez de agua. Sin embargo, el hecho de que un abastecimiento haya gozado siempre de suministro hídrico suficiente no implica que vaya a seguir sucediendo eternamente. Todo recurso es limitado. Éste es uno de los motivos por los que se recomienda realizar un uso eficiente y racional del agua, optimizando su gestión y con ello minimizando los costes derivados de la misma. Otros motivos que justifican la realización de estudios como éste, destinados a analizar actuaciones para una mejor gestión técnica, son:

- El aumento progresivo del consumo.
- Las sequías periódicas que continuamente amenazan a la mitad sur de España.
- Una creciente sensibilidad medioambiental.
- Una creciente preocupación por la detección de fugas y la mejora del rendimiento de las redes.

Los objetivos específicos perseguidos en el estudio se pueden resumir en:

- a) Realización de un inventario de las infraestructuras anexas a la red de distribución de agua potable.
- b) Introducción de toda la información disponible (tanto gráfica como temática) en un Sistema de Información Geográfica.
- c) Elaboración de un modelo matemático de la red a partir de la información almacenada y georreferenciada en el SIG.
- d) Estudio y análisis de consumos inyectados y facturados para el posterior diagnóstico del estado actual de funcionamiento de la red.

e) Previsión de demandas futuras de agua y propuesta de actuaciones.

Como se ha descrito, el contenido del estudio es de gran aplicación y utilidad ya que, en la actualidad, existen pocos estudios técnicos y modelos matemáticos que analicen los sistemas de distribución de agua potable en pequeñas y medianas poblaciones. Además, el carácter disperso y estacional de gran parte de la población lo hacen especialmente adecuado para la aplicación de algunos de los desarrollos expuestos en capítulos anteriores. En el trabajo de asignación de cargas al modelo matemático mediante herramientas basadas en el SIG resulta ciertamente interesante.

2. Descripción general de la red de agua potable de El Plantío y La Cañada.

2.1. Modo general de operación.

Antes de entrar en el detalle de los trabajos realizados, se realizará una descripción general de la instalación objeto de estudio. La red de distribución de agua potable de la Cooperativa Valenciana de El Plantío y La Cañada sirve un área de aproximadamente 6150 ha y con una población de unos 25000 habitantes. El área de servicio se extiende aproximadamente unos 16 km de Norte a Sur, teniendo como límite meridional el cauce del río Turia. La extensión de Este a Oeste es de unos 10 km. La longitud total de tubería instalada es de poco más de 289 km.

Se trata de un área destinada en gran parte a segundas viviendas y con gran cantidad de viviendas unifamiliares, lo que la convierte en una red extensa y dispersa en términos de población. Además, en ella se pueden distinguir dos partes claramente diferenciadas, separadas por la autovía que une Valencia con el Rincón de Ademuz. La mitad Norte comprende algunas urbanizaciones situadas en los términos municipales de La Pobla de Vallbona, Bétera y San Antonio de Benagéber. La mitad Sur corresponde principalmente a las urbanizaciones de El Plantío y La Cañada, situadas en el término municipal de Paterna. En la Figura 6.1 se puede ver un plano aproximado del área de servicio, los límites de los términos municipales y las tuberías que componen la red.

La alimentación de agua a la red, al menos en su mitad Norte, se realiza principalmente desde el pozo de La Pobla, que se encuentra situado en el punto más septentrional de la red. Se trata del mejor punto de producción disponible en la red de distribución, tanto en términos económicos como en cuanto a la calidad del agua extraída. De hecho, en la actualidad está en proceso de estudio la posible ampliación del mismo mediante una nueva perforación. La mitad Sur de la red se abastece principalmente de varios pozos, además de una cierta aportación de agua procedente del pozo de La Pobla a través del único punto de conexión entre ambas mitades, conocido como el *trasvase*.

Además de esta perforación, en la actualidad la red dispone de otras 12 perforaciones de las cuales sólo 4 se encuentran en funcionamiento proporcionando agua

de buena calidad, quedando el resto (en las que el agua tiene un alto contenido en nitratos) pendientes de estudio para un futuro aprovechamiento.

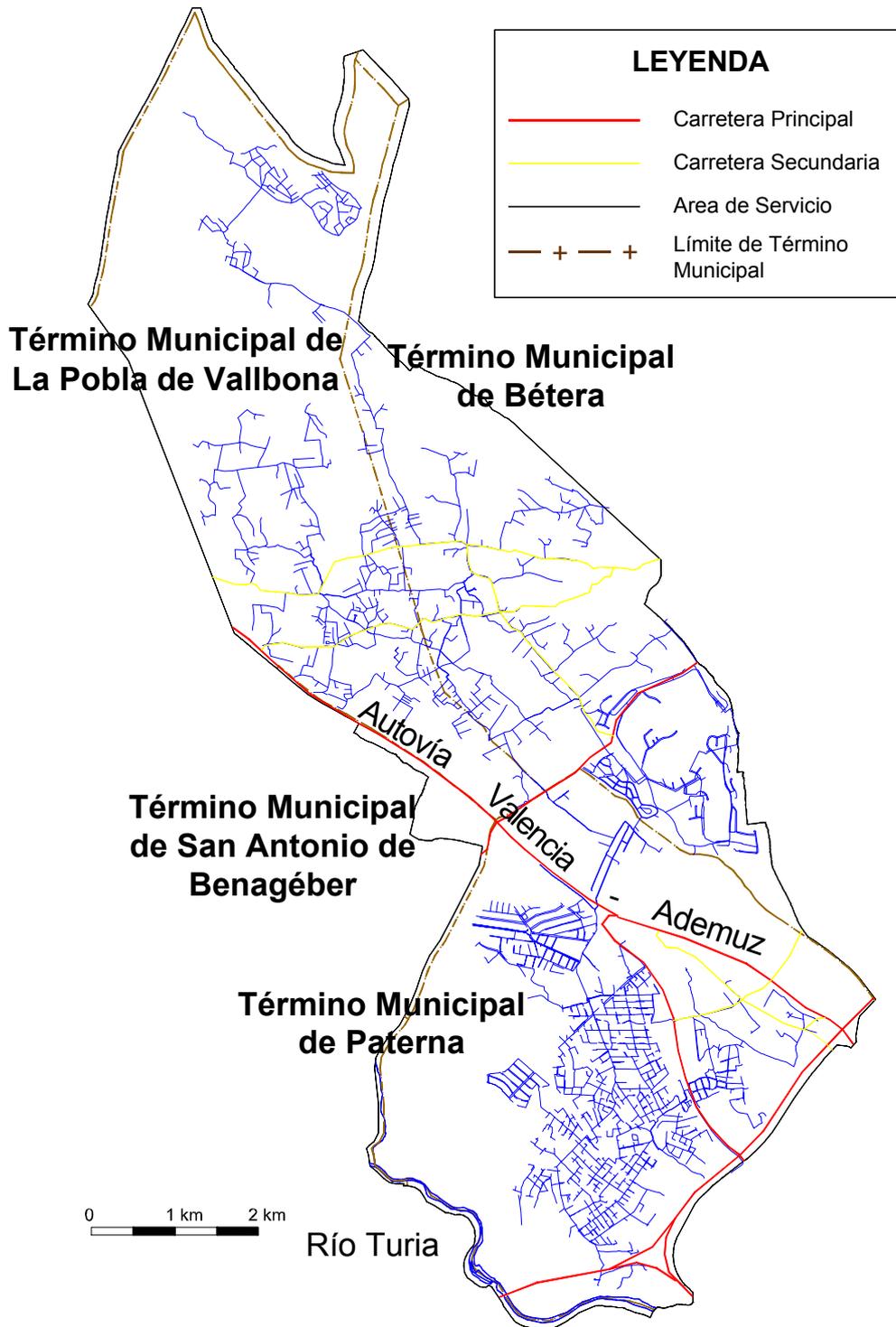


Figura 6.1. Localización de los términos municipales que comprende la red estudiada.

El hecho de disponer de 8 perforaciones en desuso, principalmente debido a problemas de calidad del agua, hace que una de las prioridades de los gestores del

abastecimiento se centre en la rehabilitación y puesta en marcha de las mismas. Una posibilidad es la utilización de aquellos pozos que se encuentran situados cerca de depósitos para utilizar estos últimos como tanques de mezcla completa que permitan diluir las altas concentraciones de nitratos encontradas. La otra opción en estudio consiste en la incorporación de variadores de frecuencia en las bombas que permitan un arranque suave de las mismas que evite el arrastre de arena, habitual en los pozos situados más al sur de la red.

En la Tabla 6.1 se muestran, a modo de resumen, las características hidráulicas más destacables de los diversos pozos de la red.

Tabla 6.1. Características de los pozos de la Cooperativa.

Pozo	Perforación	Equipo de Bombeo	Comentarios
La Pobla	Profundidad 120 - 180 m Cota: 217 m	Potencia: 340 CV Caudal: 7500 l/min	Activo Cloración
Abdón y Senén	Profundidad: carece de medidor Cota: 140 m Capacidad máx. 1600 l/min	Potencia: 2×55 CV Caudal: 336 l/min Variador de frecuencia	Sólo emergencias Nitratos 60 mg/l
San Antonio	Cota: 125 m Capacidad máx. 2000 l/min	Inexistente	Inactivo Nitratos 90 mg/l
Santa Magdalena	Cota: 142 m Sin datos	Sin datos	Totalmente en desuso
Santa Bárbara	Cota: 119 m Sin datos	Sin datos	Totalmente en desuso Titularidad compartida
San Miguel	Cota: 125 m Capacidad máx. 500 l/min	Inexistente	Temporalmente fuera de servicio
El Plantío	Profundidad 160 m Cota: 110 m	Potencia: 10 + 25 CV Caudal B1: 150 l/min Caudal B2: 300 l/min	Inactivo Baja calidad por SS (arena)
Ricós	Profundidad: 150 m Cota: 105 m	Potencia: 50 CV Caudal: 850 l/min Variador de frecuencia	Activo Buena calidad
El Pla 1	Profundidad: 100 – 107 m Cota: 110 m	Potencia: 90 CV Caudal: 1400 l/min Variador de frecuencia	Activo Funcionamiento intermitente
El Pla 2	Cota: 108 m	Inexistente	Inactivo
Pérez	Capacidad máx. 1500 l/min	Inexistente	Inactivo desde 1985 aprox.
Río	Profundidad 120 m Cota: 65 m	Potencia: 68 CV Caudal: 1800 l/min Variador de frecuencia	Activo Cloración
Despeñaperros	Profundidad 150 m Cota: 67 m	Potencia: 50 CV Caudal: 1200 l/min Variador de frecuencia	Activo Cloración

En cuanto a los depósitos existentes en la red, en la Tabla 6.1 se muestran las principales características de los depósitos actualmente existentes en la red. De ellos, los más relevantes son los de La Pobla y La Conarda, que regulan el funcionamiento de la mitad Norte del abastecimiento. En la zona Sur destaca la presencia de los dos depósitos de El Plantío, que en la actualidad se complementa con un nuevo depósito cuya construcción está prácticamente finalizada.

Tabla 6.2. Características de los depósitos de la Cooperativa.

Depósito	Características	Comentarios
La Pobla	Volumen: 1000 m ³ Cota: 217 m	Activo Cloración
La Conarda	Volumen: 3500 m ³ Cota: 165 m	Dos compartimentos Dispone de dos E.B.
Cumbres	Volumen desconocido Cota: 144 m	Fuera de servicio
Colinas	Volumen: 1000 m ³ Cota: 217 m	Pozo de San Miguel Dispone de una E.B.
Montecañada	Volumen: 1000 m ³ Cota: 120 m	Dispone de una E.B. Recibe de Omnium Ib.
La Vallesa	Volumen: 50 m ³ Cota: 125 m	Regulador de un pequeño bombeo
El Plantío	Volumen: 5000 m ³ Cota: 110 m	3 depósitos Dispone de una E.B.

Otro aspecto característico de esta red de agua es la existencia de otros dos puntos de inyección. El primero de ellos es una tubería perteneciente a la empresa de Aguas de Valencia que llega al depósito de Montecañada. Este aporte adicional de agua inyectada en la red es empleado en situaciones excepcionales de emergencia para poder dar servicio a los abonados. Sin embargo, tiene como principal inconveniente un coste demasiado alto para tratarse de agua inyectada (entre 24 y 25 ptas/m³, entre 14 y 15 céntimos de euro). Este es el motivo por el cual se intenta minimizar su utilización.

Por último, la red dispone asimismo de una tubería perteneciente al ya desaparecido Consell Metropolità de L'Horta cuya conexión está prevista para un futuro pues supone un ahorro económico para la Cooperativa. Se espera inyectar en la red a través de esta última conducción un volumen de 1 Hm³/año.

2.2. Operación de la mitad Norte de la Red.

El modo habitual de operación de esta parte de la red se basa en el sistema formado por los depósitos de La Pobla (con un volumen de 1000 m³) y de La Conarda (con una capacidad total de 3500 m³). El pozo de La Pobla alimenta al depósito de La Pobla. Este depósito, que funciona como cabecera de la red, da agua directamente a las urbanizaciones próximas.

El caudal de agua extraído del pozo de La Pobla es conducido sin apenas derivaciones (salvo los pocos consumos próximos al depósito homónimo) hasta un depósito situado en el paraje conocido como La Conarda. Este transporte se realiza a través de una tubería principal de fibrocemento con un diámetro de Ø350 mm. Dada la diferencia de cotas entre ambos depósitos, en algunos puntos donde se abastece desde esta tubería es necesario reducir la presión. Este papel lo realiza una válvula reductora de presión situada a la entrada de la urbanización San Lázaro.

Desde el depósito de La Conarda el agua es distribuida al resto de los consumidores de la mitad Norte del sistema por medio de una estación de bombeo dotada con un variador de velocidad y cuatro bombas. El último punto abastecido por este subsistema es el punto conocido como *trasvase*. Se trata del único punto de unión entre ambas mitades de la red (Norte y Sur) y se encuentra situado en la zona donde se conecta un pozo en desuso, el de Santa Bárbara. En ese mismo punto se halla situada una válvula limitadora de caudal tarada a 37,14 l/s, lo cual permite controlar la cantidad de agua que se trasvasa hacia la mitad Sur del sistema.

La decisión del reparto del agua extraída del pozo de La Pobla se realiza por medio de una válvula fija que regula el caudal de agua que ha de llegar al depósito de La Conarda, permitiendo que el resto se quede en el depósito de La Pobla para el uso de los socios de su zona de influencia. Además, existe una válvula hidráulica situada en el depósito de La Pobla que controla de modo semiautomático el intercambio de agua entre ambos depósitos, procurando cerrar en las horas punta o reducir el consumo al mínimo posible. De esta forma se ajusta el nivel de agua en el depósito de La Pobla para llegar lo más vacío posible a las 12 horas de la noche, de forma que la bomba del pozo pueda aprovechar al máximo las horas nocturnas que son las más económicas. Por último, el depósito de La Conarda cuenta con una bomba de 50 CV que permite devolver el agua al depósito de La Pobla si las circunstancias del consumo así lo aconsejan.

Como refuerzo al agua extraída del pozo de La Pobla, se está estudiando la posibilidad de rehabilitar alguno de los pozos que en la actualidad permanecen inactivos. De hecho, el pozo de San Antonio tiene una conexión directa con el depósito de La Conarda, lo que permitiría utilizar este último como tanque de mezcla para compensar las concentraciones de nitratos. Además, los terrenos que rodean a este pozo, correspondientes hasta hace poco a campos de plantación de naranjos, se están convirtiendo progresivamente en zonas residenciales, lo que hará en un futuro próximo que desciendan las concentraciones de nitratos, que es el principal inconveniente del pozo.

2.3. Operación de la mitad Sur de la Red.

La parte Sur del sistema de abastecimiento comienza con la urbanización Colinas de San Antonio, que dispone de su propio depósito y grupo de presión. El resto de la red se abastece a partir del agua procedente del trasvase y de diversos pozos (principalmente los

pozos de Despeñaperros, del Río y de Ricós) que se encuentran situados en la parte más meridional del sistema. Esta parte Sur dispone asimismo de diversos depósitos como El Plantío y Montecañada con sus respectivos grupos de presión.

Como resumen, se puede decir que el agua inyectada en la red procede en general del pozo de La Pobla a través del trasvase y de los pozos anteriormente comentados (Despeñaperros, Río y Ricós), aunque en situaciones de consumo punta (principalmente en verano y algunos fines de semana) se recurre a puntos de alimentación adicionales. Dentro de las instalaciones del sistema quedan englobadas todas las perforaciones existentes en la actualidad. Por tanto y salvo excepciones, toda el agua que se envía a la red es subterránea, si bien existen notables diferencias en la calidad del agua a extraer de unos pozos a otros.

El abastecimiento de esta mitad Sur de la red tiene una problemática vinculada a la naturaleza de los pozos. Los pozos utilizados (y especialmente el pozo del Río) son pozos arenosos y con graves deficiencias constructivas. Si bien se trata de pozos con una capacidad teórica de extracción alta, tienen en general serios problemas de arrastre de arena que obliga a realizar arranques muy lentos. Por ello, todos disponen de variadores de frecuencia para realizar arranques mediante rampas de frecuencia que pueden durar hasta 6 horas. Esto no evita el arrastre de arenas, pero si permite extraer agua en unas condiciones tales que se puede hacer pasar por un desarenador.

Los costes de bombeo de los pozos de Despeñaperros y del Río son bastante razonables, lo que hace que a efectos de regulación del sistema completo, se intente forzar a estos pozos a trabajar durante 24 horas al día. Estos pozos sólo se detienen en general por avería o por una bajada considerable de la demanda, siempre que ésta tenga un carácter estacional (por ejemplo, en invierno). Ha de tenerse en cuenta además que una parada implicaría un posterior arranque, y durante la maniobra de arranque (como se ha dicho, de 6 horas de duración aproximada) el agua extraída es devuelta al pozo, al no ser posible hacerla pasar por el desarenador.

Con estas condiciones de contorno en los pozos de producción del Sur, el modo de operación de la red se centra en el funcionamiento en continuo de los pozos. La regulación de los mismos tiene carácter estacional, pero no diario por los motivos antes comentados. Esto hace que, debido a la modulación del consumo, durante las horas nocturnas existe un excedente de producción, que es acumulado en el depósito de El Plantío. De la misma forma, cuando todos los pozos están en marcha, sólo existirá trasvase de agua procedente del Norte durante las horas de mayor consumo. Además, puesto que el depósito de El Plantío y el de Colinas están situados prácticamente a la misma cota, desde el punto de vista hidráulico funcionan como un único depósito. Esto se ve reforzado por el hecho de existir una tubería que los conecta con muy pocas pérdidas de carga. Sin embargo, el inconveniente está en que ambos depósitos necesitan sendos grupos de presión que aporten presión a los consumidores situados en las zonas más próximas a los mismos.

Finalmente, cabe señalar el papel que juega el depósito de Montecañada en el sistema. Este depósito, de 1000 m³ de capacidad, tiene como única misión recibir el agua que se compra a Aguas de Valencia. En el futuro, también ha de recibir el agua comprada al Cosell Metropolità de L'Horta. Una vez recibida el agua, es inyectada directamente a la red de distribución a través de una estación de bombeo con dos bombas.

2.4. Características de la facturación.

Junto con el conocimiento preliminar del modo de operación de la red, también es muy importante tener información acerca de la distribución de los consumos de agua potable a lo largo de la misma. Así mismo, para una utilización efectiva del modelo, es necesario conocer todas las peculiaridades de la red en cuanto a consumos se refiere.

La facturación es trimestral y se dispone de datos históricos correspondientes a los últimos catorce años (1986-1999). A diferencia de otros abastecimientos, en la red objeto del estudio la lectura de los contadores está muy concentrada en el tiempo, siendo necesarios aproximadamente 15 días para realizar la lectura completa de todos los contadores instalados. No existen pues rutas concretas de lectura repartidas a lo largo del trimestre.

Tan sólo existen contadores instalados de 15 mm de calibre. Si algún abonado desea un calibre mayor, la solución pasa por instalar tantos contadores como títulos posea. Dicho de otra forma, existen tantos contadores como acciones de la compañía.

La base de datos de facturaciones disponible divide a los abonados de la red en una serie de zonas funcionales. Esta división que se ha realizado se corresponde a urbanizaciones y, aunque resulta evidente que guardan una relación geográfica entre sí, no han de entenderse como sectores de la red en el sentido hidráulico del término. Esto es, no existe aislamiento hidráulico entre las distintas zonas, aunque los puntos de conexión son en muchas ocasiones muy escasos. Esta división se corresponde con las zonas de facturación que tiene designadas la propia empresa. Para la parte Norte se han designado 25 zonas que corresponden a otras tantas urbanizaciones diferentes. En cuanto a la parte Sur se distinguen ocho zonas correspondientes a otras tantas urbanizaciones existentes además de otras dos zonas que agrupan a los abonados residentes en los cascos urbanos de El Plantío y La Cañada propiamente dichos.

Las diferentes zonas en que se ha dividido la red se presentan en la Figura 6.2. En dicha figura se muestra además la población abastecida en 1999 en cada una de las zonas.

En estos datos se observa claramente que el tercer trimestre corresponde al de mayor consumo en todas las zonas. Este trimestre coincide con los meses estivales de Julio, Agosto y Septiembre donde la población aumenta considerablemente. Esto se debe a que se trata de una zona a las afueras de la ciudad donde la mayor parte de las residencias son chalets a los que la población acude en los meses vacacionales. Se trata por tanto de una zona típica de segunda residencia.

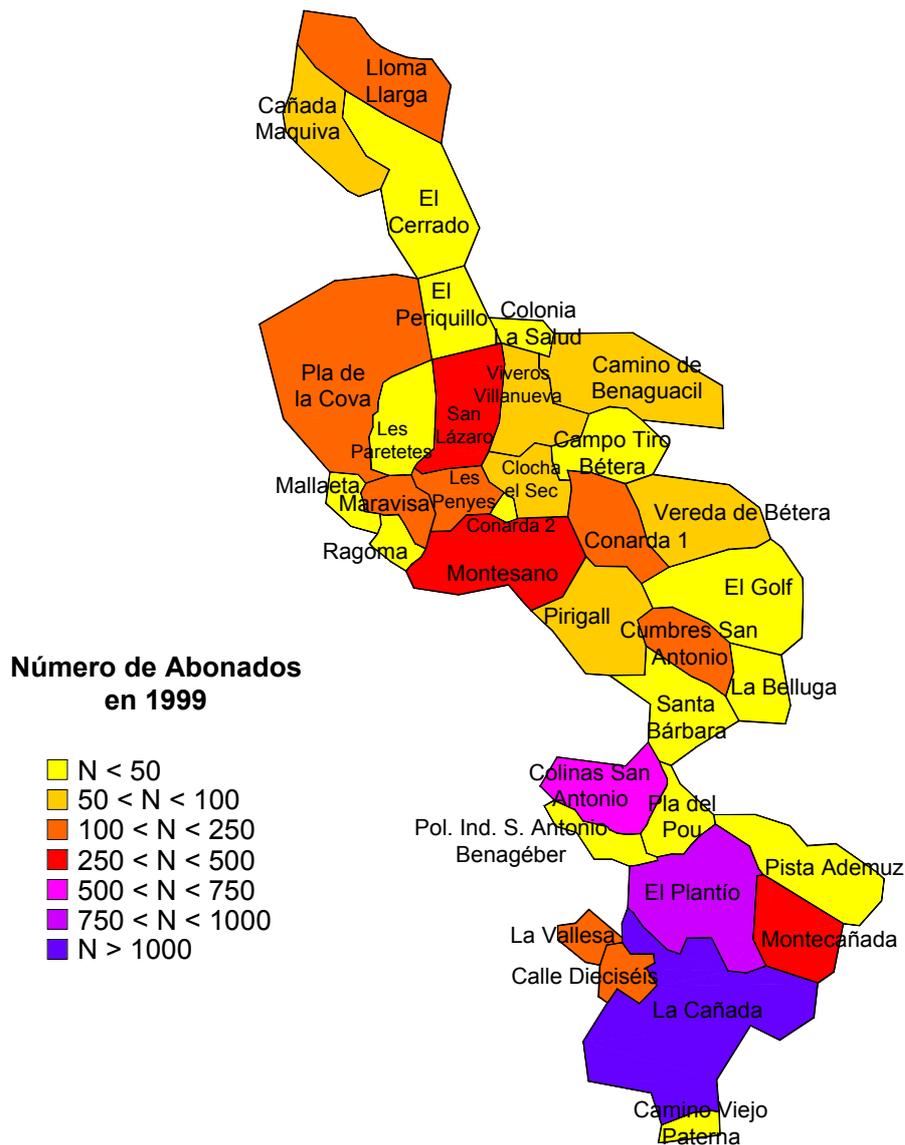


Figura 6.2. Zonas funcionales dentro del área de servicio y número de abonados de las mismas.

Un estudio también muy significativo es la evolución del consumo histórico. Este estudio permitirá hacer previsiones del consumo para los próximos años. Como tendencia general se puede observar un crecimiento en el número de abonados a lo largo de los años. Por el contrario, los resultados obtenidos al calcular las dotaciones medias reflejan un descenso de las mismas. Todo esto indica que cada vez los chalets son más modestos y disponen de parcelas más pequeñas que necesitan menos agua para regar.

Como en otras muchas redes, en ésta también es necesario destacar la existencia de grandes consumidores puntuales en algunas zonas. A estos consumidores deberá prestárseles una atención especial durante el proceso de asignación de cargas para poder obtener una pauta de consumo general para los abonados *normales* y otra particular para cada uno de los abonados importantes.

Todos estos consumidores se caracterizan por un elevado consumo de agua en algunos trimestres, llegando a suponer entre un 10-20% del consumo total de dicho trimestre en la zona correspondiente. Estos elevados consumos se deben generalmente a situaciones particulares, como puede ser el empleo del agua potable para regadío por no disponer de otras alternativas.

Para el estudio de consumos ha sido necesaria la eliminación de estos consumidores para poder obtener una pauta de consumo general.

Por último, además de las facturaciones, se dispone de mediciones de caudal o nivel en pozos y depósitos con periodicidad mensual, así como una lectura en continuo de múltiples variables en el pozo y depósito de La Pobla.

