

**Decisiones  
en los sistemas  
de saneamiento:  
un poco de ayuda**



# Decisiones en los sistemas de saneamiento: un poco de ayuda

**Manel Poch**

**Ulises Cortés**

**Joaquim Comas**

**Ignasi Rodríguez-Roda**

**Miquel Sànchez-Marrè**



Datos CIP recomendados por la Biblioteca de la UdG

CIP 628.16 DEC

Decisiones en los sistemas de saneamiento : un poco de ayuda / Manel Poch ... [et al.]. – Girona : Laboratory of Chemical and Environment Engineering (LEQUIA-UdG), Knowledge Engineering and Machine Learning Group (KEMLG), Novedar : Universitat de Girona. Servei de Publicacions, 2012.  
-- p. ; cm  
ISBN 978-84-8458-382-0

I. Poch Espallargas, Manuel II. Universitat de Girona. Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental 1. Sanejament  
2. Aigua -- Depuració

CIP 628.16 DEC

### Decisiones en los sistemas de saneamiento: un poco de ayuda

Primera edición: Enero de 2012

© Del texto, los autores: Manel Poch, Ulises Cortés, Joaquim Comas, Ignasi Rodríguez-Roda, Miquel Sánchez-Marré  
© De las fotografías, los autores correspondientes. Foto de portada: Bart Sadowski  
© De esta edición, Laboratory of Chemical and Environmental Engineering (LEQUIA - UdG), Knowledge Engineering and Machine Learning Group (KEMLG), Novedar  
© Las figuras 1.2.2, 1.5.1 y 1.5.2 están basadas en las figuras originales del texto *Sick water?. The central role of wastewater management in sustainable development*, (Corcoran, E., C. Nellemann, E. Baker, R. Bos, D. Osborn, H. Savelli (eds). 2010, UN-HABITAT, GRID-Arendal, ISBN: 978-82-7701-075-5)

Edita: Universitat de Girona  
Servei de Publicacions  
Plaça Sant Domènec, 3  
17071 Girona  
publicacions@udg.edu  
Tel. 972 41 82 06

ISBN 978-84-8458-382-0  
Depósito legal: GI-148-2012

Este libro ha sido publicado en el marco del Proyecto Novedar



NOVEDAR\_Consolider

Diseño y maquetación: Clic Traç, sccl  
Impresión: Nexa Impressions, sl

*No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión a través de cualquier medio, sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del copyright.*

# Bloque 1

# Bloque 2

## Presentación 6

### 1 Ciclos del agua 8

- 1.1 Ciclo natural del agua 10
- 1.2 Ciclo antrópico del agua 12
- 1.3 Un poco de historia... 14
- 1.4 Análisis de la evolución 16
- 1.5 El saneamiento, hoy 18
- 1.6 Tendencias de futuro. ¿Cambios incrementales o un nuevo paradigma? 20

### 2 Decisiones 22

- 2.1 ¿Qué es una decisión? 24
- 2.2 ¿Cómo las tomamos los humanos? 26
- 2.3 Decisiones colectivas. ¿Sistemas emergentes? 28
- 2.4 Niveles de decisión en el diseño de los sistemas de saneamiento 30
- 2.5 Complejidad de las decisiones 34
- 2.6 Niveles de decisión en la operación de los sistemas de saneamiento 36
- 2.7 Interacciones y retroalimentaciones 38

### 3 Sistemas de ayuda a la decisión 40

- 3.1 ¿Qué es un sistema de ayuda a la decisión? 42
- 3.2 ¿Por qué utilizar SAD? 44
- 3.3 ¿Cómo construir un SAD? 46
- 3.4 ¿Cómo opera un SAD? 48

### 4 Planificación estratégica 50

- 4.1 Gestión integral de una cuenca 52
- 4.2 Gestión de nutrientes en una cuenca 56
- 4.3 Gestión de vertidos industriales 60

### 5 Selección de alternativas 64

- 5.1 La problemática de la selección de tecnologías 66
- 5.2 La problemática de los núcleos de menos de 2.000 habitantes 70

### 6 Diseño de los procesos 74

- 6.1 Modelos matemáticos 76
- 6.2 Diseño óptimo 78

### 7 Operación y mantenimiento 82

- 7.1 Supervisión, control, gestión y optimización energética de EDAR 84
- 7.2 Operación y mantenimiento de sistemas naturales de depuración 88
- 7.3 Gestión integral del sistema de saneamiento y medio receptor 92
- 7.4 Gestión inteligente de la información 96

### 8 Consideraciones finales 100

- 8.1 Conozcamos a los autores 102
- 8.2 Para ampliar información y conocimiento 104

## Agradecimientos 108



# Presentación





## “El agua es un recurso escaso y su gestión debe ser lo más eficiente posible”

Esta es una afirmación muy bonita, con la que, seguramente, la mayoría estaríamos de acuerdo. Pero desarrollarla y llevarla a la práctica no es fácil.

En primer lugar, porque ya tenemos problemas para identificar el sentido o la interpretación que damos a algunas de las palabras. Por ejemplo, el agua como recurso. El agua no es sólo un recurso natural, sino que también es la base de un sector industrial, un generador de patrimonio cultural y un elemento articulador de la sociedad. Y quizás habitualmente utilizamos el concepto escaso cuando nos estamos refiriendo, de hecho, a un problema de distribución o de sobreexplotación. En cualquier caso, ello implica que su gestión sea muy compleja, porque intervienen diferentes actores y cada uno de ellos con diferentes intereses, muchas veces contradictorios y que pueden/suelen entrar en conflicto. Cada uno puede entender de una forma diferente el concepto de gestión eficiente. Eficiente, ¿para qué y para quién?

Simultáneamente, hay que tomar decisiones. Decisiones que implican una manera de gestionar el recurso. Por ejemplo autorizar (o no) una detración de un curso de agua, construir (y cómo) una instalación de tratamiento o definir (cuáles y con qué rangos) los parámetros de calidad que garantizan su potabilidad... Estos ejemplos, y muchos más que podríamos citar, son algunos de los aspectos sobre los que diariamente un conjunto de personas tienen la responsabilidad de pronunciarse, tomar decisiones y conseguir que se implementen.

La hipótesis que se plantea en este libro es que para conseguir esta gestión eficiente no hay recetas únicas, ni soluciones universales, pero ello no implica que todas las soluciones sean igual de correctas. Creemos que la experiencia ha demostrado que algunas son mejores que otras.

Conseguir una gestión eficiente del agua nos afecta a todos. Pero hacer una re-

flexión y valoración de las decisiones que se toman en la misma es una tarea que debe ser acotada para poder afrontarla en un libro como el que el lector tiene en sus manos. En este contexto, los autores ya han tomado dos decisiones.

La primera hace referencia a la dimensión. En el libro no se aborda todo el ciclo del agua, sino únicamente la parte que hace referencia al saneamiento urbano, entendido como el conjunto de decisiones relativas a captar el agua, transportarla, tratarla y devolverla al medio o reutilizarla. Teniendo en cuenta que ya hay excelentes manuales que proporcionan criterios de diseño o de cálculo de instalaciones, este libro quiere ir más allá. Quiere analizar cuáles son las decisiones que hay que tomar en cada etapa. Y quiere hacerlo de una manera integral para identificar cuáles son las preguntas a plantearse, en cada caso. Cuáles son las decisiones a tomar y qué impacto pueden tener. Tampoco se pretende una visión exhaustiva de cada caso, ya que se necesitaría toda una enciclopedia. En cualquier caso, esperamos interesar suficientemente al lector para que acuda a las referencias que se indican al final del libro para poder tener un análisis más exhaustivo de cada uno de los casos presentados.

La segunda, indicar que el libro ofrece una visión propia. Es nuestra visión, nuestra propuesta obtenida a partir de una experiencia de casi veinte años. Es por ello que se ha utilizado un tono muy próximo. Exponemos casos vividos, algunos ya implementados con éxito, otros en desarrollo, otros que han quedado como posibilidad, otros que duermen el sueño de los justos... pero en todos los casos se trata de problemas reales con todos sus condicionantes y sus posibilidades. A partir de un análisis inicial de constatación de la realidad, se van exponiendo cuáles son, en nuestra opinión, las problemáticas a las que hay que hacer frente para gestionar el agua, y cómo ello conlleva diferentes niveles de

decisión. En cada uno de ellos intentamos reflexionar, con casos prácticos, sobre una manera de afrontarlos. No necesariamente la única, ni la mejor. Pero de las que el lector puede sacar sus propias conclusiones.

Es por todo ello un libro pensado para personas que, de alguna manera, estén relacionadas con la gestión del agua y su saneamiento, y que estén interesadas en la toma de decisiones alrededor de la misma. Personas que ya están tomando decisiones y quieren conocer las reflexiones de otras personas que trabajan en este ámbito. Personas que en estos momentos no están trabajando en este ámbito, pero que se plantean su incorporación y quieren conocer a qué tipo de decisiones tendrán que hacer frente y analizar propuestas que se han hecho por personas que ya están trabajando en el tema. Y finalmente, aquellas personas que se sienten afectadas por la cuestión y quieren ampliar su conocimiento.

No quisiéramos acabar esta introducción sin agradecer su ayuda a todas aquellas personas e instituciones que han intervenido en la elaboración de algunos de los sistemas que se presentan en el libro. A todas ellas, GRACIAS.

Sólo nos queda desear que el trabajo que aquí presentamos le sirva de ayuda al lector. Por nuestra parte, podemos garantizarle que la experiencia de contribuir a una mejor gestión del recurso agua es apasionante.

# 1 Ciclos del agua





El capítulo empieza haciendo una presentación general del ciclo natural del agua, para constatar cómo este ciclo se ha alterado por el uso antropogénico, lo que ha dado lugar a un ciclo urbano del agua. Este nuevo ciclo, que actualmente es casi siempre un ciclo abierto, implica que el agua es utilizada y devuelta al medio. A partir de esta constatación se hace un análisis de la evolución de cómo el agua se ha tratado antes de devolverla al medio natural, y cómo esta evolución no ha sido sólo temporal, sino también espacial, puesto que actualmente coinciden en el planeta diferentes niveles de tratamiento. A partir de ahí se plantea cuáles son las tendencias actuales en los sistemas de saneamiento y si estamos ante un nuevo paradigma que implica un cambio de mentalidad al abordar el problema. Para hacer frente a estos nuevos retos, y a las decisiones que implicarán, es importante disponer de herramientas que ayuden en la toma de decisiones. En los siguientes capítulos se exponen las experiencias de los autores en el diseño y construcción de sistemas de ayuda a la decisión y cómo éstos pueden contribuir a la mejor gestión de los sistemas de saneamiento del agua.

# 1.1 Ciclo natural del agua

El agua está distribuida en el planeta en forma sólida, líquida y gaseosa, y puede encontrarse también formando parte de los seres vivos. La estimación de la cantidad global de agua varía según las fuentes, pero puede estimarse que el volumen total de agua en nuestro planeta es de unos 1.400 millones de km<sup>3</sup>. De este volumen la mayor parte (97%) se encuentra en los mares y océanos y sólo una pequeña parte (alrededor del 3%) es agua dulce, que mayoritariamente se encuentra en forma de hielo (alrede-

... el agua de nuestro planeta no está estancada, sino que se encuentra en movimiento formando el ciclo del agua

dor del 70%). Hará falta ver en los próximos años como evoluciona este sistema y qué cantidad pasa a formar parte de las masas de agua salada. Alrededor del 30% está en forma de agua subterránea en acuíferos, algunos de difícil acceso y

sólo una cantidad alrededor del 0,3 % se encuentra en forma superficial, directamente utilizable para el consumo humano.

Pero el agua de nuestro planeta no está estancada, sino que se encuentra en movimiento formando el ciclo del agua. Cuando se busca en Google un esquema del ciclo del agua una de las primeras imágenes que aparece es la del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Una imagen naturalista que presenta el concepto del ciclo natural del agua en el que, curiosamente, no aparece la huella de la actividad humana.

Cada año, el agua completa una vuelta a la Tierra involucrando unos 577.000 km<sup>3</sup> de agua. Se evaporan de los océanos 502.800 km<sup>3</sup> y de la tierra 65.200 km<sup>3</sup>, representando un descenso del nivel del mar de más de un metro por año. Al mismo tiempo, una cantidad equivalente de agua cae en forma de precipitación, de la cual 458.000 km<sup>3</sup> lo hacen sobre el océano y 110.000 km<sup>3</sup> sobre la tierra, devolviendo aproximadamente un metro al nivel del mar, pero no en el mismo sitio

de origen. La diferencia entre la evaporación y la precipitación sobre el océano controla en buena medida las corrientes generales que mantienen el equilibrio. Por otro lado, la diferencia entre la precipitación y la evaporación sobre la tierra representa el total de agua que suman los 42.600 km<sup>3</sup>/año que baja por los ríos y los 2.200 km<sup>3</sup>/año de descargas directas de agua subterránea hacia el océano.

Teniendo en cuenta la gran cantidad de agua que circula por la atmósfera y la poca cantidad de agua presente en este compartimento, su tiempo de residencia es de unos pocos días, al igual que en los ríos y la biosfera. La humedad del suelo se recicla en unos meses, mientras que los lagos y acuíferos lo hacen en semanas y años, y los glaciares tardan décadas y siglos en renovarse.



Fig. 1.1.1. Distribución del agua en el planeta

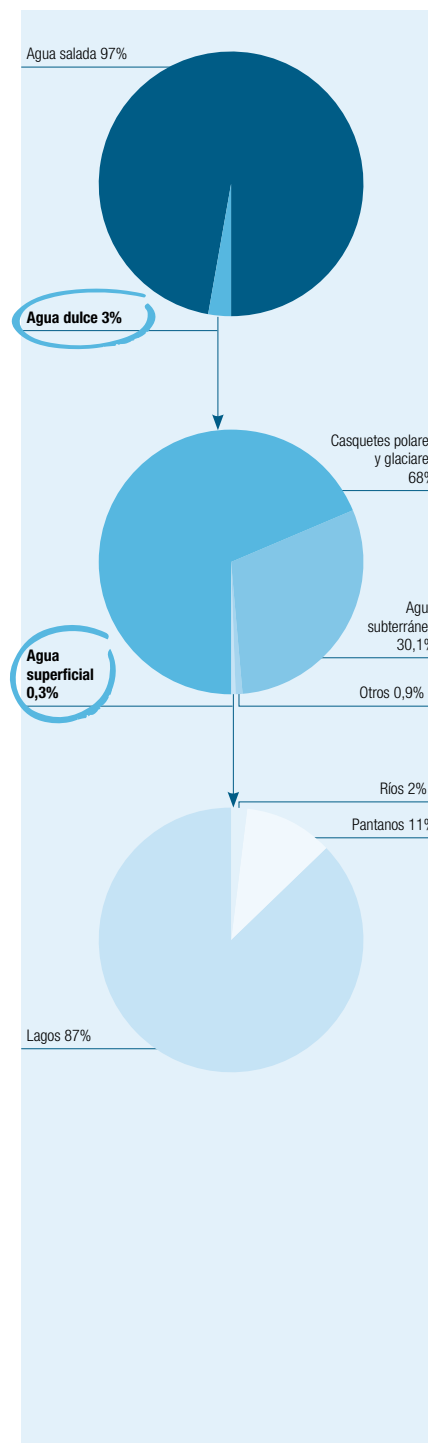
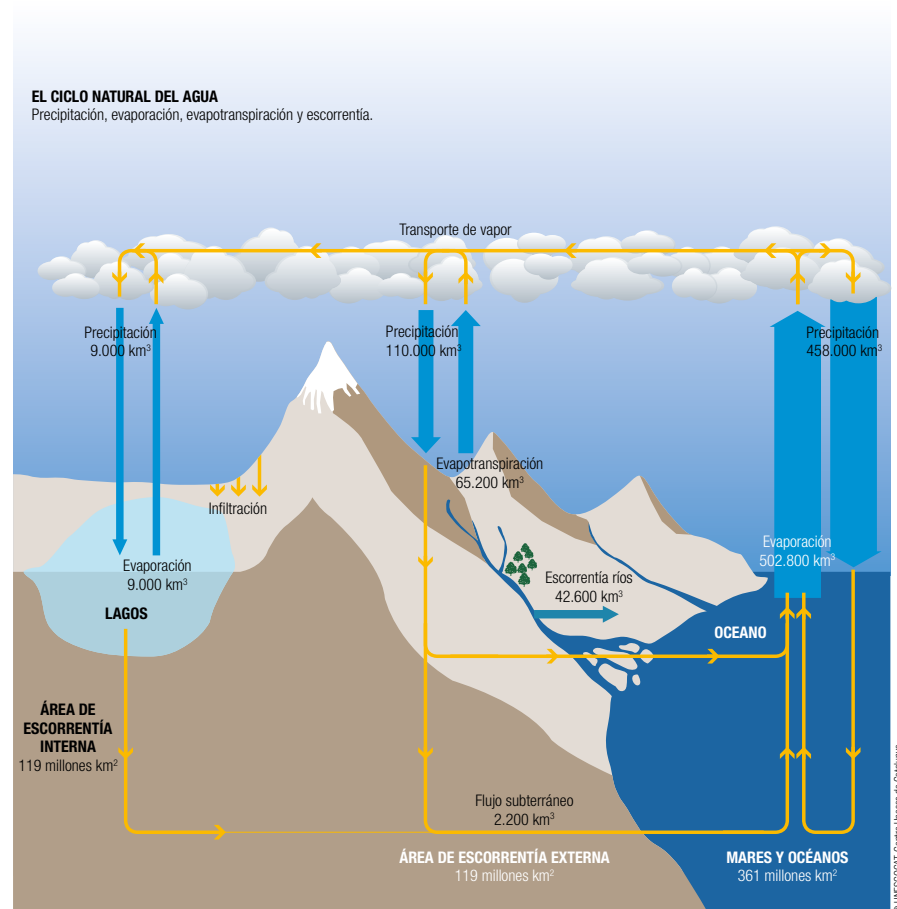
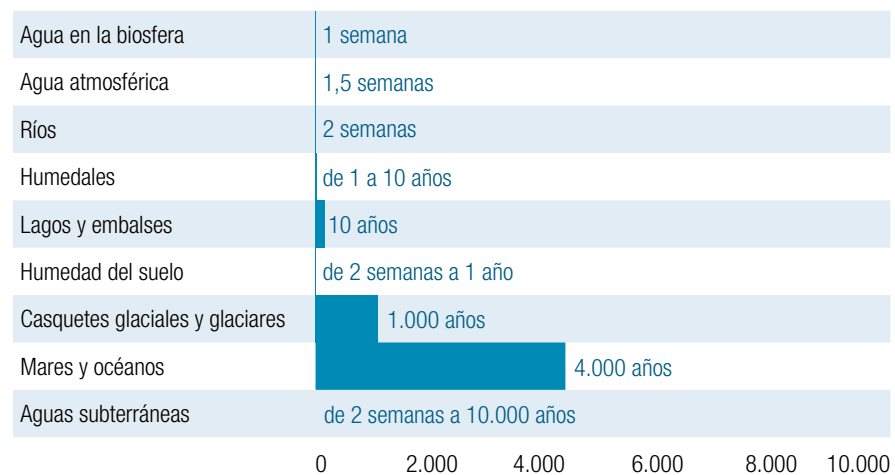


Fig. 1.1.2. Esquema del ciclo del agua proporcionado por el United States Geological Service y que encabeza el ranking en Google

Fig. 1.1.3.  
**Cuantificación de los flujos entre los diferentes compartimentos en los que puede agruparse el ciclo del agua en el planeta.**



NOTA: La anchura de las flechas es proporcional al volumen de agua transportada.



## El agua, una molécula especial

**Jaume Alemany, Institut Català de Recerca de l'Aigua ICRA**

La molécula de agua está compuesta por un átomo de oxígeno unido a dos átomos de hidrógeno (H<sub>2</sub>O) formando un ángulo de 108°. La elevada electronegatividad del oxígeno y la geometría de la molécula dan lugar a su polarización, que le permite formar los llamados “enlaces por puente de hidrógeno” con sí misma y con moléculas de otras sustancias polares. Esta estructura le

confiere propiedades únicas que permiten que exista la vida tal y como la entendemos:

- 1) Es líquida en un amplio rango de temperatura (0-100°C). Otras moléculas similares como el amoníaco o el sulfhídrico son gases a temperatura ambiente.
- 2) En estado sólido es menos densa que el líquido, a diferencia de la mayoría de los compuestos, que aumentan su densidad en estado sólido. El hecho de que el hielo flote aísla térmicamente a las capas inferiores y permite que existan masas de agua donde la vida puede continuar a pesar de las bajas temperaturas.
- 3) El calor específico o cantidad de energía necesaria para elevar un grado su temperatura y el calor de vaporización o energía necesaria para pasar de estado líquido a gaseoso son superiores a los de otras sustancias equivalentes. Ello implica que calentar (o enfriar) una masa de agua requiere un mayor intercambio de energía que el esperado, lo cual confiere una elevada inercia térmica a las masas de agua (p.e. ríos, lagos, mares). Este aspecto explica la capacidad de los océanos como factor de moderación de la temperatura terrestre. Además, sirve como factor de protección frente a fluctuaciones térmicas para la vida en el agua y fuera de ella, y
- 4) su capacidad como disolvente (disolvente universal) que permite ser utilizada como medio de transporte de nutrientes y sustancias de excreción.