3. Captación y organización de la información disponible.

3.1. Introducción

Como ya se ha comentado, entre los objetivos del estudio está la realización de un inventario completo de todas las infraestructuras vinculadas a la red de distribución de agua potable. Además, se pretende unificar todas las fuentes de información en un único Sistema de Información Geográfica. Para ello se realizó una recopilación de toda la información disponible sobre la red de la Cooperativa Valenciana de El Plantío y La Cañada. Esta información incluye:

- Planos de trazado de la red.
- Esquemas de funcionamiento de instalaciones singulares.
- Base de datos de abonados y facturaciones.
- Base cartográfica.

Con la finalidad de integrar toda esta información, se planteó como objetivo inicial la obtención de una representación completa y fiel de la red de distribución. En este caso y debido al tamaño de la red (no excesivamente grande), se ha optado por la digitalización de la misma en formato AutoCAD Map 2000 ®. Además, con el fin de agilizar las operaciones que posteriormente se realizarán sobre el SIG creado, la información recogida y digitalizada se ha estructurado en tres conjuntos de datos georreferenciados:

- a) Red. Recoge toda la información de la red de distribución, tanto la información cuantitativa (principalmente planos, trazado y datos de las instalaciones) como cualitativa (básicamente esquemas de funcionamiento y fotografías).
- b) Facturación. Incluye tanto la ubicación geográfica de cada abonado como el volumen consumido por el mismo. Además, también incluirá información sintetizada para cada una de las zonas funcionales en que se ha dividido la red.

- c) Base cartográfica. Recogerá toda la información correspondiente al área de servicio pero no directamente vinculada con la red de distribución de agua (calles, parcelas, cultivos, etc.). Se utilizará principalmente para la elaboración de cartografía temática de la red.

A pesar de estar estructurada en tres fuentes de información distintas, toda la información recogida mantiene una relación entre sí. Por ello, un paso previo al proceso de digitalización será la definición de un sistema de coordenadas único común a las tres bases de datos. Ello permitirá establecer relaciones mediante consultas temáticas basadas en los atributos o consultas espaciales basadas en la posición geográfica. El sistema de coordenadas elegido es el UTM (Universal Transversal Mercator), huso 30 S.

Una vez finalizada toda la digitalización se procederá al procesamiento de la misma de manera que quede preparada para la elaboración del modelo matemático. A continuación se describe brevemente la información disponible, evaluando la calidad de la misma y describiendo las acciones realizadas para su integración en el SIG.

3.2. Directrices de la digitalización.

Para la elaboración posterior del modelo matemático de la red hidráulica es necesario generar un listado de la información necesaria y utilizar este listado durante la organización de la información recogida. Así, junto a la selección del sistema de coordenadas común a utilizar, es necesario codificar de una forma unificada la información correspondiente a las conducciones de la red.

Así, para la elaboración de un modelo matemático de la red, los datos necesarios de las conducciones son:

- Longitud de cada tramo de tubería.
- Conectividad entre las tuberías.
- Diámetro interior de cada tramo.
- Rugosidad (ϵ) de las conducciones.

Los dos primeros datos se pueden obtener del propio SIG una vez haya finalizado el proceso de digitalización si se tiene la precaución de hacer corresponder cada objeto gráfico (es decir, cada línea trazada) con un tramo de tubería de características homogéneas sin derivaciones intermedias.

Un aspecto importante a tener en cuenta sobre los datos de las conducciones es que el diámetro interior de éstas varía respecto al exterior según cual sea la presión de trabajo de la conducción y su material. Por ello, la transformación del diámetro nominal (que es el que aparecerá habitualmente en los planos disponibles como información de partida) en diámetro interior se realizará a partir de una base de datos de diámetros comerciales de tuberías disponible en el programa SARA (Iglesias, 2001). Esta base de datos permitirá

averiguar el diámetro interior de cada tubería a partir del material, el diámetro exterior y la presión nominal de trabajo.

Así, los datos alfanuméricos digitalizarán al mismo tiempo que la información gráfica para agilizar el proceso de entrada masiva de datos. Se ha optado por codificar gráficamente la información correspondiente a material, diámetro nominal y presión de trabajo de cada tramo de tubería.

La información de la red se ha organizado mediante la utilización de diferentes *capas* o niveles de información del dibujo. Así, la información de diámetro, material y presión nominal se ha codificado como un identificador de cada capa. En efecto, cualquier línea del dibujo pertenece a una capa que tiene una nomenclatura general del tipo AAABBBCC. El significado de cada grupo de caracteres es:

AAA ⇒ Diámetro nominal de la tubería

BBB ⇒ Siglas del material (FBC = fibrocemento, PET = polietileno, PVC = policloruro de vinilo, etc.)

CC ⇒ Presión nominal de la tubería, expresada en atmósferas.

De esta manera, a partir del nombre de la capa se pueden obtener los datos más relevantes de la tubería. Pero esta información encapsulada dentro del nombre de la capa no es útil si no se manipula hasta convertirla en registros de una base de datos. No hay que olvidar que el objetivo de este SIG es, finalmente, obtener un modelo matemático de la red que pueda ser analizable mediante herramientas de cálculo hidráulico.

Con el fin de incluir los datos de diámetro, material y presión nominal en la correspondiente base de datos, se ha adoptado como solución la de aprovechar la potencialidad de un SIG y, sobre todo, de sus herramientas de personalización. De esta forma, estos datos se han almacenado como información vinculada a los objetos de dibujo (en este caso líneas). Para ello se ha realizado una pequeña aplicación por la cual se lee el nombre de la capa de cada una de las líneas del dibujo y se crea simultáneamente un registro en la base de datos de elementos y un vínculo que lo relacione con el elemento de dibujo correspondiente. Los datos básicos que ha de tener la base de datos serán los especificados en el modelo de datos correspondiente.

3.3. Fuentes de información gráfica.

En este punto, como en muchos otros, la red de la Cooperativa también presenta algunas singularidades. Si el problema principal que afecta a gran parte de los abastecimientos cuando se afronta la confección de un modelo matemático de la red es la falta de información, en este caso ocurre el fenómeno contrario. Existen hasta tres fuentes de información diferentes. Sin embargo, algunas discrepancias encontradas al comparar la información duplicada han obligado a la realización de un control de calidad de los datos

recogidos. La información gráfica disponible para la digitalización se puede agrupar en tres grupos:

- Para los términos municipales de Bétera y La Pobra de Vallbona, es decir, para la parte Norte del abastecimiento, existe una colección de croquis esquemáticos con información del trazado de las conducciones y ubicación de los abonados.
- Para los municipios de Paterna y San Antonio de Benagéber existe información previamente digitalizada del trazado de la red en gran parte de la mitad Sur de la misma.
- Por último, se dispone del fondo cartográfico de toda el área de servicio.

La información correspondiente a los dos primeros puntos ha sido facilitada por la propia Cooperativa, mientras que el fondo cartográfico se obtuvo del Instituto Cartográfico Valenciano¹, ICV.

Puesto que esta información presenta solapamiento en algunos casos y lagunas en otros, se procedió a una tarea de organización previa a la introducción de los datos temáticos. En concreto, las tareas realizadas consistieron en:

- Digitalización y organización de la información correspondiente a la red contenida en los términos municipales de Bétera y La Pobra de Vallbona.
- Agrupación y clasificación de los planos correspondientes al término municipal de Paterna y San Antonio de Benagéber. Evaluación de dicha información.
- Tratamiento digital del fondo cartográfico obtenido del Instituto Cartográfico.

A continuación se detallan las actuaciones concretas realizadas.

3.3.1. Información correspondiente a los términos municipales de Bétera y La Pobra de Vallbona.

En estos dos municipios, en los que se ubica toda la parte Norte del abastecimiento, la Cooperativa no disponía de datos previos en formato magnético. Este hecho ha obligado a digitalizar toda la información.

Información previa

A pesar de su carácter esquemático, la información disponible ha resultado ser bastante exacta, sobre todo tras ser combinada con el fondo cartográfico disponible. En concreto, cada croquis recoge la siguiente información (ver Figura 6.3):

¹ Esta información está disponible en <http://www.gva.es/icv> en versión no editable.

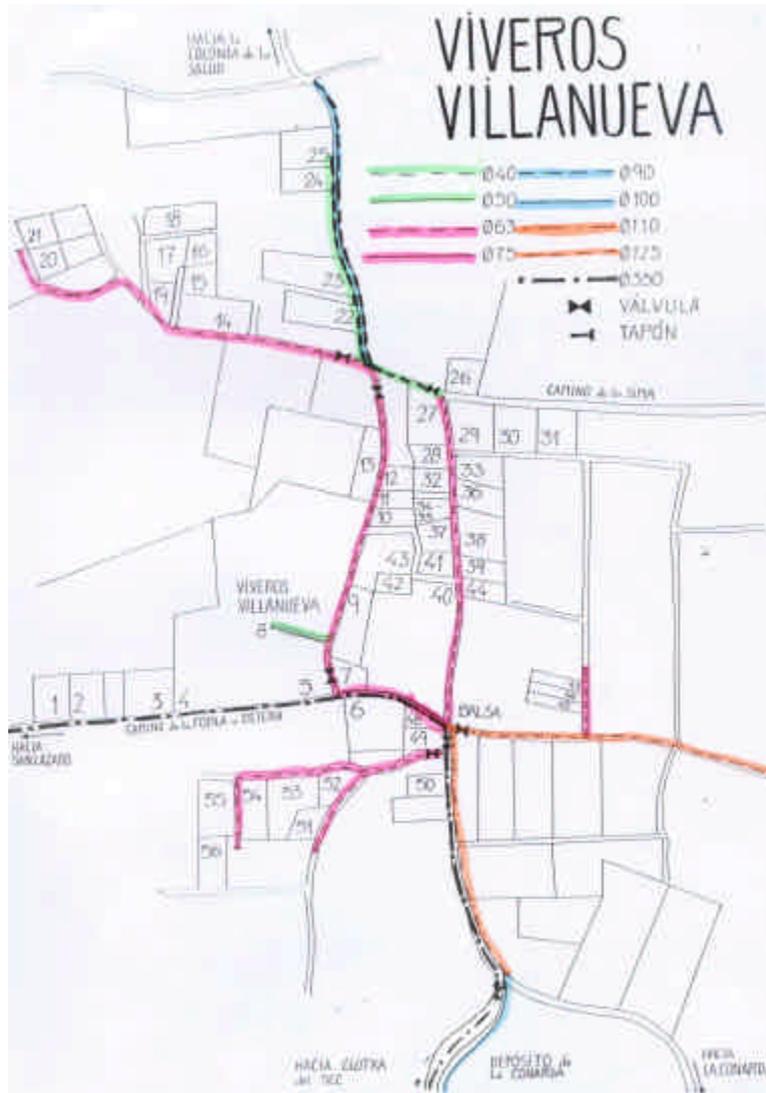


Figura 6.3. Ejemplo de croquis correspondiente a una zona del término municipal de La Pobra de Vallbona.

- Trazado de las conducciones, utilizando como referencia el viario.
- Diámetro de las mismas, especificado mediante un código de colores y trazos de línea con su correspondiente leyenda.
- Representación de la ubicación de elementos accesorios, principalmente válvulas y tapones, mediante símbolos.
- Ubicación de los abonados, utilizando como referencia la división del territorio en parcelas.

Acciones emprendidas

A partir de los esquemas anteriores, utilizando como base cartográfica el fondo proporcionado por el ICV, se ha realizado una digitalización del trazado de las conducciones. Al mismo tiempo, se ha ido recogiendo la información de los diámetros según el protocolo descrito en el apartado 3.2 de este mismo capítulo. El resultado final es

el trazado completo de la red en su parte Norte, junto con la posición de las válvulas y demás elementos y la indicación de los diámetros de cada uno de los tubos.

Sin embargo, durante el desarrollo de esta fase han surgido algunas dificultades que han debido ser resueltas y que a continuación se enumeran:

- Al tratarse de una información esquemática, el trazado de la red es sólo aproximado. Incluso en algunas zonas ha sido necesario realizar una revisión sobre el terreno para mejorar la precisión del trazado. En resumen, el trazado obtenido es suficientemente preciso para el fin perseguido (la elaboración del modelo matemático). Sin embargo, la precisión resultará insuficiente si se pretende utilizar como herramienta de apoyo a la ejecución de obras sobre la red.
- Se ha detectado ausencia de información o falta de actualización en alguna urbanización de reciente conexión de la que no se dispone del trazado de la red. Este es el caso de Maravisa o el Club de Golf, donde el trazado ha debido ser completado posteriormente.
- Por último, una laguna importante es la ausencia de información sobre el material o el espesor del tubo. En los esquemas la única información disponible es la del diámetro. Esto dificulta los cálculos, pues se desconoce de manera precisa el diámetro interior o la rugosidad de las tuberías. Esta deficiencia se ha solventado mediante consulta directa al personal técnico de la Cooperativa.

El resultado final de este proceso es el de disponer del trazado de la red en su parte Norte, con las tuberías clasificadas por diámetros. Obviamente, las tareas de digitalización se han realizado respetando el sistema de coordenadas UTM fijado como referencia.

3.3.2. Información correspondiente a los términos municipales de Paterna y San Antonio de Benagéber.

Información previa

La información disponible del trazado de la red y el fondo cartográfico asociado para los términos municipales de Paterna y San Antonio de Benagéber presenta a primera vista un aspecto bastante adecuado para su utilización y clasificación dentro de un plano único de la red de distribución. Gran parte de las dificultades aparecidas se basan por una parte en la estructuración efectuada de la información. Las dificultades han surgido en muchas de las ocasiones por la duplicidad de fuentes de información respecto del trazado en una determinada zona, con informaciones en ocasiones discrepantes entre las distintas fuentes existentes.

Para comprender el estado de la información disponible se van a analizar por separado las informaciones correspondientes a los términos de Paterna y de San Antonio de Benagéber.

En primer lugar aparece un conjunto de esquemas de ubicación e información acerca de los elementos de la red. Son datos principalmente de válvulas, ventosas y desagües.

En el término municipal de Paterna se dispone de tres fuentes de información claramente diferenciadas:

- Los planos en papel suministrados por la Cooperativa de un estudio previo realizado con el fin de actualizar el inventario de infraestructuras.
- Un primer conjunto de planos en formato digital de AutoCAD, que en lo sucesivo se denominará conjunto Paterna 1 de planos. Esta información presenta básicamente la misma estructura de numeración que los planos en papel. Dicha nomenclatura de los planos está organizada en forma tabular planos de acuerdo a una cuadrícula previamente definida. De estas forma cada uno de los planos viene identificado por un nombre de archivo de la forma XXYY.DWG, donde XX es un identificativo de la posición horizontal de cada plano e YY es el identificativo de la posición vertical del plano. Los planos disponibles corresponden tanto al trazado de la red como a la ubicación de las diferentes válvulas y elementos del sistema. De hecho existen dos archivos diferentes para cada plano: uno con la información completa del fondo cartográfico, la red y los elementos y otro únicamente con la información de los elementos, sin fondo cartográfico.
- Un segundo conjunto de planos en formato igualmente digital, también para AutoCAD. Para distinguirlo del anterior, a este segundo conjunto se le denominará conjunto Paterna 2 de planos. Estos planos presentan una organización distinta de los planos anteriores principalmente en la denominación de los mismos, si bien también están organizados en forma de tabla o rejilla. Sin embargo, en este caso la denominación es de la forma ZZX.DWG, donde ZZ es un identificativo numérico que indica una posición o celda en la rejilla, pero cuya relación es del tipo correlativo. Por su parte, X es un código literal que indica si se trata de la mitad norte de la celda (n) o de la mitad sur (s) del cuadro indicado con el código ZZ. Dichos planos además no cubren la totalidad de la red de abastecimiento situada dentro del término de Paterna, lo que deja lagunas en la información de la red. Recogen la información correspondiente al trazado de la red y el fondo cartográfico de la zona sur del término de Paterna.

La información disponible para el término de San Antonio de Benagéber consiste en un conjunto de planos en papel en tamaño A3 y una serie de archivos con la información del trazado de la red, los elementos y el fondo cartográfico de los tramos correspondientes a dicho término. La identificación y numeración de los planos contenidos en cada archivo no guarda relación alguna con la información en papel que se poseía.

Los planos disponibles correspondientes al término de San Antonio de Benagéber presentan muchas de las características ya indicadas para los planos del término de Paterna, si bien tienen peculiaridades propias de dicho término. Algunas de las características similares de los planos de San Antonio de Benagéber y de Paterna son las siguientes:

- Los planos se encuentran divididos con las dificultades que ello supone para obtener una referencia cartográfica completa y unida de toda la red.
- Existen discrepancias entre la información recogida en formato magnético de la información recogida en papel.
- Al igual que ocurría en el caso de la información de los planos de Paterna la referencia a los planos en papel XX.YY.dwg se encuentra cambiada.

Algunas de las peculiaridades y particularidades de los planos del municipio de San Antonio de Benagéber son las siguientes:

- Las coordenadas de los diferentes planos recogidos en formato magnético se encuentran en UTM, de forma que es sencillo unir los diferentes planos entre sí.
- La numeración y denominación de los planos en formato digital no coincide con la denominación de los planos en formato papel.

Además de las diferencias existentes entre las dos fuentes de información, la revisión superficial de la información permite detectar una serie de defectos importantes en los planos, principalmente asociados a las uniones de determinadas zonas funcionales del sistema.

A la vista de las tres fuentes de información existentes, y que la información contenida en éstas es distinta se plantean una serie de inconvenientes:

- ¿Cuál de las dos fuentes de información disponibles en formato digital debe utilizarse como referencia para la elaboración de una cartografía completa de la red?
- ¿En caso de duda cuál es la fuente de información que debe aceptarse como buena?

En definitiva, de cuanto se ha expuesto se ve a dificultad en el análisis de dicha información a pesar de disponer a priori de una información suficientemente estructurada y ordenada.

Procesamiento de la información disponible

Tras el análisis de la información disponible se procedió a realizar las modificaciones necesarias en la información con el objeto de obtener una representación completa y unificada de la red de distribución. Dichas modificaciones son las que se recogen a continuación:

- Se escogió como información de partida toda aquella que se encontraba en coordenadas UTM por cuanto era más fácil de ubicar espacialmente en el SIG.

- Se analizaron todos y cada uno de los planos en formato digital del término de Paterna, estableciendo la escala de los mismos y la conversión de coordenadas que era necesaria para convertir éstos a coordenadas UTM.
- Con la totalidad de la información correspondiente al término de Paterna en coordenadas UTM se procedió a la fusión de las dos fuentes de información en formato magnético, intentando discernir con ayuda de los planos en papel diámetros y materiales de aquellas conducciones que presentaban información contradictoria o desconocida.
- El procedimiento de clasificación establecido en la actualidad es el de disponer de un único plano con la totalidad de la red de distribución donde la información de las diferentes conducciones se encuentra agrupada en capas. Así, existe una capa por cada diámetro y material diferentes.
- Finalmente se ha realizado todo el tratamiento gráfico necesario para unir todas aquellas conducciones que quedaban desligadas o cortadas por el hecho de disponer de los planos cortados en su punto de partida.
- El resultado final es un plano con toda la información disponible, clasificado y ordenado para identificar fácilmente diámetros y materiales.
- Verificación de la información en cuanto a discrepancias en la información disponible. Esta verificación se ha realizado mediante comprobación en campo, contando en todo momento con el apoyo del personal de la Cooperativa.

Integración de toda la red en un sistema de información único. Esto implicó la conexión de la parte norte del abastecimiento con el resto del sistema situado en la parte sur.

3.3.3. Tratamiento del fondo cartográfico.

Uno de los puntos fundamentales en cualquier representación de un sistema de distribución de agua es el fondo cartográfico sobre el que se va a representar ésta. En este caso el tratamiento que se ha realizado del fondo cartográfico ha venido condicionado por la información disponible.

En el comienzo del estudio sólo se disponía de la información del fondo cartográfico de los términos municipales de Paterna y San Antonio de Benagéber, contenida en los mismos planos pero apenas sin clasificar. Sin embargo, dicho fondo cartográfico era sumamente detallado y se encontraba dividido de la misma forma que los planos descritos en apartados anteriores.

En cambio, no se disponía de información alguna acerca de los fondos cartográficos de los términos de Bétera y La Pobra de Vallbona. Por este motivo se decidió utilizar un fondo cartográfico único para toda la red, y se recurrió al elaborado por el Instituto Cartográfico Valenciano. Dicho Instituto dispone de copias en formato magnético de los

planos de escala 1:10000 confeccionados por la Generalitat Valenciana a partir de un vuelo realizado en 1991. Dicho fondo cartográfico es el que se ha empleado como cartografía básica del sistema de distribución.

El fondo cartográfico adquirido inicialmente requería de una capacidad de almacenamiento elevada (superior a los 27 Mb de memoria) que demoraba en exceso los trabajos en pantalla. Por este motivo se decidió simplificarlo al mínimo. Una vez recortada el área de servicio de la Cooperativa y eliminada la información poco significativa se obtuvo el fondo empleado como base cartográfico, que resultaba mucho más ligero pero sin perder ninguna información relevante para el estudio.

De toda la información disponible en el fondo cartográfico, se han aislado dos niveles de información que sí serán posteriormente tratados. Se trata del contorno de las parcelas, a las cuales se vincularán los abonados existentes en las bases de datos utilizadas para la facturación, y los valores de las cotas, de los cuales se derivará un Modelo Digital del Terreno basado en un red de triángulos irregulares. A partir del MDT se realizarán las interpolaciones oportunas para determinar las cotas de cada uno de los nudos de la red.

3.4. Información disponible de facturación.

La información relativa a las facturaciones resulta bastante completa, aunque no guarda en la práctica ninguna relación con la información correspondiente a la red. Esto es, se trata de datos de uso administrativo. Esta información estaba estructurada inicialmente en tres bases de datos donde se recoge toda la información acerca de los consumos y abonados a esta red de distribución de agua potable. Se trata de las bases de datos DATOSAN, MASTER1 y MASTER2.

Estas tres bases de datos han sido recogidas en sólo una denominada *Abonados* y realizada en el programa Microsoft Access. El archivo *Abonados* recoge las tres bases de datos mencionadas anteriormente en forma de tablas, rebautizadas como *Datosan*, *Abonados* y *Consumos*.

A continuación se describen los contenidos de cada una de estas tablas:

- **Datosan**

Se trata de una tabla que recoge información acerca de los consumos de agua potable durante los últimos 12 meses. Puesto que la facturación es trimestral, recoge en realidad los últimos cuatro recibos facturados. Además, puesto que se trata de una facturación por tramos, en dos escalones, se especifica el consumo y el precio de facturación para cada uno de los tramos.

A continuación se muestra una relación detallada de dicha información:

Tabla 6.3. Estructura de la tabla de datos **Datosan**.

Nombre del Campo	Descripción del campo
TITULO	Indica el número de la acción de cada abonado.
ZONA	Indica la urbanización a la que pertenece el abonado.
DIRECCIÓN	Número de la calle y vivienda del abonado.
LIBRO	Indica mediante una numeración el grupo de zonas a la que pertenece el abonado.
HOJA	Indica la hoja en la que se encuentra situado el abonado en los croquis facilitados por la Cooperativa.
SUB_HOJA	Indica el número con el que está representado el abonado en los croquis.
DISTRITO	Código postal de la zona.
TELÉFONO	Número de teléfono del abonado.
CONTADOR	Número del contador del abonado.
FECHA_CONT	Fecha en que fue instalado el contador.
CONTROL	Información específica de la instalación.
SITUACIÓN	Indica dónde se encuentra el contador en caso de no situarse en la misma calle de la vivienda.
HIDROPRE	Indica si está o no conectado a un grupo hidropresor.
LECTURA_AN	Ultima lectura realizada el año anterior.
LECTURA_1T	Indica la lectura del contador en el primer trimestre.
LECTURA_2T	Indica la lectura del contador en el segundo trimestre.
LECTURA_3T	Indica la lectura del contador en el tercer trimestre.
LECTURA_4T	Indica la lectura del contador en el cuarto trimestre.
CONSUMO_AN	Consumo del año anterior.
CONSUMO_1T	Indica el consumo de agua durante el primer trimestre.
CONSUMO_2T	Indica el consumo de agua durante el segundo trimestre.
CONSUMO_3T	Indica el consumo de agua durante el tercer trimestre.
CONSUMO_4T	Indica el consumo de agua durante el cuarto trimestre.
TOTAL	Consumo total del abonado.
PRECIO1_1T	Indica el precio del agua consumida durante el primer trimestre en el primer bloque de consumo.
PRECIO1_2T	Idem para el segundo trimestre.
PRECIO1_3T	Idem para el tercer trimestre.
PRECIO1_4T	Idem para el cuarto trimestre.
PRECIO2_1T	Indica el precio del agua consumida durante el primer trimestre en el segundo bloque de consumo. Este precio es diferente del anterior y aplicado a partir de un determinado consumo.
PRECIO2_2T	Idem para el segundo trimestre.
PRECIO2_3T	Idem para el tercer trimestre.
PRECIO2_4T	Idem para el cuarto trimestre.

Nombre del Campo	Descripción del campo
MEMORIA	Observaciones sobre la instalación o el abonado.
TIPO	Especifica el tipo de uso que se hace del agua.
APAREJADO	La información recogida en este campo no afecta en la elaboración del modelo.
INCIDENCIA	La información recogida en este campo no afecta en la elaboración del modelo.
CARGOABONO	Cuantía del recibo.
FECHACONTA	Fecha en que fue instalado el contador.
DOMESTICO	Especifica el tipo de uso que se hace del agua. .
OTRAGUA	Indica si el abonado emplea otra agua que provenga de una empresa diferente.
COEF_IDA	La información recogida en este campo no afecta en la elaboración del modelo.

- **Abonados**

Esta tabla recoge principalmente los datos particulares de cada uno de los abonados, incluyendo los datos bancarios. Por tanto es una tabla que carece totalmente de interés desde el punto de vista de la elaboración del modelo. Sin embargo, es la única que contiene un listado completo de todos los abonados, pues recoge tanto los que existen en la actualidad como los que se dieron de baja en algún momento anterior al estudio.

El significado de algunos de los campos es el que se describe a continuación:

Tabla 6.4. Estructura de la tabla de datos Abonados.

Nombre del Campo	Descripción del campo
TITULO	Indica el número de la acción de cada abonado.
APELLIDOS	Apellidos del abonado.
NOMBRE	Nombre del abonado.
DIRECCIÓN	Indica el lugar de residencia habitual del abonado.
DISTRITO	Distrito postal de la dirección del abonado.
POBLACIÓN	Población donde se sitúa la residencia del abonado.
DNI	Número del Documento Nacional de Identidad del abonado.
TITULAR_CU	Nombre del titular de la cuenta con la que se abona el agua consumida.
OBSERVACION	Observaciones al abonado.
F_ALTA	Fecha en que se dio de alta el abonado.
APORTACION	Aportación inicial hecha por el titular para darse de alta en la Cooperativa.

- Consumos

Esta última tabla recoge el histórico de facturaciones de todos los abonados. Recoge información sobre el consumo a lo largo de catorce años (entre 1986 y 2000). La información detallada que recoge se puede condensar de la siguiente forma:

Tabla 6.5. Estructura de la tabla de datos **Consumos**.

Nombre del campo	Descripción del campo
TITULO	Indica el número de la acción del abonado.
LEC_AT_BB	Indica la lectura del contador en el trimestre A del año 19BB .
CON_AT_BB	Indica el consumo de agua durante el trimestre A del año 19BB .

Las columnas correspondientes a la lectura del contador y el consumo total de agua facturado se repiten en esta tabla para cada trimestre desde el año 1986 al 2000. Así, por ejemplo, la tabla LEC_4T_89 recogerá las lecturas de los contadores correspondientes al cuarto trimestre de 1989. Para el caso del año 2000, la notación quedaría como CON_3T_00, siendo ésta la tabla con el consumo facturado en el tercer trimestre del año 2000. Un aspecto de esta tabla de la base de datos se muestra en la Figura 6.4.

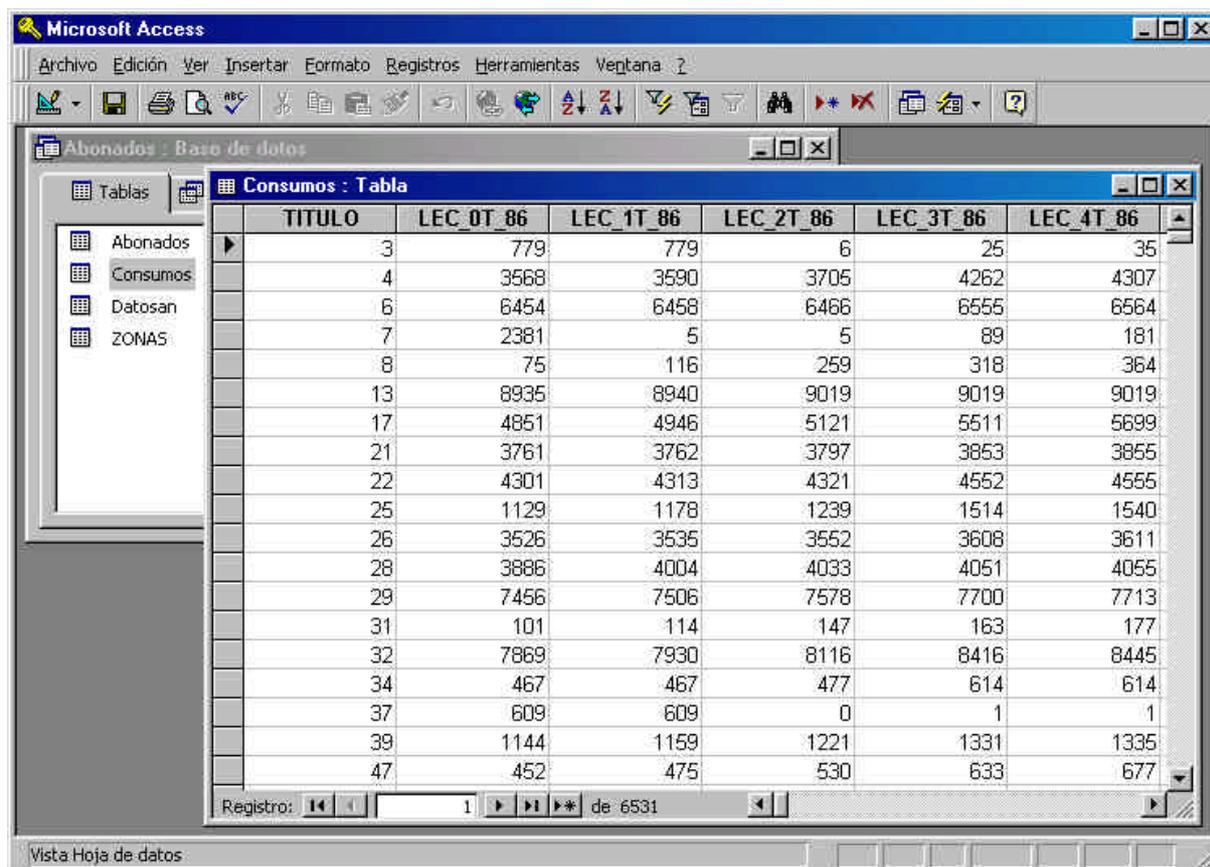


Figura 6.4. Aspecto parcial de la tabla **Consumos** de la base de datos de facturaciones.

Acciones emprendidas

Esta información de facturaciones está prácticamente preparada para su integración en el SIG. A parte de su integración en una única base de datos Access, el único tratamiento que se ha hecho de ella ha consistido en la creación de una cuarta tabla que incluirá información sintetizada para cada una de las zonas funcionales, pues durante el proceso de asignación de cargas proyectadas al modelo se recurrirá a trabajar por zonas, en lugar de hacerlo de manera individual para cada abonado. Así, se ha creado una cuarta tabla denominada ZONAS, que sintetizará toda la información necesaria para cada zona. Esta cuarta tabla contendrá los siguientes campos:

Tabla 6.6. Estructura de la tabla de datos ZONAS.

Nombre del campo	Descripción del campo
ID_zona	Identificativo de la zona funcional.
Nombre	Nombre de la urbanización incluida en la zona.
Alta	Año del primer registro disponible.
Consumo_AAAA	Consumo facturado para el año AAAA. Incluye el consumo proyectado en el año 2010.
Nabonados_AAAA	Número de abonados en el año AAAA. Incluye el número de abonados esperado en el año 2010.
Dotacion_AAAA	Dotación media del año AAAA. Incluye la dotación media esperada en el año 2010.
Dotacion_Media	Dotación media entre los años 1986 y 1999.
Dotacion3T_AAAA	Dotación durante el tercer trimestre del año AAAA. En este caso, se evita el año 2010.
Tasa_AAAA	Tasa de crecimiento anual de la población en el año AAAA, entre 1986 y 1999.
Tasa_Media	Tasa de crecimiento media anual entre los años 1986 y 1989.
Densidad	Densidad de población (en hab/km ²)
Kp_estacional	Coefficiente de punta en el tercer trimestre referido al consumo medio anual.

4. Integración de la información en el SIG.

4.1. Modelo de datos.

En el capítulo anterior se describió un modelo de datos completo para el cálculo hidráulico que incluía el cálculo en condiciones de caudal punta. Sin embargo, aquí se va a describir el modelo de datos para el almacenamiento permanente de la información relativa a la red de la Cooperativa. En este sentido, gran parte de la información descrita

anteriormente se utilizará sólo como un paso intermedio en el cálculo, y no es necesario almacenarla permanentemente.

Por otra parte, puesto que se va a estudiar la integración de los datos disponibles en el SIG, hay que decir que se contemplan como elementos principales las tuberías, los pozos y los depósitos, pues son los únicos elementos de los cuales se dispone de información. Los nudos, como se explicará posteriormente, se definirán una vez se haya creado una vez la correspondiente topología. Así pues, en este apartado se describen, de una parte, los datos necesarios para estos elementos y que se pretende conservar en el tiempo. Dadas las características del estudio, se obvian datos que en otras aplicaciones pueden resultar de especial interés. Este es el caso, por ejemplo, de la edad de las conducciones o el histórico de averías de las mismas.

Por último cabe señalar que el modelo de datos utilizado se ajusta perfectamente a la utilización que se va a hacer del SIG, esto es, a la elaboración y explotación del modelo matemático como herramienta de toma de decisiones. Por ello, algunas decisiones propias del proceso de modelación matemática de la red ya se han tenido en cuenta durante la digitalización, como es la agrupación en serie de tramos de tubería de características homogéneas, en lugar de digitalizar individualmente todos y cada uno de los tramos de tubería instalados.

A continuación se muestran los modelos de datos correspondientes a los cinco elementos considerados durante la modelación de la red. Para cada uno de los elementos se describe la representación simbólica, el tipo de objeto gráfico que lo representa y la estructura de la tabla de datos alfanuméricos correspondiente, almacenada en una base de datos desarrollada en MS Access ® denominada genéricamente **MODELO**.

4.1.1. Tuberías.

Es el elemento principal del modelo de datos, pues durante la digitalización es el único elemento del que se disponía de información combinada gráfica y temática. La definición que se ha hecho de una tubería es la de un elemento lineal de transporte de agua de características uniformes y sin derivaciones ni aportes *distintos de las acometidas*. Como se acaba de comentar, en la base de datos ya se recogen algunas decisiones propias del proceso de modelación, y esta es una de ellas. Se desprecia el concepto de tramo de tubería entendido como unidad mínima de tubería suministrada por un fabricante para utilizar directamente el concepto de línea entendido como elemento de transporte entre dos nudos. Durante la digitalización se ha tenido especial cuidado en garantizar una correcta conectividad entre las tuberías, para evitar que zonas de la red queden desconectadas en el modelo.

El objeto gráfico utilizado para la representación de las tuberías es el de la polilínea aligerada, es decir, una línea compuesta por segmentos rectilíneos en dos dimensiones (sólo coordenadas X e Y). Esto implica dejar de lado la coordenada Z, pero a efectos de

cálculo hidráulico este hecho no resulta importante por cuanto los valores de presión y altura piezométrica sólo se tienen en cuenta en los nudos de la red.

En cuanto a los atributos de cada tubería, éstos quedarán guardados en la tabla TUBERIAS de la base de datos antes mencionada, y tendrá los siguientes campos:

Tabla 6.7. Estructura de la tabla de datos TUBERIAS.

Nombre del campo	Descripción del campo
HDL	Clave que relaciona el registro de la base de datos con el objeto gráfico de AutoCAD Map.
ID	Identificador de la línea dentro de la topología. Es necesario para la conexión con EPANET Tool Kit.
Nudo1	Identificador del nudo situado aguas arriba de la línea.
Nudo2	Identificador del nudo situado aguas arriba de la línea.
DN	Diámetro nominal en mm (recuperado del nombre de la capa)
Diámetro	Diámetro interior en mm (será el que se utilice para los cálculos hidráulicos).
Rugosidad	Rugosidad absoluta de la tubería, en mm. Salvo excepciones, se aceptará como valor válido 0,1 mm.
kPerdidas	Coefficiente adimensional de pérdidas menores en accesorios, expresado a partir del término cinético ($k \cdot v^2/2g$)
Caudal	Caudal circulante por la conducción, en l/s. Será uno de los resultados devueltos por EPANET Tool Kit.
PN	Presión nominal de la conducción en atmósferas.
Material	Material del que está hecha la conducción.
Patrón	Curva de modulación temporal de consumos. Como luego se verá, los abonados se han asignado a las tuberías, por lo que representa la curva de modulación aplicada a los abonados de cada conducción.
Longitud	Longitud de cada tramo de conducción expresado en m.

4.1.2. Pozos.

Como se vio en la Tabla 6.1, de los pozos se tiene alguna información. Constituyen, por tanto, otro elemento importante en el modelo de la red. Sin embargo, el tratamiento que se va a hacer de ellos en el modelo es el de un nudo más, y por ello su representación gráfica vendrá marcada por un nudo vinculado a los datos disponibles recogidos en la tabla POZOS de la base de datos general para el modelo. Para distinguir a los pozos de los depósitos y de los nudos (todos con representación mediante un punto), se utilizará también una representación simbólica como la mostrada en la Figura 6.5, consistente en un cuadrado verde dividido en dos por una de las diagonales y con una de las mitades de color igualmente verde.



Figura 6.5. Representación simbólica de un pozo en el SIG.

En cuanto a los datos alfanuméricos empleados en la modelación, son los que se describen a continuación:

Tabla 6.8. Estructura de la tabla de datos POZOS.

Nombre del campo	Descripción del campo
HDL	Clave que relaciona el registro de la base de datos con el objeto gráfico de AutoCAD Map.
ID	Identificador del nudo utilizado para la representación del pozo. Es necesario para la conexión con EPANET Tool Kit.
Cota	Cota altimétrica de la boca del pozo, en m.
Presión	Presión calculada para el pozo. Dado el tratamiento que se les dará a los pozos durante el cálculo, esta información es irrelevante.
Demanda	Caudal extraído del pozo, en l/s.
Patrón	Curva de modulación temporal de demandas. Representa la variación temporal del caudal extraído del pozo a lo largo del día.

4.1.3. Depósitos.

Al igual que sucede con los pozos, de los depósitos también se tiene alguna información. Estos datos alfanuméricos se guardarán en la tabla DEPOSITOS de la base de datos. El objeto gráfico que marcará la posición geográfica de cada depósito será de nuevo un punto. Para distinguir a los depósitos en la generación de cartografía temática, se utilizará también una representación simbólica como la mostrada en la Figura 6.6, consistente en un círculo naranja dividido en dos por un diámetro oblicuo y con una de las mitades de color igualmente naranja.



Figura 6.6. Representación simbólica de un depósito en el SIG.

En cuanto a los datos temáticos, la descripción de cada uno de los campos es la siguiente:

Tabla 6.9. Estructura de la tabla de datos **DEPOSITOS**.

Nombre del campo	Descripción del campo
HDL	Clave que relaciona el registro de la base de datos con el objeto gráfico de AutoCAD Map.
ID	Identificador del nudo utilizado para la representación del depósito. Es necesario para la conexión con EPANET Tool Kit.
Cota	Cota altimétrica de la solera del depósito, en m.
Presión	Nivel alcanzado por el agua por encima de la solera del depósito
Demanda	Caudal saliente (positivo) o entrante (negativo) en el depósito, en l/s, resultado de los cálculos.
Patrón	Evolución temporal del nivel de agua en el depósito.

4.1.4. Nudos.

Este es el único elemento que no será digitalizado, sino que los datos correspondientes al mismo serán íntegramente creados en el momento de iniciar la conexión con el programa de simulación. Es evidente que la representación gráfica de un nudo será un punto. Los nudos se crearán cuando se cree la topología de la red, por lo que hasta que ésta no sea creado, aquéllos no existirán en la base de datos.

Los datos temáticos que darán guardados en la tabla **CONEXIONES**, cuya descripción se detalla en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10. Estructura de la tabla de datos CONEXIONES.

Nombre del campo	Descripción del campo
HDL	Clave que relaciona el registro de la base de datos con el objeto gráfico de AutoCAD Map.
ID	Identificador del nudo. Es necesario para la conexión con EPANET Tool Kit.
Cota	Cota altimétrica del nudo, en m.
Presión	Presión calculada en el nudo, en m.
DemandaM	Caudal medio asignado al nudo tras el proceso de asignación de cargas, en l/s.
DemandaP	Caudal medio asignado al nudo tras el proceso de cálculo de caudales punta en las líneas, en l/s.
Patrón	Evolución temporal del consumo de agua de los abonados.

4.1.5. Estaciones de bombeo.

Para las estaciones de bombeo se observará que el modelo de datos es ligeramente diferente al descrito en el capítulo anterior. En este caso, se ha preferido simplificarlo, optando por almacenar el caudal y la altura nominales de las bombas, y utilizando un único registro para cada estación de bombeo, en lugar de utilizar un registro para cada bomba. Esto es posible gracias al hecho de que en aquellas estaciones de bombeo en las que hay varias bombas, todas ellas son iguales o bastante similares. En el caso de que hubiesen bombas diferentes, se representarían por registros distintos de la base de datos. Así, puesto que se tiene conocimiento del número de bombas puestas en marcha en cada caso, esta información se acumulará en el campo Patrón, para utilizarlo posteriormente al exportar la estación de bombeo al programa de simulación.

Como ya se explicó en el capítulo anterior, la representación gráfica vendrá dada por un punto, por lo que posteriormente habrá de convertirse a una línea con sus correspondientes nudos inicial y final.

La descripción de los campos de la tabla que representará cada una de las estaciones de bombeo (EB) se muestra en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11. Estructura de la tabla de datos BOMBAS.

Nombre del campo	Descripción del campo
HDL	Clave que relaciona el registro de la base de datos con el objeto gráfico de AutoCAD Map.
ID	Identificador del nudo utilizado para la representación de la EB. Es necesario para la conexión con EPANET Tool Kit.
Nudo1	Identificador del nudo situado aguas arriba de la EB.
Nudo2	Identificador del nudo situado aguas arriba de la EB.

Nombre del campo	Descripción del campo
n	Coefficiente de caudal de la curva característica de la bomba, ajustado para el caudal en l/s.
H0	Altura nominal de cada bomba, en mca.
Caudal	Caudal calculado para cada bomba, en l/s.
Altura	Altura calculado para cada bomba, en mca.
Patrón	Número de bombas puestas en marcha en cada intervalo.

4.2. Vinculación de los datos.

4.2.1. Vinculación de los datos de la red.

Como se explicó previamente, durante el proceso de digitalización se han establecido unas directrices que ayudan a la inclusión de la información contenida en los planos a la base de datos creada. De esta manera, a partir del nombre de la capa (recuérdese, del tipo AAABBBCC) se pueden obtener los datos de diámetro nominal, presión de nominal trabajo y material del tubo. Un posterior tratamiento combinado con una base de datos de materiales de tubería comerciales o basada en la norma UNE ha permitido determinar el diámetro interior de cada uno.

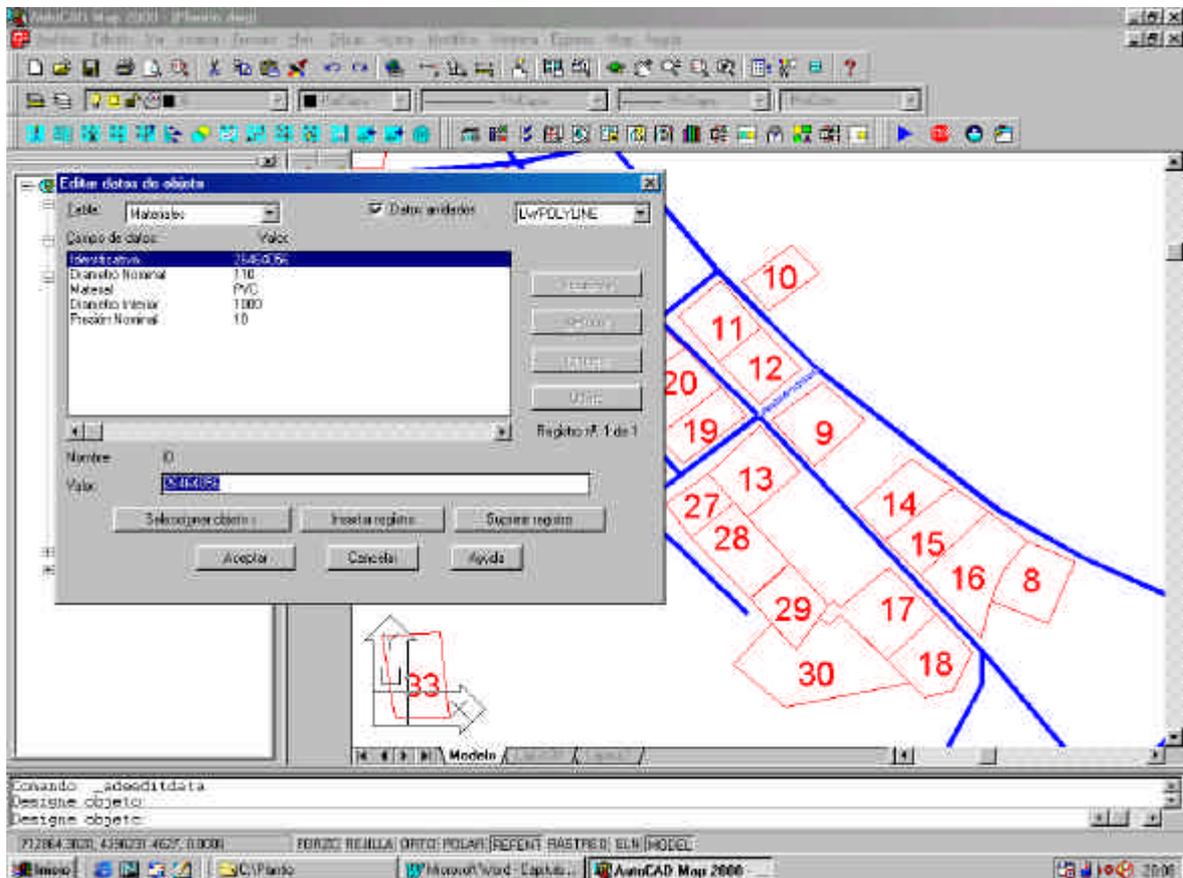


Figura 6.7. Vinculación de datos: digitalización de infraestructuras.

En la Figura 6.7 se muestra un ejemplo de la información almacenada en el SIG por este procedimiento.

El resto de elementos de la red de los que se tiene datos (pozos, depósitos y estaciones de bombeo) han sido vinculados a sus respectivas representaciones gráficas de forma manual, al tratarse de una cantidad de objetos muy reducida.

Por último, la vinculación de los datos correspondientes a los nudos se realizará posteriormente cuando se complete la creación de la topología.

En cualquier caso, la información de red aparece estructura en tres bases de datos distintas:

- Base de datos de inventario. Recoge los datos de diámetro, material y presión nominal obtenidos de la información disponible. Esta base de datos está integrada en el propio SIG.
- Base de datos topológica. Se crea durante el proceso de modelación de la red. Recoge principalmente la información sobre la conectividad y la orientación de la red, así como los parámetros geométricos (longitud de las tuberías y cotas de los nudos, principalmente). Esta base de datos está igualmente integrada en el SIG.
- Base de datos del modelo. En esta base de datos sólo aparecen los elementos que forman parte del mismo y recoge tanto los datos que se han de proporcionar al programa de análisis hidráulico como los resultados que se esperan obtener de él. En este caso, se trata de una base de datos externa (MS Access ®, para ser más exactos) que permite tanto la vinculación con objetos gráficos del SIG como el acceso independiente desde otras aplicaciones.

4.2.2. Vinculación de los datos de los abonados.

La vinculación de los datos de los abonados se ha realizado en dos fases. En una primera fase se han utilizado los esquemas disponibles (como el presentado en la Figura 6.3) para digitalizar las parcelas correspondientes a cada abonado y vincularles a cada una el correspondiente registro. Así, la información queda almacenada como se muestra en la Figura 6.8, donde cada abonado queda representado en el plano por la parcela correspondiente y de la misma forma cada parcela que es abastecida desde la red tiene un registro en la base de datos de abonados. Posteriormente, durante la operación de asignación de cargas al modelo, cada abonado se ha asignado a la tubería de distribución de donde sale la acometida que le da servicio.

Dada la estructura relacional de la base de datos, aunque la información de los abonados aparece en tres tablas distintas, se ha elegido el identificativo único de cada uno (el título, o número de socio de la Cooperativa) como clave para acceder a cualquier dato

del mismo. Esto es, las tablas se han indexado utilizando el campo TITULO como clave primaria.

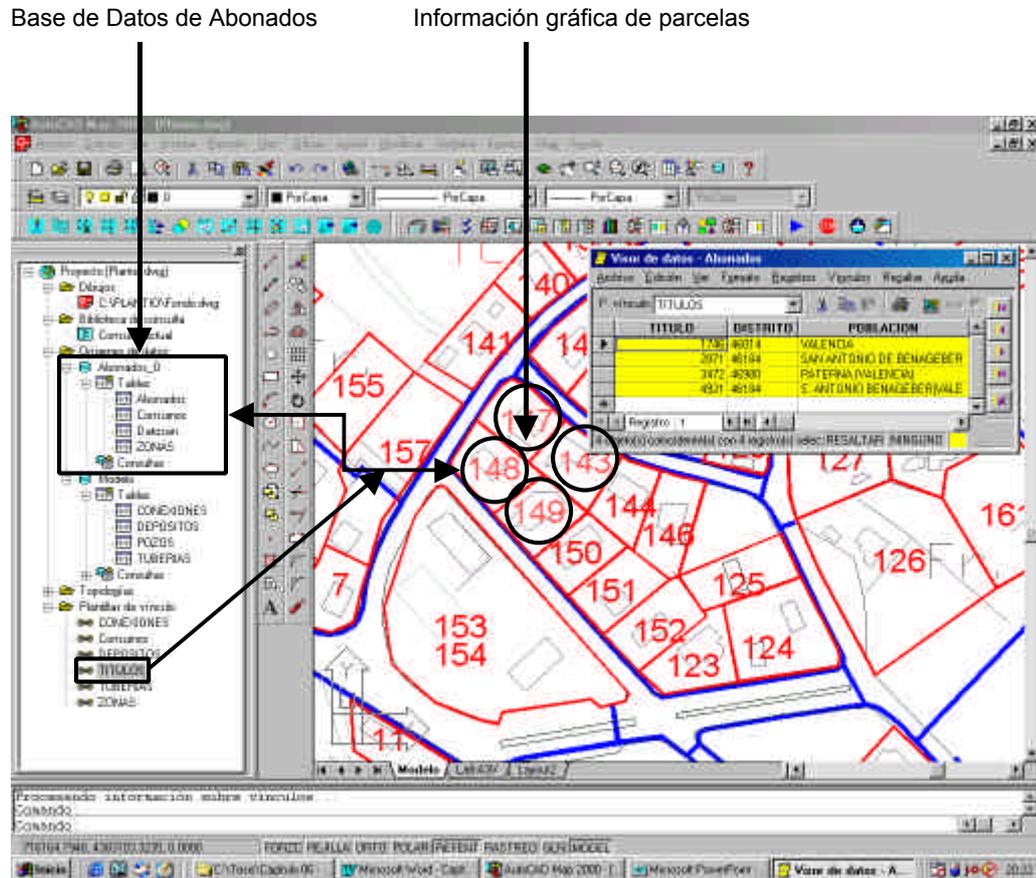


Figura 6.8. Georreferenciación de los abonados mediante un vínculo entre éstos y las parcelas.