Estas propiedades están también relacionadas con el ciclo del agua. La fuerza impulsora de este ciclo es la energía del sol, que evapora el agua de mares y océanos, para lo cual consume una parte de la energía que el planeta recibe del Sol. Una vez condensada (lluvia) o solidificada (nieve o granizo) la fuerza de la gravedad impulsa el agua a la superficie de la tierra donde circula superficial y subterráneamente hasta llegar al mar, iniciando un nuevo ciclo.

Aunque la determinación de los valores de los flujos de energía en el sistema de la Tierra es un campo de investigación en curso y existen diferentes estimaciones con cierto grado de incertidumbre, un ejercicio interesante es la estimación de las magnitudes energéticas asociadas al ciclo del agua. El calor necesario para evaporar los 577.000 km<sup>3</sup> de agua/año que moviliza el ciclo del agua –tomando una entalpía de vaporización del agua de 2.253 kJ/kg– da como resultado que se requieren 1.299.981·10<sup>3</sup> PJ (PJ= petajulio =10<sup>15</sup> J), que puede estimarse casi como el 50% de la energía solar que llega a la superficie del planeta. No cabe duda, pues, de que el ciclo del agua es importante para el balance energético de la Tierra.

Por otra parte, según la Agencia Internacional de la Energía, en el año 2008 en el mundo se produjo, y consumió, la energía equivalente a 513.611·10<sup>3</sup> PJ, lo que significa casi el 40% de la energía que moviliza el ciclo del agua. Las magnitudes de actividad humana (y por tanto su impacto) son ya significativas respecto a las magnitudes de la naturaleza.



## 1.2 Ciclo antrópico del agua

El agua no sólo presenta el ciclo natural general, sino que también forma parte de otros ciclos. En este libro nos interesa la modificación del ciclo natural por parte de la actividad humana, y muy especialmente los ciclos asociados a la gestión del agua que se están desarrollando. El actual paradigma del uso urbano del agua implica: que es extraída del ciclo natural, bien sea de un curso superficial, bien sea del medio subterráneo o de la utilización de embalses como medio regulador; transportada hasta las instalaciones donde será tratada para alcanzar niveles de calidad que permitan su distribución; utilizada para satisfacer el consumo humano; recogida en el sistema

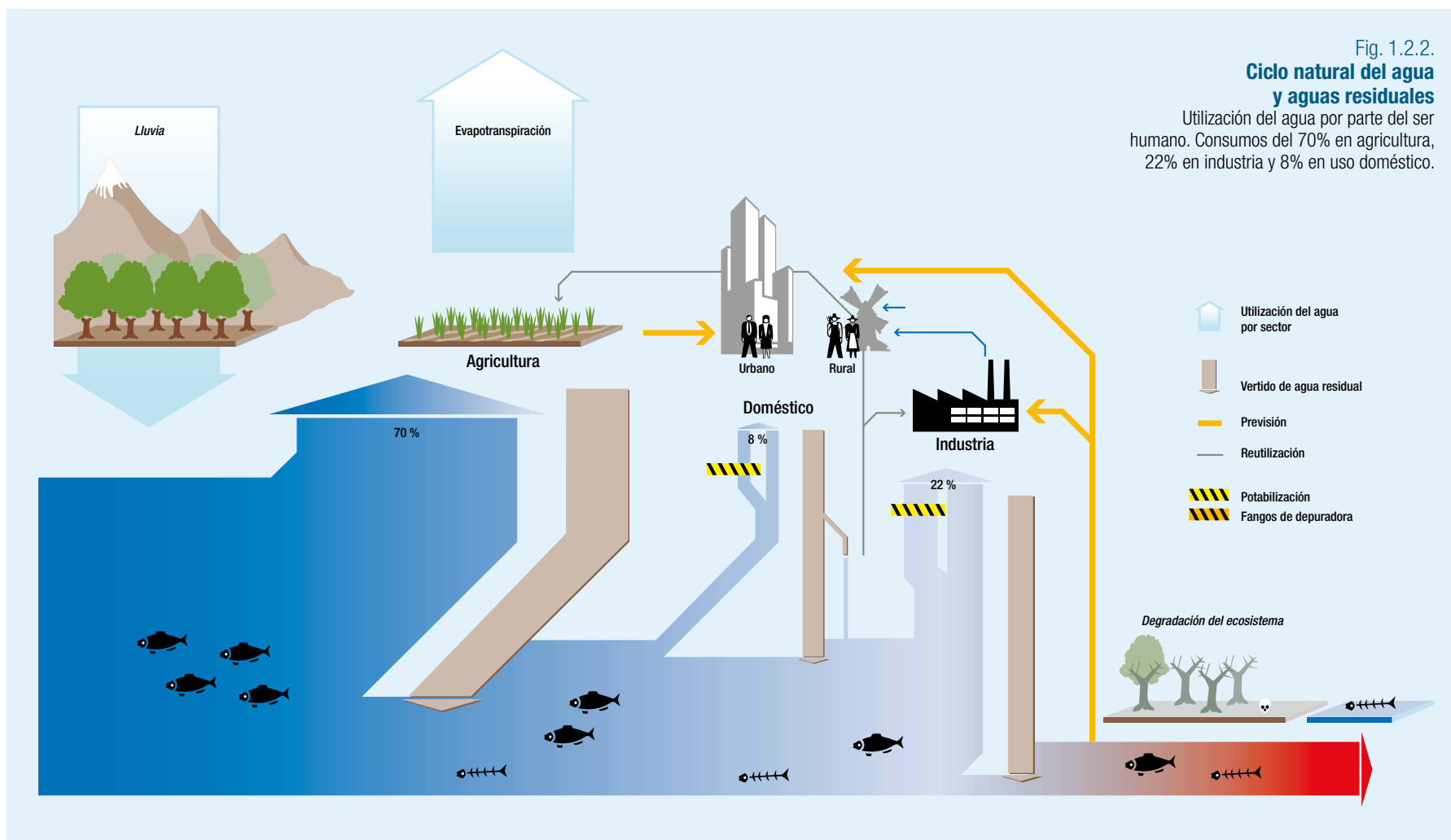
de alcantarillado; procesada para depurarla hasta alcanzar un nivel que permita su devolución al medio o su reutilización.

▼  
Figura 1.2.1.  
**Un esquema de ciclo antrópico del agua, propuesto por la Agència Catalana de l'Aigua.**



Fig. 1.2.2.  
**Ciclo natural del agua  
y aguas residuales**

Utilización del agua por parte del ser humano. Consumos del 70% en agricultura, 22% en industria y 8% en uso doméstico.



## La huella hídrica o huella del agua

**Anna Monistrol Térmens – Consultora medioambiental**

¿Han pensado alguna vez cuánta agua ha sido necesaria para preparar un simple café? La respuesta es 140 litros. Esta sorprendente cifra tiene el origen en el hecho de que este café ha sido cultivado en el campo de un país lejano, regado en su mayor parte con agua de lluvia, recolectado, lavado, clasificado, secado y descascarillado para obtener un grano limpio y, finalmente, tostado hasta conseguir un perfecto café torrefacto. Se calcula que el agua consumida en dicho proceso

es de 21.000 litros por kg de café. En consecuencia, para preparar una taza de unos 7 gramos, se precisan 140 litros.

Estas y más cuestiones son las que intenta medir la huella hídrica, un indicador del volumen de agua utilizado para producir bienes y servicios de forma directa e indirecta el consumidor, productor y comercializador. Se contabiliza como el agua consumida, evaporada y/o contaminada por unidad de tiempo y suele ser calculada por un grupo de consumidores (individuo, familia, ciudad, país) o productores (organizaciones públicas, sectores económicos, empresas privadas). En la huella del agua se distingue entre el agua azul (agua natural fresca que circula por la superficie de la tierra o por los acuíferos), el agua verde (agua de lluvia en superficie) y el agua gris (agua contaminada asociada a la producción). Según datos de Waterfootprint Network:

- Producir una manzana requiere 70 litros de agua, 1 taza de café 140 litros, 1 kg de arroz 3.400 litros y 1 kg de ternera 15.500 litros.
- El promedio mundial de la huella hídrica es de 1.240 m<sup>3</sup> por habitante al año. Un 74% es agua verde, el 11% agua azul y el 15% restante agua gris. La producción agrícola contribuye con el 92% a este total.
- La huella hídrica de los españoles es de 2.325 m<sup>3</sup> por habitante al año y alrededor del 36% de esta se origina fuera de España. Es un país importador de agua.
- La suma de los flujos de agua virtual entre países relacionados con el comercio del café es de unos 80.000 millones de m<sup>3</sup>/año, que representan aproximadamente el 6% de los flujos de agua virtual internacional en el mundo.

La huella del agua es un indicador explícito desde el punto de vista geográfico, ya que no sólo muestra los volúmenes de utilización del agua y su contaminación, sino también los lugares donde se originan los mismos. Muchos países han externalizado de forma significativa su huella hídrica al importar bienes de otros lugares que requieren un alto contenido de agua para su producción. Este hecho genera una importante presión sobre los recursos hídricos de las regiones exportadoras, a menudo sin mecanismos para el buen control y conservación de estos. De hecho, muchos de estos problemas están íntimamente relacionados con la estructura económica mundial. Ser consciente de los datos de consumo del agua puede ayudar a gobiernos, empresas, consumidores y a la sociedad en general a racionalizar la gestión de los recursos hídricos del planeta.



## 1.3 Un poco de historia...

Aunque los seres humanos hemos generado aguas residuales desde que existimos, seguramente no es hasta que las concentraciones humanas alcanzan determinadas dimensiones, al igual que la problemática asociada a las mismas (y a las actividades que simultáneamente se van realizando) que el tema empieza a preocupar. Quizá por ello no es sorprendente que la bibliografía referente a historia del saneamiento sea mucho más reducida que la referente a la obtención y gestión del recurso del agua en general.

### El primer concepto de sistema de saneamiento de las aguas residuales fue sacarlas de los núcleos de población

Construida en el año 600 a.c., se encuentran datos del mantenimiento y funcionamiento de la Cloaca Maxima hasta más allá de la caída del Imperio Romano de Occidente, hecho que tradicionalmente marca la entrada a la Edad Media.

Parece claro que el primer objetivo era alejar de la población aquello que era ofensivo para la vista y el olfato, opción que al mismo tiempo tenía consecuencias de mejora sanitaria para sus habitantes.

Aunque se han encontrado restos arqueológicos en civilizaciones como Mesopotamia, Egipto o la Grecia clásica, no parece aventurado indicar que, en Occidente, la historia de los sistemas de saneamiento no difiere mucho de la historia de la civilización, y como en tantos otros aspectos los romanos, aunque no fueran los inventores de los sistemas de gestión de las aguas residuales, con sus desarrollos en ingeniería y en arquitectura urbana, marcan un antes y un después.

Ello no debe sorprendernos. En la Roma antigua el agua era parte nuclear de su cultura y organización social, así que sus ingenieros sobresalieron en las construcciones para recogerla, transportarla, dis-

tribuir y, también, evacuarla. La Cloaca Maxima, de la cual todavía se puede ver su salida al río Tiber, a la altura del puente Rotto y el Palatino, es un magnífico ejemplo de construcción pensada para la evacuación, de la misma manera que el acueducto de Segovia o los baños de Bath lo son del transporte o de su uso.

### ... en la historia del saneamiento la Edad Media se prolonga casi hasta el siglo XIX

Habitualmente se considera la Edad Media como el período que se extiende desde la caída de Roma hasta la de Constantinopla en el año 1453, pero quizá sería más adecuado decir que, en la historia del saneamiento, la Edad Media se prolonga casi hasta el siglo XIX. Muchos de los avances que se habían producido durante la civilización romana, así como gran parte de las construcciones que la soportaban, caen, en este período, en el olvido. De alguna manera, hasta mediados del siglo XVIII la limpieza “prescinde” del cuerpo, excepto en aquellas partes visibles como cara y manos. Es más, se llega a considerar que el agua es poco saludable e incluso que la higiene es pecaminosa. Esta percepción limitó el desarrollo de técnicas para su gestión. En lo que ahora conocemos como Europa, las calles eran las vías por donde circulaban las aguas residuales, que añadido al incremento de la densidad de la población urbana, favoreció las grandes epidemias que asolaron el continente durante la Edad Media. Si bien se podría considerar que esta era la situación generalizada, también habría que citar que se pueden encontrar excepciones como el *Statuti delle Strade e dell'acquae del contado di Milano* (1346), que dedica una buena parte a la problemática de los pozos negros, el edicto de Villers-Cotterets (1539) o la profesión de “gongfermors” de Londres, que tenía su propia regulación.

Un punto y aparte de este panorama lo representan en España los territorios ocupados por los musulmanes, ya que en la cultura islámica, como en el caso de Roma, el agua tenía una especial importancia, incluso desde un punto de vista religioso, ya que forma parte del ritual de purificación antes de las oraciones. El Islam, en tanto que sistema de organización social originario de zonas desérticas, había ido creando un corpus legislativo alrededor del uso y propiedad del agua, sobre todo para el regadío y la bebida (tanto de personas como de animales), pero también para la evacuación de las residuales. La relevancia del tema se pone de manifiesto en la existencia de gremios especializados en las conducciones urbanas de distribución y desagüe. En Fez, una de estas corporaciones todavía estaba en funcionamiento en la primera mitad del siglo XX. Parece ser que el sistema de evacuación de aguas residuales en este contexto se basa en la división de las aguas a recoger en pluviales y residuales. A cada uno de los dos tipos le corresponde una canalización y conducción diferentes.

La pervivencia del sistema organizativo después de la conquista se puede ver, por ejemplo, en la redacción de las Ordenanzas de las Aguas de Granada de 1501. Como tantas otras ordenanzas de la época, la atención principal se centraba en el uso del agua para regadío, para lo que se establecen todo un conjunto de normas e instituciones, algunas de las cuales, como el Tribunal de las Aguas de Valencia, perviven hasta la actualidad, considerando de forma colateral la retirada de las aguas residuales.

El aumento de población que se había iniciado en la segunda mitad del siglo XVIII se intensificó en la segunda mitad del XIX, en la que Europa pasó de tener 170 millones de habitantes en 1800 a 300 millones en 1870, concentrados cada vez más en las ciudades, lo que, acompañado del crecimiento de la industria, acabó por saturar los sistemas existentes de evacuación de las aguas





residuales, mostrándolos claramente obsoletos. Las epidemias de cólera y tífus que asolaron repetidamente Europa entre 1830 y 1870, con un punto importante en el *Great Stink* (Gran Hedor) de 1858 en Londres, llevaron indefectiblemente a una revisión del sistema de gestión de las aguas residuales. De alguna manera se pasaba de un sistema descentralizado a un sistema centralizado de recogida y tratamiento.

En este contexto, la ciudad de Londres fue una de las pioneras en la búsqueda de soluciones gubernamentales para los problemas de salud pública derivados de las aguas fecales. Pero no sólo concibiéndolo como un problema de salud pública, sino también de costes. E. Chadwick, miembro de la Metropolitan Commission of Sewers de Londres, creía firmemente que era necesario mejorar la salud pública para ahorrar. Su informe, *The Sanitary Condition of the Labouring Population* (1842), marcó un punto de inflexión en las consideraciones sobre salud pública, y entre sus conclusiones destaca la necesidad de buscar la ayuda de la ciencia de los ingenieros, no sólo la de los médicos. Esta “nueva” tendencia desembocó en el diseño de nuevas redes de alcantarillado, en Europa y en Estados Unidos. Así podemos encontrar la de Hamburgo en 1843, la de Chicago en 1850, la de París en 1853 o la de Londres en 1858.

Pero de nuevo fue un inglés el primero en formular una teoría consistente sobre el modo de transmisión de determinadas enfermedades. En 1849 el Dr. Snow publicaba por primera vez su obra *On the mode of Communication of Cholera* (reeditada el 1855, mejorada después de un trabajo de campo realizado a partir del brote de cólera de 1854). En esta obra el Dr. Snow demostró que había una correlación entre enfermos y la zona donde habían bebido agua.

La construcción de los sistemas de alcantarillado llevó implícito otro debate: el



▲ *“Respecto a las muertes de la localidad, en 61 casos se me informó que los fallecidos bebían del agua de la bomba de la calle Broad Street de forma habitual o esporádicamente... El resultado de la investigación concluyó que no había ningún brote de cólera en esta parte de Londres a excepción de las personas que tenían la costumbre de beber agua de la mencionada bomba. Tuve una entrevista con las autoridades de la parroquia de St. James la tarde del 7 de septiembre, y les presenté las circunstancias anteriormente mencionadas. Consecuencia de dicha reunión, el mango de la bomba se retiró al día siguiente.”*

**John Snow**, carta al director de la revista *Medical Times and Gazette*

uso de un sistema unitario en el que las aguas pluviales y residuales utilizan las mismas conducciones, o el de un sistema separativo, en el que se utilizan diferentes conducciones para la recogida de las aguas pluviales y de las aguas residuales. Este debate ha ido teniendo partidarios y detractores de ambas opciones y, en nuestra opinión, todavía está vigente. Seguramente porque es un debate en el que hay factores a favor y en contra de cada una de las opciones que van evolucionando con el tiempo, de acuerdo con aspectos como la sensibilidad ambiental, los costes relativos de las diferentes opciones y la interrelación con otros aspectos de la sociedad, como el tipo de urbanización que se va desarrollando.

Un ejemplo interesante es el de los Estados Unidos, donde a finales del siglo XIX

la mayoría de los sistemas implementados eran de tipo unitario, hasta que a principios del siglo XX se produjo una revalorización de los de tipo separativo. En buena medida este cambio fue motivado por el crecimiento demográfico y el incremento de urbanización de algunas áreas que, de nuevo, dejaron obsoletos los sistemas de alcantarillado que se estaban utilizando hasta el momento, y que eran insuficientes para absorber las cantidades de agua residual vertidas. El sistema unitario, simplemente, estaba transportando las molestias y los riesgos de salud pública de las áreas urbanas a otras áreas.

Pero la construcción de los sistemas de tratamiento de agua de boca y de aguas residuales eran caros y pocas municipalidades podían asumir los costes. El debate sobre la bondad de construir los dos tipos de instalaciones o solamente la primera, asumiendo que era suficiente para garantizar la calidad del agua de boca, fue encarnizado y con diferentes defensores y detractores, hasta que, este sí, fue decantándose claramente por la necesidad de la realización de los dos tipos de instalaciones, no sólo desde el punto de vista de la salud pública, sino por la presencia de un nuevo actor en el sistema, como fue el medio ambiente. A partir de aquí puede considerarse que se inicia una nueva etapa en los sistemas de saneamiento, con el desarrollo de un conjunto de tecnologías de tratamiento que de alguna manera son las que han llegado hasta nuestros días.

La preocupación por proteger el agua de boca de la posible contaminación por parte de los sistemas de recogida de las aguas residuales, comenzó a ser el aspecto de la calidad del agua que más impacto tuvo a finales del siglo XIX y principios del XX

## 1.4 Análisis de la evolución

Del concepto inicial de saneamiento –para reducir la cantidad de agentes productores de enfermedades– se ha ido pasando al de depuración –con la aparición de un nuevo actor, el medio ambiente–

La constatación de que el suministro público de agua era sólo una parte del problema sanitario que provocaba miles de muertes al año, y que se requería también un esfuerzo en el desarrollo de sistemas de saneamiento, se convirtió en un clamor cada vez mayor en Inglaterra. Un clamor que no sólo incidía sobre los sectores sociales más desfavorecidos que se veían afectados, sino que empezó a afectar a las clases dirigentes, que veían como ello representaba una limitación a la prosperidad económica. Como sigue ocurriendo actualmente, decisiones tomadas en el ámbito social condicionan los sistemas de saneamiento. Así, empiezan a aumentar las inversiones en este ámbito, de forma que a finales del siglo XIX, según Caldecott, una cuarta parte de la deuda de los gobiernos locales se debía a gastos relacionados con el agua y el saneamiento. Esta inversión se



trajo a nivel social en una disminución de la mortalidad infantil y en un aumento de la esperanza de vida.

Estas decisiones estratégicas implicaron a nivel técnico el desarrollo de nuevas tecnologías de saneamiento, que cristalizan en 1914 con la aparición del proceso de lodos activados –también conocido como fangos activados, o lodos activos– que se convierte en la referencia de los sistemas de tratamiento a partir de aquel momento, con diferentes modificaciones y variantes que llegan hasta nuestros días.