4.3. Generación de la topología de la red.

Sin duda esta etapa es clave en el éxito de la integración de la información en el SIG. De ella dependen todas las comprobaciones destinadas a garantizar la conectividad de la red. Por ello, antes de realizar la generación de la topología es necesario hacer un último control de calidad de los datos, tanto a nivel temático como gráfico. Así se realizarán las siguientes comprobaciones mínimas:

- Todas las tuberías de la base de datos tendrán, como datos mínimos antes de proceder a la creación de la topología, el diámetro nominal, el material y la presión nominal, o, en su defecto, los datos derivados de aquéllos, es decir, el diámetro interior y la rugosidad.
- Los pozos tendrán asignado un caudal extraído. En el caso de que el pozo esté inactivo, este caudal estará fijado en 0, pero el valor debe aparecer en la base de datos en cualquier caso.

- Dos tuberías adyacentes deben tener las mismas coordenadas geográficas en los nudos extremos que les sirven de unión. Este hecho es de vital importancia, porque dichos extremos servirán para la creación del nudo que almacenará dicha conectividad. Es posible que en una representación gráfica den la sensación de estar unidas, pero si las coordenadas no son exactamente las mismas, en la topología no aparecerán unidas y aparecerán problemas de conectividad. Por ello, se ha utilizado una herramienta de consolidación de las tipologías que corregirá de manera semiautomática estas anomalías a través de la utilización de un margen de error (ver Figura 6.9).

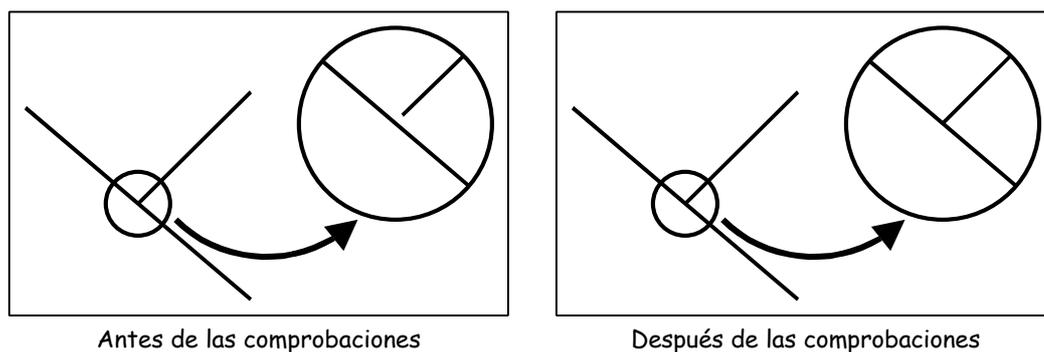


Figura 6.9. Corrección de errores de conectividad debidos a una digitalización deficiente.

Una vez se han realizado estas comprobaciones se dispone de una estructura de datos topológica que recogerá la información necesaria para conocer la conectividad de la red. Estos datos son fundamentales para conectar el SIG con el programa de simulación hidráulica. Concluida la generación de la topología, ya se dispone de casi todos los datos necesarios para la generación del modelo, salvo las cotas de cada uno de los nudos de la red (cuya obtención se comenta a continuación) y, lógicamente, las cargas en los nudos, que vendrán dadas como consecuencia del proceso de asignación de cargas.

4.4. Creación del MDT e interpolación de las cotas.

Para la obtención de las cotas de los nudos de la red, se ha partido de los datos altimétricos obtenidos del fondo cartográfico. En concreto, se ha obtenido una colección de puntos con valor conocido de la cota sobre el nivel del mar. Con ellos se ha procedido a elaborar un MDT siguiendo lo expuesto en el capítulo 3 de esta Tesis. La finalidad de este MDT es principalmente la interpolación de las cotas en los nudos del modelo de la red.

Los *TIN* (del inglés *Triangular Irregular Network*, Red de Triángulos Irregulares) pueden considerarse como una estructura derivada de otra anterior de puntos o líneas. Aunque la distribución original puede ser cualquiera (incluso puntos distribuidos aleatoriamente), es frecuente partir de una base de isohipsas (modelo vectorial) para generar la red de triángulos. Estos están internamente organizados en función de su vecindad mediante un conjunto de información bastante complejo que hace posible un manejo relativamente ágil y eficaz frente a alternativas menos estructuradas.

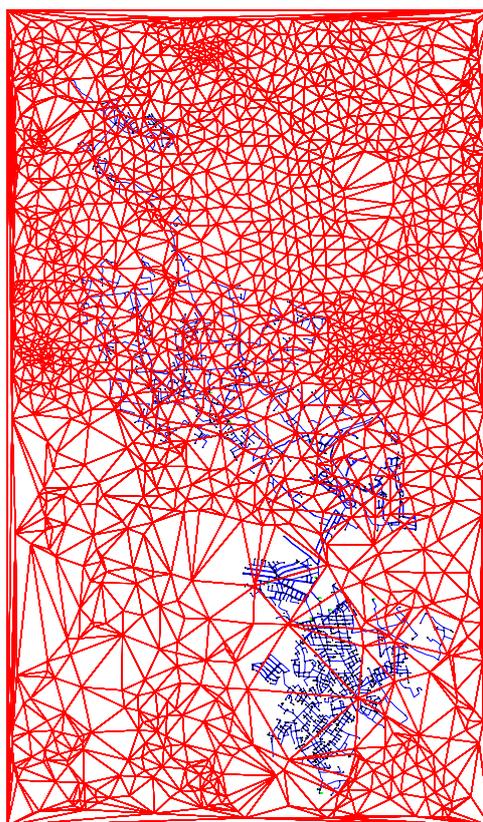


Figura 6.10. Red irregular de triángulos para el MDT de la red de El Plantío y la Cañada.

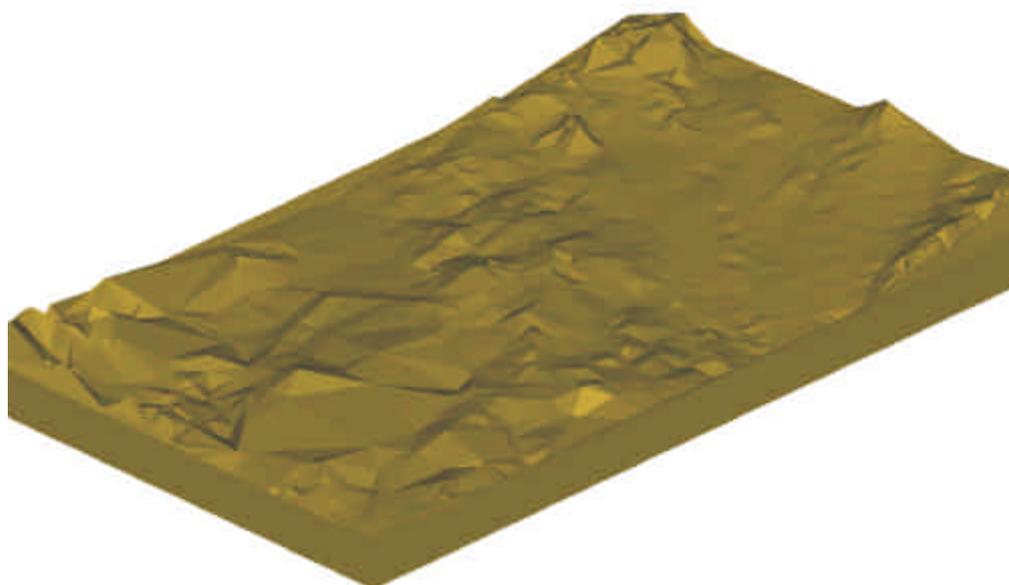


Figura 6.11. Representación en perspectiva isométrica del relieve de la red objeto de estudio.

En la Figura 6.10 se muestra el resultado de la triangulación realizada siguiendo el algoritmo de Watson previamente descrito, mientras que en la Figura 6.11 se muestra una

perspectiva isométrica en relieve obtenida como resultado de la triangulación anterior mediante una interpolación plana (interpolación lineal dentro de cada triángulo).

Aunque existen muchas formas distintas de interpolación de los datos altimétricos, en este caso se ha optado por emplear la interpolación inversa con el cuadrado de la distancia para la obtención de las cotas. Como ya se comentó, da buenos resultados (aunque no exentos de mínimos errores) y, sobre todo, resulta muy ágil en el cálculo.

5. Definición del modelo matemático.

5.1. Simplificación del modelo.

La esqueletización de la red es una práctica habitual en la confección de modelos matemáticos de redes de distribución. Se trata de un proceso consistente en la simplificación de la red, considerando únicamente el esqueleto necesario para la adecuada modelación hidráulica.

No obstante, dadas las características del sistema, la técnica utilizada y que uno de los objetivos del Plan Director es recoger una cartografía detallada de la red de distribución de la Cooperativa, ha parecido adecuado considerar en el presente modelo la mayor cantidad de conducciones posibles. De esta forma se han recogido todas aquellas conducciones que forman parte del sistema de distribución, excluyendo tan sólo las conducciones de acometida a abonados individuales. Además, las instalaciones singulares han recibido una modelación especial ya que ha sido necesario introducir tramos de tuberías auxiliares y punto de presión conocidos para conseguir un adecuado ajuste.

Se trata por tanto de un modelo de detalle de la red. Esta consideración de la red en su totalidad puede no reflejar con exactitud el comportamiento real en ramales terminales, en los que los coeficientes de simultaneidad o los coeficientes de punta son sumamente influyentes, si bien los resultados que se obtienen en las conducciones principales del sistema son equivalentes a las que se obtendrían en el caso de realizar una esqueletización.

Los objetivos del modelo son básicamente dos: conocer con mayor exactitud el funcionamiento global de la red en la actualidad y determinar la capacidad de la misma en un horizonte a medio plazo (año 2010). Por ello, se han adoptado las dos tipos de modelación posibles. Para el estado actual se ha optado por un modelo estratégico en régimen cuasi-estacionario (simulación en período extendido) en el que los valores de presión y caudal en líneas extremas serán poco fiables. Para la simulación del escenario correspondiente al año 2010 se ha utilizado un modelo estacionario con caudales determinados para condiciones de consumo punta.

Por otra parte, puesto que la simplificación del modelo es prácticamente nula, los criterios de simplificación adoptados han consistido en:

- Asociación en serie de todas las tuberías con características uniformes de material, diámetro nominal y presión nominal.
- Una vez realizada la simplificación anterior, los abonados han sido asignados a la línea resultante de la cual parte la acometida. Este proceso se ha realizado siguiendo criterios de proximidad con el SIG de forma automática, utilizando como referencia de cada abonado el punto geográfico donde se ha vinculado la información y buscando la tubería de la red simplificada más próxima a dicho punto.
- Los pozos se han representado por un punto de consumo negativo (es decir, con caudal inyectado en lugar de consumido). El consumo negativo asignado ha sido, obviamente, el caudal nominal aportado por la bomba del pozo.
- Los depósitos se han asumido todos como puntos de cota conocida y nivel variable, utilizando la variación de nivel en los mismos. Para ello, se comprobaron previamente los registros de nivel en los mismos, observándose el margen de variación permitido como consignas de los mismos.

5.2. Estudio de consumos.

5.2.1. Análisis de los consumos.

Para la elaboración de un correcto modelo matemático de la red es muy importante tener conocimiento de la distribución de consumos de agua potable a lo largo de la misma. Así mismo, para una utilización efectiva del modelo, es necesario conocer todas las peculiaridades de la red en cuanto a consumos se refiere. Es por esto que a continuación se muestra el método seguido a la hora de estimar los consumos de la red de distribución de agua potable.

Para realizar el estudio de consumos de la red de agua se parte de la información sobre facturaciones proporcionada por la Cooperativa Valenciana El Plantío y La Cañada. Esta información recoge en forma de bases de datos las facturaciones de cada uno de los consumidores comprendidas entre los años 1986 a 1999.

A partir de los datos de facturaciones y de fecha de alta de los abonados se han realizado gráficas para cada una de las zonas donde quedan reflejadas las dotaciones medias para cada trimestre, la evolución del número de abonados y una media total de la dotación.

Para calcular el número de abonados de cada año y para cada una de las zonas se parte de la información de la fecha de alta de los abonados. Si la fecha de alta del abonado en cuestión es anterior al trimestre que se está tratando será contabilizado, en caso contrario no. Estos resultados han sido representados en la Figura 6.2.

Para el cálculo de las dotaciones medias se dispone de los consumos trimestrales en m³. Con este dato y el número de abonados trimestral se puede calcular la dotación media mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Dotación (l/día)} = \frac{\text{Consumo Trimestral (m}^3\text{)} \cdot 1000}{\text{N}^\circ \text{ Abonados Trimestre}} \cdot \frac{1000}{92} \tag{6.1}$$

En la Figura 6.12 se muestran sendos mapas con las dotaciones medias de cada una de las zonas. En estas gráficas es posible comprobar dos hechos dignos de resaltar. En primer lugar, y como sucede en casi todos los abastecimientos de agua de carácter mayoritariamente doméstico, la dotación correspondiente a los meses de verano (el tercer trimestre) es notablemente superior que la media del año. El segundo hecho destacable es el comportamiento de las zonas más residenciales del abastecimiento, esto es, las zonas periféricas. En ellas se observan crecimientos de la dotación mucho mayores, debidos en gran parte no sólo a un aumento real de la dotación, sino también a un aumento estacional de la población.

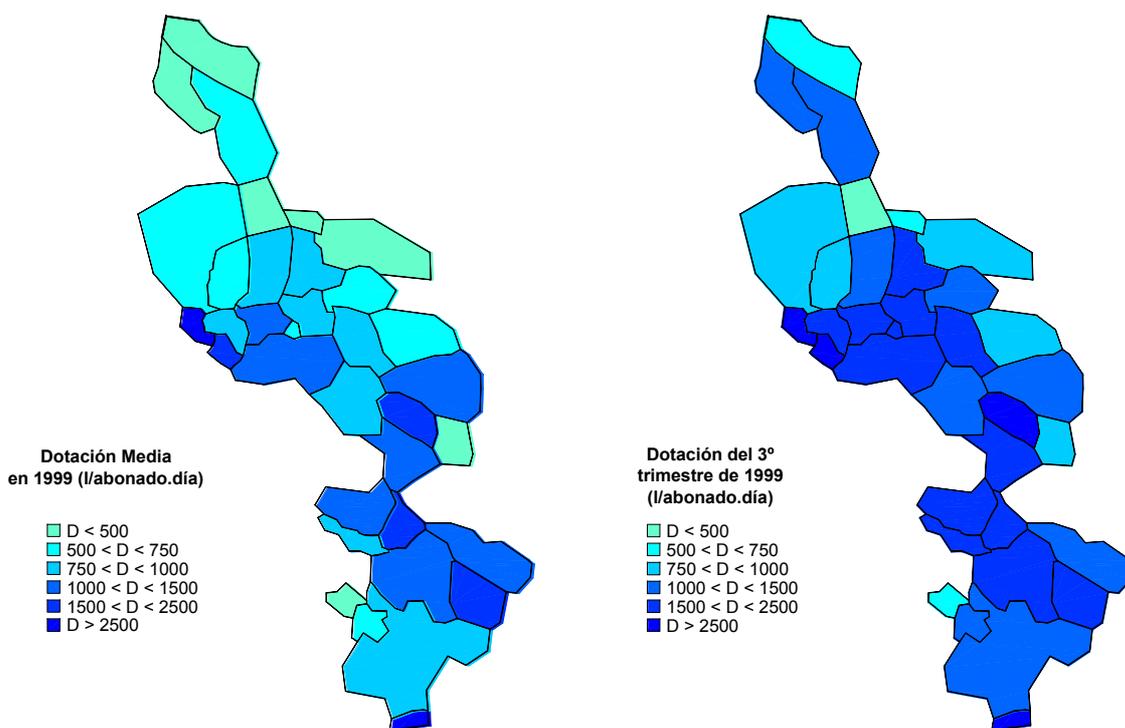


Figura 6.12. Dotaciones registradas por zonas en el año 1999. Izquierda: dotación media anual; derecha: dotación correspondiente al tercer trimestre del año.

5.2.2. Asignación de cargas al modelo.

Con el esqueleto de la red ya definido se ha de proceder a la asignación de cargas al modelo. Una característica del programa AutoCAD Map® es la posibilidad de asociar datos de otro archivo al dibujo que se está realizando. Esto ha permitido asociar datos de consumo a cada una de las tuberías de nuestra red, tal y como se describió en el apartado 5.1. Así, se dispone de una tabla creada en el programa MS Access® y denominada

Datosan donde se recogen los datos de consumo de los abonados a la red de agua de El Plantío y La Cañada. En esta tabla se hallan, entre otros datos, el consumo del agua empleada por trimestre y está vinculada tanto a la ubicación geográfica de los abonados (como ya se ha visto, a través de la parcela que ocupa su vivienda) como a la tubería que los abastece (vínculo que se estableció durante el proceso de esqueletización).

Esta asociación de datos es de gran utilidad ya que permite localizar rápidamente un abonado pues al seleccionar un título de la tabla de datos se encuadra automáticamente en la pantalla la tubería de la que extrae agua permitiendo una rápida visualización. A la inversa, permite también seleccionar una tubería y averiguar quienes son los abonados vinculados a esa tubería. Por ello, en este caso la asignación del caudal medio demandado en la red es tan simple como sumar todos los consumos medios facturados a cada abonado y asignarlos a partes iguales a los extremos de las tuberías que guardan el vínculo.

Una demanda positiva se entiende como una extracción de agua de la red, mientras que una demanda negativa se entiende como un aporte de agua al sistema. Además de dicha demanda o también denominado consumo medio del nudo, para cada uno de los nudos del modelo puede establecerse una *Curva de Modulación*.

Una de las características significativas de la simulación de redes de distribución de agua con programas como SARA o EPANET es la capacidad de asignar diferentes curvas de modulación a cada uno de los nudos que componen la red. Así, como una de las propiedades que puede asignarse a cada uno de los nudos de la red aparece la evolución con el tiempo del coeficiente de modulación.

La curva de modulación de un nudo muestra la evolución con el tiempo del consumo respecto del consumo medio. Los datos necesarios para calcular las curvas de modulación se obtienen a partir de mediciones en la red. En este caso se realizaron medidas de la red durante los meses de Julio y Agosto, detallados en el apartado 5.3. Las medidas fueron tomadas cada 5 minutos, creando posteriormente gráficas que agrupan los datos cada 15, 30 y 60 minutos (ver Figura 6.13). Una vez realizado esto se dispone de datos de mediciones cada 15, 30 y 60 minutos respectivamente durante 34 días consecutivos (duración de las mediciones). Con estos datos se crean dos nuevas columnas de datos obteniendo el valor máximo y mínimo de caudal para el mismo instante del día entre los 34 días que duran las mediciones. A partir de estos valores máximo y mínimo se calcula un valor de caudal medio y una media acotada de este valor. A partir de ello se obtienen gráficas de valores cada 15, 30 y 60 minutos representando comparativamente el caudal medio junto a la media acotada para observar la fiabilidad de los datos (ver Figura 6.14). Finalmente se ha optado por emplear los datos recogidos cada 15 minutos por presentar mayor exactitud que los agrupados cada 30 minutos. A continuación se pueden observar estas gráficas para cada la zona Colinas de San Antonio.

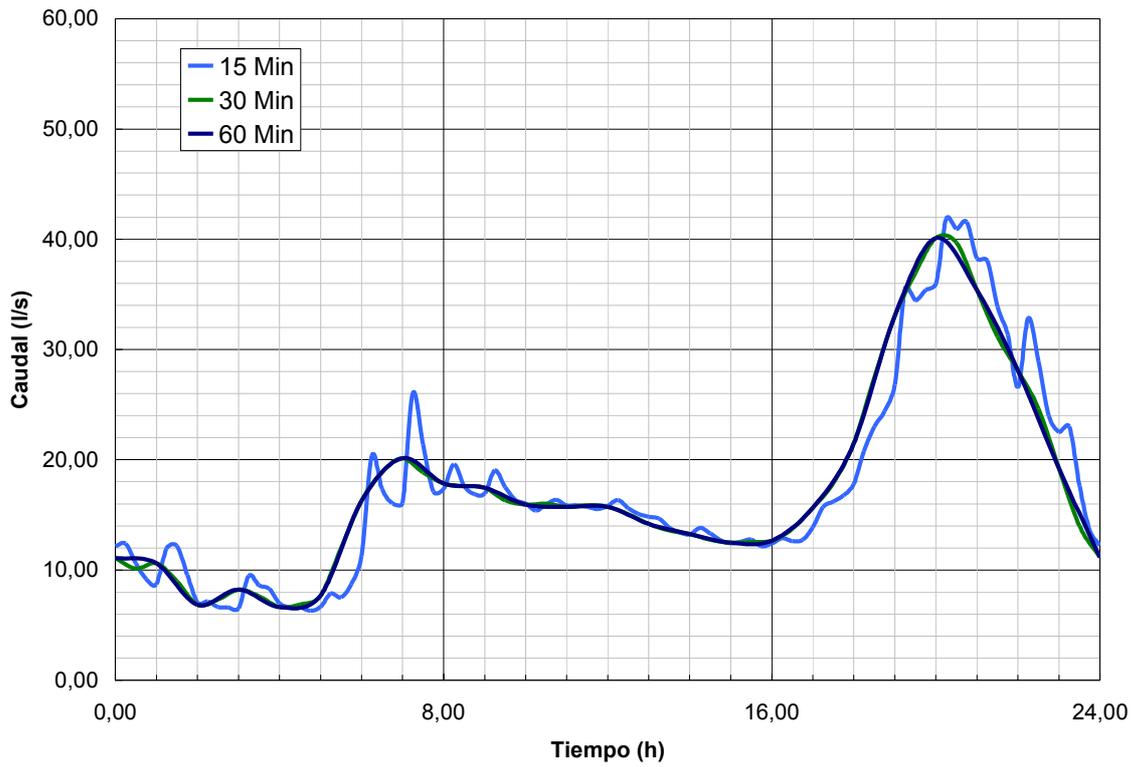


Figura 6.13. Caudal medido en Colinas de San Antonio integrado para distintos intervalos de tiempo (15, 30 y 60 minutos).

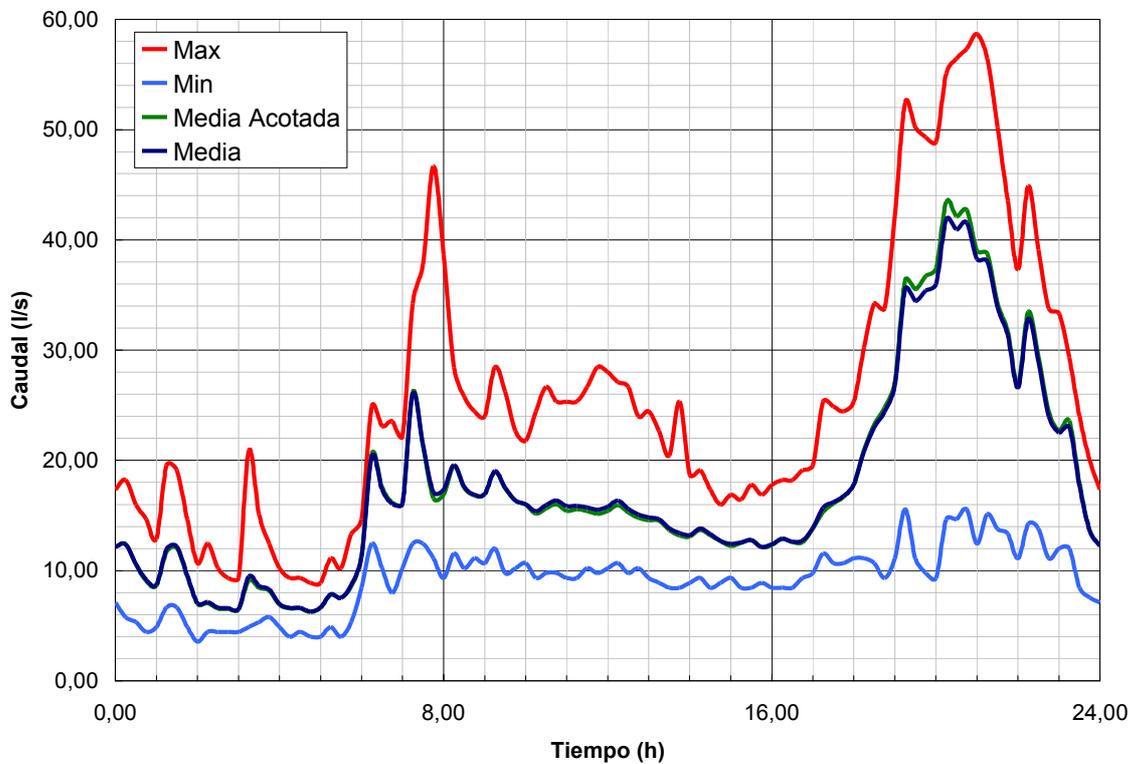


Figura 6.14. Gráfico de caudales en Colinas de San Antonio cada 15 minutos.

Una particularidad de esta red de agua es la existencia de grandes consumidores en algunas zonas. Estos consumidores toman un elevado consumo de manera puntual en algunos trimestres impidiendo obtener una tendencia general del consumo en la zona. Por estos motivos se ha considerado necesario suprimir estos datos de consumo y analizarlos separadamente.

A continuación se muestra un listado de estos grandes consumidores indicando también los meses de excesivo consumo.

Tabla 6.12. Consumidores importantes de la red de El Plantío y La Cañada.

Título	Zona	Período
9902	El Plantío	Años 87/88
4947	La Cañada	2T-99
5965	La Cañada	3T-88
9231	La Cañada	4T-88
9192	Mallaeta	3T-93
9193	Mallaeta	3T-93
9816	Maravisa	4T-99
3502	Pirigall	Todos los años
3915	Pirigall	1T-98
11234	Pirigall	3T-97/4T-97
2885	Pista Ademuz	3T-98
9903	Pla de la Cova	Todos los años
4881	Ragoma	3T-87
4797	Santa Bárbara	Todos los años
10685	Vereda de Bétera	Todos los años
7686	Vereda de Bétera	Todos los años
10566	Pla del Pou	Todos los años

Por último, durante la asignación de cargas se han considerado las pérdidas de agua como un coeficiente constante que mayor el consumo. Dicho coeficiente se ha obtenido a partir del balance entre volumen inyectado en la red y volumen facturado a los abonados de tal forma que en 24 horas el balance quede equilibrado. En la mitad Norte del abastecimiento el rendimiento volumétrico medido ha sido del 70%, mientras que en la mitad Sur dicho rendimiento desciende hasta el 60%. Esta diferencia es debida al hecho de que las conducciones de la mitad Norte son más recientes que las de la mitad Sur.