En esencia, el tratamiento de lodos activados constituye la puesta en contacto del agua residual con una población multiespecífica de microorganismos que utilizan la materia orgánica para transformarla en nueva biomasa, y en energía para el mantenimiento. Para ello, necesitan un aporte de oxígeno, proporcionado habitualmente por equipos mecánicos de aeración, con lo que se obtiene una disminución de la materia orgánica presente en el agua, y por tanto una reducción sobre el impacto en el medio receptor. Este contacto puede hacerse con los microorganismos en suspensión, en cuyo caso se requiere de una posterior etapa de separación, estableciéndose una recirculación de los microorganismos decantados, parte de los cuales son purgados del sistema. El exceso de biomasa generada y purgada del sistema necesita un tratamiento específico que implica el espesamiento, el acondicionamiento, la estabilización y la deshidrata-

ción, como procesos que se realizan en la propia estación depuradora, mientras que los procesos de secado final suelen realizarse en instalaciones específicas.

La bibliografía sobre la captación y el tratamiento de aguas residuales es extensa y queda lejos de un texto como el presente. Nos interesa aquí remarcar como estas tecnologías se han ido desarrollando en un proceso simultáneo con las preocupaciones que han motivado su evolución y los indicadores que se han utilizado para identificar el rendimiento de las mismas.

Así, de una preocupación inicial sobre los aspectos sanitarios (de los que deriva el nombre de sistemas de saneamiento) se ha ido evolucionando a aspectos ambientales, y las estaciones de saneamiento se han ido convirtiendo en estaciones de depuración, en las que ya no sólo importan los elementos patógenos, sino también los compuestos que pueden consumir oxígeno al ser vertidos. Una segunda evolución se produce respecto al impacto ambiental de los nutrientes, elementos consumidores de oxígeno, pero sobre todo posibles generadores de otros problemas ambientales como la eutrofización.

Ello ha implicado que los sistemas iniciales de lodos activados se hayan ido modificando para reducir las concentraciones de estos compuestos. Ya no se trata sólo de aportar oxígeno para oxidar la materia orgánica, ahora también hay que establecer zona anóxicas para alcanzar la nitrificación y la desnitrificación. Un aspecto interesante es que este proceso se ha llevado a cabo a lo largo del siglo XX y se pueden encontrar testimonios (como el que proporciona Willy Gujer) de personas que han ido viviendo esta evolución a lo largo de su carrera profesional.

Pero estos cambios se están viendo modificados por un nuevo salto, motivado por una nueva preocupación que conlleva unos nuevos indicadores y que está

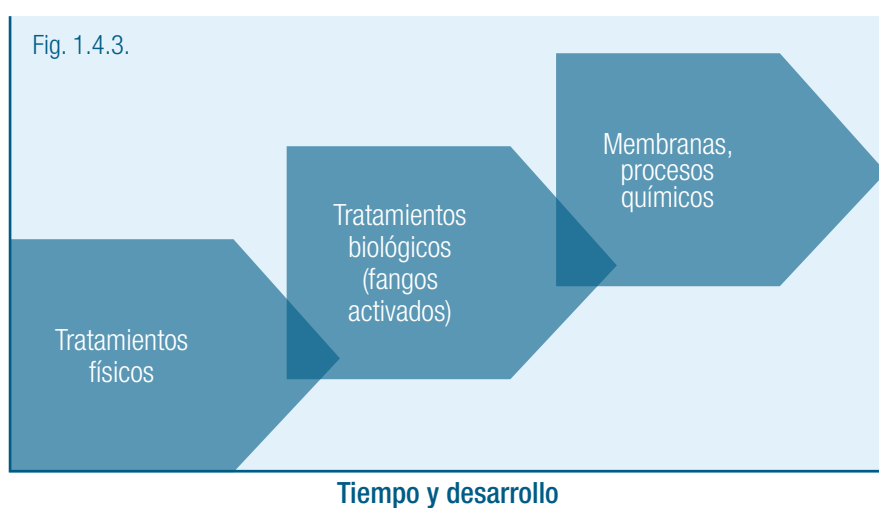
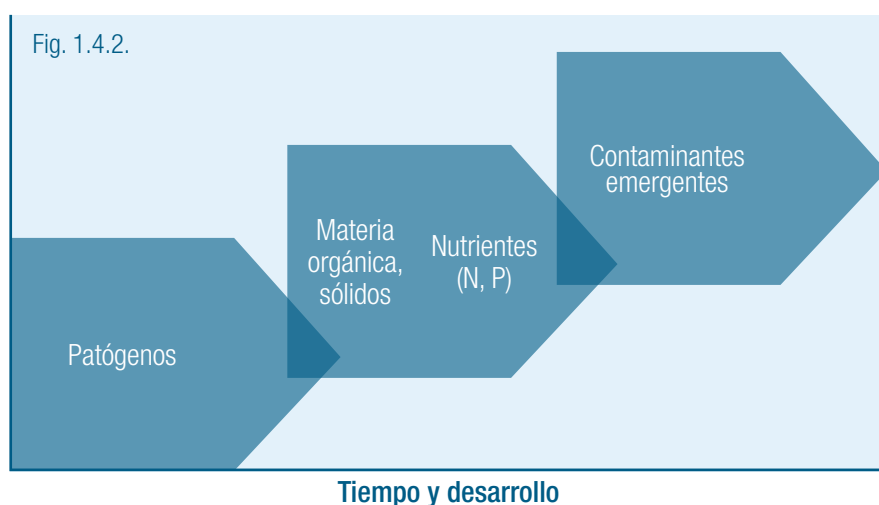
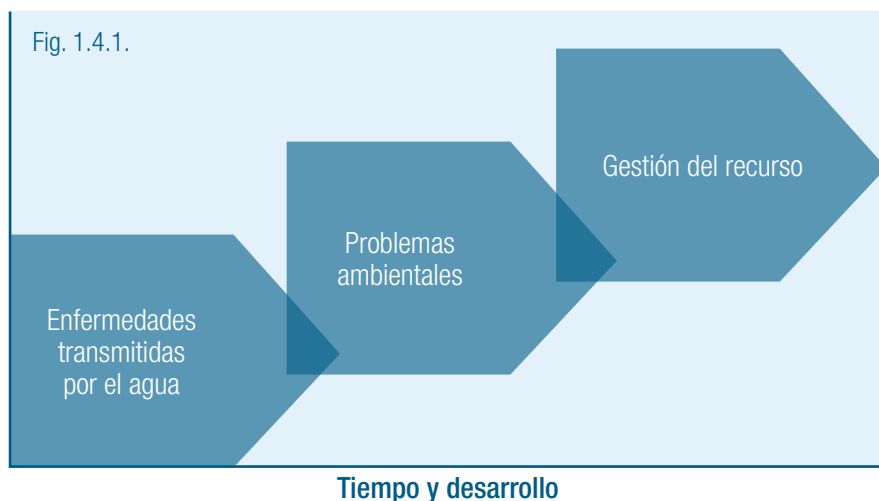
implicando la aplicación de nuevas tecnologías y en el que estamos implicados una nueva generación de profesionales. Una preocupación motivada por la evolución de la calidad de vida alcanzada en las sociedades industrializadas, donde el uso de productos químicos de síntesis para el cuidado de la salud, o simplemente como complemento de la higiene, motiva que aparezcan nuevos compuestos que no son fácilmente degradados en los procesos de lodos activos desarrollados a inicios del siglo XX. Hacen falta nuevas tecnologías, con nuevos procesos biológicos, con tratamientos químicos o con la utilización de membranas, que sean capaces de proporcionar mejores rendimientos, pero todavía con efectos colaterales de mayor complejidad y coste energético.

Las bases para un nuevo paradigma están servidas

►  
Fig. 1.4.1.  
**Evolución de los problemas abordados en el saneamiento**

Fig. 1.4.2  
**Evolución de los elementos a depurar**

Fig. 1.4.3  
**Evolución de las tecnologías**



**Miquel Rigola Lapeña, Universitat de Girona**

Como se ha visto en la revisión histórica, las sociedades más ricas de la antigüedad, agrupadas en ciudades densamente pobladas, organizaron sistemas de saneamiento destinados a alejar el inconveniente de excrementos que de otro modo eran acumulados en las vías de tránsito interior.

A la caída de Roma, la sociedad pierde el progreso conseguido, los pozos de agua potable se contaminan, y las calles de las ciudades se convierten en receptores inmundos de todo tipo de desechos y en focos de transmisión de enfermedades. Solamente las zonas rurales obtienen la parte beneficiosa de los excrementos aplicándolos a los campos de cultivo para recuperar los nutrientes y enriquecer los suelos.

En este contexto, podría situarse al siglo XIX como el inicio del actual paradigma de saneamiento de las aguas residuales, con los descubrimientos microbiológicos que hacen aparecer el concepto de higiene como base de una vida más saludable. Se recuperan los colectores urbanos como parte de la solución, pero cuando los grandes volúmenes de aguas negras son vertidos en los ríos, son estos los que se convierten en masas de agua insalubres, situación particularmente preocupante porque también son las fuentes de agua potable. Se inicia el proceso de potabilización de las aguas de consumo, pero el problema es demasiado grave para no comprender que los problemas han de ser resueltos en su origen.

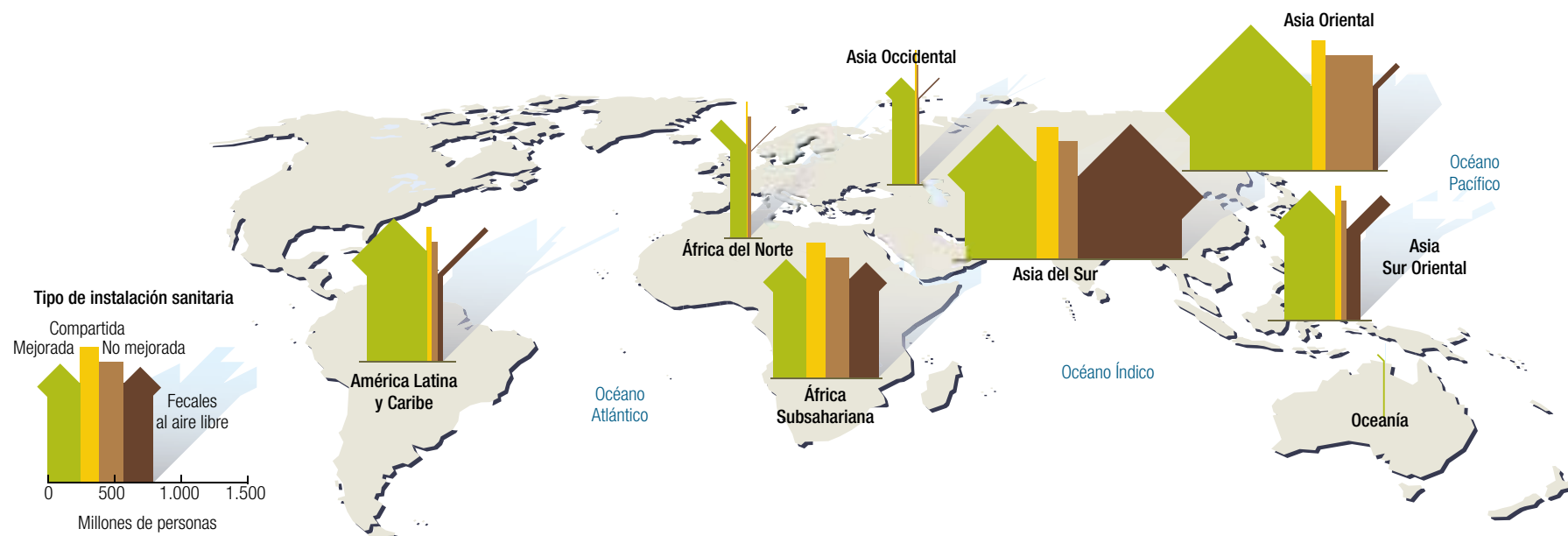
Empieza el desarrollo de una industria de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) donde se concentra la actividad, inicialmente de higienización, con el principal objetivo de eliminar los organismos patógenos y reducir al mínimo la materia orgánica soluble. Surgen así los sistemas de fangos activos. No sin sentido, las sociedades rurales se oponen inicialmente a un proceso que les priva de su fuente de nutrientes para fertilizar el campo.

En un segundo período, después de que se consigue controlar el problema de las enfermedades de transmisión microbiana, se hace evidente que los nutrientes residuales, principalmente los derivados del nitrógeno y del fósforo, originan otros problemas de tipo patológico para los humanos y muchos otros problemas ambientales, que no han sido eliminados por los procesos de fangos activos. Además, el desarrollo industrial es capaz de abastecer con nutrientes sintéticos a la agricultura y los nutrientes antrópicos no se consideran necesarios. Un nuevo elemento cultural lleva a la destrucción de estos nutrientes en los sistemas de saneamiento, aunque no tardará en ponerse de manifiesto el interés de su recuperación en una sociedad que ve cómo se agotan sus recursos naturales.

El siglo XX ha hecho proliferar las industrias de la salud y la higiene. Sus productos, como tales o sus metabolitos, llegan en cantidades progresivamente mayores a las aguas receptoras de los efluentes. Aparece en consecuencia una nueva preocupación que lleva a buscar métodos y tecnologías más eficientes para eliminar estas sustancias, pendientes de organizar las medidas preventivas. La acumulación de medidas correctoras convierte al sistema en un gran consumidor de recursos, que impide verlo como un gran resultado de racionalización y que requiere grandes esfuerzos de investigación para poder cerrar el ciclo del agua. Estas reflexiones son las que llevan al planteamiento de un nuevo paradigma del saneamiento.



## 1.5 El saneamiento, hoy



### No todos los países tienen el mismo nivel de saneamiento en el mismo momento

Actualmente, se pueden encontrar, simultáneamente, tres situaciones en nuestro planeta.

- Hay países cuyo principal problema es todavía evitar las enfermedades transmitidas por agua en malas condiciones. Hay que tener en cuenta que actualmente se cifran en 900 los millones de personas que no tienen acceso a agua potable en condiciones, y que 2.600 millones (aproximadamente la mitad de la población del tercer mundo) no tiene acceso a sistemas de saneamiento. Al menos 1,8 millones de niños menores de cinco años mueren cada año debido a enfermedades relacionadas con el agua (*water related diseases*) aproximadamente el 17% de las muertes en esta

edad. Cada año mueren 2,2 millones de personas por problemas diarreicos, de los que se calcula que el 88% son debidos a problemas de calidad del agua.

- Otros países se encuentran en estos momentos haciendo grandes esfuerzos para empezar a depurar sus aguas, eliminando en primera instancia la materia orgánica. Un ejemplo lo constituye la construcción de la planta de Atotonilco en México, en el estado de Hidalgo, que indican que será la mayor del mundo, con su capacidad para procesar 23 m<sup>3</sup>/s y 12 m<sup>3</sup>/s adicionales en condiciones de lluvia. Eliminará la materia orgánica, manteniendo los nutrientes en el agua.

- La tercera situación correspondería a aquellos países (por ejemplo la Unión Europea, Estados Unidos, Australia) que ya tienen mayoritariamente resueltos los problemas de conexión a sistemas de saneamiento de casi toda su población, que eliminan de las aguas residuales la materia orgánica, y en muchos casos los nutrientes. Países que en estos momentos están simultáneamente estudiando cual es el comportamiento de estos procesos para eliminar los contaminantes emergentes, y por otro lado están haciendo grandes esfuerzos en investigación para desarrollar nuevos procesos que puedan hacer frente de forma satisfactoria a este nuevo tipo de contaminación.



Fig. 1.5.1.

### Acceso a sistemas de saneamiento en el mundo

**Mejorada:** instalaciones que garantizan la separación higiénica de aguas fecales del contacto humano. Incluye la conexión a un sistema de alcantarillado, fosas sépticas o letrinas.

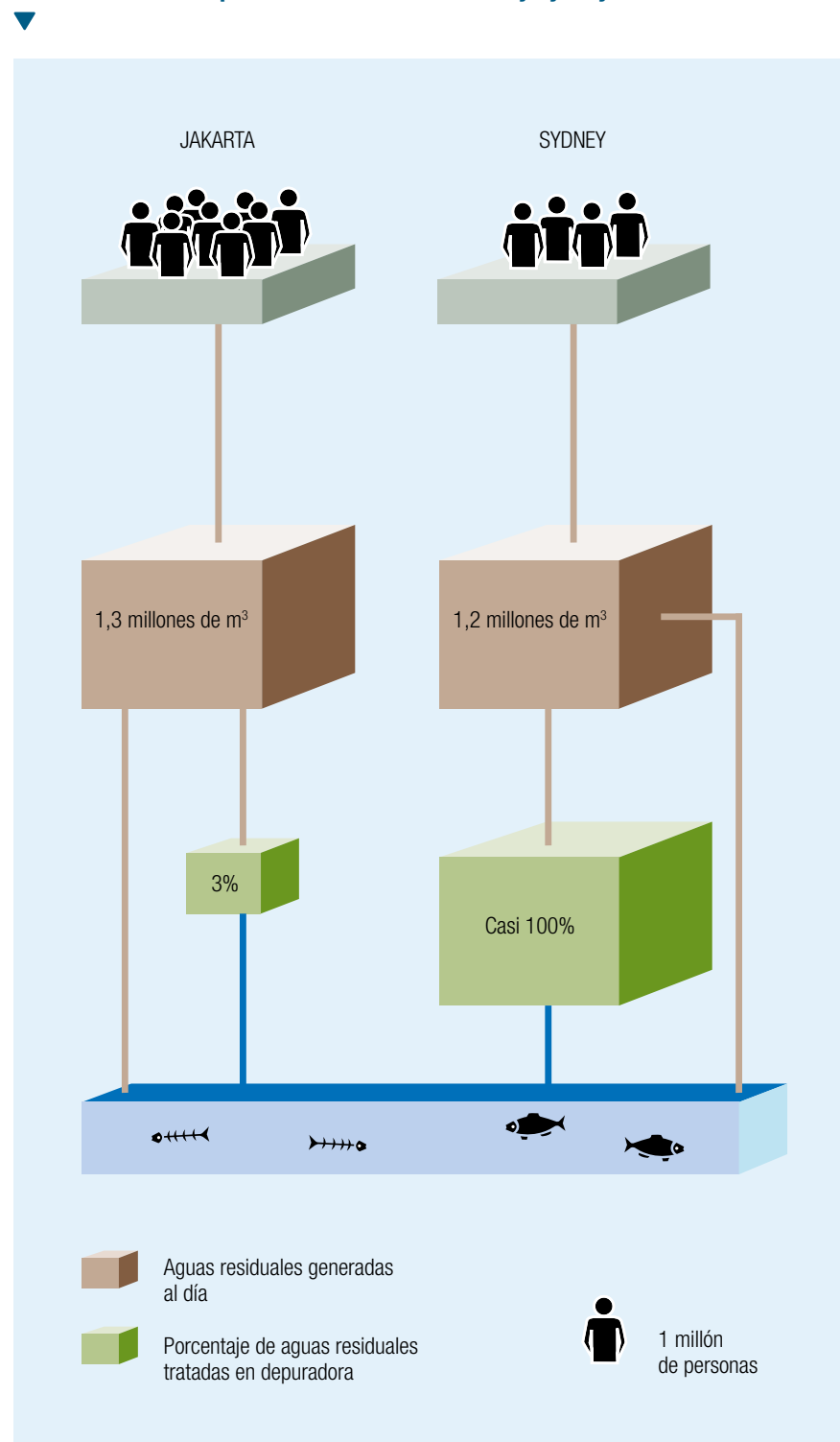
**Compartida:** servicios de saneamiento de algún modo aceptados y compartidos entre dos o más hogares.

**No mejorada:** instalaciones que no garantizan la separación higiénica de aguas fecales del contacto humano

**Fecales al aire libre:** en campos, bosques, en cursos de agua u otros espacios abiertos, vertidos como residuo sólido.

Actualmente, se pueden encontrar tres tipos de situaciones simultáneamente en nuestro planeta

Fig. 1.5.2. Un ejemplo de la diferencia de niveles de saneamiento se encuentra al comparar la situación de Jakarta y Sydney



## Cooperación

La existencia de diferentes niveles de desarrollo de los sistemas de saneamiento en diferentes zonas del planeta obliga a diferentes tipos de actuaciones. En el caso de los países con niveles más bajos de saneamiento se pueden distinguir dos tipos. Por una parte, actuaciones comerciales en las que las empresas del sector optan, en un mercado muy globalizado, por conseguir los correspondientes contratos que licitan estos países para mejorar sus infraestructuras. Por otra parte, la existencia de entidades públicas y organizaciones no gubernamentales que establecen proyectos sobre cómo abordar el tema del saneamiento de las aguas residuales partiendo del conocimiento alcanzado en los países con más experiencia, en un proceso que denominamos cooperación.

Mientras que las reglas en el primer apartado son claras y se encuentran reguladas por el mercado, el proceso de cooperación se halla en una situación más difusa. Partiendo de la mejor voluntad por ambas partes, el proceso no se encuentra libre de dificultades. Muchas veces la parte que tiene más experiencia se olvida de escuchar a la otra parte para identificar cuáles son sus verdaderos problemas (y no serán algunos de los autores de este libro los que tiren la primera piedra), intentando aplicar metodologías que pueden no ser válidas en el nuevo contexto. La experiencia nos indica que sólo a partir de un verdadero proceso de diálogo, con identificación de las problemáticas y posibilidades reales de actuación, con participación activa de los diferentes agentes, escuchando mucho por ambas partes, se pueden obtener resultados útiles. Y también nos indica que cuando ello se produce... el esfuerzo queda plenamente justificado.

# 1.6 Tendencias de futuro. ¿Cambios incrementales o un nuevo paradigma?

En estos momentos se están produciendo diferentes presiones sobre los sistemas de saneamiento, que pueden abordarse de forma individualizada, produciendo cambios incrementales:

- Modificación de las normativas de calidad del agua a la salida del sistema de saneamiento para incorporar los contaminantes emergentes, especialmente aquellos productos derivados del consumo de medicamentos y aseo corporal, con el consiguiente desarrollo de tecnologías que permitan incrementar el tratamiento de estos contaminantes.
- Cambio del concepto de depuración al de regeneración. Que el usuario final del agua (el cliente, en palabras afortunadas de un gestor de sistemas de saneamiento) ya no es sólo el río o

el medio receptor, sino que aparece un nuevo agente que es el reutilizador. Se empieza a cerrar el ciclo. El agua ya no vuelve al medio una vez utilizada y saneada/depurada, sino que se destina a usos antrópicos como agricultura, usos ornamentales, riego de jardines y campos de golf, recarga de acuíferos, y para consumo humano.

- Consideración de la problemática de las aguas de lluvia en los sistemas de alcantarillado para reducir su impacto, al tiempo que se mejora el conocimiento de estos sistemas para reducir problemas de olores y corrosión.

A la hora de tomar decisiones hay que tener en cuenta, sin embargo, que estos cambios no son gratuitos.

- a) Cada vez que se incorpora un nuevo indicador al proceso de tratamiento, éste se vuelve más complejo y provoca un aumento de consumo de productos y energía, y sobre todo la aparición de subproductos en el proceso de tratamiento. Un ejemplo claro lo constituyen los fangos generados en el proceso biológico de tratamiento. Las inversiones para tratar los fangos pueden llegar a ser superiores a los de la línea de agua.

Ello crea una situación en la que algunos de los problemas se van resolviendo parcialmente pero derivándolos, cuando no aumentándolos, hacia otros impactos (incremento del consumo de energía, generación de subproductos,...).

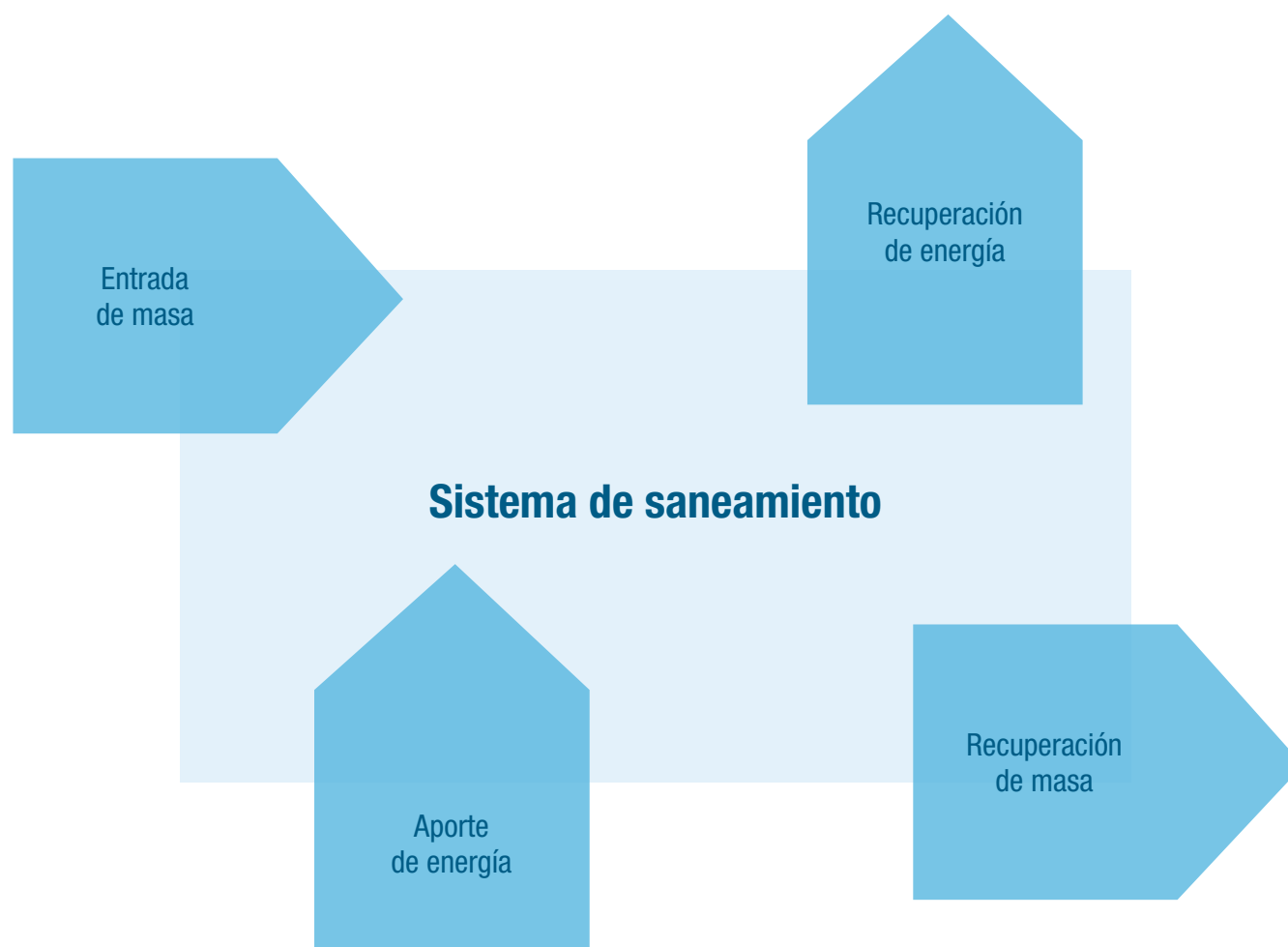
“El reto en aguas residuales no es sólo una amenaza, sino un desafío en el que podemos encontrar oportunidades en empleo, bienestar social y salud”

*Su alteza real el príncipe Willem-Alexander de los Países Bajos*  
Presidente de la Junta General Asesora en Agua y Saneamiento de las Naciones Unidas

- b) El impacto ambiental que incide sobre aspectos como la energía, el cambio climático o la huella del carbono.
- c) Que el agua puede reutilizarse, pero a medida que se incrementa el número de ciclos en los que interviene, la concentración de elementos recalculantes al saneamiento aumenta. Simultáneamente, el agua residual contiene elementos y compuestos que pueden incorporarse a otros ciclos (caso del nitrógeno para cultivos...) y esto se pierde en los actuales procesos de tratamiento. Estamos gastando energía para pasar los compuestos de nitrógeno a  $N_2$  gas, mientras que después gastamos energía para conseguir fertilizantes.







## Recuperación de recursos, no tratamiento de un residuo



Figura 1.6.1.

Este esquema nos introduce en el que puede ser el nuevo paradigma del ciclo del agua urbano: considerar el agua residual, no tanto como un problema, sino como un recurso. Hay que plantearse no sólo la reutilización del agua, sino simultáneamente su interrelación con la energía y otros ciclos de la naturaleza (carbono, nitrógeno, fósforo...). No es sólo un tema de agua, es un problema económico, ecológico y social.

### Nuevo paradigma

La constatación de que abordar los problemas individualmente no es la solución, sino que estamos en un momento en el que los cambios incrementales han de ser sustituidos por un nuevo paradigma, es una realidad que se va imponiendo. Existen, sin embargo, diferentes consideraciones de cuáles pueden ser los elementos impulsores de este nuevo paradigma:

- Algunos autores consideran tres elementos clave, relacionados fundamentalmente con aspectos de urbanismo y gestión de flujos del agua: gestión descentralizada, reutilización y gestión en tiempos de lluvia.
- Otros expertos consideran que el cambio de paradigma puede venir ocasionado por la separación en origen. Una idea que ya hace tiempo que se viene proponiendo, en la que ya hay trabajo hecho y afecta incluso al diseño de los cuartos de baño. En nuestra opinión, en este caso se trata de un cambio significativo, no sólo por las implicaciones de cambio de cantidad y concentración de contaminantes en el agua residual a la entrada de la planta, sino que es la primera vez que se plantea un cambio estructural de final de tubería a actuación en origen.
- Otros expertos consideran en el cambio de paradigma aspectos de calidad, entre los que incluyen el tratamiento de los contaminantes emergentes como una nueva etapa lógica, después del tratamiento de la materia orgánica y los nutrientes.

- Sin duda, un aspecto a considerar también es la relación saneamiento-energía. En nuestra opinión, esta cuestión está planteada actualmente de forma demasiado parcial, centrándose únicamente en la reducción de energía consumida, en lugar de un balance más integral.

Estos elementos están modificando nuestra concepción del tratamiento del agua residual. Sin embargo, siguen manteniendo el concepto del agua residual como elemento que debe ser tratado como un residuo, en lugar de considerarlo como una fuente de recursos. Hay que considerarla no sólo como elemento residual a tratar, sino también como elemento proveedor de recursos (no sólo agua).

En nuestra opinión, el auténtico cambio de paradigma en los próximos años será el que se sintetiza muy bien en una expresión (el idioma inglés permite expresiones sintéticas muy afortunadas) que va ganando adeptos, como se puede constatar en algunos foros de internet: "resource recovery, not wastewater treatment".

Esta expresión plantea que el agua residual debe ser considerada, en su conjunto, como un recurso no solo de cantidad de agua, sino de sus constituyentes. Es decir, un sistema en el que se produce una entrada de recursos (humanos, energéticos, materia) y en el que se obtiene una recuperación de materia (agua, materia orgánica, nutrientes) y de energía. Un nuevo paradigma con un balance más sostenible que el actual.

# 2 Decisiones



En el capítulo anterior se ha constatado la necesidad de disponer de herramientas que ayuden a la toma de decisiones en el tema del saneamiento del agua. Para desarrollar estas herramientas, y que puedan ser útiles posteriormente en su aplicación al mundo real, parece necesario empezar primero a definir qué entendemos por decisiones y analizar cómo estas decisiones son tomadas tanto a nivel individual como colectivo. En el caso de las decisiones a nivel individual, se reflexiona sobre el procedimiento que seguimos los humanos, tanto desde un punto de vista conceptual, como incorporando esquemas para la definición de sistemas inteligentes computacionales. El segundo aspecto que se ha querido contemplar ha sido cómo se produce la toma de decisiones en sistemas autoorganizados que corresponden a los llamados sistemas emergentes. Con esta información previa, se pasa a analizar los tipos de decisiones que se toman alrededor de los sistemas de saneamiento o que influyen en ellos. Se propone una clasificación en tres niveles que implican decisiones de diferente impacto. Finalmente, se analizan las interrelaciones entre los niveles establecidos, para proponer, en los capítulos posteriores, herramientas que han sido capaces de ayudar a la decisión en los diferentes niveles.



## 2.1 ¿Qué es una decisión?

*El impulso de buscar causas es innato en el alma del hombre*

L. Tolstoi

Una *decisión* (del latín “decidere”, cortar) es el producto final de un proceso cognitivo que implica la elección de sólo una acción u opción de entre un conjunto de posibilidades o alternativas que son excluyentes entre sí y no necesariamente conocidas *a priori*. Esta elección puede ser o no consciente. Las decisiones pueden ser individuales o colectivas y, además, pueden ser tomadas por una máquina inteligente o un conjunto de ellas y, también, por colectivos donde interactúan individuos y máquinas.

El hecho es que tomamos muchas decisiones a lo largo de un día sin apenas darnos a pensar en ello: ¿vino tinto o vino blanco? ¿a la izquierda o a la derecha? Otras requieren un esfuerzo que requiere de nuestra mayor concentración para no errar en la elección ¿chocolate o rosas? ¿Barça vs Real Madrid o ir al teatro? La cantidad de tiempo que alguien requiere para tomar una decisión afecta al tipo y calidad de la información que utiliza para tomar esa decisión. Es decir, los individuos que tratan de tomar decisiones rápidamente utilizan aspectos fácilmente disponibles en el entorno para tomarlas o basados en su experiencia previa. Lo interesante, en este punto, es que algunas decisiones se pueden tomar de forma acertada si se hace rápidamente. Por ejemplo, a menudo somos capaces de hacer buenos juicios acerca de una persona después de una breve exposición. Si nos *gusta* al principio, entonces probablemente continuará gustándonos. Pasar mucho tiempo pensando en si nos gustaría no es probable que mejore nuestro juicio o lo haga más preciso.

Por otro lado, si alguien está evaluando una situación donde las características importantes pueden quedar ocultas entre miles o millones de datos, entonces

hacer un juicio rápido no es tan buena idea. Esto requiere una búsqueda y procesamiento de la información cuyo resultado sea una pieza de información de mayor calidad que permita hacer una elección más mesurada. La pregunta subyacente es ¿cómo desarrollamos esa capacidad que nos permite *decidir* si pensar o no pensar ante la situación de tomar una decisión? En esta situación aparecen también otros componentes que informan a los mecanismos de decisión en forma de criterios, como son la certeza, el riesgo y la incertidumbre.

- La *certeza* indica que se sabe con seguridad cuál es el efecto de una acción. Esto implica un conocimiento ideal de una situación y su evolución.

Los dos siguientes aspectos implican que el tomador de decisiones tiene un conocimiento incompleto de la situación. Se utilizan en entornos competitivos y no competitivos. La teoría de toma de decisiones se ha centrado en el desarrollo de métodos y criterios para abordar la toma de decisiones en estos entornos.

- El *riesgo* indica que no se sabe qué ocurrirá tomando ciertas decisiones, pero sí se sabe que ocurrirá y cuál es la probabilidad de ello.
- La *incertidumbre* indica que no se sabe qué ocurrirá tomando ciertas decisiones, pero sí se sabe que ocurrirá entre varias posibilidades.

A modo de resumen, podemos decir que una decisión, que es un objeto mental, puede ser tomada para ser ejecutada como una tarea y así modificar el entorno en el que se ejecuta dicha tarea. Conforme aumenta la complejidad del proceso que se quiere controlar, aumenta también la complejidad de las decisiones

y la forma en que éstas se toman. Así, el proceso de toma de decisiones es un proceso de razonamiento o emocional que puede ser racional o irracional, que puede estar basado en suposiciones explícitas o tácitas y que permite a los individuos y/o colectivos alcanzar las metas que les permiten interactuar con el entorno o con otros individuos y colectivos de forma exitosa y, por extensión, sobrevivir.

En nuestro caso, lo que interesa estudiar son los procesos racionales que llevan a un individuo, a una máquina o a ambos trabajando juntos, a tomar una decisión de la que diremos que es *racional*. Para poder actuar de forma racional a la hora de tomar una decisión es necesaria la clara comprensión de los cursos alternativos mediante los cuales se puede alcanzar una meta u objetivo de acuerdo a las circunstancias y limitaciones existentes. Se necesita también la información y la capacidad para analizar y evaluar las alternativas plausibles de acuerdo con la meta deseada o establecida. Por último, se necesita tener el deseo de llegar a la *mejor* solución mediante la selección de la(s) alternativa(s) que satisfaga(n) de un modo más efectivo el logro de la meta. Dicha eficiencia a la hora de tomar decisiones medioambientales debe de ser respetuosa con el entorno natural, cumplir con la legislación vigente y óptima desde el punto de vista económico y social.

La complejidad inherente a los problemas ambientales, en términos de información, no sólo la actual sino también la histórica acumulada, los posibles impactos en el entorno y en términos económicos, hacen necesaria la aparición de sistemas automáticos de toma de decisiones. Aun usando estos sistemas, en la mayor parte de los casos no se pueden analizar todas las alternativas incluso con las técnicas analíticas y las computadoras más modernas disponibles, así que el objetivo es converger hacia a las soluciones más aceptables posibles.

### ¿Quién toma las decisiones?

La toma de decisiones en una organización alcanza a cuatro funciones vitales, que son: planificación, organización, dirección y control. Para nuestro estudio, es de particular relevancia, asimismo, la función de selección de misiones y objetivos, así como de las acciones para cumplirlas. Esta función permite fijar los objetivos a corto y largo plazo de los sistemas de saneamiento, así como las estrategias para alcanzarlos. Además, asumiremos que las decisiones que se pueden tomar están limitadas por *a)* la información y conocimiento disponible, *b)* la capacidad de cálculo disponibles, *c)* el tiempo en que debe ser tomada la decisión para que sea útil, es decir, el tiempo disponible para construir un conjunto de alternativas válidas de entre las cuales escoger la solución, y el tiempo necesario para decidir. Este proceso se denomina racionalidad limitada y fue introducido por H. Simon; permite escoger un curso de acción que sea satisfactorio o lo bastante bueno, dadas las circunstancias, es decir, dentro de los límites de la *racionalidad* y de acuerdo con el tamaño y la naturaleza de los riesgos implícitos.

En los entornos ambientales hay dos posibles opciones sobre quién toma las decisiones, que a su vez dan lugar a dos aproximaciones para poder proporcionar herramientas los sistemas de ayuda a la decisión, y que serán las consideradas en los dos próximos temas.

La primera es aceptar la existencia de un agente central que toma las decisiones en el ámbito del agua. La Administración, representada en muchos casos por una Agencia del Agua, que puede abarcar todo el territorio o una unidad de gestión determinada, normalmente una cuenca. En este caso hay un único ente que toma las decisiones o *decision maker* que en su proceso de decisión tiene en cuenta a los diferentes actores que intervienen

en el proceso. Actores que se encuentran incorporados de alguna manera en los órganos consultivos o de gestión de la Administración.

En el segundo caso, la aproximación por la que se puede optar es que haya diferentes agentes interaccionando, cada uno con sus propios intereses, y con la voluntad (y de alguna manera la capacidad) de modificar el comportamiento global de todo el sistema. En la situación extrema, el sistema podría ser considerado como una amplia red de componentes, sin un elemento central de control y con unas reglas simples de operación que proporcionan un comportamiento colectivo complejo.



Figura 2.1.1.

Existe una relación entre la cantidad de información y la relevancia de las decisiones, pudiéndose establecer una gradación en la que se van elaborando los elementos de cada uno de los escalones para alcanzar el nivel superior.

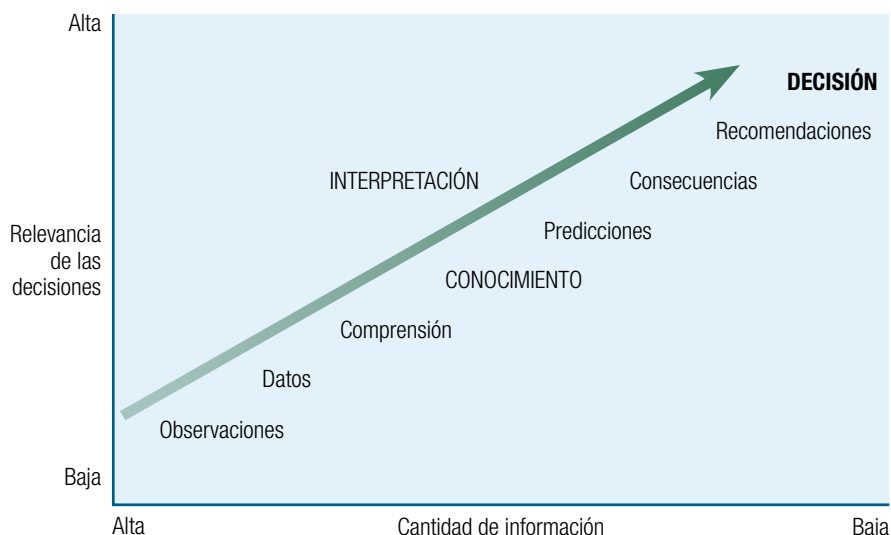
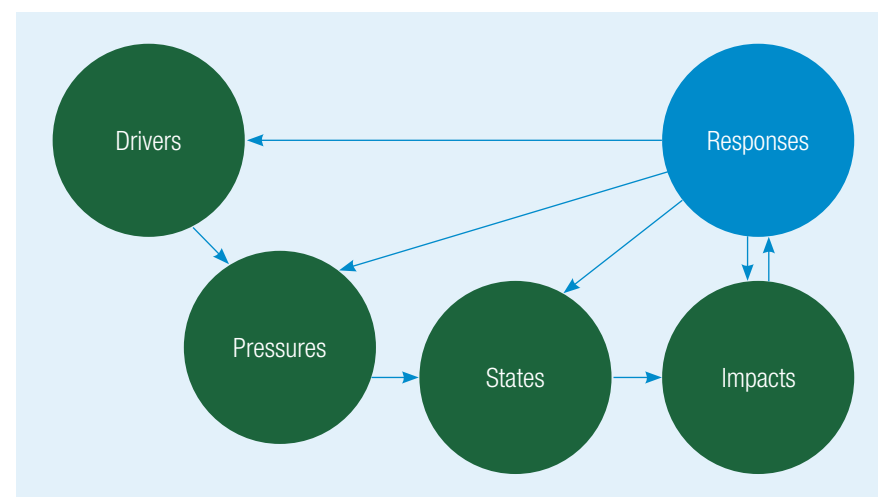


Figura 2.1.2.