5.3. Calibración del modelo.

5.3.1. Mediciones en la red

Si el modelo tiene que reproducir el funcionamiento real de la red deberemos conocer cuál es su funcionamiento y la única forma posible de averiguarlo es tomando medidas. En base a éstas se ajustarán los parámetros del modelo para su posterior validación. El modelo simulará el comportamiento de la red. Como resultado de la simulación se obtendrá la presión en los nudos de consumo y los caudales circulantes por las líneas. El modelo será válido si los valores de presión y caudal obtenidos de la simulación presentan pequeñas desviaciones con respecto a los valores medidos. Así pues, son dichas presiones en los nudos y los caudales de línea las magnitudes que han de ser medidos.

El ajuste de la rugosidad, pérdidas localizadas, etc. se hará para que coincidan los valores medidos con los simulados. Las medidas de presión son fáciles de realizar. Sin embargo, es difícil que su ubicación coincida exactamente con un nudo del modelo. Se buscará instalar los manómetros en puntos próximos a algún nudo del modelo, donde exista constancia que la presión no es muy diferente de la de éste.

Las medidas a tomar, bien sean presiones o caudales, deben suponer un conocimiento previo y aproximado del estado de carga del sistema al que se refieren tales medidas. Las lecturas que resulta conveniente realizar se pueden resumir en:

- Aportaciones a la red desde las estaciones de bombeo y depósitos. Se pueden realizar mediante lecturas de contador (si existe), mediante registros de caudal, o si se trata de depósitos, a partir de las fluctuaciones de nivel registradas.
- Presiones en las estaciones de bombeo y altura de los depósitos.
- Control de los grandes consumidores por medio de sus contadores.
- Mediciones de presión y/o caudal en puntos estratégicos de la red. La elección de su emplazamiento y su número están en función del tamaño de la red y es un detalle muy importante para la credibilidad del modelo.

En la red de distribución de la Cooperativa Valenciana El Plantío y La Cañada se realizaron una serie de medidas de presión en diversos puntos. Estas medidas se llevaron a cabo durante los meses estivales en ocho puntos diferentes a lo largo de la red. La Tabla 6.13 muestra los resultados obtenidos de estas mediciones:

Tabla 6.13. Puntos de medida de la presión.

Punto	Localización	p_{\min} (mca)	p_{\max} (mca)	p_{media} (mca)
1	Les Paretetes	18,8	35,5	27
2	Cañada Maquiva	43,4	63,9	54
3	San Lázaro 1 ^(*)	14,6	79,8	47
4	San Lázaro 2 ^(**)	14,3	36,8	26
5	Depeñaperros	52,4	79,2	66
6	La Cañada	16,1	40,7	28
7	San Abdón	10,1	24,8	18

(*) Medidas tomadas delante de la VRP

(**) Medidas tomadas detrás de la VRP

Para la determinación de los puntos de medida se consideran diversos aspectos, como son la facilidad de instalar medidores, la importancia estratégica de las zonas, los niveles de consumos de las mismas, los problemas de suministro a determinadas zonas, etc. Todo ello con el objetivo de conseguir unas medidas fiables y que pongan de relieve las peculiaridades de la red. En cualquier caso hay que cubrir, en la medida de las posibilidades, toda la extensión de la red para así tener definido el nivel de presiones en, prácticamente, la totalidad de la red.

Resulta obvio que cuanto mayor sea el número de medidas, mejor se contrastará el modelo y con mayor grado de confianza, si bien un número excesivo podría resultar contraproducente por quedar enmascaradas las variaciones de las medidas con el error del aparato y las fluctuaciones de consumo instantáneo en las cercanías de esos puntos debidas, por ejemplo, al arranque o parada de grupos hidropresores. Así, un número adecuado de puntos de medida sería hasta un 25% en modelos de 100 nudos, un 15% en modelos de 200 nudos y un 10% en modelos de mayor envergadura, que corresponde a al caso objeto de estudio.

En la Figura 6.15 se muestran sendas representaciones gráficas de la evolución de la presión a ambos lados de la válvula reductora de presión instalada en San Lázaro. En estas gráficas se puede observar variaciones de presión que corresponden a las horas punta y valle de consumo. Así, se observa que las presiones caen para las horas de mayor consumo y aumenta durante las horas valle.

En la gráfica anterior también se detectan instantes en que la variación de la presión parece excesiva. Por ello, una vez recopiladas todas las mediciones, de nuevo conviene realizar un control de calidad de las mismas para excluir los valores extremos que sean difícilmente justificables.

A la hora de aplicar adecuadamente estos datos cabe tener en cuenta que un error en la determinación de la cota de un punto de medida supone, directamente, un error en la presión del nudo. La cota de los puntos debe ser obtenida con gran exactitud, es por ello que se ha realizado una triangulación antes comentada para conocer en cada punto de la

red el valor de la cota. Por ello se instalaron una serie de emisores de impulsos en diversos puntos de la red que abastecen a diferente número de abonados. Este tipo de medidas permitirá entre otras cosas un mayor conocimiento de las pautas de consumo de la red.

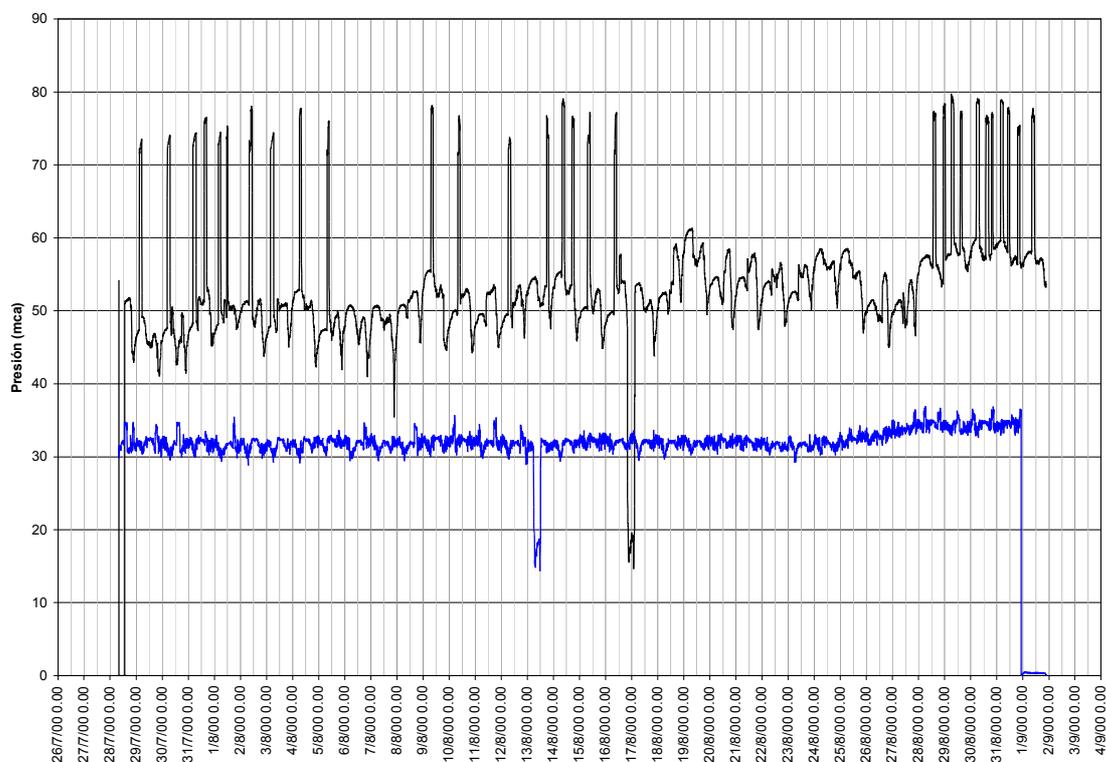


Figura 6.15. Mediciones de presión en la válvula reductora de presión instalada en la urbanización San Lázaro. En color negro la presión aguas arriba de la VRP y en color azul la presión ya reducida.

En lo que se refiere a las medidas de caudal suponen una gran dificultad y elevado costo. Por este motivo usualmente no se toman en cuenta y los modelos se ajustan exclusivamente en base a las medidas de presión. Sin embargo, con la aparición en el mercado de sondas de inserción para medidas de caudal, este problema queda parcialmente solucionado.

Los registradores magnéticos (*data-logger*), permiten almacenar una gran cantidad de medidas que, posteriormente, pueden ser capturadas y tratadas convenientemente por un software específico. Asimismo, pueden trabajar en condiciones más extremas que los registradores gráficos y necesitan menos espacio, dado su pequeño tamaño. Tienen, además, una gran versatilidad. Pueden recibir, según el tipo, señales de tensión, corriente o impulsos. Los hay de uno o varios canales, para almacenar lecturas de varias magnitudes simultáneamente (por ejemplo, presión aguas arriba y aguas debajo de una válvula). También existen en el mercado con sonda de medida de presión incorporada, de manera que no resulta necesario instalar un transductor de presión en el punto de medida.

En este caso también se disponía de medidas de caudal tomadas con un intervalo de 5 minutos a lo largo de 34 días entre los meses de Julio y Agosto. Se estudiaron 6 posibles

ubicaciones, además de los datos proporcionados por la Cooperativa de los caudales inyectados desde el depósito de La Pobra y la Estación de Bombeo de Colinas de San Antonio. De ellas, sólo en cuatro fue posible instalar los emisores de impulsos y los *data-logger*. En la Tabla 6.14 se muestra un resumen de las características principales de estas mediciones. Además, en la Figura 6.16 se muestra un ejemplo de la instalación típica realizada para las mediciones de caudal.

Tabla 6.14. Puntos de medida del caudal.

Punto	Localización	Q nominal (m ³ /h)	D nominal (mm)
1	La Vallesa	300	150
2	Torre En Conill	300	150
3	Camino de Benaguacil	45	50
4	Santa Bárbara	300	150
5	Campo de Golf	Contador averiado	
6	Campo de Tiro		
7	La Pobra	Proporcionados por la Cooperativa	
8	Colinas		



Figura 6.16. Imagen del caudalímetro y el *data-logger* instalados en Santa Bárbara.

5.3.2. Ajuste y calibración del modelo.

Calibrar el modelo es ajustar los resultados de la simulación (presión en nudos de consumo y caudal en líneas) a los valores reales medidos en la red. Previo al proceso de ajuste es necesario obtener una simulación fiable del estado de la red en los instantes en que se realizaron las medidas. Basta simplemente con ejecutar una simulación con el modelo con el programa de simulación y comprobar que la conectividad de los elementos es la correcta y que los resultados son lógicos en un modelo sin ajustar. Si durante la simulación encontramos algún resultado especialmente anormal, localizaremos y corregiremos su causa antes de comenzar a ajustar parámetros.

Para la calibración se ajustarán los parámetros que introduzcan mayor incertidumbre al modelo: rugosidad de las tuberías, pérdidas menores debidas a incrustaciones en las paredes de las tuberías, y demanda en los nudos.

Para el proceso de calibración, es mejor el ajuste basándose en medidas de caudal que de presión. El problema es que existen pocas medidas de caudal en la red. En cualquier caso, en una primera aproximación al proceso de calibración se intentará ajustar los caudales en los puntos donde éstos sean conocidos. Ello asegura cierto grado de fiabilidad en posteriores ajustes.

En el modelo estático se ajustan los parámetros que no van a depender del tiempo: rugosidad y pérdida menor de línea y distribución de demandas (% de la demanda total) en los nudos del modelo.

El proceso de calibración realizado ha pasado por dos fases. En primer lugar se han ajustado las demandas. Una vez estas dan resultados comparables a las medidas de caudal realizadas, se ha procedido a ajustar rugosidades y pérdidas menores.

Durante el proceso de ajuste de las demandas, éstas han sido afectadas por un coeficiente, cociente entre el agua que se inyecta a la red en dicho instante y la demanda total en los nudos, para simular el estado de cargas en la red en el instante de calibración teniendo en cuenta las pérdidas de agua. Además, se ha situado los elementos de regulación en la posición correspondiente a dicho instante. Con estas modificaciones se realizó una simulación y se obtuvieron los resultados de la misma.

A continuación se procedió a la distribución de demandas para que los caudales de línea se distribuyan en la red con arreglo a los valores medidos. En este sentido hay que tener en cuenta que el balance de caudales en la red, o por sectores, se ha de cumplir. Si aumentamos el consumo en un nudo, o zona, de la red debemos disminuirlo, en la misma proporción, en otro nudo, o zona, de consumo de la red. En este sentido, disponer de una clasificación de las facturaciones por zonas ha permitido facilitar este proceso.

Una vez ajustadas las demandas se ajustan las rugosidades de las líneas para que coincidan las presiones medidas. En este caso, se ha preferido ajustar exclusivamente la rugosidad de las conducciones incluyendo en ella el efecto de las pérdidas menores debidas

a los accesorios existentes. Como es prácticamente imposible ajustar línea a línea se ha procedido a modificar la rugosidad por zonas de la red. Es de esperar que si una línea ha visto alterada su rugosidad por sus condiciones de servicio, las líneas adyacentes lo hagan de la misma forma.

Hay que pensar que la distribución de demandas en la red puede variar mucho de los meses estivales a los invernales. En verano las urbanizaciones se llenan de gente. Incluso dentro de la misma zona puede variar de unas zonas con un nivel de vida más alto a otras con niveles más bajos. Por ello, la calibración del modelo es un proceso continuo que debe realizarse a menudo si se desea que el modelo sea permanentemente válido.

5.4. Escenarios simulados.

Una vez se dispone del modelo completamente ajustado se va a realizar el estudio y simulación de dos escenarios posibles. Básicamente, estos escenarios corresponden a otras dos finalidades claramente diferenciadas:

- El primero de ellos, que será el modelo de simulación de la red en su estado actual, utilizará para diagnosticar algunos problemas existentes en la actualidad en la red y estudiar las posibles soluciones a los mismos.
- El otro escenario se utilizará como herramienta de toma de decisiones para poder tener previsto el comportamiento del sistema a medio plazo.

5.4.1. Situación actual.

Se realiza un análisis del sistema actual, indicando los problemas detectados en cuanto a presiones y aquellos puntos que tienen unas carencias de suministro más importante. Este escenario permite servir sólo de punto de partida para el resto de escenarios. En este escenario se incluyen las modificaciones más recientes realizadas al sistema.

El principal problema que se observa es la existencia de zonas donde la presión es insuficiente. Se distinguen principalmente dos zonas que presentan presiones insuficientes que provocan problemas a los abonados. Estas zonas abarcan a la urbanización Montesano y a la zona sur de la urbanización Colinas de San Antonio.

Para la simulación de este escenario se ha seguido el método de asignación de cargas descrito en el apartado 5.2 a partir de los registros de la base de datos de abonados vinculados en el SIG a cada una de las tuberías del modelo. Así, el proceso seguiría la siguiente secuencia. En primer lugar (Figura 6.17) se ha de seleccionar el trimestre que se ha de utilizar para asignar los consumos basados en las facturaciones.

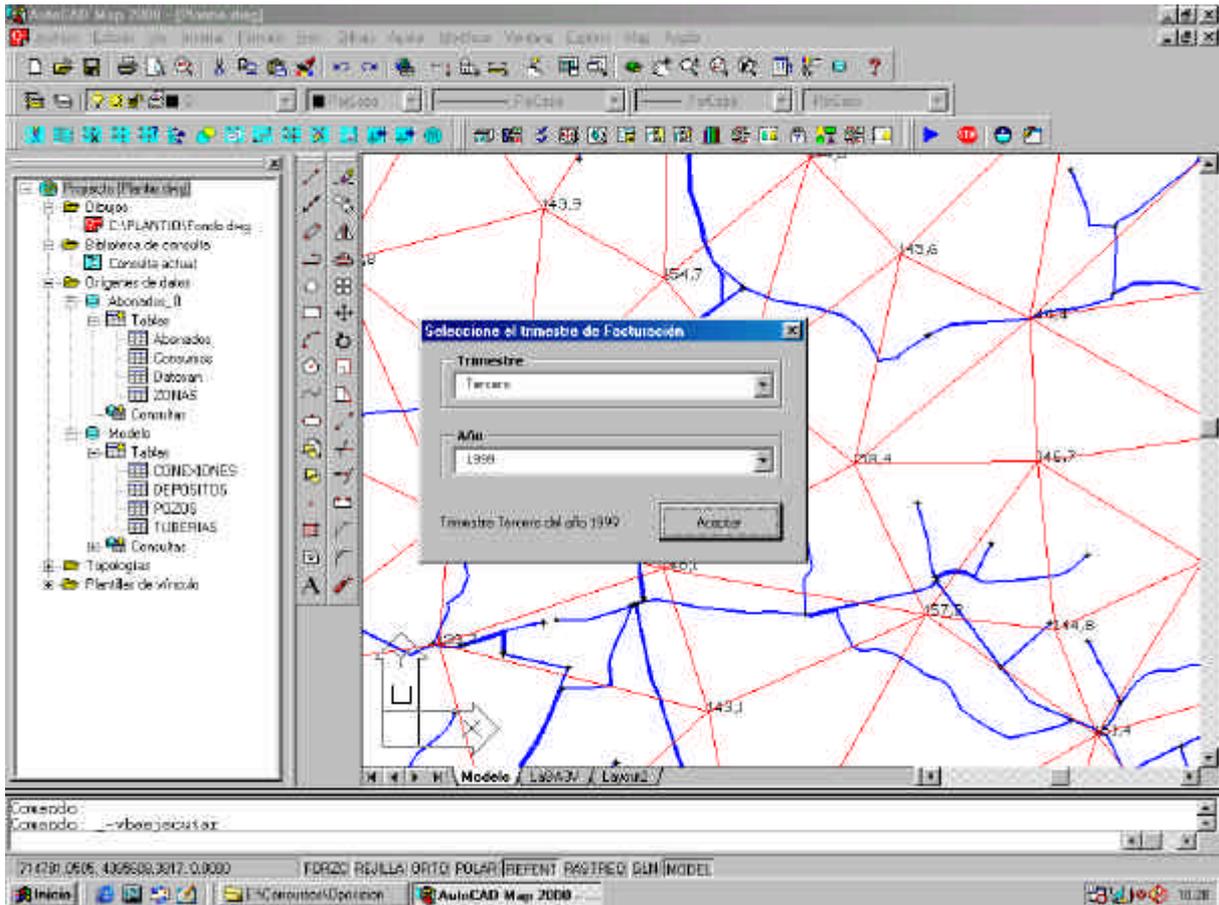


Figura 6.17. Carga del escenario para simular la situación actual: selección del trimestre calculado.

Con el trimestre seleccionado, se accederá a la base de datos que está vinculada a los elementos del modelo, extrayéndose el volumen facturado para cada uno de los nudos. Este proceso ha sido complejo, pues ha de tenerse en cuenta que los abonados aparecen georreferenciados a objetos del tipo línea correspondientes a la tubería de distribución de la cual parte la acometida. Por ello, la operación pasa por acumular primero los caudales en las líneas y después se ha optado por repartir dicho caudal al 50% a cada uno de los nudos extremos de cada línea. El siguiente paso consiste en corregir los caudales asignados a los nudos con el coeficiente que tiene en cuenta el rendimiento volumétrico de la red y por último asignar los consumos de las abonados considerados importantes y que aparecían listados en la Tabla 6.12.

Con los consumos asignados a los nudos, el último paso será el de construir el modelo propiamente dicho. Para ello se creó una aplicación (SIG_EPA) que permite la conexión e intercambio de datos y resultados entre el SIG y las rutinas del *EPANET Programmer's Toolkit* a través de la generación de una estructura de datos similar a la descrita en el capítulo 5 dedicado al modelo de datos de la red.

5.4.2. Estudio de consumos con horizonte en el año 2010.

Se ha realizado como parte del estudio de consumos una previsión del crecimiento en cada una de las zonas, estableciendo unos determinados consumos del sistema en el año 2010. Con dicho escenario se estudia el sistema, viendo la capacidad y respuesta del mismo. Para ello ha sido necesario, en primer lugar, tener un conocimiento del crecimiento de consumo en cada una de las zonas puesto que no se puede suponer un comportamiento uniforme para la totalidad de la red. Una vez calculado el crecimiento para cada zona se han aplicado coeficientes de crecimiento según la ubicación geográfica de cada nudo de consumo gracias a la utilización del SIG. Así se ha obtenido un modelo que se ha exportado al programa SARA para simular conjuntamente el comportamiento global de la red supuesto este crecimiento. Este cálculo permite comprobar la efectividad de la red en los próximos años.

Para la determinación del horizonte de consumo en el año 2010 se ha tenido en cuenta, de una parte, el crecimiento de consumo de los abonados actuales a partir del análisis de las series temporales de consumos históricos. De esta forma se han extraído pautas de crecimiento tanto del número de abonados en zonas ya establecidas como del volumen consumido por cada uno de ellos. El otro factor que ha sido tenido en cuenta ha sido la posibilidad de expansión de la red en zonas donde se está proyectando la recalificación de los usos del suelo. La urbanización de El Golf es un claro ejemplo de este tipo de actuaciones que han de ser tenidas en cuenta para una eficiente planificación del abastecimiento.

Se trata de uno de los casos más importantes que se debe simular pues se prevé un futuro aumento del consumo debido al progresivo aumento en el número de abonados. Esta simulación permitirá a la Cooperativa hacer frente a las futuras situaciones preparando adecuadamente las instalaciones en aquellas zonas donde se considere necesario.

Para simular estos escenarios futuros es necesario calcular un coeficiente de crecimiento de la demanda. Se ha optado por trabajar siguiendo criterios geográficos, agrupando a los abonados en las mismas zonas en que aparecen en la base de datos. Sin embargo, se han excluido de los cálculos los abonados importantes. De esta forma, lo que realmente se ha hecho es calcular el consumo **doméstico** proyectado en el año 2010. Es necesario realizarlo separadamente para cada una de las zonas ya que no se puede establecer una pauta general de aumento de consumo para toda la red.

Este coeficiente de crecimiento se calcula de la siguiente forma:

$$c_{2010} = \frac{N_{2010} \cdot d_{2010}}{N_{1999} \cdot d_{1999}} \quad (6.2)$$

siendo N_{2010} el número de abonados previsto para el año 2010, N_{1999} el número de abonados en 1999, d_{2010} dotación prevista para el 2010 y d_{1999} la dotación calculada en el año 1999.

El estudio de demandas futuras se basa en una predicción de la evolución en el número de abonados a lo largo de los años. Para ello se calcula la *Tasa de Crecimiento* de los abonados mediante la siguiente fórmula:

$$TC_i = \frac{NAbonados_i - NAbonados_{i-1}}{NAbonados_{i-1}} \quad (6.3)$$

siendo i el año que se está estudiando.

Para hacer la predicción de los años sucesivos se ha empleado la siguiente fórmula:

$$NAbonados = NAbonados_{1999} \cdot (1 + TC)^N \quad (6.4)$$

siendo TC la tasa de crecimiento promedio en cada zona entre los años 1986 y 1999, y N el número de años transcurridos desde 1999 hasta el año que se está calculando (en este caso 11 años).

Una vez calculadas las dotaciones previstas para el año 2010 podemos calcular el coeficiente de crecimiento. Para ello es necesario recoger los datos de la dotación en 1999 así como el número de abonados existente en 1999 y el previsto para el 2010. Por último, también se han añadido las posibles ampliaciones de la red utilizando consumos unitarios por unidad de superficie. Estas ampliaciones sólo se consideraron en dos zonas: Cañada Maquiva y Lloma Larga, además de El Golf antes comentado. Todos estos datos y el resultado del cálculo del *Coefficiente de Crecimiento* quedan recogidos en la siguiente tabla.

Tabla 6.15. Coeficientes de crecimiento de la demanda.

Zona	N2010	d2010	N1999	d1999	c2010
Calle Dieciséis	224	640	131	648,2	1,688
Camino de Benaguacil	251	486	88	487,1	2,846
Camino Viejo de Paterna	41	3302	8	3302,4	5,124
Campo de Tiro de Bétera	121	571	26	536,3	4,955
Cañada Maquiva	507	640	52	499,3	12,497
Clocha el Sec	168	603	98	810,5	1,275
Colinas de San Antonio	1266	1265	667	1265,2	1,898
Colonia La Salud	32	365	21	354,2	1,570
Conarda 1	274	996	160	991,8	1,720
Conarda 2	44	460	26	730,4	1,066
Cumbres de San Antonio	213	1937	154	1773,2	1,511
El Cerrado	26	615	11	607,5	2,393
El Golf	68	1100	44	1100,3	1,545
El Periquillo	23	440	9	236,7	4,751
El Plantío	1961	905	841	1153,3	1,830
La Belluga	25	563	18	486,7	1,607

Zona	N2010	d2010	N1999	d1999	c2010
La Cañada	3515	659	1362	868,1	1,959
La Vallesa	218	314	175	319,6	1,224
Les Paretetes	114	280	49	549,6	1,185
Les Peñes	368	1173	129	1107,1	3,023
Lloma Llarga	1300	545	122	364,2	15,946
Mallaeta	77	2581	27	2515	2,927
Maravisa	515	992	148	985,3	3,503
Montecañada	749	1870	356	1590,8	2,473
Montesano	508	1267	330	1122,2	1,738
Pirigall	89	853	58	770,6	1,699
Pista Ademuz	132	1363	38	1364,4	3,470
Pla de la Cova	756	461	197	521,4	3,393
Pla del Pou	82	1682	48	1613,5	1,781
Pol.I. S. Antonio de Benagéber	25	800	20	770,1	1,299
Ragoma	87	2347	46	2469,9	1,797
San Lázaro	1119	637	355	772,8	2,598
Santa Bárbara	37	1452	24	1343,5	1,666
Vereda de Bétera	147	518	57	555,6	2,404
Viveros Villanueva	92	940	60	916,5	1,573

Consumo medio total para el año 1999	6013,3 m ³ /día
Consumo medio total para el año 2010	13310,6 m ³ /día

Estos valores corresponden a los caudales medios consumidos. Sin embargo, aplicando los coeficientes adecuados para tener en cuenta las pérdidas de agua y la distribución temporal de los caudales, se obtiene que para situaciones punta el caudal se llega a multiplicar por un coeficiente de 2,5, obteniéndose los siguientes valores:

Consumo punta para el año 1999	15032 m ³ /día
Consumo punta para el año 2010	33250 m ³ /día

La Figura 6.18 recoge una comparación entre el volumen total facturado en 1999 y la previsión de volumen total proyectado para el año 2010. Este último es el que se ha utilizado como base para la asignación de cargas en este escenario.