## DPSIR. Un marco genérico propuesto por la Agencia Europea del Medio Ambiente para ayudar a estructurar el proceso de decisiones

La propuesta de este marco se basa en poner en relación la tarea de la toma de decisiones con diferentes elementos que la condicionan. Así, es necesario evaluar las fuerzas (Drivers) que actúan, sus presiones (Pressures) ambientales, las consecuencias sobre las variables de estado (States) y su impacto final (Impacts). De este último análisis sobre los impactos deben determinarse las respuestas (Responses) apropiadas para dirigir el efecto final en la dirección deseada (la reducción del daño ambiental).

**DRIVERS (D)** o fuerzas impulsoras: Son las fuerzas motrices como necesidad. En el caso de los sistemas de saneamiento, la necesidad de alcanzar un buen estado ecológico del medio de la forma más sostenible, con el mínimo impacto (o máximo beneficio) social, económico y ecológico.

**PRESSURES (P)** o presiones: Son las presiones sobre el medio ambiente que ejercen las actividades humanas como resultado de los procesos de producción o de consumo. Se pueden dividir en tres tipos principales: (i) el uso excesivo de los recursos ambientales,

(ii) cambios en el uso de la tierra, y (iii) las emisiones (de productos químicos, residuos, radiaciones, ruido) en el aire, el agua y el suelo.

**STATES (S)** o estados: Como resultado de las presiones, el estado del medio ambiente se ve afectado, en los diferentes vectores ambientales (aire, agua, suelo, etc.), y relación con sus funciones en el ecosistema.

**IMPACTS (I)** o impactos: Los cambios en el estado físico, químico o biológico del medio ambiente determinan la calidad de los ecosistemas y el bienestar de los seres humanos. En otras palabras, los cambios pueden tener impactos ambientales o económicos sobre el funcionamiento de los ecosistemas, sus sistemas de soporte vital, y en última instancia sobre la salud humana, social y económica de una sociedad.

**RESPONSES (R)** o respuestas: Una respuesta por los responsables de la sociedad o la política es el resultado de un impacto no deseado y puede afectar a cualquier parte de la cadena entre las fuerzas impulsoras y los impactos. Las respuestas demuestran los esfuerzos de la sociedad (por ejemplo, los políticos, tomadores de decisiones, etc) para resolver los problemas identificados por los impactos evaluados; por ejemplo, medidas en política y planificación de acciones.

Las relaciones entre las diferentes partes del modelo se describen en el diagrama.

## 2.2 ¿Cómo las tomamos los humanos?

En los sistemas de saneamiento, el proceso de toma de decisiones puede ser jerárquico, siendo al final una persona o una entidad la que toma la decisión. Para intentar describirlo necesitaremos considerar los mecanismos que se utilizan en este caso. Hay que tener en cuenta que los mecanismos de toma de decisiones han recibido una gran atención desde siempre y desde distintas perspectivas. La toma de una decisión tiene que ver con la combinación de la experiencia del tomador de decisiones y la información disponible sobre las probabilidades de éxito de una alternativa, sumado a los deseos e intereses de quién toma la decisión. Nosotros asumiremos que el proceso de toma de decisiones es un proceso cognitivo y racional continuo que permite interactuar con el entorno para ser exitosos y sobrevivir.

El proceso que conduce a la toma de decisión tiene en general cuatro fases:

1. Elaboración de premisas
2. Identificación de alternativas
3. Evaluación de las alternativas, en términos de metas que se desea alcanzar
4. Selección de una alternativa, es decir, tomar una decisión

Las decisiones pueden estar influenciadas por elementos externos al entorno donde se sitúa la acción del agente y que pueden ser irracionales, como la superstición u otras creencias, o modelos no científicos que sesgan los mecanismos de toma de decisiones. Así que en el día a día es difícil saber cómo se han tomado ciertas decisiones y si el mecanismo utilizado ha seguido o no unos cauces racionales. Las experiencias *positivas* o *negativas* son un elemento importante en la toma de decisiones; esto implica que existe una manera eficiente para recordar el resultado de una decisión tomada y para comparar situaciones: *se toman decisiones semejantes ante situaciones con problemas semejantes*. Además, en muchas circunstancias lo importante para los individuos o los colectivos es el resultado y no el proceso.

*Each problem-solving strategy, each style of thinking, each knowledge-representation scheme – each works in certain areas, but fails in other domains*

*M. Minsky*

La información de base se puede clasificar en una de las cuatro categorías que se muestran a continuación, y los resultados de las consecuencias de la decisión se pueden también clasificar en tipos de consecuencias.

Categorías	Consecuencias
Certidumbre	Deterministas
Riesgo	Probabilísticas
Incertidumbre	Desconocidas
Conflicto	Influidas por un oponente

Desde un punto de vista *normativo*, el análisis de la toma de decisiones está relacionado con la lógica y la racionalidad del proceso y con la elección de alternativas invariantes en situaciones similares. Así, desde este punto de vista el objetivo del tomador de decisiones es hallar la *mejor* decisión posible asumiendo que se tiene *información completa, precisión de cálculo y racionalidad*. Bajo esta óptica se pueden analizar los mecanismos usados por los expertos humanos a la hora de tomar decisiones para resolver problemas en un dominio específico. La resolución de problemas es otro proceso cognitivo que hace uso de la toma de decisiones y que termina cuando se ha encontrado una solución satisfactoria para una situación problemática o cuando se abandona.

Resulta relevante diferenciar entre apoyo a la toma de decisiones y la resolución de problemas, ya que la segunda se refiere más a una etapa de gestión, es decir, una vez tomada una decisión.

### Tipos de problemas

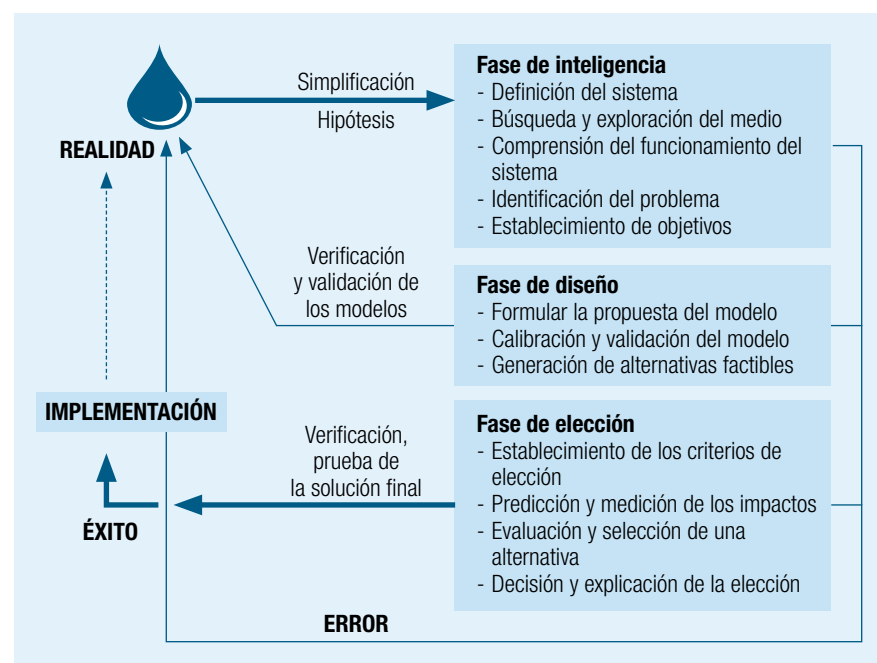
Tenemos un problema de decisión cuando queremos pasar de un estado actual ( $E_0$ ) a uno deseado ( $E_f$ ) y donde podrían encontrarse tres situaciones: -cuando hay alternativas visibles, factibles y disponibles; -cuando la elección puede tener un efecto significativo difícil de delimitar sobre la situación actual, o al menos en parte de ésta. -cuando en ocasiones es incierto vislumbrar una alternativa viable para quien toma la decisión. A su vez, podemos resumir los tipos de problema en:

- bien estructurados,
- mal estructurados y
- no estructurados

### Tipos de decisiones

Las soluciones alternativas disponibles entre las que hay que decidirse van de las conocidas y claramente definidas a las experimentales y ambiguas. En procesos críticos como la depuración de aguas residuales, ¿cómo se adopta una solución *experimental* para un problema si se han de evitar posibles daños en el entorno? ¿Se puede permitir la *creatividad* a la hora de tomar decisiones?

▼  
Figura 2.2.1.  
Esquema del proceso de toma de decisiones.







## Racionalidad o irracionalidad de la decisión humana

Joan Manuel del Pozo

Departamento de Filosofía. Universitat de Girona

Una cuestión de gran interés filosófico es la de la racionalidad o irracionalidad de las decisiones humanas. Es indiscutible que, salvo actos muy rutinarios o automatizados de la vida o momentos de impulso pasional o desestabilización psicofísica, la decisión se entiende como una operación intelectual, llamada *racional* porque pretende garanti-

zar, mediante el análisis y la ponderación de diversas *razones*, en el sentido de argumentos, una óptima salida entre las opciones contempladas como posibles para nuestra acción. Si es así, podríamos decir que el proceso de decisión es racional, porque la razón guiará el análisis que nos permitirá la mejor conclusión lógica para facilitar nuestra elección y decisión final. Esta racionalidad parece postulable como punto de partida —todos pensamos y queremos que la razón guíe nuestras decisiones: por eso acostumbramos a decir que *sabemos* lo que hacemos—, pero no necesariamente impregna todo el proceso ni menos aún llega siempre a cualificar el resultado final. Ello es porque en la vida casi nunca, o muy pocas veces, contamos con razones *concluyentes* que nos permitan elecciones y decisiones *plenamente aseguradas como racionales*. Dicho de otra forma, sabemos que acabamos decidiendo casi siempre después de aceptar que las razones a favor de una de las opciones están contrapesadas —a menudo con fuerza parecida— por razones a favor de otra de las opciones, lo cual debilita enormemente la racionalidad de la decisión, porque la razón resulta que está *repartida*; puede estarlo incluso llegando a un empate a favor de dos opciones distintas que, *racionalmente*, llevarían a la paralización del proceso: es el caso del célebre asno del lógico medieval Buridán que, teniendo tanta hambre como sed y encontrándose ante un saco de apetitosa paja y una pila de agua fresca, después de analizar que no tenía ninguna *razón de más* para dar prioridad a la paja o al agua, acabó muriendo de hambre y de sed.

Pero además sabemos que en el proceso integral de la decisión humana no sólo unas razones contrapesan a otras —lo que quiere decir que la decisión que se base en unas de ellas no podrá ser plenamente racional y, por lo tanto, será al menos parcialmente irracional— sino que la inteligencia del ser humano no puede actuar en solitario —como *pura* razón—, sino que actúa en permanente mezcla con otras fuentes de conducta que la pueden condicionar hasta anularla: las emociones, sentimientos, pasiones, reacciones reflejas o instintivas, alteraciones mentales, enfermedades físicas, dolores insoportables, placeres exultantes, inercias mentales —creencias, prejuicios, intereses conscientes o inconscientes— componen un panorama de complejidad del proceso real de decisión que reducen casi a broma el concepto de *decisión razonable*, por no decir a broma de mal gusto el de *racionalidad de la decisión*. De hecho, si el asno de Buridán hubiera sido solo *un poco humano* —o no hubiera sido imaginado como una máquina racional pura— es seguro que se habría acabado decidiendo o por morder primero con furia la paja o primero sumergiendo su hocico con entusiasmo en la pila de agua fresca, y después ya hubiera visto cómo seguir. El instinto de supervivencia habría dado una lección a la supuesta ‘razón pura’. Es decir: se habría decidido *irracionalmente* como hacemos a menudo los humanos. ¿O no?

Porque, según qué concepto de racionalidad adoptemos, habría que considerar muy racional —en el sentido de muy adecuado a nuestra condición, dotada de razón pero no solo de ella— permitir que la vida fluya aunque las razones supuestamente *inteligentes* no nos lo permitieran en algunos casos. Es decir, puede postularse como profundamente racional que la razón *mecánica*

de análisis abstracto de condiciones para la elección sea considerada no como criterio supremo para decidir nuestras acciones, sino sólo como un criterio más, ciertamente aconsejable e importante, pero no determinante, para acompañarlas. La máxima racionalidad —o una cierta ‘metaracionalidad’—, por tanto, podemos decir que reconoce e incorpora la propia limitación racional y la presencia de elementos irracionales en la decisión, lo cual la enaltece y la descalifica a la vez: la enaltece como abierta a su propia e importante limitación y la descalifica como la instancia segura que pretendía ser. Por eso podemos decir con Searle (2000: *Razones para actuar*): “La racionalidad no es enteramente, ni siquiera en gran medida, un asunto consistente en seguir reglas de racionalidad”.

Ya el dictum clásico aconsejaba con sabiduría que “*primum vivere, deinde philosophari*”: la vida, pues, no puede limitarse a seguir a la razón. Por eso hay quien se ha ganado una plaza en el cielo de las celebridades contemporáneas por haber acuñado al servicio de una vida no solo *mecánicamente racional* la expresión “inteligencia emocional”; pero es como quien descubre el Mediterráneo, porque los conceptos que alberga ya están presentes en el debate filosófico desde sus orígenes griegos. ¿Qué daba Heráclito por supuesto, si no era el bajo ‘rendimiento racional’ humano, cuando escribía: “No hay que actuar ni hablar como adormilados” (DK-73)? Suponer que habitualmente estamos *adormilados* significa que la instancia apolínea de la razón luminosa —el adormilado lo es porque no acaba de ver claro— no guía ordinariamente las decisiones de nuestra vida. De ahí su consejo.

La presencia del componente irracional en nuestro proceso de decisiones vitales es el que hizo que Kierkegaard estableciera un singular concepto filosófico, sorprendente cuando lo formuló en el s. XIX, el de *salto*; aunque él postula el *salto* como actitud vital imprescindible para decidir el paso al estadio religioso de la vida, también lo considera necesario en todas las decisiones importantes de la existencia individual —recordemos que se lo considera el padre del célebre movimiento ‘existencialista’ del s. XX— que no pueden ser regidas por una transición conceptual lógica, gradual, racional —de inspiración hegeliana, contra la que se rebela— sino que requieren una actitud de salto al vacío, a menudo ciego, hecho de puro impulso voluntario y arriesgado.

No podemos olvidar, finalmente, que hay un argumento digno de consideración en el análisis de la racionalidad de la decisión humana. Si la racionalidad humana actuara siempre con plena eficacia, es decir, estableciendo una garantía plena de la seguridad de cada decisión sin duda alguna, sin razones a la contra, sin presencia de impulsos no racionales de la conducta, entonces se habría anulado la libertad humana. Seríamos, supuestamente, íntegramente racionales, pero habríamos eliminado nuestra libertad. La libertad, paradójicamente, nace de la razón —sólo porque somos racionalmente capaces de entender y ponderar opciones distintas podemos empezar a ser libres— pero moriría a manos de una razón absolutamente segura, porque quedaríamos *determinados* por ella, porque *no podríamos dejar de cumplir* su dictamen exacto: la libertad vive, pues, en el terreno ambiguo de la limitación racional, que nos permite reflexionar y ponderar, pero no *cierra* en un dictamen concluyente e inapelable su ponderación; sólo porque tenemos inseguridad racional tenemos libertad, a costa, claro está, de sufrir la angustia de la elección —Sartre: la angustia de estar “condenados a ser libres”—.

Aquí es donde aparece la necesidad de completar el proceso *racionalmente limitado* —o parcialmente irracional— de la decisión, que deja la libertad con la angustia de tener que *saltar* y efectuar en frío una elección sin seguridad, con la cálida exigencia ética de orientar la libertad hacia objetivos que *justifiquen valorativamente* lo que intelectivamente no puede ni debe quedar cerrado. O, en el orden de las decisiones colectivas, que lo *justifiquen democráticamente*. Pero estas son ya otras historias bien distintas.

## 2.3 Decisiones colectivas: ¿sistemas emergentes?

### ...la conciencia humana es una propiedad emergente de nuestro cerebro

La teoría de sistemas nos dice que cuando diferentes elementos interactúan entre sí en un sistema (como ocurre en los sistemas de saneamiento) la respuesta del sistema en su conjunto es diferente de la suma de las respuestas individuales. Aparecen unas nuevas propiedades, las denominadas *propiedades emergentes*.

Estas propiedades emergentes no pueden detectarse y analizarse a menos que el sistema se mire en su totalidad, como por ejemplo cuando hablamos de una colonia de hormigas, abejas o termitas o, incluso, del cerebro humano. En este sentido, la conciencia humana es una propiedad emergente de nuestro cerebro. Al igual que las hormigas que componen una colonia, ninguna neurona por sí misma contiene información compleja como la conciencia de uno mismo, la esperanza o el orgullo. No obstante, la suma de muchas de las neuronas en

el sistema nervioso genera las emociones humanas como el miedo o la alegría, ninguna de las cuales se puede atribuir a una sola neurona. Se piensa que la conciencia surge de la oscilación y sincronización de las neuronas en el cortex. Aunque todavía no se entiende lo suficiente el mecanismo por el cual se genera la emergencia de las funciones, los neurobiólogos están de acuerdo en que las interconexiones complejas entre las partes dan lugar a las cualidades que pertenecen sólo a la totalidad.

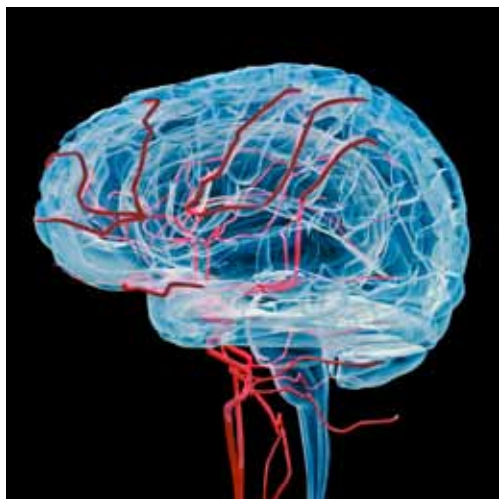
A estas propiedades emergentes se les llama a veces inteligencia colectiva, en cuanto suelen coincidir con unas capacidades mayores que la suma estricta de las capacidades de los individuos considerados individualmente. En el caso de la toma de decisiones en los sistemas de saneamiento, una reflexión interesante que se podría plantear es si el conjunto de agentes que intervienen en la misma podría mejorar su comportamiento si interaccionaran directamente entre ellos, si se tomaran las decisiones a partir de su interacción directa, sin necesidad de una organización jerárquica. Conceptualmente, el tema es interesante, ya que indicaría la bondad de dotarse de organizaciones distintas a las actuales, mucho menos jerarquizadas.

Sin embargo, parece claro que actualmente un sistema con este tipo de funcionamiento no sería operativo para gestionar sistemas de saneamiento, lo que no quita que, en algunos casos, podría ser interesante contemplar la existencia de procesos de decisión construyendo metodologías basadas en sistemas emergentes. Es por ello que la mayoría de sistemas de ayuda a la decisión que se plantean en el texto corresponden a sistemas que son capaces de gestionar el conocimiento existente entre los diferentes agentes que intervienen en un sistema de saneamiento, pero presuponiendo la existencia de una persona o entidad (*decision maker*) que finalmente

tomará la decisión, ya que es la situación más habitual en la gestión de los sistemas de saneamiento. Simultáneamente, parece interesante seguir trabajando en el desarrollo de sistemas de ayuda a la decisión que puedan reconstruir el comportamiento de los sistemas emergentes, a partir de la identificación de sus objetivos individuales y posteriormente a partir del estudio de sus interrelaciones.