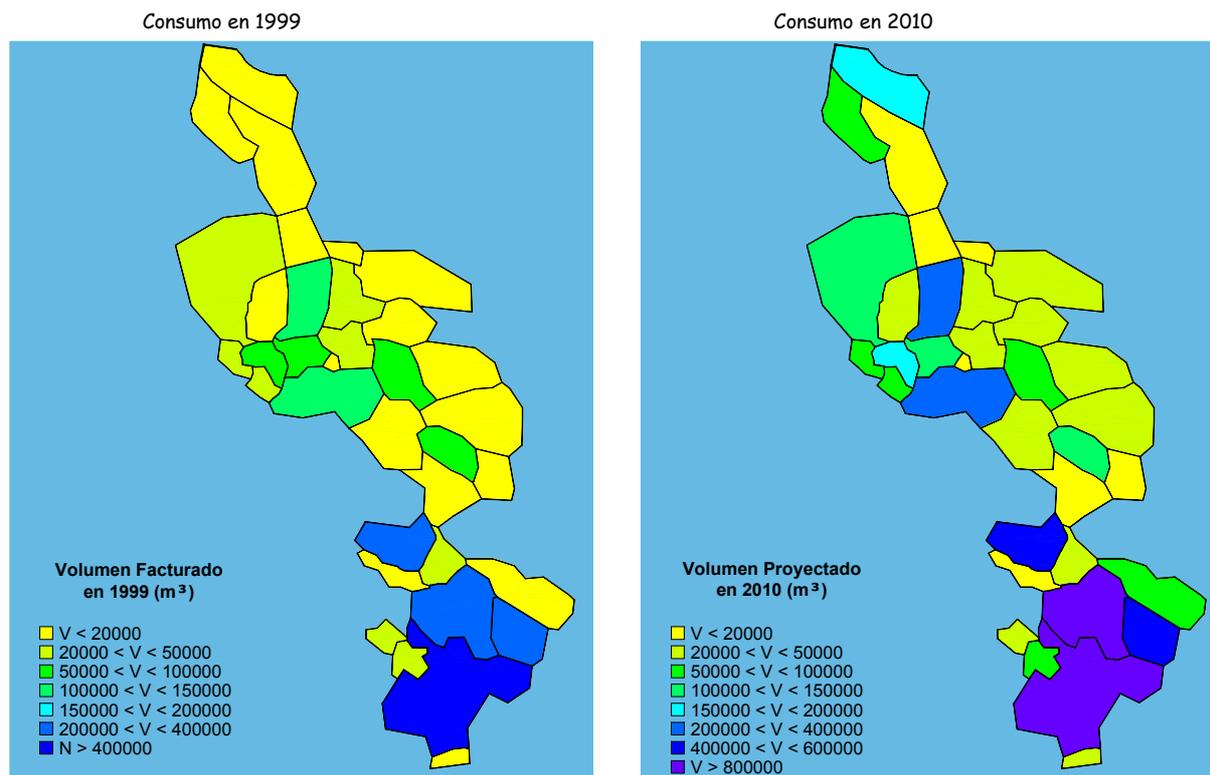


Figura 6.18. Comparación entre los consumos facturados por zonas en 1999 y los proyectados para el año 2010.

6. Resultados de las simulaciones realizadas.

6.1. Cálculos y resultados.

Como parte del estudio realizado se realizaron los cálculos correspondientes a los escenarios antes descritos. La creación del modelo de una red de distribución supone una herramienta muy útil a la hora tanto de diagnosticar el estado actual de la red como de estudiar escenarios futuros. Esta herramienta ha permitido simular situaciones previstas para saber en todo momento si la capacidad de nuestra red será suficiente.

Para obtener resultados efectivos se debe estar en constante actualización del modelo, es decir, cualquier modificación que se realice en la red debe realizarse también en el modelo. Esto permitirá siempre disponer de una herramienta de consulta ante futuras situaciones que se presenten.

A continuación, y a modo ilustrativo, se muestran los resultados obtenidos tras la simulación de ambas situaciones así como las decisiones tomadas a partir de dichos resultados y la verificación de la bondad de dichas soluciones como paso final del proceso de apoyo a la toma de decisiones. Para la representación de los resultados se ha optado por utilizar las facilidades de presentación del programa SARA, si bien estos mismos

resultados han sido almacenados en el SIG en la base de datos MODELO creada a tal efecto y descrita en el apartado 4.1.

6.2. Escenario Actual.

Se trata del primer escenario a analizar para poder encontrar los problemas que presenta en la actualidad esta red. Este escenario será el punto de partida para las simulaciones posteriores. Se observan puntos de bajas presiones especialmente en Montesano y la zona sur de Colinas de San Antonio.

6.2.1. Montesano

Los resultados del cálculo, con su correspondiente código de colores, se muestran en la Figura 6.19. Esta zona como se ha podido observar presenta nudos con presiones negativas. A este problema se une el hecho de que existen dos tuberías de Fibrocemento de $\varnothing 250$ mm situadas en un terreno privado, lo que dificulta enormemente el acceso a las mismas.

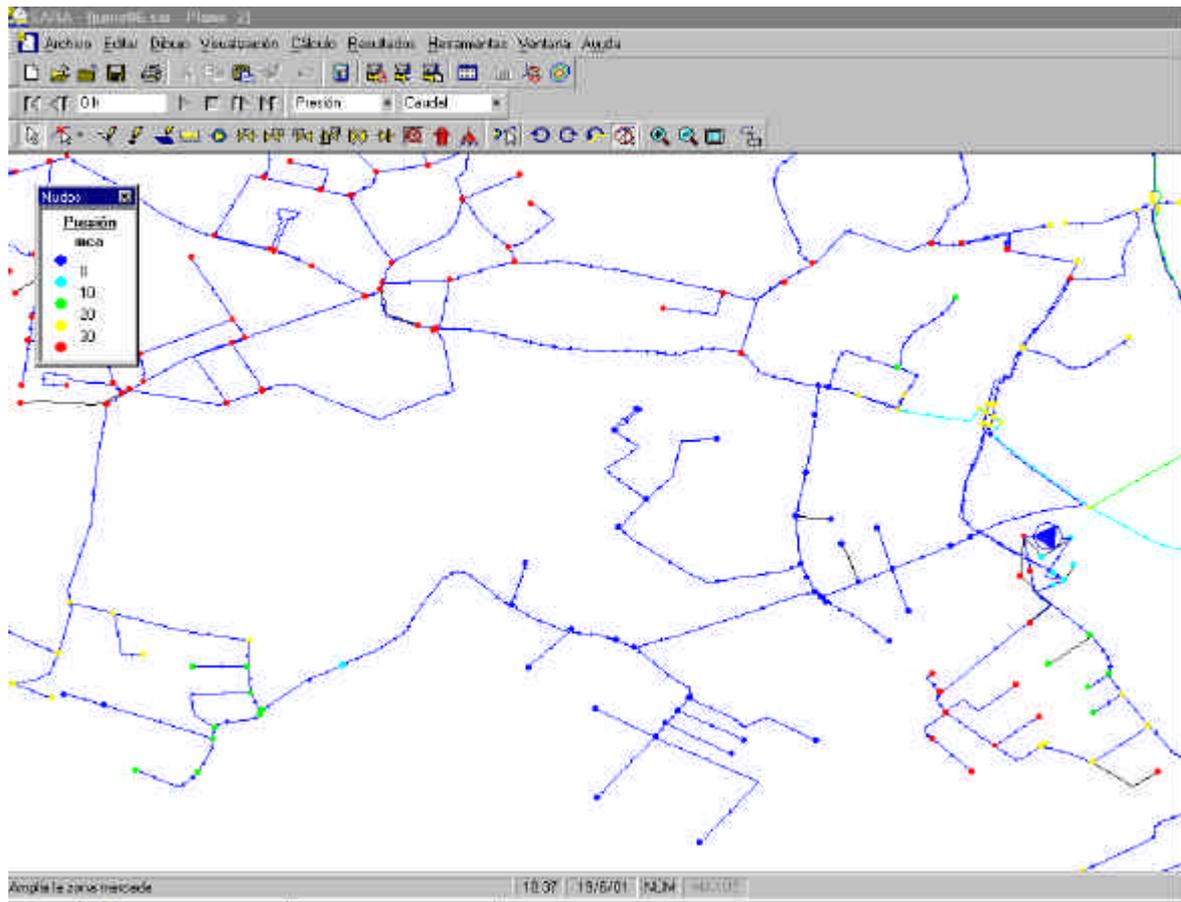


Figura 6.19. Resultados de la simulación correspondiente a la situación actual de la red. Urbanización Montesano.

Para evitar el problema de presiones se propone una modificación en las tuberías de $\varnothing 250$ mm. Mediante esta solución se eliminan los tramos de tuberías enterrados en

terrenos privados eliminando a su vez este problema añadido. La solución propuesta consiste en un nuevo trazado para las tuberías de $\varnothing 250$ mm (tubería de color verde en la Figura 6.20) de manera que ambas procedan del pozo de San Abdón y San Senén. Una de ellas saldrá directamente del pozo para unirse a la tubería principal de $\varnothing 400$ mm y así conseguir una mezcla que reduzca la concentración de nitratos. La otra tubería tendrá una conexión a la tubería de $\varnothing 150$ mm para abastecer a la urbanización Montesano y por el otro extremo se unirá a la tubería de $\varnothing 100$ mm de Fibrocemento para seguir hacia la derecha hasta unirse a otra de las conducciones principales de $\varnothing 350$ mm.

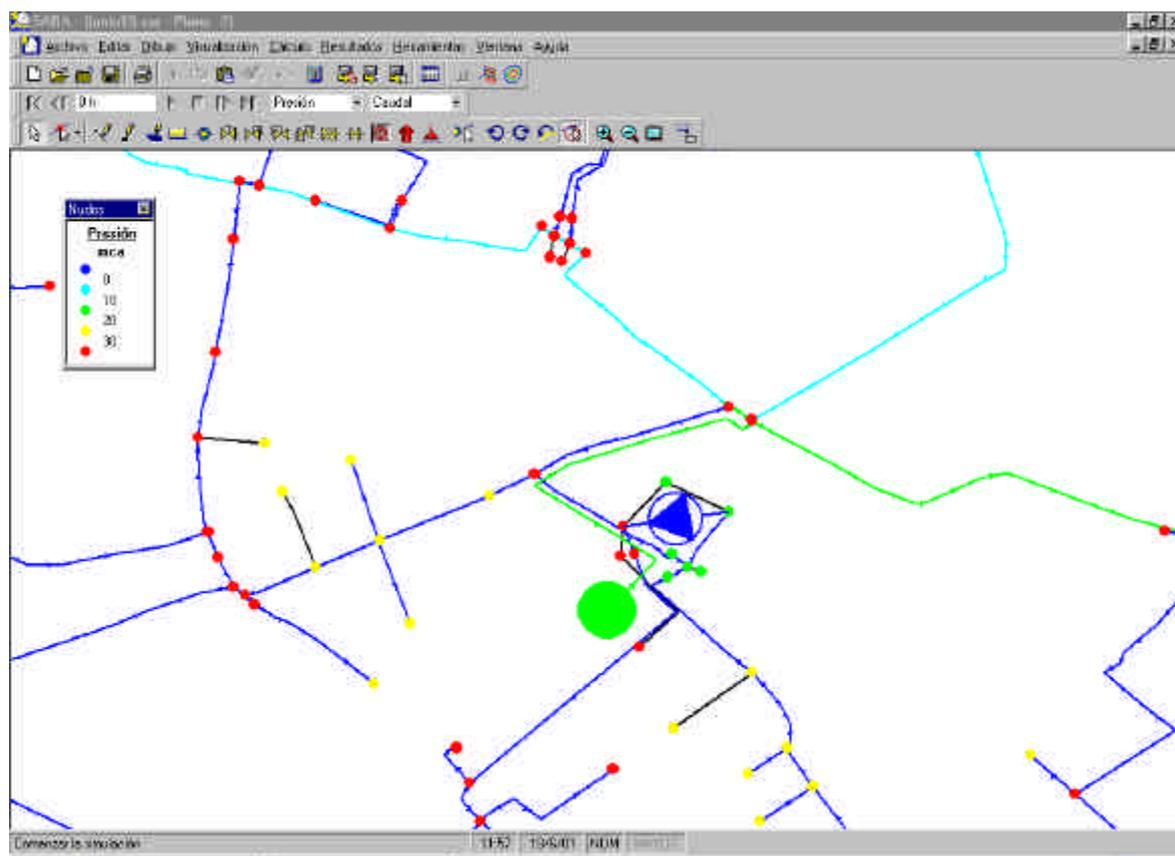


Figura 6.20. Simulación tras la modificación de la red para incluir las soluciones propuestas en el entorno de la urbanización Montesano.

Aplicando esta solución se observa una clara mejoría en las presiones conseguidas, se obtienen valores por encima de los 30 mca en zonas donde se obtenían valores negativos de presión.

6.2.2. Zona Sur Colinas de San Antonio

En esta zona existe un ramal que presenta tras los cálculos realizados presiones negativas (parte inferior de la Figura 6.21). Se ha comprobado que este ramal contiene aproximadamente unos 30 abonados que no disponen de suficiente presión.

El agua llega desde el depósito de El Plantío a pesar de que esta zona se encuentra mucho más cerca del depósito de Colinas. Se observan además elevadas pérdidas en las

tuberías ya que toda el agua que llega para abastecer a esta zona debe hacerlo a través de una tubería de $\varnothing 63$ mm de polietileno, diámetro claramente insuficiente.

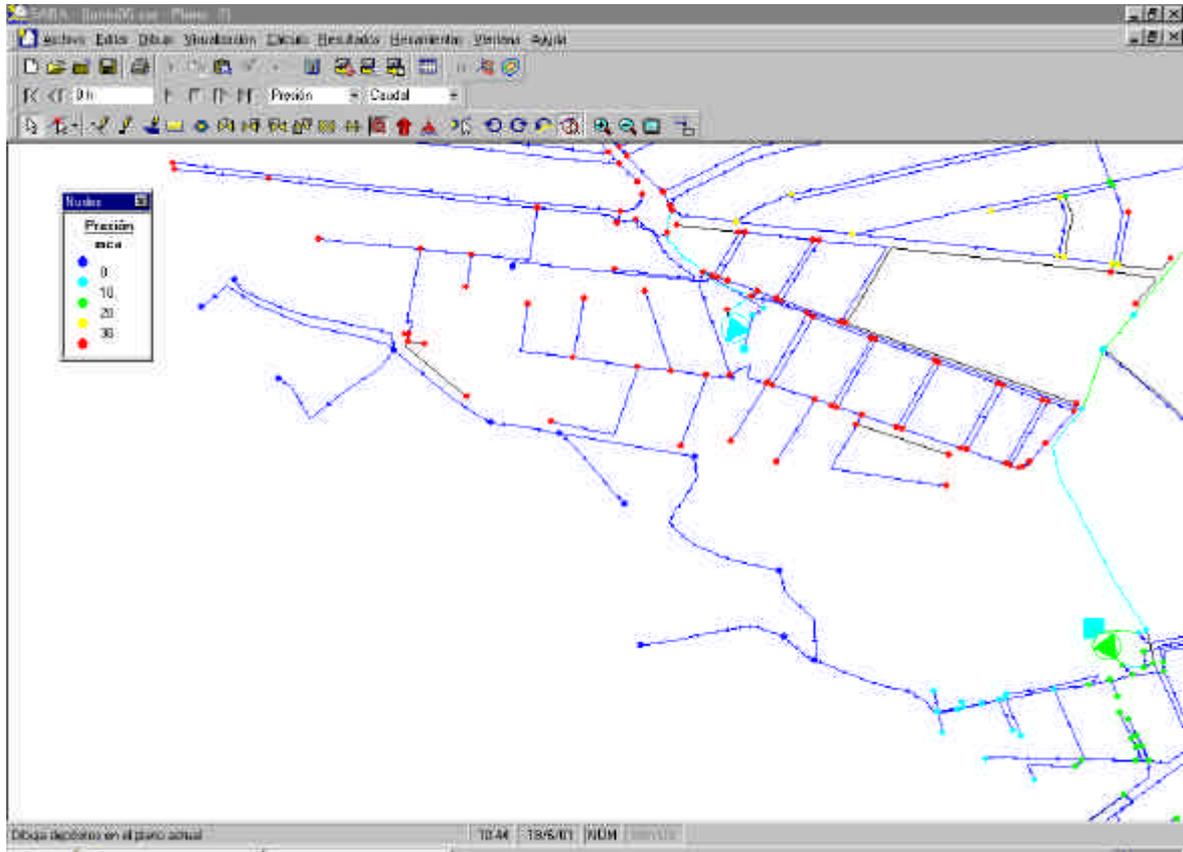


Figura 6.21. Resultados de la simulación correspondiente a la situación actual de la red. Urbanización Colinas de San Antonio.

Para mejorar la situación de esta zona se deben realizar conexiones a la urbanización Colinas de San Antonio debido a su proximidad y a la existencia de presión suficiente en esta zona.

Se propusieron dos posibles conexiones. Por una parte, una conexión de unos 100 metros de tubería de $\varnothing 75$ de PVC que uniría uno de los extremos de la zona con poca presión con el resto de la urbanización. La otra conexión consistirá en añadir un tramo de menos de 50 metros de tubería de $\varnothing 110$ de PVC que facilite la llegada de agua procedente del propio depósito de Colinas.

Como era de esperar, tras estas dos conexiones el nivel de presiones en la urbanización se iguala bastante desapareciendo los problemas antes comentados. En la Figura 6.22 aparecen las conexiones propuestas como solución uniendo los nudos representados con un mayor tamaño. En la misma figura se puede observar la evidente mejoría en la presión de los abonados de la parte sur de la urbanización.

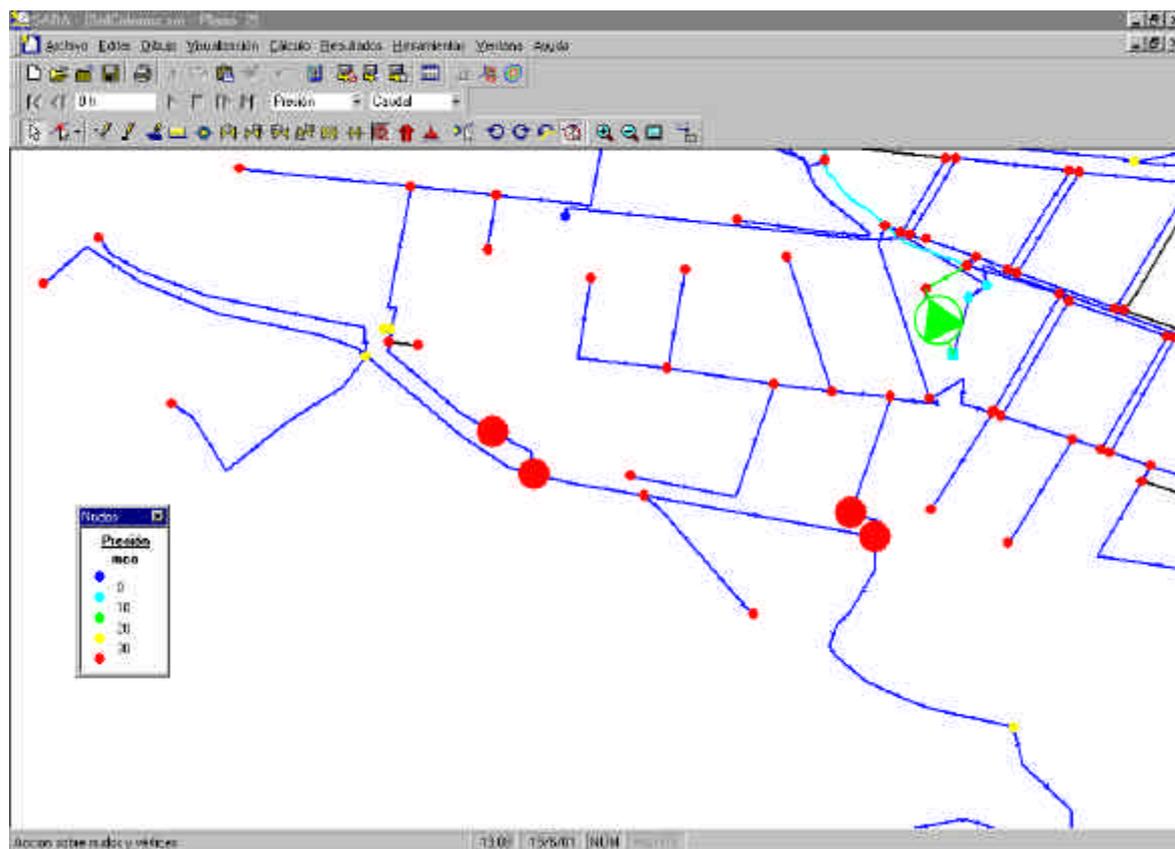


Figura 6.22. Simulación tras la modificación de la red para incluir las soluciones propuestas en el entorno de la urbanización Colinas de San Antonio.

6.3. Horizonte año 2010.

Para el cálculo de la situación de la red en el año 2010 se han tenido en cuenta las dos situaciones antes comentadas: crecimiento de la población y recalificación de terrenos. A continuación se comentan los pasos seguidos para obtener la proyección de consumos.

En primer lugar, se ha contemplado la posibilidad de conexión del sistema El Golf. Se trata de una zona actualmente en construcción donde se prevé la conexión de aproximadamente 1000 chalets. En este caso se debe calcular el efecto que tendrá este aumento en el consumo. La principal dificultad se deriva del hecho de no poder extrapolar los consumos, al no existir registros anteriores.

Por ello, será necesario estimar en primer lugar cuál será el caudal demandado por esta urbanización. Esta estimación se calculará dividiendo el caudal total consumido en la red entre el número total de abonados, así sabemos el caudal medio consumido por cada abonado. Multiplicando por 1000 esta cantidad obtendremos el consumo previsto para esta urbanización. Esta dotación se ha estimado, para el año 1999, en 1045 litros por abonado y día. Para esta estimación se han empleado los datos correspondientes al año 1999, ya que es el año más reciente del que se disponen datos.

Una vez se ha contemplado este aumento excepcional del consumo en la zona de El Golf, se ha procedido con el estudio de consumos con horizonte en el año 2010. En este caso, se han utilizado los coeficientes de crecimiento especificados en la Tabla 6.15. Tras el cálculo, se han presentado algunos problemas posibles a medio plazo.

Para la simulación de este escenario se han contemplado dos mejoras en la red. La primera consiste en la puesta en marcha del pozo de San Abdón y San Senén. La segunda afecta a la estación de bombeo situada en el depósito de La Conarda. En la actualidad existen instaladas cuatro bombas que no aportan suficiente presión a los abonados. Por tanto, la solución propuesta consiste en una ampliación de dicho grupo de presión. Esta ampliación implica la instalación de dos bombas más, disponiendo así de un grupo de presión formado por seis bombas. La capacidad de producción de agua en la actualidad (considerando la puesta en marcha del pozo de San Abdón y San Senén) es de 20664 m³/día, repartidos tal y como se indica en la Tabla 6.16.

Tabla 6.16. Capacidad actual de producción de agua.

Pozo	Capacidad (m³/día)
Pobla	10800
Abdón y Senen (*)	2304
Ricós	1224
Pla-1	2016
Río	2592
Despeñaperros	1728
TOTAL	20664

(*) Pozo con problemas de nitratos pero que podría entrar en funcionamiento.

Como se puede observar en los resultados presentados en la Figura 6.23 a), el consumo medio previsto para el año 2010 puede ser abastecido con la situación actual sin demasiados problemas. Tan sólo algunos puntos de la urbanización Montesano presentan presiones inferiores a los 20 metros de columna de agua, aunque siempre superiores a los 10 mca.

Así pues, para una situación de consumo medio la totalidad de los pozos (tanto los que están en funcionamiento en la actualidad como los que podrían estarlo si se efectúa una adecuada gestión de la carga de nitratos que poseen) aportan 20664 m³/día y la cantidad demandada es de 13310 m³/día, sin presentar problemas serios de abastecimiento de agua.

Por el contrario, la situación prevista para los caudales punta el año 2010 conlleva problemas de abastecimiento. En la Figura 6.23 b) se muestran los resultados de presiones

para este segundo caso. La situación cambia para el estado de consumo punta con respecto a los caudales medios. En este caso, la cantidad demandada llega hasta los 33250 m³/día, y por tanto la capacidad de producción es insuficiente para garantizar el abastecimiento. Observando los resultados, se observan puntos con presiones incluso inferiores a -1 mca. Estos resultados resulta obvio que son incorrectos y por tanto se han de interpretar. En estas zonas (básicamente Montesano de nuevo) lo que sucedería en realidad es que la red sería incapaz de satisfacer la demanda prevista.