### The tragedy of the commons (la tragedia del común)

La capacidad que tienen los sistemas de ofrecer respuestas diferentes de la suma de las individualidades que lo forman no siempre es positiva. A veces se produce la llamada “tragedy of the commons”, expresión acuñada para describir lo que le sucede a la parte común de un sistema formado por un conjunto de individuos en el que el egoísmo propio de cada uno y el interés por obtener el máximo beneficio individual provoca que el conjunto tenga peores resultados, y la gran mayoría pierdan. De los muchos ejemplos ambientales que se pueden citar cuando se estudian comportamientos humanos, uno de los más significativos en este momento es el relacionado con el cambio climático. Un bien común como es la atmósfera, de cuya evolución depende la supervivencia de la especie humana, se encuentra afectado por intereses particulares que intentan maximizar sus beneficios o su comodidad, provocando que el bien común se vaya deteriorando, lo que puede acabar con grave daño colectivo. No deja de ser curioso que la mayoría de los ejemplos que se pueden proporcionar de este tipo de comportamiento, en el que al final casi todo el mundo pierde, se obtenga de sistemas humanos, a los que se nos supone una inteligencia individual superior a la del resto de animales, entre los que podemos encontrar casos de inteligencia colectiva. En todo caso, este debate excede del objetivo de este libro, donde sólo se pretende estudiar este tipo de comportamientos para ofrecer mejores herramientas en los sistemas de ayuda a la decisión en sistemas de saneamiento.





## No somos hormigas, pero estudiar su organización nos puede ayudar

Uno de los sistemas emergentes más estudiados son los hormigueros. Es un buen ejemplo de inteligencia colectiva, ya que a partir de un conjunto de elementos (las hormigas) que individualmente son capaces de ejecutar un número reducido de acciones, el sistema (el hormiguero) considerado en su conjunto es capaz de desarrollar una sociedad compleja que incluso les permite construir sofisticadas construcciones. Parece ser que una de las claves de este éxito es que el elemento individual cumple estrictamente su reducido programa de instrucciones, sin plantearse reflexiones a otros niveles superiores. Por tanto, parece difícil establecer comparaciones con las sociedades humanas, en las que el elemento individual dispone de libre albedrío, pero ello no quita que su estudio puede ser útil para desarrollar algoritmos de ordenador que ayuden en procesos complejos de optimización. Así, recientemente, se han ido proponiendo los llamados *algoritmos de colonias de hormigas*, en los que se intenta reconstruir el comportamiento de las colonias de hormigas para la búsqueda de comida, una tarea en la que colectivamente demuestran una gran eficacia. En la naturaleza, las colonias de hormigas basan su comportamiento para la búsqueda de comida en la transmisión de información a través de la modificación del entorno. Para esta forma de comunicación, denominada estigmergia, las hormigas utilizan la deposición de feromona. Se desplazan aleatoriamente desde el hormiguero en busca de comida y, si la localizan, depositan una determinada cantidad de feromona en su camino de retorno al hormiguero. Cuando otras hormigas perciben este rastro de feromona, lo siguen de forma que cada vez hay más hormigas en el área de localización de comida. Esta mayor concentración de hormigas va a generar un rastro de feromona aún más intenso y mientras no se evapora, va a favorecer que muchas más hormigas lo sigan y consigan localizar la comida.

Simulando este tipo de comportamiento, los algoritmos de colonia de hormigas intentan encontrar una solución próxima a la óptima, utilizando como hormigas artificiales a entidades computacionales simples que se moverán aleatoriamente por un espacio de búsqueda de soluciones, aplicando una estrategia probabilística denominada regla de transición de estado. En su movimiento iterativo van construyendo las soluciones. Cuando éstas son viables, depositan un rastro de feromona. La cantidad acumulada está relacionada con la calidad de las soluciones. Se incluye, además, un cierto grado de evaporación de feromona, para permitir la exploración de nuevas regiones, con nuevos componentes, en busca de mejores soluciones e ir olvidando lentamente la región de localización anterior.

Básicamente todos los algoritmos de colonia de hormigas incluyen tres etapas:

- La construcción de soluciones, en la que el conjunto de hormigas construye soluciones a partir de elementos de un conjunto finito de componentes de una posible solución. En cada paso, a la solución parcial se añaden nuevos componentes. La elección de un componente va a estar guiado por la regla de transición de estado, en la que se consideran la feromona y la información heurística pertinente. Si se han definido restricciones para la solución, ésta se considerará viable si las cumple y no viable en caso contrario.
- La aplicación de métodos heurísticos de mejora local, que intentan mejorar la solución construida a través de movimientos de sustitución de componentes de la solución en el entorno vecinal del espacio de búsqueda de soluciones.
- La actualización del rastro de feromona, que ha de permitir incrementar el valor asociado a un componente que pueda formar parte de una buena solución, o disminuirlo en caso contrario.

Una vez más, la observación de la naturaleza y el estudio de la complejidad de sus relaciones nos pueden ayudar no sólo a comprender mejor su comportamiento, sino también en otros aspectos que pueden parecer tan alejados como la asignación óptima de vertidos industriales, como se analizará en un capítulo posterior.



*El comportamiento emergente no es sólo una fascinante extravagancia científica; es el futuro*

*The New York Times*



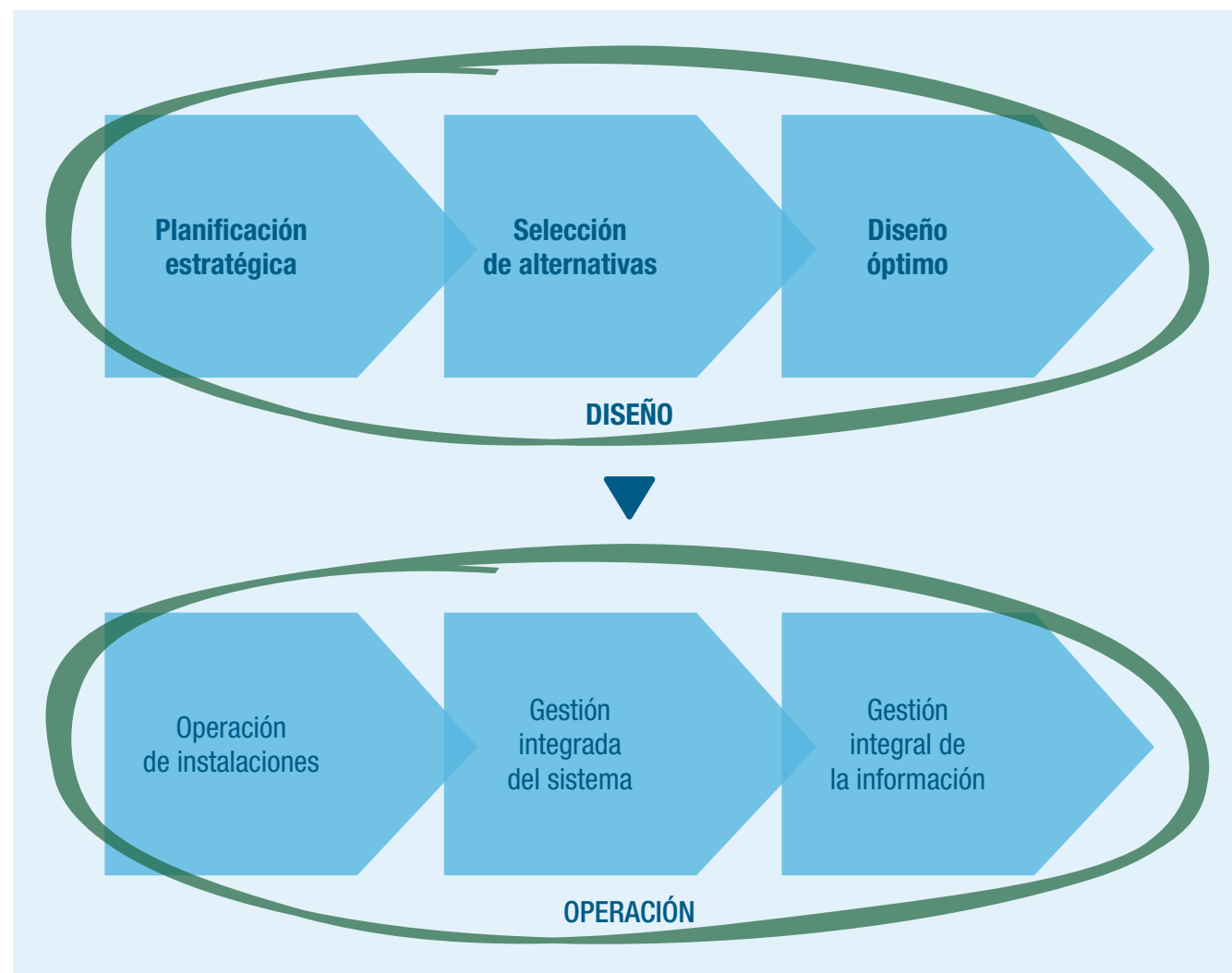
## 2.4 Niveles de decisión en el diseño de los sistemas de saneamiento



Figura 2.4.1.

La existencia de diferentes niveles en el diseño de las instalaciones de saneamiento es conocida. Así, Glen T. Daigger, autor de reconocido prestigio, considera cinco niveles para identificar en qué etapas del diseño del proceso pueden utilizarse los modelos matemáticos. Basándonos en su esquema, en nuestro caso proponemos la existencia de seis niveles en la toma de decisiones agrupados en dos grandes apartados (diseño y operación).

Un aspecto importante para poder ayudar en la toma de decisiones es, en primer lugar, identificar la existencia de diferentes niveles de decisión que tienen lugar en la gestión del saneamiento del agua



### Primer nivel

Entendemos que el primer nivel corresponde a **decisiones estratégicas**, en la mayor parte de los casos no directamente relacionadas con el ciclo urbano del agua, pero que condicionarán su diseño y operación. No es nuestro objetivo hacer una relación exhaustiva, pero sí que parece importante indicar algunos de los elementos de planificación que condicionan, muchas veces de forma indirecta, los sistemas de saneamiento, y sobre los que habitualmente la administración responsable de los mismos suele tener

poca influencia. Entre ellos quisiéramos destacar:

- La planificación urbanística, que puede ser más concentrada o extensa y que condicionará la cantidad de agua residual generada y su concentración, la distribución de los sistemas de recogida, la posibilidad de utilización de sistemas de tratamiento más extensivos o intensivos...
- La política de financiación de los costes asociados al tratamiento en

el ciclo del agua. La Directiva marco europea, por ejemplo, establece que los costes deben ser repercutidos directamente en el ciclo del agua y que el sistema debería ser autosostenible. Este es un modelo que todavía se encuentra lejos de ser aplicado en los propios países afectados por la Directiva, pero no es el único, y en la práctica en diferentes países pueden encontrarse diferentes modelos de financiación, con diferentes pesos de participación público-privada.

- El desarrollo industrial y su relación con el ciclo urbano del agua, con la existencia y magnitud de industrias en centros urbanos o la definición de la política de tratamiento integrado (doméstico/industrial) de las aguas residuales. Ello condiciona la cantidad, pero sobre todo la calidad de las aguas que entran en el sistema de saneamiento.
- Las políticas ambientales generales, que puede hacer referencia a la existencia de reglamentación de captación y/o re-uso del agua de lluvia, a la separación en origen en las propias viviendas, o al reciclado de las aguas grises en los edificios, con la existencia de circuitos para las mismas.
- Costes de inversión, operación y energéticos. Si bien muchas veces sólo se tiene en cuenta el coste de inversión, es importante considerar el coste total de la vida útil de la instalación, que puede hacer cambiar el orden de preferencia respecto a considerar únicamente el coste de construcción. Simultáneamente, y con los progresivos incrementos del coste de la energía, el coste energético debe ser considerado en esta etapa.
- Compatibilidad con otras operaciones de tratamiento. No todas las operaciones de tratamiento son compatibles entre sí, ni todas tienen la misma capacidad de adaptación a los cambios que el sistema puede experimentar a lo largo del tiempo, como posibles ampliaciones. Es por ello que este aspecto debe ser contemplado en el proceso de toma de decisiones.

## Segundo nivel

En el segundo nivel se toman las decisiones correspondientes a la **selección de la configuración** de los sistemas de recogida y tratamiento. En este nivel, y a partir de la información procedente del nivel anterior, se selecciona la configuración y las tecnologías más adecuadas para alcanzar los objetivos y restricciones definidos en el nivel anterior. Este es un nivel en el que aparecen nuevos elementos que condicionan las decisiones, especialmente relacionados con las tecnologías disponibles para alcanzar los objetivos definidos en el nivel anterior. Para el caso del tratamiento, para cada tecnología será necesario incorporar:

- Sus capacidades de tratamiento para los diferentes tipos de contaminantes. Hay que tener en cuenta que las diferentes tecnologías se han ido desarrollando a lo largo de un período de tiempo en el que las prioridades y los objetivos han ido cambiando, y con diferentes objetivos. Por ello ofrecen diversas prestaciones para los diferentes contaminantes, aspecto que debe ser tenido en cuenta.

- Efectos secundarios, impactos, generación de subproductos. Los sistemas de saneamiento están diseñados para reducir el impacto ambiental de las aguas residuales, pero a su vez son instalaciones industriales que también presentan impacto. Actualmente no solamente tienen coste económico, sino que también generan subproductos e impactos asociados a su actividad, como la emisión de gases de efecto invernadero.

## Tercer nivel

El tercer nivel, correspondiente al diseño y optimización de los equipos, **es un nivel fundamentalmente técnico**. De los niveles anteriores ya se ha identificado cual es la secuencia de operaciones a incorporar en el sistema de saneamiento que permite alcanzar los objetivos del primer nivel. En el tercer nivel se procede a identificar cuáles son las dimensiones asociadas a cada una de las unidades implicadas. Hay que identificar, en esta

etapa, cuáles son los volúmenes, superficies, potencias, etc. de las bombas, tuberías y reactores implicados. También deberán considerarse aspectos de operación de la instalación para asegurar un posterior funcionamiento óptimo, por lo que deberán incluirse los elementos de control y definir condiciones de operación, para garantizar la máxima eficacia del proceso. Si bien en las primeras instalaciones los cálculos se efectuaban de forma manual (todavía pueden encontrarse excelentes manuales que permiten calcular de forma relativamente sencilla las dimensiones de muchos de los equipos utilizados), el esfuerzo científico realizado para obtener modelos cada vez más ajustados a la realidad, la complejidad que se ha ido obteniendo al considerar diferentes opciones y la potencia de cálculo de los ordenadores ha derivado en un uso masivo de estos equipos en este nivel.



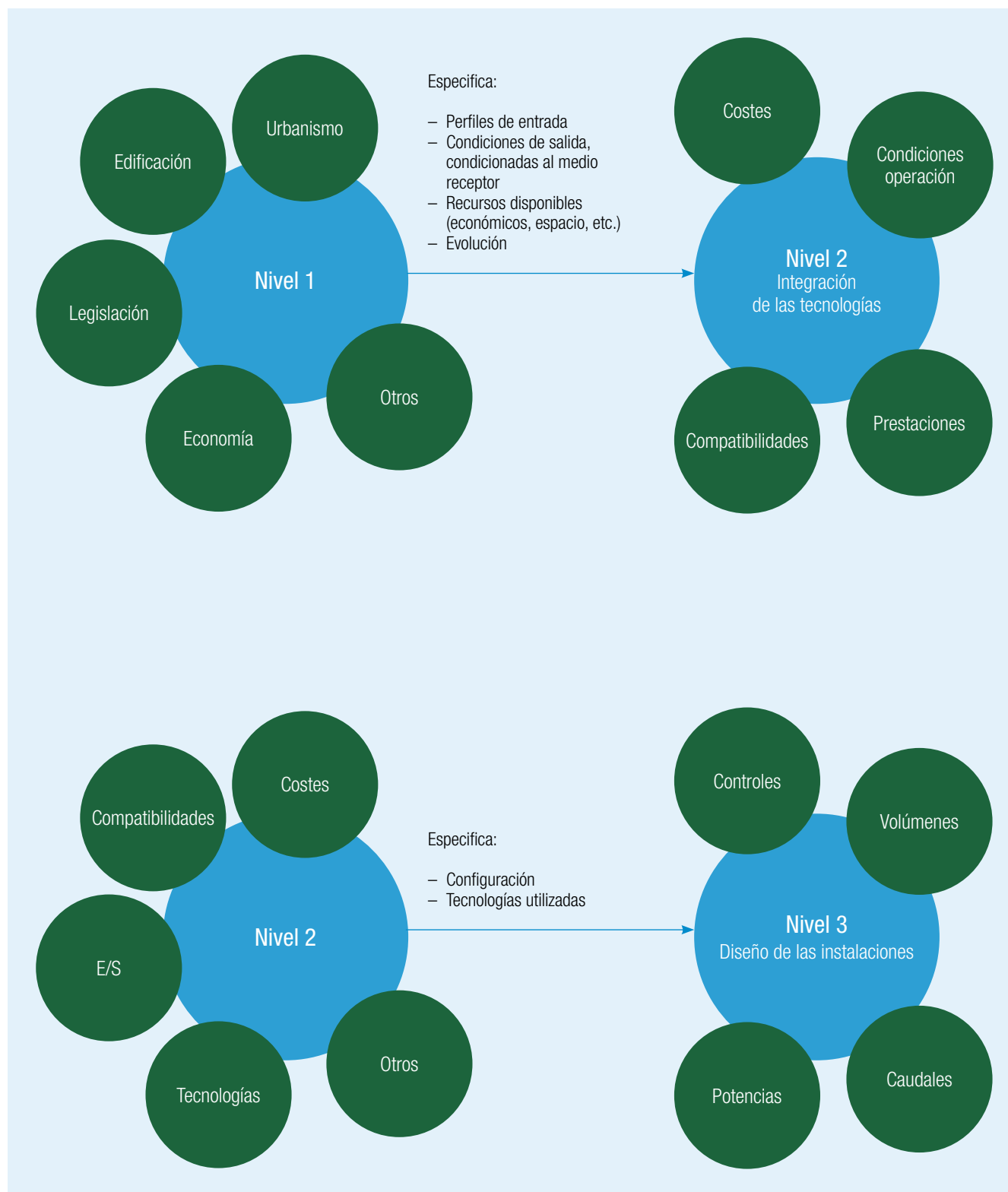


Figura 2.4.2.

En nuestra propuesta se identifica un primer nivel que condiciona las posteriores decisiones a tomar en el diseño de los sistemas de saneamiento. En este primer nivel, ámbitos distintos al del saneamiento (como pueden ser el urbanístico, el legislativo o el económico), toman decisiones que condicionan los niveles posteriores. Así, el conjunto de decisiones que se hayan tomado en el primer nivel condicionarán tanto los perfiles de entrada al sistema de saneamiento, como las especificaciones que estos deben cumplir y las disponibilidades de recursos (dinero, espacio...) de los que se dispone. A su vez, en el segundo nivel se toman decisiones que se encuentran restringidas por nuevos elementos, como pueden ser la disponibilidad de tecnologías, sus prestaciones, costes, condiciones de operación o compatibilidades.



Figura 2.4.3.

Siguiendo con el esquema propuesto, en el segundo nivel se toman las decisiones correspondientes a la selección del sistema de colectores y de la línea de tratamiento. En este caso se incorporan las restricciones correspondientes a un nuevo conjunto de conocimiento, más característico y específico del saneamiento, que corresponde a las capacidades, prestaciones y restricciones de las diferentes tecnologías disponibles que conjuntamente han de dar respuesta a los requerimientos establecidos. En el tercer nivel se toman las decisiones correspondientes a las dimensiones y condiciones de operación de los equipos e instalaciones, que se trata de que sean óptimas, desde el punto de vista económico y operacional.







Figura 2.4.4.

**Variables que afectan al nivel estratégico**

Segundo nivel. La selección de la configuración de los sistemas de recogida y tratamiento. En este nivel, y a partir de la información procedente del nivel anterior, se selecciona cuáles son la configuración y la tecnología más adecuadas para alcanzar los objetivos y restricciones definidos en la etapa anterior. Hay que tener en cuenta cuáles son las especificaciones del agua a la salida del sistema (teniendo en cuenta la sensibilidad del medio receptor o el uso al que va a ser destinada); cuáles son las características del agua a la entrada del sistema y en qué condiciones llegará; y los recursos disponibles (a nivel económico, pero también de espacio, tecnología, energía...).

## 2.5 Complejidad de las decisiones

Un aspecto interesante del establecimiento de los tres niveles en el diseño de los sistemas de saneamiento es que nos permite visualizar mejor algunas de las características que van evolucionando a lo largo del proceso de diseño. De alguna manera se están identificando aquellos elementos básicos que permiten identificar la complejidad de las decisiones que se toman en cada etapa, lo que permite simultáneamente determinar la conveniencia de los agentes que intervienen en la toma de decisiones en cada una de ellas.