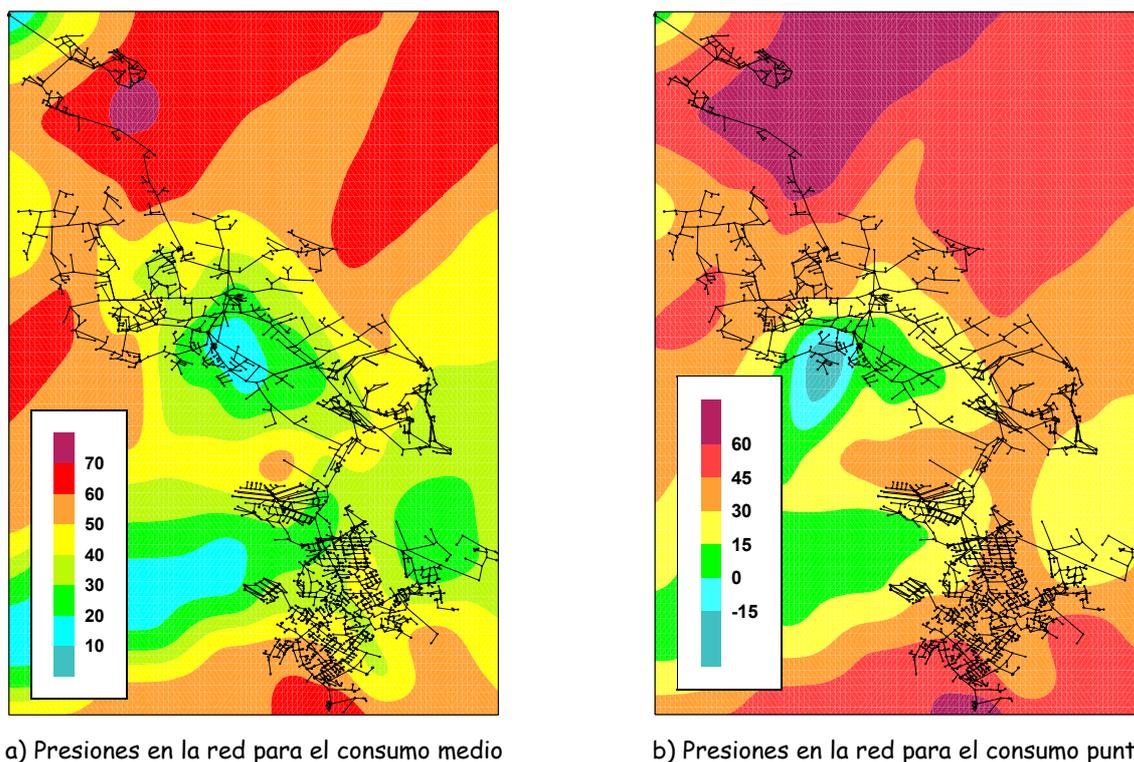


Figura 6.23. Resultados de las presiones (expresadas en mca) en la red de El Plantío y La Cañada para los caudales proyectados en el año 2010.

Las posibles soluciones para evitar estos problemas se encuentran en el estudio de nuevos puntos de extracción de agua. Los puntos propuestos son los siguientes:

- Conseguir un convenio con la entidad metropolitana correspondiente para poder extraer hasta 1 Hm³ (2740 m³/día) de agua de la tubería que llega al depósito de Montecañada. Este convenio, por tratarse de una acción política no afectaría al presupuesto.
- Realizar una segunda perforación en el pozo de La Pobra con lo que se conseguiría extraer 12000 m³/día más. Desde esta segunda perforación se debería instalar una tubería de Ø350 mm de fibrocemento desde la propia perforación hasta el depósito de La Conarda, tratándose de 6800 metros de tubería.

La capacidad conjunta de estos dos puntos es de 14740 m³/día que junto a los 20664 m³/día que aporta el sistema en la actualidad se consigue un total de 35404 m³/día

que es prácticamente la cantidad mínima necesaria para abastecer al sistema en situación de consumo punta.

Por último cabe destacar que si bien se tiene una estimación de un crecimiento en el consumo, no se conoce realmente el modo concreto en que va a hacerse. Esto implica que en un futuro puede ser necesaria la ampliación de algunos diámetros de tubería que no pueden ser proyectados en estos momentos por desconocimiento del modo de crecimiento de la red.

6.4. Resumen de resultados

De los resultados correspondientes al estado actual de la red se ha comprobado que la puesta en marcha del pozo de San Abdón y San Senén evita la inyección de caudales ajenos a la Cooperativa. Cabe destacar que para la situación punta la capacidad conjunta de todos los pozos también es suficiente aunque no excesiva.

Sin embargo, uno de los problemas detectados es la falta de presión en dos zonas localizadas. Estas zonas son Montesano y la parte Sur de Colinas de San Antonio. Las soluciones propuestas consisten en realizar una serie de modificaciones en el estado actual de las conexiones de las tuberías, para el primero de los casos, y en realizar nuevas conexiones para el caso de Colinas de San Antonio. Con estas modificaciones se consigue aumentar notablemente la presión llegando a obtener valores entre los 20 y 30 mca.

Una mejora propuesta para aumentar la productividad del sistema es la puesta en marcha del pozo de Abdón y Senén. Este pozo en la actualidad se encuentra en desuso debido a la elevada concentración de nitratos que presenta. Sin embargo, este aspecto puede ser solucionado mediante mezclas de esta agua con agua procedente de un pozo libre de nitratos.

La creación del modelo de una red de distribución utilizando la información codificada en el SIG también ha demostrado ser una herramienta muy útil a la hora de estudiar escenarios futuros. Esta herramienta nos ha permitido simular situaciones previstas para saber en todo momento si la capacidad de nuestra red será suficiente.

En este caso se han simulado dos casos diferentes para comprobar la capacidad de la red. Ambos casos se han superpuesto para ver el efecto conjunto, pero también se podían haber estudiado por separado con el fin de proponer soluciones individuales a los problemas aparecidos.

El primero de los casos ha consistido en la conexión del sistema El Golf. En esta zona se prevé la construcción inmediata de aproximadamente 1000 chalets. La utilización del modelo ha permitido comprobar cómo afecta la conexión de estos abonados en los valores de presión conseguidos.

Además, se ha realizado una simulación del escenario prevista para el año 2010, observándose una red claramente deficitaria de agua para el caso de consumo punta. Se

plantean dos acciones a emprender para conseguir la cantidad necesaria de agua para abastecer completamente la red en la situación más desfavorable. La primera de ellas consiste en la realización de una segunda perforación en el pozo de La Pobla obteniéndose diariamente una aportación de 12000 m³. La segunda acción a emprender se trata de la creación de un convenio entre la Cooperativa Valenciana El Plantío y La Cañada y la entidad metropolitana correspondiente que permita a la primera la extracción de 1 Hm³ diario de agua.

Además de todas estas mejoras se insiste en que debe considerarse la posibilidad de futuras ampliaciones en los diámetros de la red por cuanto no se conoce exactamente el modo de crecimiento de la demanda, disponiendo simplemente de una estimación global de capacidades tanto de la red como de futuras demandas.

7. Conclusiones.

En el presente capítulo se ha presenta un estudio realizado sobre la red de distribución de agua potable de la Cooperativa Valenciana de El Plantío y La Cañada. Este estudio se adapta bastante bien a la propuesta de utilización de los Sistemas de Información Geográfica como herramientas de apoyo a la toma de decisiones en la gestión de abastecimientos urbanos de agua potable.

En el desarrollo del capítulo se ha optado por potenciar la descripción del tratamiento que se ha hecho de los datos de partida, por cuanto la base del éxito de un proyecto SIG en cualquier ámbito radica en una acertada organización y depuración de los datos que se han de referenciar. De esta forma, el estudio es un buen ejemplo de las dificultades que habitualmente surgirán durante el proceso de implantación de un proyecto SIG y que corroboran la justificación y la necesidad de desarrollar una metodología para el desarrollo de este tipo de proyectos.

El capítulo se ha iniciado con una descripción de la problemática que ha originado la necesidad de este proyecto. En ella se observan todos los elementos que se enunciaron en el capítulo 1 como justificación de esta tesis. Entre ellos destacan el desequilibrio creciente entre el aumento de la demanda de agua y la disminución de la oferta de la misma o la poca calidad de los datos disponibles en el abastecimiento y que se refieren a las infraestructuras del mismo.

Se ha continuado con una breve descripción del sistema de tal forma que el lector quede familiarizado con el sistema objeto de estudio. Esta descripción no se ha limitado simplemente a la ubicación geográfica de las instalaciones más importantes, sino también a la operación en régimen normal del propio abastecimiento, así como las peculiaridades del mismo.

En el tercer apartado del capítulo se ha desarrollado todo el trabajo realizado para la implantación del Sistema de Información Geográfica. Entre estos trabajos hay que resaltar

la elaboración de un protocolo de digitalización y tratamiento de la información previa disponible en el que ya se ha tenido en cuenta el uso futuro que se hará de esta información. Quizás ésta es una de las aportaciones más relevantes realizadas a este estudio, pues es habitual iniciar la digitalización siguiendo criterios de gestión de la base de datos exclusivamente, mientras que en este caso se ha tenido en cuenta que esos datos han de servir para generar el modelo matemático de la red de una forma automatizada desde el propio SIG. De hecho, la estructura de la base de datos donde se acumulan la información relativa al modelo fue creada de forma previa a la creación del propio modelo.

Uno de los resultados más importantes que se lograron con el estudio ha consistido en disponer en un sistema de gestión de las infraestructuras que permite conocer los datos de cualquier elemento de la red a través de consultas tanto alfanuméricas como espaciales. Este logro es especialmente importante en una red con la extensión de la de la Cooperativa y que abarca abonados de cuatro términos municipales distintos y 35 urbanizaciones claramente diferenciadas.

Por último, se ha completado el estudio con una descripción somera del proceso de calibración seguido, los escenarios simulados, los resultados obtenidos y las soluciones propuestas. Puesto que la Tesis versa sobre la utilización de los SIG en la gestión técnica de los abastecimientos, se ha preferido incidir más sobre la organización de los datos y la relación entre el SIG y el programa de simulación que en el funcionamiento y los resultados aportados por este último.

En resumen, si bien no recoge la totalidad de las propuestas presentadas en la Tesis, sí constituye un buen ejemplo de lo que se puede conseguir con una adecuada implantación de un SIG en un abastecimiento de pequeño tamaño.

Capítulo 7.

Conclusiones y Desarrollos Futuros

1. Introducción.

La principal conclusión que se puede extraer de esta Tesis es que se ha realizado un trabajo que facilitará la toma de decisiones relativas a la gestión técnica de los abastecimientos, basando estas decisiones en los resultados proporcionados por un modelo matemático obtenido a partir de los datos incluidos en un sistema de información geográfica. Para ello ha sido necesario solventar una serie de aspectos que se han ido desarrollando a lo largo de los distintos capítulos.

Entre los principales trabajos realizados, destacan la definición de una estructura de base de datos que recoge la totalidad de los datos necesarios para la elaboración del modelo matemático de una red de abastecimiento de agua potable, la integración de esta información con la cartografía de base y la elaboración de un modelo digital del terreno (MDT). Esto en cuanto a la función del sistema de información geográfica.

Por otra parte, se ha descrito un método para la modelación de la red a partir de los datos de la misma disponibles en el SIG. La creación de este modelo es lo suficientemente flexible como para permitir adaptarlo a la necesidad para la cual se ha creado. Por ello, en función del uso que se vaya a hacer del modelo y el nivel de detalle necesario en éste, el SIG incorporará una serie de rutinas de simplificación de la red. De la misma forma que el nivel de detalle del modelo depende del uso que se va a hacer de él, la asignación de cargas o consumos al modelo también debe hacerse según el uso que se vaya a hacer del modelo. Por ello se han contemplado dos criterios de asignación: uno dependiente del nivel de detalle del modelo y otro dependiente de la disponibilidad de datos de facturación.

Junto a todo esto y respondiendo a una demanda creciente en la sociedad de la información como es la posibilidad del intercambio de información entre distintos soportes e incluso entre distintas empresas, se ha tenido en cuenta la posibilidad de compartir la información integrada en el SIG. Para ello, se ha elaborado un modelo de datos compatible con los estándares proporcionados por el *Open GIS Consortium* que permitirá implantar todo lo desarrollado en cualquier sistema, independientemente de la plataforma elegida.

Por último, a modo de recapitulación, se ha completado el trabajo realizado con una aplicación práctica de todo lo expuesto a una red real. En este caso ha sido la red de abastecimiento gestionada por la Cooperativa Valenciana de El Plantío y La Cañada.

A continuación se recogen las aportaciones originales de la Tesis. Algunas de estas aportaciones tienen un carácter general que las hacen válidas para cualquier aplicación de

los SIG. Junto a éstas se recogen también las aportaciones específicas, mas relacionadas con la gestión de los abastecimientos de agua potable.

A pesar del trabajo realizado, han quedado algunos frentes abiertos, en los cuales es posible continuar el trabajo iniciado aquí. Por ello, no se ha querido dar por terminada la memoria sin presentar algunos de estos frentes y proponer algunos de los trabajos que se han de acometer en el futuro.

Como comentan Ejeta y Mays (2002), la aparición de los SIG en los abastecimientos de agua y su integración con los modelos de simulación es un gran paso para la gestión de estos últimos, pero aún quedan muchas cosas por hacer en esta campo.

2. Principales aportaciones de la Tesis.

Durante el desarrollo de la Tesis se han debido solucionar una serie de problemas para concluir el trabajo propuesto inicialmente y cumplir los objetivos expuestos en el Capítulo 1. La solución de estos problemas ha supuesto en muchas ocasiones la utilización de algoritmos, técnicas y métodos que constituyen una aportación en el campo de la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica a la gestión de las redes de distribución de agua potable.

Estas aportaciones se han clasificado en dos grandes grupos. Por una parte se agrupan las aportaciones generales que son de aplicación en cualquier uso de los SIG. Estas aportaciones afectan en este caso a la generación, almacenamiento y utilización de los modelos digitales del terreno.

Por otra parte, estarían la aportaciones específicas de la utilización de los SIG en las redes de distribución de agua. Estas son sin duda más numerosas y van desde la propia organización de los datos hasta la elaboración del esqueleto del modelo matemático o la asignación de cargas al mismo. A continuación se describen con mayor detalle las aportaciones realizadas.

2.1. Aportaciones generales en el campo de los Sistemas de Información Geográfica.

2.1.1. Elaboración de un Modelo Digital del Terreno (MDT)

Se ha realizado un repaso de los principales métodos de almacenamiento de los modelos digitales del terreno (MDT), así como de algunos métodos para su construcción. De entre todos los métodos de almacenamiento de los MDT se ha optado por la red de triángulos irregulares, al disponer en todos los casos estudiados de un conjunto de puntos irregularmente distribuidos y ésta es la estructura que mejor se adapta a estos datos de partida. Para ello, se ha implantado un algoritmo de generación del MDT basado en un método propuesto por Watson para la obtención de la triangulación de Delaunay a partir de una conjunto disperso e irregular de puntos.

Durante la programación de dicho algoritmo se han incluido algunas mejoras que permiten una mejora en la rapidez de cálculo. Entre estas mejoras destacan la ordenación de los puntos a insertar según una de sus coordenadas. La mejora implica un ahorro en el tiempo de cálculo en las dos fases. Por una parte, durante el propio proceso de ordenación de los puntos, al utilizar el conocido algoritmo recursivo *Quick Sort*. Además de la reducción en el tiempo de cálculo que supone la utilización de este algoritmo, esta ordenación permite descartar a un triángulo ya creado una vez que la coordenada del punto con el que se está trabajado queda más allá del alcance del propio triángulo, definido dicho alcance como el círculo circunscrito al mismo.

Como complemento al MDT se ha descrito el algoritmo de teselación para la obtención del mosaico que corresponde a la estructura dual de la triangulación de Delaunay. Se trata del mosaico de Thiessen. Para la construcción de dicho mosaico se han utilizado algunas de las mejoras ya utilizadas en la construcción de la triangulación de Delaunay, como es el hecho de ordenar los vértices de los triángulos y aislar los triángulos una vez ya han sido utilizados sus tres vértices.

Esta aportación ha resultado muy importante por su posterior utilización en la asignación de consumos con falta de datos de facturación, es decir, en la previsión de demandas a medio plazo basadas en los distintos usos del suelo.

Igualmente, se han revisado los principales algoritmos de interpolación espacial disponibles para su utilización conjunta con los MDT. Estos han sido utilizados posteriormente en la interpolación de cotas durante la generación de los modelos matemáticos. De esta revisión se ha concluido que para la aplicación específica de interpolación de cotas, el más adecuado por la relación entre sencillez del cálculo y error cometido es el de la interpolación inversa con el cuadrado de la distancia, tomando como entorno de trabajo el triángulo en el cual se halla el punto que está siendo objeto de la interpolación.

2.1.2. Elaboración de un modelo de datos orientado a objetos para la obtención y almacenamiento del MDT.

Se ha establecido una estructura de datos para el almacenamiento tanto de la triangulación de Delaunay como del mosaico de Thiessen. Esta estructura de datos está basada en la aproximación orientada a objetos, al ser esta la nueva tendencia en cuanto a almacenamiento y gestión de las bases de datos.

Por último, todos los desarrollos realizados en torno al MDT se han acompañado de un modelo de datos expresado a través de diagramas de entidades y relaciones. Estos diagramas se han realizado siguiendo las recientes recomendaciones tanto del Open GIS Consortium como de la International Standard Organisation. El lenguaje utilizado para representar este modelo de datos ha sido el Unified Modelling Language, propuesto también por las dos asociaciones anteriores.

Con esto se ha realizado una pequeña aportación en el campo de la interoperabilidad entre sistemas de información, permitiendo que cualquier otro usuario puede interpretar las bases de datos creadas e incluso utilizar las rutinas desarrolladas en cualquier entorno de trabajo.

2.2. Aportaciones específicas a la modelación de redes de distribución de agua potable.

2.2.1. Definición de una estructura de datos para la gestión técnica de una red de abastecimiento.

La principal aportación realizada en la modelación de redes es la definición de una estructura de base de datos que recoja la totalidad de los datos necesarios para la elaboración del modelo matemático de una red de abastecimiento de agua potable. Esta base de datos recoge en primer lugar los datos puramente cartográficos (como altimetría, viario o parcelario). Junto a esta base cartográfica, se han definido otras tres bases de datos adicionales.

Por un lado una base de datos de abonados que permite el análisis de consumos y la utilización de éstos para la asignación de cargas al modelo o la extrapolación y proyección de consumos.

Junto a esta base de datos de abonados, se ha definido una base de datos de infraestructuras. La principal novedad de esta base de datos es que se ha creado teniendo presente durante su concepción que debe facilitar la obtención del modelo matemático de la red.

Por último, también se ha definido la base de datos que debe contener los elementos incluidos en el propio modelo matemático.

2.2.2. Integración en el SIG de las técnicas de simplificación de modelos.

Otra de las aportaciones realizadas es la incorporación de las principales técnicas de simplificación de modelos con el fin de obtener un esqueleto simplificado de la red a partir de unos criterios de simplificación de la misma. Entre estos criterios se ha incluido como novedad la utilización posterior del modelo, pues ésta condicionará en gran medida el nivel de detalle necesario en el modelo creado.

De la misma forma que el nivel de detalle del modelo depende del uso que se va a hacer de él, la asignación de cargas o consumos al modelo también debe hacerse según el uso que se vaya a hacer del modelo. Sin duda las principales aportaciones de la Tesis se han producido en la asignación de cargas al modelo. En este sentido, se ha realizado una revisión de las principales técnicas de asignación de cargas encontradas en la bibliografía.

2.2.3. Desarrollo de un método de asignación de cargas teniendo en cuenta los caudales punta y la probabilidad de ocurrencia de los mismos.

Entre las aportaciones a la asignación de cargas destacarían principalmente dos. La primera y más importante es el desarrollo de una metodología para la generación de escenarios para la asignación de cargas a modelos de detalle de tal manera que se amortigüe en la medida de lo posible el efecto de promediar los consumos en el tiempo y en el espacio. Por ello, se ha desarrollado un método de cálculo de caudales siguiendo un método estocástico por el cual un evento de consumo se asimila como un pulso rectangular de Poisson. Esto permite, a partir de un cierto número de abonados y un patrón de comportamiento de los aparatos domésticos de consumo de agua, obtener un caudal con una cierta probabilidad de que no sea excedido.

Este tipo de cálculos permite calcular caudales máximos, bien para calcular el estado de la red en momentos de máximo consumo o el estado de la red en horas nocturnas. Este último es un método matemático para la detección de fugas conocido como método alemán o método de los caudales mínimos nocturnos.

Asociado con lo anterior aparece la necesidad de obtener el número de abonados abastecidos por una tubería. Esto resulta muy sencillo en redes ramificadas, pero no es tan sencillo en redes malladas en las que el sentido de circulación del agua en las tuberías depende en muchas ocasiones del estado de carga de la red. Por ello, el cálculo del caudal punta se ha acompañado de un método de asignación y cálculo del funcionamiento de la red con tales caudales. Esta es, sin duda, una de las principales aportaciones de esta Tesis a la modelación de redes.

Al igual que se ha hecho con el MDT, en todo el trabajo realizado para la generación del modelo y la asignación de cargas, la organización de los datos ha resultado fundamental, por lo que se ha incluido el modelo de datos con el fin de facilitar el intercambio de información.

2.2.4. Aplicación de todo lo desarrollado a un caso real.

Por último se ha concluido la Tesis con la puesta en práctica de todo lo expuesto, como forma de refrendar la utilidad de la metodología desarrollada cuando se traslada a un caso real. En esta aplicación se han acometido las tareas de organización de los datos, generación del modelo digital del terreno, generación del modelo matemático de la red integración del mismo en el propio SIG. Además, se han procesado dos escenarios de cálculo: uno correspondiente al estado actual de la red en el cual la asignación de cargas se ha basado en los datos disponibles de facturación de los abonados y otro correspondiente al estado probable de carga de la red en el año 2010, para lo cual se ha combinado un análisis estadísticos del histórico de facturaciones con un tratamiento espacial de la información para la asignación de cargas.

3. Desarrollos futuros.

A pesar del trabajo realizado, han quedado algunas tareas que quedan abiertas para futuros desarrollos. El trabajo presentado se ha realizado partiendo de la base que los consumos disponibles para asignar al modelo, bien a partir de las facturaciones, bien a partir de los usos del suelo, son eminentemente urbanos. Así, tanto el modelo de datos desarrollado como el método de asignación de cargas se han concebido para este caso. Sin embargo, en la introducción se comentaba la tendencia creciente a una gestión integral del agua que incluya no sólo los consumos urbanos, sino también los consumos industriales y rurales.

Además, no se han tenido en cuenta de una forma individualizada las pérdidas de agua y no se ha distinguido entre agua consumida no contabilizada y agua no consumida.

Por último, no se ha explotado todo el potencial que permite una base de datos georreferenciada. Las modernas técnicas de gestión de datos permiten extraer conocimiento a partir de relaciones aparentemente independientes. En este tipo de relaciones, el factor geográfico es un factor muy importante y, más si cabe, cuando se trata de estudiar el consumo del agua.

A continuación se presentan algunas de las puertas que quedan abiertas para futuros trabajos.

3.1. Integración en un mismo sistema de las redes de abastecimiento y de saneamiento.

De cara a una gestión integral del agua, se han de tener en cuenta todas las etapas que sigue esta cuando es consumida por el hombre. Así, la utilización del SIG para el abastecimiento es una aplicación parcial dentro de un ciclo completo que empieza en la captación, continúa con la potabilización y el consumo, sigue con la evacuación de las aguas residuales y termina con el tratamiento de éstas y su posterior vertido.

En este sentido, ha de tenerse en cuenta que, si bien la captación y la potabilización están íntimamente unidas a la gestión de los abastecimientos, estos aspectos no han sido tratados en la Tesis y, sin embargo, resultan de vital importancia en la gestión de cualquier red de abastecimiento.

Además, es común utilizar los datos de facturación de las redes de abastecimiento para la estimación de las cargas de aguas residuales urbanas en las redes de saneamiento. En estos casos, se suelen utilizar estos datos para asignar caudales de tiempo seco en colectores unitarios o caudales de residuales en la red de aguas negras en los sistemas separativos de saneamiento.

3.2. Extensión del método de asignación de cargas a consumos no domésticos.

El método de asignación de cargas descrito incluye el tratamiento de mediciones realizadas en consumos domésticos a fin de extraer de éstas información acerca del comportamiento de los aparatos domésticos de consumo. Sin embargo, las mediciones realizadas abarcan sólo los aparatos ubicados en el interior de las viviendas. En el capítulo 4 se ha llegado incluso a comentar las discrepancias que ofrecen algunos datos, básicamente norteamericanos, debido a que el análisis realizado incluía aparatos no domésticos, como pueden ser los sistemas automáticos de riego.

Este hecho limita la aplicabilidad del método, al suponer que todos los consumos son aleatorios tanto en lo referente al instante en que se producen como en la duración del consumo o el caudal extraído. Sin embargo, algunos consumos no se comportan así. Es el caso de los consumos determinísticos, como pueden ser las descargas de cisternas (que si bien son aleatorias en el tiempo, el volumen extraído es prácticamente constante) o los sistemas de riego programado.

De la misma forma, se ha de estudiar el efecto que consumos muy concretos, como el baldeo de calles o el llenado de piscinas, tienen sobre la red.

Otro aspecto a tener en cuenta es el estudio de otro tipo de consumos, como los consumos correspondientes a industrias ubicadas dentro de un núcleo urbano o los destinados a atender las necesidades de los comercios que puedan existir en dichos núcleos. Todos ellos presentan características bien diferenciadas que hacen necesario un estudio individualizado de los mismos.

3.3. Inclusión de las fugas en el proceso de asignación de cargas.

Otro aspecto relacionado con la asignación de cargas es el tratamiento de las fugas. En esta Tesis se han tratado de una forma que se podría calificar de tradicional. Esto implica no hacer distinción entre lo que son fugas propiamente dichas (es decir, caudales disipados a través de fisuras en la red y, por tanto, dependientes de la presión en la misma) y lo que son otras pérdidas de agua, como es el caso de las conexiones fraudulentas, los caudales no contabilizados o los errores imputables a los equipos de medición, bien por subcontaje, bien por avería de aquéllos.

En la actualidad se están realizando varios estudios para la modelación de las fugas como consumos dependientes de la presión. Sin embargo, estos estudios tropiezan con dos obstáculos: la necesidad de diferenciar fugas del resto de pérdidas de agua y la complejidad de calibración de estos modelos. En cualquier caso, estos estudios se están realizando desde un punto de vista estrictamente numérico. Así pues, un avance importante sería relacionar estos modelos con un SIG de tal manera que la ubicación de las fugas pudieran

tener en cuenta la componente geográfica y el SIG pudiera proporcionar a estos modelos los datos necesarios para la calibración.