En un trabajo previo de los autores, a partir de las ideas originales de Fun-towicz, se consideran tres niveles de complejidad asociados a los tres niveles de decisión en el diseño de los sistemas de saneamiento.

### Primer nivel

El primer nivel correspondería a sistemas realmente complejos donde existe una elevada incertidumbre epistemológica o ética, y donde lo que se pone en juego puede implicar conflictos de intereses entre las partes que intervienen en el proceso, además de un riesgo importante. En este caso, es importante tener en cuenta la necesidad de considerar una pluralidad de percepciones o perspectivas. En los sistemas de saneamiento correspondería a la gestión de una unidad de masa de agua, donde intervienen diferentes factores, económicos, técnicos, ecológicos, etc. y asociados a cada factor se presentan diferentes objetivos. Por tanto, es necesaria la colaboración entre los diferentes actores, lo que implica, además de diferentes objetivos, diferentes experiencias que deben ser integradas.

### Segundo nivel

El segundo nivel, el de selección de la configuración, correspondería a sistemas con un menor nivel de incertidumbre, pero que difícilmente se pueden representar, de forma satisfactoria, mediante la aplicación de un modelo estándar que pueda ser reproducido en cualquier lugar y por cualquier practicante competente. En esta instancia, el elemento personal y la experiencia adquirida son importantes, por lo que la presencia y participación de un experto es significativa. Esta selección variará según el lugar y la apreciación que la persona responsable haga de la importancia de los diferentes fenómenos que intervienen. Se han de mantener unos niveles de depuración a la salida, existen diferentes opciones para alcanzarlos y la selección de una u otra configuración depende de la persona responsable del diseño y de su propia experiencia.

### Tercer nivel

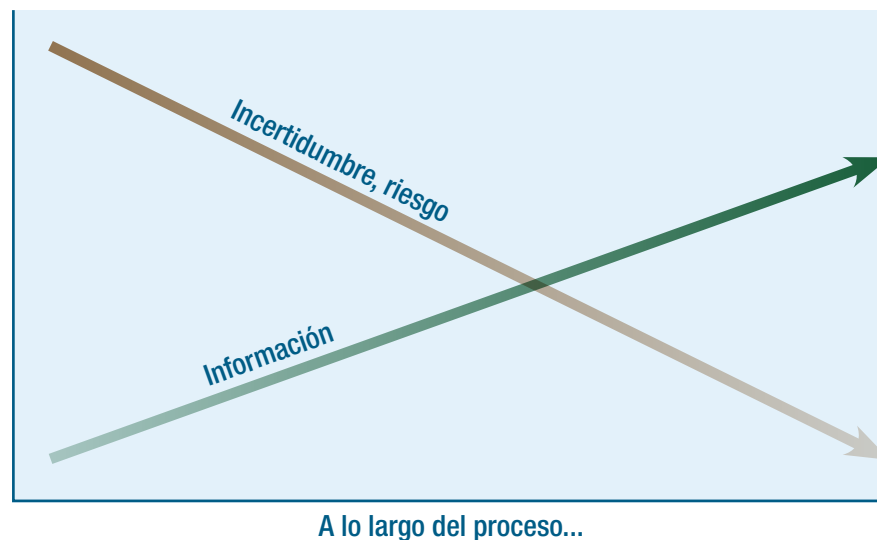
El tercer nivel de diseño corresponde a sistemas de menor complejidad en los que la incertidumbre se ha reducido y lo que se pone en juego tiene una importancia más reducida, puesto que los grados de libertad y las inversiones se han reducido. Son sistemas que se pueden representar utilizando una única perspectiva y donde es posible encontrar un modelo que proporcione una descripción satisfactoria. Se tiene perfectamente definida la entrada, el número de alternativas se encuentra acotado y la información disponible es suficiente para discriminar entre ellas.



Figura 2.5.1.

Hay dos características que evolucionan significativamente a lo largo del diseño del proceso:

- El impacto de las decisiones en los costes del proyecto, así como el número de opciones a considerar, va disminuyendo a medida que el proyecto se va concretando. Esta constatación, que parece evidente, curiosamente no siempre está relacionada con el esfuerzo que se dedica a las diferentes etapas. Muchas veces el tiempo y los recursos para tomar decisiones no coinciden con el impacto que las mismas puedan tener en el coste final del proyecto. Es una de aquellas verdades tan obvias que a veces se olvidan.
- La cantidad de información disponible aumenta a medida que se avanza en la definición del proyecto. No sólo se tienen que tratar menos alternativas, sino que habitualmente se dispone de mayor información y esta tiene menos incertidumbre. El aspecto de la incertidumbre es importante, ya que condicionará la confianza en las decisiones que se tomen; por tanto, su minimización ha de ser uno de los elementos clave en los sistemas de ayuda a la decisión.

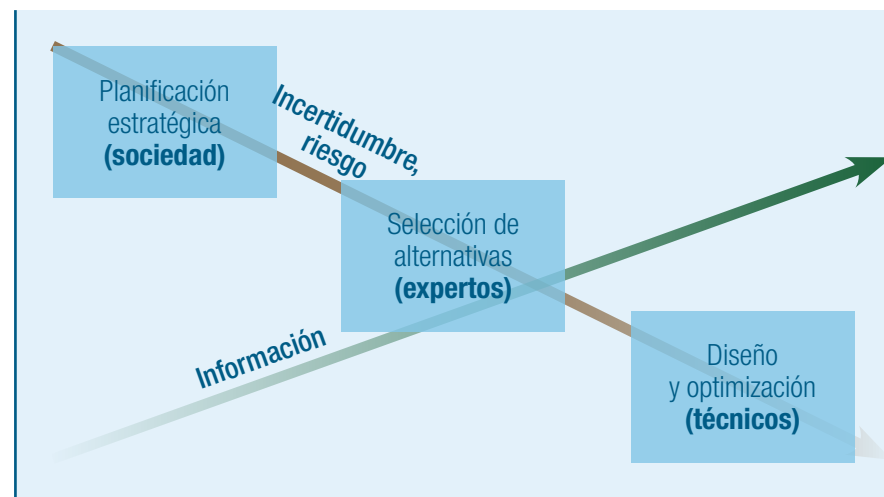


Un aspecto interesante del establecimiento de los tres niveles en el diseño de los sistemas de saneamiento es que nos permite visualizar mejor algunas de las características que van evolucionando a lo largo del proceso de diseño



Figura 2.5.2.

La integración de la variación del impacto de las decisiones con la información disponible en cada nivel nos permite identificar tanto la existencia de los diferentes conocimientos que intervienen en la toma de decisiones como los diferentes actores. Además, cada uno de estos niveles establece diferentes relaciones entre los agentes y con el proceso de toma de decisiones. En el primer nivel la decisión presenta importantes componentes políticos (en un sentido amplio del término) que, tal como se ha indicado, pueden tener de unas intenciones claras, pero de difícil traducción cuantitativa, por lo que serán necesarios sistemas de ayuda a la decisión que sean capaces de gestionar esta característica. En el segundo nivel, la característica fundamental es la experiencia; las decisiones serán tomadas mayoritariamente por expertos, que pueden provenir de ámbitos distintos. Cada uno de ellos puede ser experto en su parcela, pero el sistema de ayuda a la decisión ha de ser capaz de gestionar la "paradoja del experto", que nos recuerda que cuanto más se sabe de un tema, más difícil es explicar el porqué de la decisión que se propone. En el tercer nivel, el componente instrumental incrementa su peso. Se ha reducido la incertidumbre y se dispone de herramientas capaces de cuantificar los procesos que tendrán lugar en el sistema. Es el entorno en el que los técnicos pueden desenvolverse con más comodidad y eficacia.



A lo largo del proceso...

Cada nivel presenta una complejidad diferente y necesita diferentes responsables en la toma de decisiones

## La complejidad de definir la complejidad

Para intentar entender algunas de las cosas que pasan, la primera de las constataciones es que el mundo en el que nos desenvolvemos es complejo. Y definir complejidad ya es una de las primeras dificultades. Como dicen que sucede con la pornografía, la identificamos cuando la tenemos delante, pero nos cuesta definirla. Decimos que una cosa es compleja cuando presenta interrelaciones y sus límites no están bien definidos, o cuando las respuestas que da a los cambios no son triviales, ya que pueden variar de un vez para la siguiente. Así, decimos que nuestro cerebro es complejo, pero también lo es un bosque, o el conjunto de redes sociales. En este contexto, ¿cómo medir el nivel de complejidad de una decisión? En un excelente libro introductorio al tema *Complexity: A guided tour*, su autora, Melanie Mitchell, dedica un buen número de páginas a buscar una definición que permita cuantificar el nivel de complejidad, en función del tamaño del sistema, de la cantidad de información que puede llegar a procesar, en función del grado de jerarquía en el que se estructura, etc. concluyendo que la existencia de tantas posibles medidas es una demostración de que difícilmente podemos encontrar, de forma sencilla, una que pueda abarcar todas las dimensiones del problema. En todo caso, parece existir consenso en que hay tres elementos que son comunes y que pueden utilizarse como indicadores para su definición, de manera que cuanto mayores sean, mayor será la complejidad del sistema:

- La existencia de un conjunto de elementos que interaccionan entre sí, mediante una estructura en red.
- El sistema proporciona respuestas no triviales, y difícilmente predecibles a partir del análisis de los elementos individuales, generando lo que se llama comportamiento emergente, sin necesidad de que exista un cerebro central.
- Algunas de las interrelaciones pueden ir variando a lo largo del tiempo, de manera que el sistema trata de adaptarse a su entorno, mediante procesos de aprendizaje o evolutivos.





## 2.6 Niveles de decisión en la operación de los sistemas de saneamiento

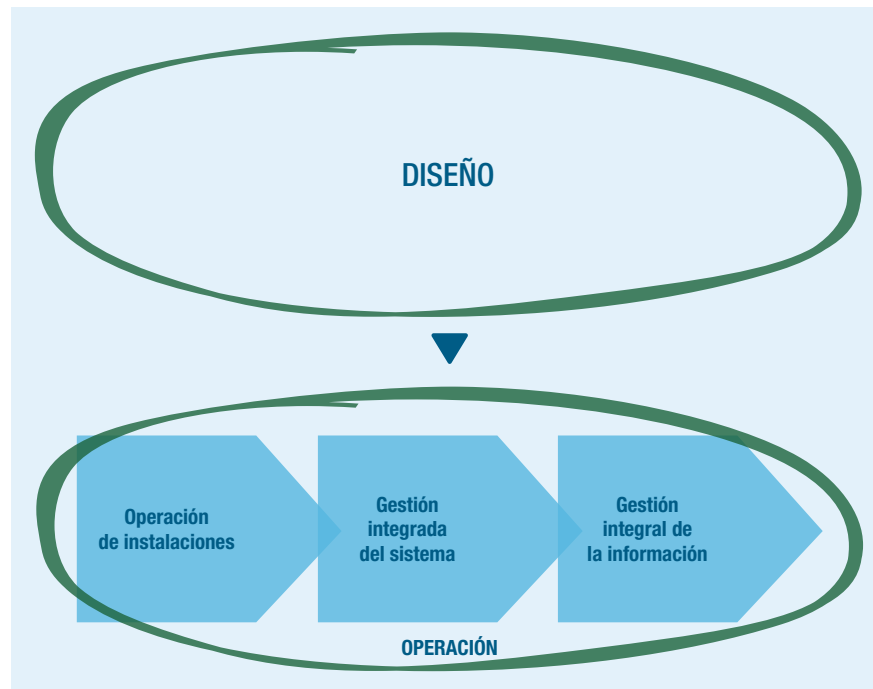


Figura 2.6.1.

De manera análoga al proceso de diseño, en este apartado se propone también la existencia de tres niveles de decisión. Y si en el caso del diseño la propuesta va de un ámbito más general a un ámbito más concreto, en el caso de la operación nuestra impresión es que se trabaja al revés. En primer lugar, se hace el esfuerzo de asegurar la continuidad en los elementos del sistema de saneamiento, mayoritariamente de forma individual, por un lado el sistema de colectores, por otro lado el de tratamiento. Cada vez más se trabaja para abordar el problema de forma más integrada, tomando decisiones que tengan en cuenta todo el sistema de saneamiento considerado como unidad, en línea con la gestión integrada que establece la Directiva marco hasta llegar a considerar, al menos a nivel de gestión del conocimiento, de toda una cuenca.

Una vez los sistemas de saneamiento han sido diseñados y construidos, se debe proceder a su operación procurando que ésta sea lo más eficiente posible. Ello implica tener que tomar decisiones para asegurar su eficacia y mantenimiento

### Primer nivel

En el caso de la operación de los sistemas de saneamiento, el primer nivel de decisión correspondería a la explotación de las plantas de tratamiento o colectores separadamente, individualmente. Es en el que se toman las decisiones operativas de puntos de consigna de los controladores, tiempos de ciclos, dosificaciones de productos, etc. Las instalaciones actuales son capaces de proporcionar importantes conjuntos de información, difíciles de procesar por una única persona, a menos que disponga de herramientas que la ayuden en la interpretación de los datos a tiempo real para identificar las problemáticas que se presenten en cada momento. En este nivel las decisiones son, fundamentalmente, de tipo técnico, y correspondería al tercer nivel de complejidad.

Ello no quiere decir que no presenten complejidad. Hay un riesgo, como es el derivado de la mala operación de colectores o de la estación depuradora, que puede conllevar el vertido al medio de aguas residuales sin depurar, y hay subsistemas que a su vez son el resultado de fenómenos complejos, como es el ecosistema que depura las aguas en un tratamiento biológico. A la manera de las muñecas rusas, el análisis detallado de cada unidad nos permite observar que las situaciones de complejidad se van reproduciendo en los diferentes niveles.

### Segundo nivel

Un segundo nivel de complejidad en la gestión de los sistemas de saneamiento es el que aparece cuando la misma se realiza de forma integral entre el sistema de alcantarillado, la planta depuradora y el medio receptor. En este caso, la información proporcionada por cada uno de los elementos es utilizada por los otros dos, lo que puede permitir la optimización global del proceso. En nuestra opinión, aunque este beneficio es claro, to-

avía hay pocos sistemas en los que se esté aplicando, por dos razones:

- Por un lado, porque a veces hay dificultades administrativas. Las competencias de cada uno de los sistemas, pueden corresponder a diferentes niveles de la administración (local, regional...) o aunque sea en el mismo nivel de administración, ello no garantiza la coordinación, ya que las competencias pueden estar distribuidas en diferentes departamentos, que no siempre mantienen relaciones fluidas.
- En segundo lugar, porque se produce un aumento de la complejidad epistemológica. No sólo hay más cantidad de información a procesar, sino que ésta es de un tipo diferente. Así, los procesos que tienen lugar en los colectores están asociados a movimiento de fluidos, y aunque actualmente hay un esfuerzo en la consideración de los procesos bioquímicos que tienen lugar, hasta ahora el conocimiento que tenemos es reducido. Esta situación es diferente en los procesos de tratamiento, donde en los últimos años se ha hecho un esfuerzo importante de descripción de los procesos bioquímicos que tienen lugar. El hecho de incorporar la gestión del medio receptor implica un tipo de conocimiento específico. Esta diversidad ha provocado incluso, en algunos países, que la mayoría de los profesionales de cada uno de estos sistemas provengan de diferente formación (ingeniería civil, química/ingeniería química, biología).

### Tercer nivel

Finalmente, el tercer nivel correspondería al uso de la información que se obtiene de un conjunto de sistemas de saneamiento, bien sea agrupado por zona geográfica, bien por tipología de tratamiento. Cada sistema plantea sus problemáticas específicas, pero hay comportamientos que se repiten y que pueden generali-

zarse. Es importante, por tanto, poder disponer de herramientas de ayuda a la decisión que permitan extraer conocimiento de forma automática y útil de toda la información que se va obteniendo, para poder aplicarla en los nuevos diseños o en la gestión del día a día.

Es importante remarcar que los tres niveles de decisión implican diferentes niveles de integración en la operación de los sistemas de saneamiento.

Figura 2.6.2.

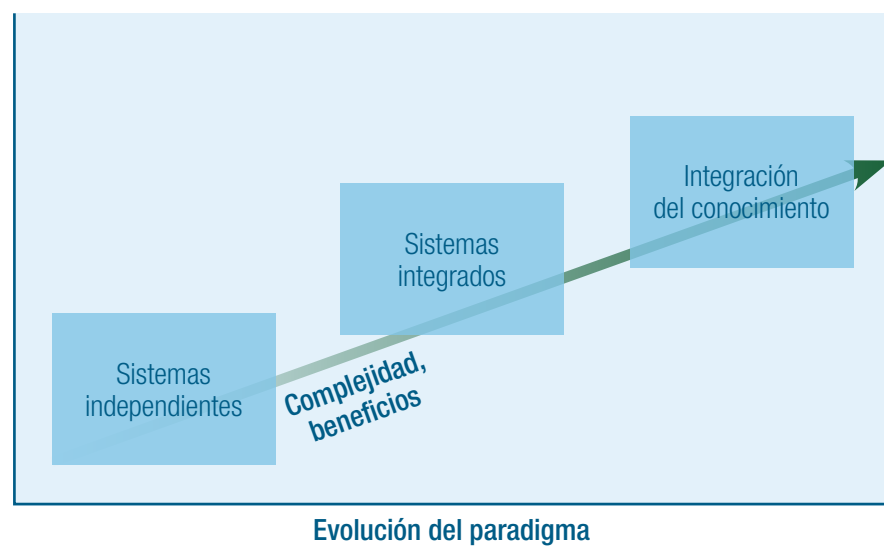
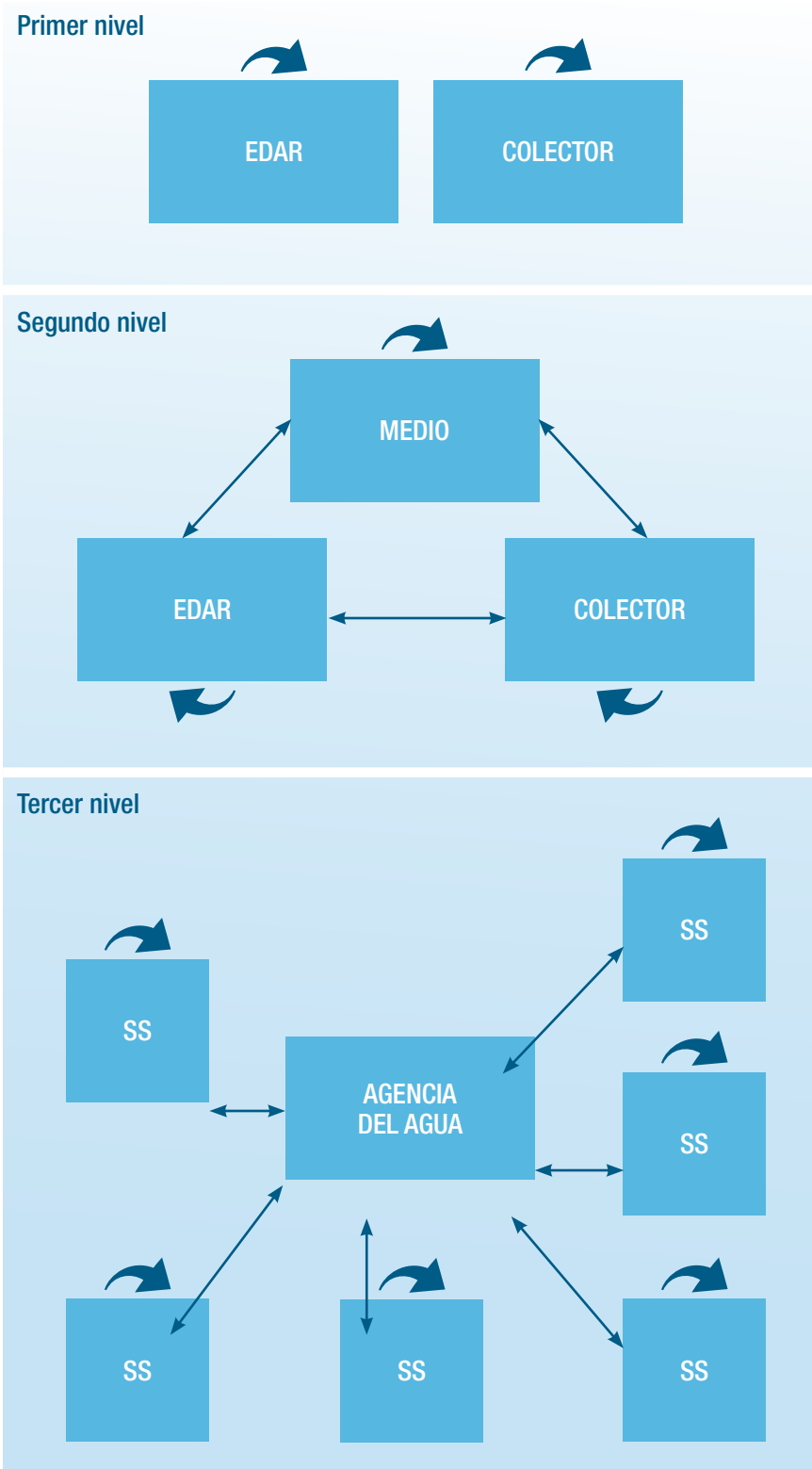


Figura 2.6.3.