3.4. Inclusión en el SIG de técnicas de extracción no trivial de información.

Esta técnica, procedente del campo financiero y del *marketing*, está tomando progresivamente más fuerza en otros campos de la ingeniería relacionados con el manejo de grandes cantidades de datos. Recibe el nombre de *datamining* y su traducción al español podría ser *minería* o *prospección de datos*. Se basa en la distinción entre dos conceptos diferentes: datos y conocimiento.

El número y tamaño de las bases de datos en muchas organizaciones está creciendo a un ritmo incontrolado. Se hace necesario sintetizar esta información mediante un proceso de Descubrimiento de Conocimiento en Bases de Datos (DCBD). Este proceso emplea algoritmos para extraer o identificar conocimientos de acuerdo a ciertos criterios o medidas de interés, pero también incluye pasos que preparan los datos, tales como el preprocesamiento de los datos, el muestreo y las transformaciones de la base de datos.

La aplicación de este tipo de técnicas adquieren especial importancia en aquellos campos donde el factor geográfico resulta decisivo. Así, por ejemplo, en el campo del consumo de agua, puede resultar interesante la segmentación de los consumidores según criterios geográficos o demográficos.

La prospección de datos (*data mining*) es el proceso de encontrar datos importantes, tendencias, asociaciones y otros patrones importantes y útiles en los datos almacenados. La estadística juega un papel importante en la prospección de datos, mediante el análisis de conjuntos de datos y la determinación de la relevancia de los patrones detectados.

Dentro de la minería de datos se ha definido una disciplina más específica que es la minería de datos espaciales (del inglés *spatial datamining*). La utilización de esta técnica en los abastecimientos de agua supone, sin duda, un desafío para el futuro.

Anexo.

Referencias Bibliográficas

- Abbott, M.B. (1991). *Hydroinformatics: information technology and the aquatic environment*. Ashgate, Aldershot (Reino Unido).
- Abbott, M.B.; Babovic, V.M.; & Cunge, J.A. (2001). *Towards the hydraulics of the hydroinformatics era*. IAHR Journal of Hydraulic Research, Vol. 39, 2001, N°4, pp. 339-349.
- Abbott, M.B.; Havnø, K.; & Lingberg, S. (1991). *The fourth generation of numerical modelling in hydraulics*. IAHR Journal of Hydraulic Research, Vol. 29, 1991, N°5, pp. 581-600.
- Arizmendi, L.J. (1991). *Instalaciones Urbanas. Infraestructura y Planeamiento*. Ed. Bellisco, Madrid.
- Arregui de la Cruz, F.J. (1998). *Propuesta de una Metodología para el Análisis y la Gestión del Parque de Contadores de Agua en un Abastecimiento*. Tesis Doctoral. Dept. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Octubre, 1998.
- Arregui de la Cruz, F.J.; García-Serra García, J.; López Patiño, G. y Martínez Solano, F.J. (1998). *Metodología para la Evaluación del error de Medición de un Parque de Contadores*. Ingeniería del Agua, Vol. 5, N° 4, Diciembre 1998, pp. 55-66.
- AWWA (1995). Journal of the American Water Works Association. Número especial dedicado a la gestión integral de recursos, Vol. 87, N°6, Junio 1995.
- Ayuntamiento de Valencia (1995). Manual de Normalización de los Elementos de Saneamiento de la Ciudad de Valencia. Valencia, 1995.
- Ayza Prats, M. (1991). *Proyecto de Mejora del abastecimiento de agua de Reus. Aspectos relativos a la calidad del agua potable y el control de presiones en base a la sectorización de la red de distribución*. Proyecto Final de Carrera. E.T.S. Ingenieros Industriales de Valencia, Septiembre 1991.
- Bernhardsen, T. (1992). *Geographic Information Systems*. Viak IT & Norwegian Mapping Authority. Arendal (Noruega), 1992.
- Booch, G.; Rumbaugh, J., y Jacobson, I. (1999). *The Unified Modeling Language user guide*. Object Technology Series. AddisonWesley, EE.UU.

- Bourke, P. (1989). *An algorithm for interpolating irregularly-spaced data with applications in terrain modelling. A contouring subroutine.* BYTE Magazine. Enero 1989.
- Bowen, P.T.; Harp, J.F.; Baxter, J.W., y Shul, R.D. (1993). *Residential Water Use Patterns*. Ed. American Water Works Association Research Foundation. Denver, CO.
- Bras, R. L. y Rodríguez-Iturbe, I. (1985) *Random functions and hydrology*. Ed. Addison-Wesley 1985.
- Bronson, R. (1983). *Investigación de Operaciones*. Serie Schaum, Ed. McGraw-Hill, Mexico, 1983.
- Buchberger, S. G. & Wells, G.J. (1996). *Intensity, Duration and Frequency of Residential Water Demands*. ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 122, Nº 1, Enero/Febrero 1996, pp. 11-19.
- Buchberger, S. G. & Wu, L. (1995). *Model for Instantaneous Residential Water Demands*. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 121, Nº 3, Marzo 1995, pp. 232-246.
- Burrough, P.A. (1986). *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford University Press, New York.
- Butler, D. y Graham, N. J. D. (1995). *Modeling Dry Weather Wastewater Flow in Sewer Networks*. Journal of Environmental Engineering, Vol. 121, Nº 2, Febrero 1995.
- Cabrera, E.; Espert, V.; García-Serra, J.; Martínez, F.; Andrés, M. y García, M. (1996). *Ingeniería Hidráulica aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua*. Ed. Grupo Mecánica de Fluidos. Valencia, 1996.
- Cabrera, E.; García-Serra, J. & Iglesias, P.L. (1995). *Modelización de Redes de Distribución de Agua. Desde el Régimen Permanente hasta el Golpe de Ariete*. En Mejora del Rendimiento y de la Fiabilidad en Sistemas de Distribución de Agua. Ed. Cabrera, E. y Vela, A.F.. Valencia, 1995, 5-39.
- Cabrera Marcet, E. y García-Serra García, J. (1997). *Problemática de los abastecimientos urbanos. Necesidad de su modernización*. Ed. Grupo Mecánica de Fluidos. Valencia, 1997.
- Cabrera Rochera, E. (2001). *Diseño de un sistema para la evaluación de la gestión de abastecimientos urbanos*. Tesis Doctoral. Dept. de Ingeniería Hidráulica y Medio ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Octubre de 2001.
- Cascetta, F. (2000). *Il telecontrollo delle reti idriche. Efficienza gestionale, qualità del servizio e soddisfazione del cliente*. L'Acqua, Nº5, Mayo 2000, pp. 49-52.
- Cesario, L. (1986). *Denver's Mapping Information Management System*. In Proc. of AWWA Annual Conference. Denver, Colorado (USA). pp. 669-681. Ed. American Water Works Association (AWWA)

- Cesario, A.L. (1995). *Modeling, Analysis and Design of Water Distribution Systems*. Ed. AWWA.
- Costelloe, D.; Mooney, P. & Winstanley, A. (2001). *Multi-objective Optimisation on Transportation Networks*. Proc. of 4th AGILE Conference, Brno, Czech Republic.
- Cox, S.; Cuthbert, A.; Lake, R. y Martell, R. (2001). *Geography Markup Language (GML) 2.0. OpenGIS® Implementation Specification*. Open GIS Consortium, OGC Documento N° 01-029.
(<http://www.opengis.net/gml/01-029/GML2.htm>)
- Cubillo González, F.; Caro Esteban, M.; Del Valle Lindes, J.; Chueca, P.; Gamboa Antoñolo, S. y Castaño Sousa, M.I. (1997). *Guía para la implantación de Sistemas de Información en la gestión de redes de suministro de agua*. CENTA, Sevilla, Septiembre 1997.
- Danish Hydraulic Institute (DHI, 2000). *MIKE NET 2000. User's Manual*. Ed. Danish Hydraulic Institute, Hørsholm (Dinamarca)
- Di Federico, V.; Grelli, C.; Schiatti, M. y Bizarri, A. (1999). *Metodica di individuazione delle perdite in una rete di distribuzione idrica urbana*. Ingegneria Ambientale, Vol. XXVIII, N°5, Mayo 1999, pp. 239-247.
- Domínguez Bravo, J. (2000). *Breve Introducción a la Cartografía y a los Sistemas de Información Geográfica (SIG)*. Informe Técnico de CIEMAT N° 943. Ed. CIEMAT, Octubre 2000.
- Dorsel, D.; La Breche, T. (1997). *Environmental Sampling and Monitoring Primer. Kriging*. Trabajo universitario dirigido por el Prof. Daniel Gallagher (no publicado).
(<http://www.ce.vt.edu/enviro2/smprimer/kriging/kriging.html>).
- Dutton-Marion, K.E. (1988). *Principles of Interpolation Procedures in the Display and Analysis of Spatial Data: A Comparative Analysis of Conceptual and Computer Contouring*. Tesis Doctoral. Department of Geography, University of Calgary, Canadá.
- Ejeta, M.Z. & Mays, L.W. (2002). *Computer models for integrated hydrosystems management*. En *Regional Water Systems Management. Water Conservation, Water Supply and System Integration*. Ed. Cabrera, Cobacho y Lund. Balkema Publishers, pp. 259-293.
- Elgy, J.; Charnock, T.W. & Hedges, P.D. (1996). *Use of GIS and Remote Sensing in Water Supply*. En *Water Supply Systems*, ed. Maksimovic, C.; Calomino, F. y Snoxell, J. NATO ASI Series, pp. 491-526. Pub. Springer-Verlag, Berlín.
- ESRI, (1989). *PC ARC/INFO User's Guide*. Ed. Environmental Systems Research Institute. Redlands (CA, EE.UU.)

- Ester, M.; Gundlach, S.; Kriegel, H.P. y Sander, J. (1999). *Database Primitives for Spatial Datamining*. Proc. Int. Conf. On Databases in Office, Engineering and Science (BTW'99). Friburgo, Alemania.
- Felicísimo Pérez, A.M. (1992) *Aplicaciones de los modelos digitales del terreno en las ciencias ambientales*. Tesis Doctoral. Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (INDUROT), Universidad de Oviedo.
(<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>)
- Fernández, Mario (1999). *GIS para la Gestión de Pérdidas y Diagnóstico de la Red de Distribución de Agua*. Conferencia impartida en el II Máster en Gestión y Uso Eficiente del Agua. Valencia, 1999.
- Friis-Christensen, A. (2001). *Modeling Geographic data Using UML*. Proc. of 4th AGILE Conference, Brno, Czech Republic, pp. 361-375.
- Fuertes, V.; García-Serra, J. y Pérez, R. (1999). *Modelización de redes de distribución de agua*. En Gestión de Sequías en Abastecimientos Urbanos. Ed. Grupo Mecánica de Fluidos, pp. 61-103.
- García, S.G. (2002). *El uso de los DEM para la extracción de parámetros hidrogeomorfológicos de modelos hidrológicos: aplicaciones*. Jornadas sobre sistemas de ayuda a la decisión ante problemas hidráulicos e hidrológicos en tiempo real. CEDEX, pp. 44-71.
- García-Serra García, J. (1984). *Modelización y Mejora de la Red de Distribución de Agua de Gandía-Playa. Interconexión con la Red de Gandía Pueblo*. Proyecto Final de Carrera. E.T.S. Ing. Industriales. Universidad Politécnica de Valencia.
- Garrote de Marcos, L. (2002). *Construcción de modelos hidráulicos e hidrológicos para su uso en tiempo real*. Jornadas sobre sistemas de ayuda a la decisión ante problemas hidráulicos e hidrológicos en tiempo real. CEDEX, pp. 17-42.
- Gascón Ricós, L. (2001). *Elaboración del plan Director de la Red de Distribución de la Cooperativa Valenciana El Plantío y La Cañada*. Proyecto Final de Carrera. E.T.S. Ing. Industriales. Universidad Politécnica de Valencia.
- Grupo Mecánica de Fluidos (GMF, 2001a). *Pliego de Condiciones Técnicas para la elaboración de un estudio de previsión de la infraestructura, condiciones y regulación del servicio en la nueva etapa de Gestión del abastecimiento de aguas a Valencia*. Informe presentado al Excmo. Ayuntamiento de Valencia.
- Grupo Mecánica de Fluidos (GMF, 2001b). *Preparación del Plan Director de la Red de Saneamiento de Castellón*. Informe presentado a la empresa Fomento Agrícola Castellonense, S.A. (FACSA).

- Hamam, Y.M, & Brameller, A. (1971). *Hybrid method for the solution of piping networks*. Proc. IEE, Vol. 113, No. 11, pp. 1607-1612.
- Healey, R.G. (2001). *Database management systems*. En Geographic Information Systems Science. Ed. Longley, Goodchild, Maguire & Rhind. Pub. John Wiley & Sons Ltd.
- Hernández Rodríguez, F. (1995). *Modelización de información espacial mediante tecnología orientada a objetos*. Tesis Doctoral. Dept. Ingeniería del Diseño. Universidad de Sevilla.
- Healey, R.G. (1991). *Database Management Systems*. En Geographical Information Systems: Principles and Applications. Ed. Maguire, D.J.; Goodchild, M.F. y Rhind, D.W., pp. 251-267.
- Hunter, R.B. (1940). *Methods of estimating loads in plumbing systems*. Rep. N° BMS 65, U.S. Bureau of Standards, Washington, D.C.
- Iglesias Rey, P.L. (2001). *Modelo general de análisis de redes hidráulicas a presión en régimen transitorio*. Tesis Doctoral. Dept. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. universidad Politécnica de Valencia. Octubre 2001.
- Iglesias Rey, P.; Izquierdo Sebastián, J.; López Patiño, G, y Martínez Solano, F. J. (1999). *Geographical Information Systems (GIS) applied to Water Distribution Systems (WSS)*. En Drought Management Planning in Water Supply Systems. Kluwer Academic Publishers. Holanda, pp. 22-51.
- Iglesias Rey, P., López Patiño, G., y Martínez Solano, F.J. (1997). *Simulación, Interpretación y Presentación de Resultados en Sistemas de Distribución de Agua Potable*. Conferencia impartida en el I Máster en Gestión y Uso Eficiente del Agua. Valencia, Noviembre 1997.
- International Standard Organisation (ISO, 1992). *ISO/TR 11295:1992-08-01. Techniques for Rehabilitation of Pipeline Systems*. International Standard Organisation. Ginebra, Suiza.
- International Standard Organisation (ISO, 2000). *ISO/CD 19155.3 Geographic information – Metadata (Draft)*. International Standard Organisation / Technical Committee 211 Geographic information/Geomatics. Norwegian Technology Centre. (<http://www.statkart.no/isotc211/wg4/welcome.html>)
- Jankovic-Nišić, B.; Maksimovic, C, Butler, D., y Graham, N.J.D. (2001). *Effects on consumption uncertainty on positioning and sampling frequency of flow meters for operational management*. Proceedings of the IWA specialised conference on System approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management. (Ed. Ladislav Tuhovcák. Brno, República Checa, Mayo 2001, pp. 42-49.
- Joly, F. (1988) *La cartografía*. Oikos-Ta. Barcelona, 1988.

- Lang, C. (2000). *Kriging Interpolation*. IBM Data Explorer 2.0. Dept. of Computer Science, Cornell University.
(<http://www.nbb.cornell.edu/neurobio>)
- Lingireddy, S.; Wood, J.W. & Nelson, A. (1998). *Modified Pipe Network Model for Incorporating Peak Demand Requirements*. ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 124, N° 5, Septiembre/Octubre 1998, pp. 296-299.
- Longley, P.A.; Goodchild, M.F.; Maguire, D.J. & Rhind, D.W. (2001). *Geographic Information Systems Science*. Ed. John Wiley & Sons Ltd.
- López Patiño, G. (1994). *Modelo Matemático de la Red Arterial de Distribución de Agua Potable a la Ciudad de Valencia*. Proyecto Final de Carrera. E.T.S. Ing. Industriales. Universidad Politécnica de Valencia.
- López Patiño, G.; Fuertes Miquel, V. y Ayza Prats, M. (1996). *Modelización matemática de redes en servicio*. En Ingeniería Hidráulica aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua. Ed. Cabrera, Espert, García-Serra, Martínez, Andrés y García, pp. 729-759.
- Macke, S. (2001). *DC Water Design Extension Version 2.06*. DORSCH Consult.
(<http://dcwaterdesign.sourceforge.net>)
- Maddaus, W.O. (1987). *Water Conservation*. American Water Works Association. Denver, EE.UU.
- Maguire, D.J.; Goodchild, M.F. & Rhind, D.W. (1991). *Geographic Information Systems*. Ed. Loughman Scientific & Technical.
- Maksimovic, C; Prodanovic, D.; Elgy, J. & Fuchs, L. (1994). *GIS (or GIM) in Water Projects – Tools or Toys*. Hydroinformatics '94. Proc. of the First International Conference on Hydroinformatics, Delft, Holanda.
- Martínez Marín, R.; Gordo Murillo, C. y Ojeda Manrique, J.C. (2002). *Los elementos finitos y su aplicación a los modelos digitales del terreno*. Revista de Obras Públicas, N° 3417. Enero 2002, pp. 53-59.
- Martínez Solano, F.J. (1994). *Análisis y Elaboración de un Modelo Matemático del Sistema de Abastecimiento de Agua Potable del Municipio de Jávea (Alicante)*. Proyecto Final de Carrera. E.T.S. Ing. Industriales. Universidad Politécnica de Valencia.
- Martínez Solano, F.J.; Iglesias Rey, P.L.; López Patiño, G. y López Jiménez, P.A. (2001). *Diagnóstico de los aljibes domiciliarios desde el punto de vista de la Calidad*. Tecnología del Agua, N° 211, Abril 2001, pp. 34-41.
- Martínez Solano, F.J.; Pérez García, R.; e Iglesias Rey, P.L (2002). *Water Mains Creation Using GIS*. Proc. 5th AGILE Conference, Palma de Mallorca, pp. 547-556.

- Martínez Tortajada, J. (1998). *Dimensionado Óptimo de Instalaciones de Fontanería en Edificios de Viviendas*. Tesis Doctoral. Dept. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Julio 1998.
- Massana, M. y Cortón, H. (2001). *Sistemas de Información Geográfica para la gestión de redes de abastecimiento y saneamiento*. Tecnología del Agua, N° 214, Julio 2001, pp. 32-42.
- Meneghin, M. (1999). *Fabbisogno, consumi, portate e perdite nella pratica di esercizio delle reti di distribuzione d'acqua potabile a sollevamento meccanico*. L'Acqua, N°4, Abril 1999, pp. 55-65.
- Ministerio de Industria, Comercio y Turismo (NIA, 1975). *Orden Ministerial de 9 de Diciembre de 1975 por la que se aprueban la "Normas Básicas para las Instalaciones Interiores de Suministro de Agua"*. Publicada en el Boletín Oficial del Estado de 12 de Febrero de 1976.
- Mitchell, B. (1990). *Integrated Water Management: International Experiences and Perspectives*. Belhaven Press. Londres.
- Montgomery Watson, Inc. (1996). *H2ONET. Graphical water distribution modeling and management package. User's manual*. MW Soft Inc. Pasadena (CA, EE.UU.)
- Nelson, E.J.; Jones, N.L.; Berrett, R.J. (1999) *Adaptative tessellation method for creating TINs from GIS data*. Journal of Hydrologic Engineering, Enero 1999, Vol. 4, N° 1, pp. 2 - 9.
- Open GIS Consortium (OGC, 1999). *The OGC Abstract Specification*. Open GIS Consortium, OGC Documentos N° 99-100 a 99-116, Wayland, Massachusetts. (<http://www.opengis.org/techno/specs.htm>)
- Osiadacz, A.J. (1987). *Simulation and Analysis of Gas Networks*. Ed. E. & F.N. Spon, Londres.
- Parsons, E. (1997). *The Essential Guide to GIS. A hands-on GIS Workshop*. Internet Seminar, Kingston Center for GIS. Kingston (Reino Unido), Julio 1997. (<http://www.future-geomatics.com/esguide/start.html>).
- Pérez García, R. (1993). *Dimensionado Optimo de Redes de Distribución de Agua Ramificadas considerando los Elementos de Regulación*. Tesis Doctoral. Dept. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.
- Pérez García, R.; Andreu Navarro, M. e Izquierdo Sebastián, J. (1996). *Diseño de Redes de Distribución*. En Ingeniería Hidráulica aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua. Ed. Cabrera, Espert, García-Serra, Martínez, Andrés y García, pp.653-727.

- Prodanovic, D. (1997). *Modelos Digitales del Terreno*. Conferencia impartida en el I Máster en Gestión y Uso Eficiente del Agua. Valencia, Noviembre 1997.
- Reca Cardaña, J. (1997). *Estado de los SIG en España. Estado de los SIG en aplicaciones agrícolas*. Conferencia impartida en el I Máster en Gestión y Uso Eficiente del Agua. Valencia, Noviembre 1997.
- Rossiter, David G. (1994). *Special Topics in Soil, Crop & Atmospheric Sciences: Land Evaluation, with emphasis on computer application*. Notas del curso de la Cornell University, EE.UU.)
(http://wwwscas.cit.cornell.edu/landeval/le_notes/s494ch2p.htm)
- Rossman, L.A. (1993). *EPANET 1.0 User Manual*. Water Supply and Water Resources Division. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, EE.UU.
(<http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/wswrd/epanet.html>)
- Rossman, L.A. (2000). *EPANET 2 Programmer's ToolKit*. Water Supply and Water Resources Division. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, EE.UU.
(<http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/wswrd/epanet.html#Toolkit>)
- Rossman, L.A.; Boulos, P.F. & Altman, T. (1993). *Discrete volume-element method for network water-quality models*. J. Water Resources Planning and Management. Vol. 119, No. 5, pp. 505-517.
- Salgado, R. (1988). *Computer modelling of water distribution network using the gradient method*. PhD. Thesis. Civil Engineering Department. University of Newcastle-upon-Tyne.
- Sedgewick, R. (1995). *Algoritmos en C++*. Ed. Addison-Wesley-Díaz de Santos.
- Taher, S.A., Labadie, J.W. (1996). *Optimal design of water-distribution networks with GIS*. J. Water Resources Planning and Management. Vol. 122, N° 4, pp. 301-311.
- Taylor, M. (2000). *Metada – Describing geospatial data*. En Developing Spatial Data Infrastructures: The SDI Cookbook. Ed. Douglas D: Nebert, Global Spatial Data Infrastructure, Julio 2000, pp. 24-40.
(<http://www.GSDI.org>)
- Theobald, D.M. (2001). *Topology revisited:representing spatial relations*. Int. Journal of Geographical Information Science, Vol. 15, N° 8, pp. 689-705.
(<http://www.tandf.co.uk/journals>)
- Thompson, S.A. (1999). *Hydrology for Water Management*. A.A. Balkema. Rotterdam, Holanda.
- Todini, E. (1979). *Un metodo del gradiente para la verifca delle reti idrauliche*. Bolletino degli Ingegneri della Toscana, N° 11, pp. 11-14.

- Todini, E. & Pilati, S. (1988). *A gradient algorithm for the analysis of pipe networks*. International Conference on Computer Applications in Water Supply. Ed. Coulbeck, B. y Orr, C. Research Studies Press Ltd. Leicester Polytechnic, Reino Unido, 1988, pp. 1-20.
- Tükbe, A. (2001). *Fuentes de creación de valor en los países candidatos*. The IPTS Report (Edición española), N°58, Octubre 2001, pp. 18-27.
- Ungerer, M.J. & Goodchild, M.F. (2002). *Integrating spatial data analysis and GIS: a new implementation using the Component Object Model (COM)*. Int. Journal of Geographical Information Science, Vol. 16, N° 1, pp. 41-53.
(<http://www.tandf.co.uk/journals>)
- Van der Wal, J.J. y Johnson, E.H. (1999). *A GIS based Dynamic Strategic Planning System*. Water Industry Systems: modelling and optimization applications. Ed. Savic, D. y Walters, G.A. Research Studies Press Ltd. Reino Unido, 1999, pp. 103-112.
- Vela, A.; Martínez, F.; García-Serra, J. y Pérez, R. (1994). *Estrategias óptimas para la reducción de pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento*. Ingeniería del Agua, Vol. 1, N° 1. pp. 35-53.
- Vela Gasulla, A.F. (1993). *Contribución a la Diagnósis y Optimización del Mantenimiento Integral de los Sistemas de Distribución de Agua*. Tesis Doctoral. Dept. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia, Octubre de 1993.
- Vela Gasulla, A.F.; Díaz Martínez, J. y Aguirre Pascual, A. (1996). *Gestión Técnica de Sistemas de Abastecimiento*. En Ingeniería Hidráulica aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua. Ed. Cabrera, Espert, García-Serra, Martínez, Andrés y García, pp. 1049-1097.
- Veltri, P. (1996). *Historical and Institutional Aspects*. En Water Supply Systems, ed. Maksimovic, C.; Calomino, F. y Snoxell, J. NATO ASI Series, pp. 559-563. Pub. Springer-Verlag, Berlín.
- Visser, U.; Stuckenschmidt, H. y Schlieder, C. (2002). *Interoperability in GIS – Enabling Technologies*. Proc. 5th AGILE Conference, Palma de Mallorca, pp. 1-5.
- Walski, T.M.; Chase, D.V. y Savic, D.A. (2001). *Water Distribution Modeling*. Haestad Press, Waterbury (EE.UU.)
- Wang, M.; Hjelmfelt, A.T. (1998) *DEM based overland flow routing model*. ASCE Journal of Hydrologic Engineering, Enero 1998, Vol. 3, N° 1, pp. 1 - 8.
- Waters, N.M. (1988). *Expert Systems and Systems of Experts*. En Geographical Systems and Systems of Geography: Essays in Honour of William Warntz. Department of Geography, University of Western Ontario, Canadá.

- Watson, D.F. (1981) *Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes*. Computer Journal, Vol. 24, N° 2, pp 167-172, 1981.
- Weatherill, N.P.; Hassan, O.; Marcum, D.L. & Marchant, M.J. (1994) *Grid generation by Delaunay triangulation*. Von Karman Institute for Fluid Dynamics - Lecture Series. University College of Swansea, U.K. Enero 1994, pp. 1-9.
- Weimer, D. (1992). *Leakage Control in Water Supply, Vol. 10*. Florence, pp. 169-176.
- Zaragoza, J. (1997). *Gestión de Redes utilizando el SIG en Aguas de Alicante*. Conferencia impartida en el I Máster en Gestión y Uso Eficiente del Agua. Valencia, Noviembre 1997.