Hay una variable importante que diferencia los niveles de decisión entre el diseño y la operación de los sistemas de saneamiento, que es la variable tiempo. A diferencia de las etapas de diseño, que pueden llevar meses o incluso años, y en los que las decisiones se van tomando de forma discontinua a lo largo de este período, los sistemas de saneamiento deben operar de forma continua todas las horas del día, todos los días del año. Es por ello que, a nivel operativo, inicialmente se ha asegurado el funcionamiento de los sistemas individuales, a pesar de que no sea la forma óptima. Es a partir del conocimiento adquirido en esta operación cuando se dispone de herramientas para plantear una gestión cada vez más integrada.

## 2.7 Interacciones y retroalimentaciones

Podría pensarse que la consideración de los tres niveles en el diseño y en la operación de los sistemas de saneamiento, y su presentación en forma lineal que la toma de decisiones en cada uno de los niveles se realiza de forma independiente, únicamente condicionada por las decisiones del nivel precedente. Es decir, como un proceso lineal en el que cada decisión tiene unos antecedentes y produce unos resultados.

Nada más lejos de la realidad. Como ya se ha ido repitiendo a lo largo del texto, las problemáticas abordadas en los sistemas de saneamiento son complejas y una de las características de la complejidad es la existencia de interacciones entre los diferentes elementos. Cada decisión no sólo produce resultados (mejores o peores) en relación con el problema que pretende resolver, sino que también produce efectos colaterales, afectando a otros elementos del sistema.

Como ayudar en cada una de las etapas y a cada uno de los agentes que toma decisiones, es el objetivo de este libro.

El sistema no sólo funciona como *top-down* (de arriba abajo), también como *bottom-up* (de abajo arriba), dentro del propio ciclo y entre ciclos. Existe también un flujo de retroalimentación de los impactos de las decisiones entre los niveles inferiores y los niveles superiores

Figura 2.7.1.

Una posible conceptualización de la toma de decisiones en los sistemas de saneamiento sería una concepción lineal, en la que cada decisión se toma para resolver un único problema y produce un único resultado.

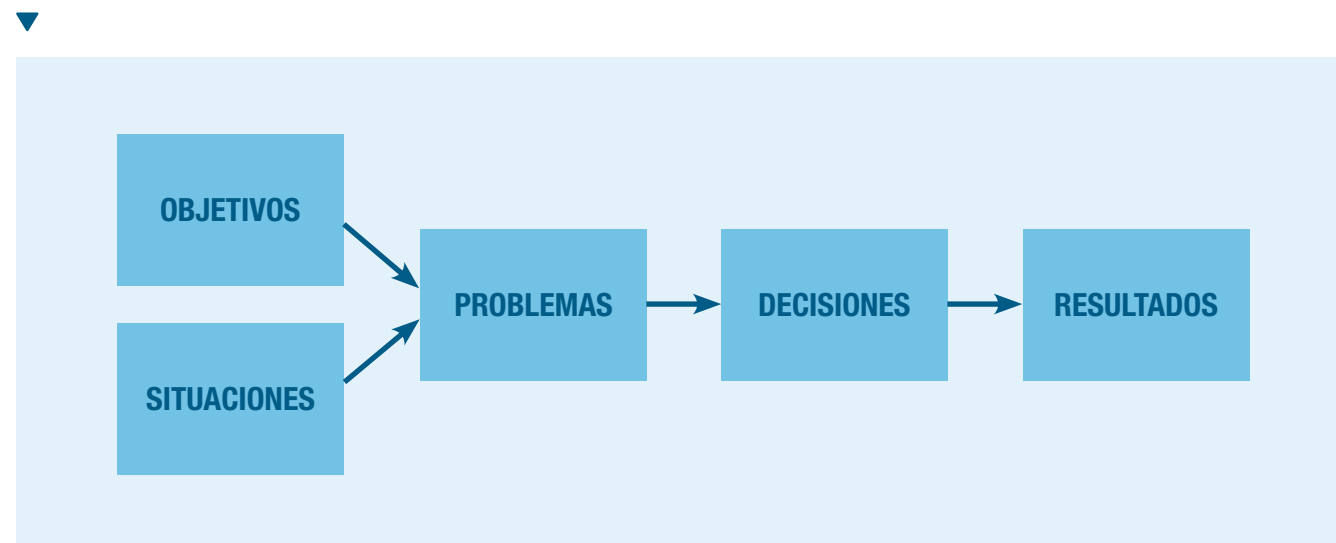


Figura 2.7.2.

En la práctica, se están tomando decisiones simultáneamente en todos los niveles. Mientras la comisión de precios decide cuál será el precio de agua el próximo año, hay un responsable de EDAR que está modificando su edad del fango para resolver un problema de sedimentabilidad, o un usuario está valorando cuánta agua reutilizará para el riego de un campo de golf, en función de la climatología. Ello implica que el flujo de decisiones no es unidireccional. No es una cascada de decisiones que van bajando desde el nivel superior a los niveles inferiores, que la van implementando. El sistema no sólo funciona como *top-down* (de arriba abajo), también funciona como *bottom-up* (de abajo arriba), dentro del propio ciclo y entre ciclos. Existe también un flujo de retroalimentación de los impactos de las decisiones entre los niveles inferiores y los niveles superiores. El precio del agua puede estar condicionado por la eficacia del sistema de depuración, que puede requerir nuevas inversiones para hacer frente a su operatividad, o la operación de la instalación, a su vez, estar condicionada por el uso final que haga el usuario del agua reutilizada. Esta retroalimentación aumenta la complejidad del sistema y, por tanto, el mecanismo de toma de decisiones, si quiere ser eficiente, no puede ser lineal.

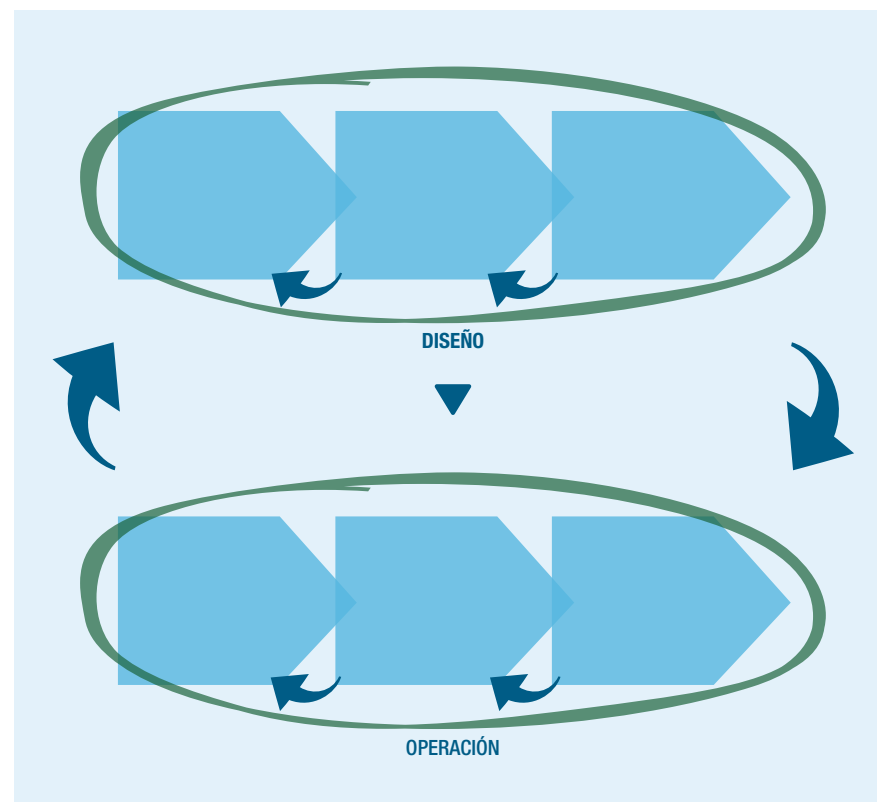
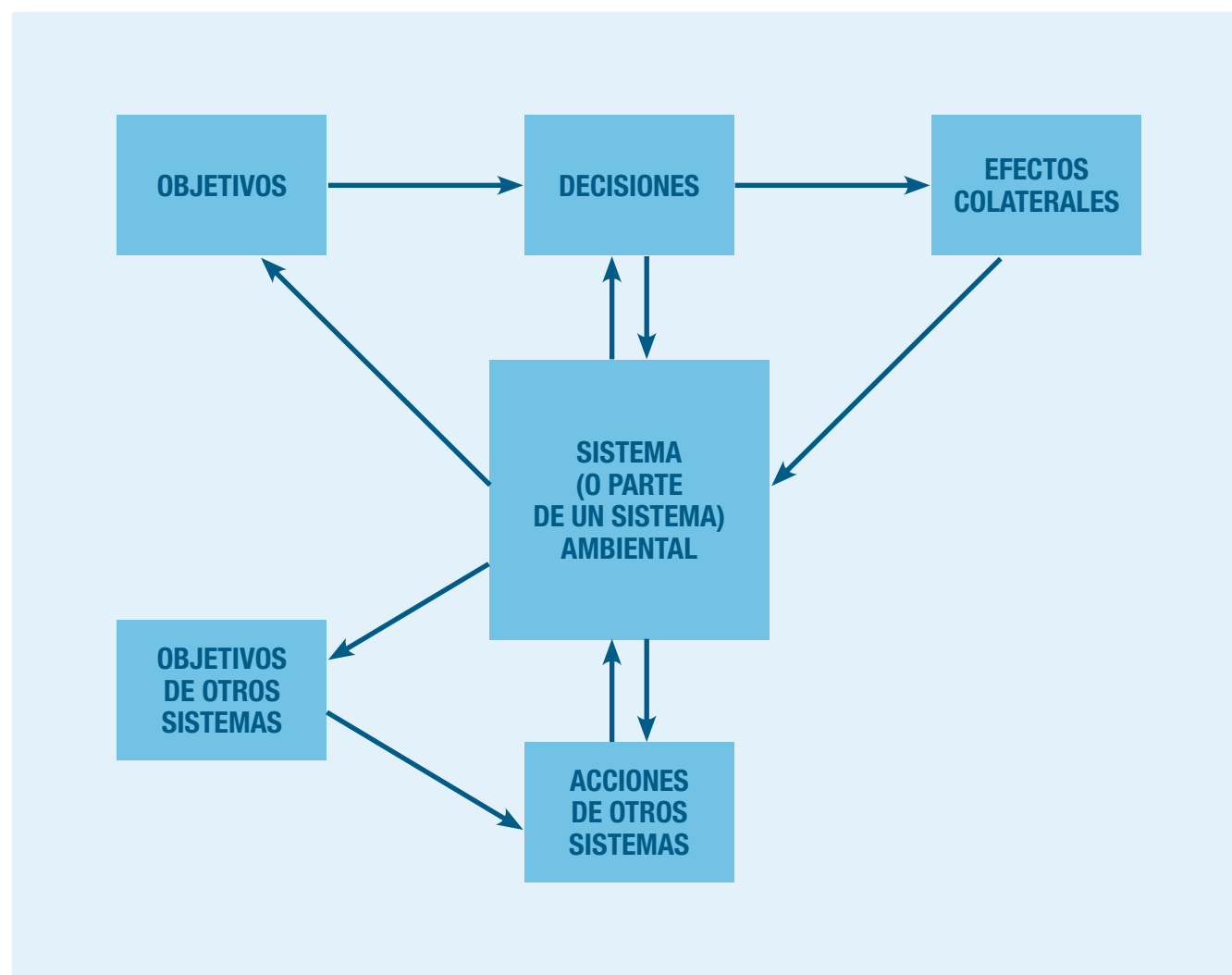




Figura 2.7.3.

Las decisiones en sistemas complejos no se encuentran sólo condicionadas por un único objetivo, sino que deben tener en cuenta los objetivos de otros niveles o de otros elementos del sistema, que también toman sus decisiones, y sobre todo deben evaluar los efectos colaterales de las decisiones tomadas.



## El cisne negro

El término *cisne negro* lo propone Nicholas Taleb para referirse a un conjunto de situaciones que presentan tres características: son altamente improbables; cuando se producen tienen un gran impacto; y es posible encontrar explicaciones y justificaciones de las mismas... a posteriori. El cisne negro se refiere a cambios bruscos que tienen lugar en los procesos o en la sociedad y que (casi) nadie a priori había intuido, provocando sin embargo un impacto que modifica la situación preexistente. En la sociedad actual, no es difícil identificar algunos cisnes negros que, en forma de crisis o atentados, han modificado nuestra percepción del mundo. El autor toma el término de la visión que se tenía en Europa de la existencia de cisnes negros. Como no se había visto ninguno, la conclusión era que no existían... hasta que en Australia se descubrieron cisnes de ese color.

La existencia del fenómeno está asociada a la complejidad. Es una de sus características. La existencia de una interrelación entre los diferentes procesos/decisiones y los efectos colaterales de algunas actuaciones, muchos de ellos no conocidos, provocan que el comportamiento del sistema deje de ser extrapolable para pasar a ser impredecible. El fenómeno también tiene lugar en los sistemas de saneamiento. Aunque el término es reciente, ya hace algunas décadas M.B. Beck afirmaba que los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales funcionaban... hasta que dejaban de funcionar. Es un hecho experimental que los responsables de explotaciones pueden confirmar en su vida profesional, cuando de repente –sin saber por qué– el proceso altera su comportamiento. Ahora ya lo saben, se ha producido un cisne negro.

# 3 Sistemas de ayuda a la decisión



En los capítulos anteriores se ha podido constatar la complejidad que afecta a la toma de decisiones en los sistemas de saneamiento. Este problema, que no afecta únicamente a estos sistemas sino que puede extenderse a un número amplio de sistemas complejos, ha llevado al desarrollo de un conjunto de herramientas que, bajo el nombre genérico de sistemas de ayuda a la decisión (DSS, Decision Support Systems, en inglés), se han ido proponiendo para mejorar la toma de decisiones. Pero las particularidades de cada caso han llevado a desarrollar herramientas más específicas y más adaptadas. Esta es la situación de los procesos ambientales, donde a lo largo de estos últimos años diferentes grupos de todo el mundo han propuesto herramientas que pueden catalogarse bajo el epígrafe de SAD (o EDSS, correspondiente a Environmental Decision Support Systems). En este capítulo se presenta la propuesta realizada por los autores del libro de una metodología propia de construcción y operación de los SAD para sistemas de saneamiento. El capítulo empieza con la propia definición de lo que se entiende por un SAD, haciendo especial hincapié en una definición operativa de los elementos que lo constituyen y cuáles son los objetivos que, a nuestro juicio, el sistema debe cumplir. Después de la definición se presentan las características que capacitan a los SAD para abordar la complejidad de los sistemas de saneamiento, y se hace una pequeña referencia a cómo ha ido evolucionando este tipo de sistemas a medida que se han ido aplicando y mejorando sus capacidades.

En los dos últimos apartados se presenta de forma esquemática nuestra propuesta de construcción y operación de SAD aplicados a sistemas de saneamiento. Queremos remarcar que esta no es la única propuesta posible, y que es una propuesta flexible. No es un “receta”, en la medida que el seguimiento de unas etapas pautadas permite obtener el producto deseado, sino que la entendemos como una guía, como una hoja de ruta que puede ser de ayuda a la personas que deban tomar decisiones en sistemas de saneamiento y consideren que este tipo de herramientas le puede ser útil. Esta guía es la que nosotros hemos utilizado a lo largo de los años y hemos ido depurando a través de la construcción de los SAD que se presentan en el segundo bloque del libro.



## 3.1 ¿Qué es un sistema de ayuda a la decisión?

Los sistemas de ayuda a la decisión (SAD) aplicados a sistemas ambientales nacieron en la década de los 80 con el objetivo de proporcionar ayuda en la toma de decisiones, una ayuda que fuera simultáneamente más allá de la que ofrecían los modelos matemáticos que presentaban restricciones para incorporar conocimiento cualitativo y más allá de lo que sería una simple acumulación de experiencia difícil de gestionar. Ya desde su inicio son sistemas que agrupan diferentes herramientas procedentes de diferentes ámbitos. Esta versatilidad, y su reciente desarrollo, hace que no exista una definición única de los mismos.

Así, Fox y Dax, en su libro *Safe and Sound* consideran un sistema de ayuda a la decisión como un sistema computacional que ayuda a quien tenga la responsabilidad en la toma de decisiones, en el proceso de decidir entre alternativas o acciones, aplicando conocimiento acerca del dominio, para llegar a recomendaciones respecto a las diferentes opciones. El sistema incorpora un procedimiento de decisión explícito basado en un conjunto de principios teóricos que justifican la “racionalidad” del proceso. En este caso, los autores centran su atención en la necesidad de incorporar la justificación de la propuesta como elemento significativo, pero sin hacer referencia a aspectos como el tiempo de respuesta del SAD, que puede ser importante en el caso de aplicación a la gestión de procesos en línea.

Este segundo aspecto, sin embargo, focaliza la propuesta de Cortés, que define un SAD como un sistema de información inteligente, que ayuda a reducir el tiempo necesario para tomar decisiones y mejora la consistencia y calidad de las mismas. Las decisiones se toman cuando se observa (o predice) una desviación del estado del sistema respecto al esperado o deseado. Esto implica una conciencia del problema que, a su vez, debe estar basada en información, experiencia y conocimiento del proceso. En este caso

se refuerza asimismo la capacidad de integrar diferentes tipos de conocimiento que debe presentar un SAD.

Desde un punto de vista más operativo, podríamos definir un SAD como un sistema interactivo, flexible y adaptable que puede vincular métodos numéricos y algorítmicos con técnicas de inteligencia artificial, sistemas de información geográfica y ontologías ambientales.

Esta definición, cuya visualización se presenta en la figura que centra este apartado, refuerza la idea de los SAD como herramientas integradoras que incorporan metodologías procedentes de diferentes ámbitos y como elementos capaces de describir la complejidad de los sistemas que estudian –en nuestro caso, los sistemas de saneamiento–, por cuanto gestionan simultáneamente datos numéricos, conocimiento cualitativo y ontologías, además de incorporar las dimensiones espaciales (con los Sistemas de Información Geográfica) y las temporales (con los modelos matemáticos).

Ello no quiere decir que todos los SAD deban integrar todas estas herramientas, ya que sus constructores elegirán en cada caso las más adecuadas, pero en nuestra opinión hay algunos elementos que deben cumplirse necesariamente:

- Tienen que permitir gestionar datos, pero también, y muy importante, conocimiento adquirido a base de experiencia,
- Tienen que permitir incorporar resultados y conocimiento de diferentes ámbitos, diferentes expertos, diferentes niveles de descripción, etc.
- Tienen que permitir la recuperación de datos y de conocimiento de forma fácil y útil para el usuario.
- Tienen que ser capaces de justificar las propuestas, indicando qué y quien las apoya, es decir, qué fiabilidad se merecen los resultados proporcionados por el SAD.

Figura 3.1.1.

### TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

A lo largo de los años, la inteligencia artificial ha ido desarrollando herramientas capaces de mimetizar el comportamiento humano en sus capacidades de percepción, aprendizaje y razonamiento, unas herramientas que se han ido aplicando a la gestión de problemas complejos, y que han demostrado su capacidad para afrontar los mismos, especialmente cuando se integran con herramientas numéricas, ya que complementan las limitaciones que éstas presentan cuando se aplican a problemas complejos con dominios poco estructurados y donde el conocimiento experto es significativo.

En el caso de los sistemas de saneamiento, como en otros sistemas complejos, la utilización de estas técnicas ha ido evolucionando a lo largo del tiempo, desde unas aplicaciones iniciales con herramientas aisladas, al uso de metodologías más deliberativas aplicadas de forma más integrada.



## SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Los sistemas de información geográfica corresponden a sistemas de información, implementados habitualmente en software especializado, que permiten almacenar, procesar y recuperar información geo-referenciada de forma fácil para el usuario.

La posibilidad de separar la información de diferentes elementos (localización de instalaciones industriales, núcleos de población, sistemas de conducciones de fluidos...) en diferentes capas, y la posibilidad de relacionarlas entre ellas, es un elemento de gran ayuda en el proceso de toma de decisiones, ya que contribuye a identificar posibles interrelaciones entre los diferentes elementos. En este sentido, el mapa de Snow, representado en el apartado 1.3, puede ser considerado un pionero conceptual de este tipo de sistemas, que actualmente presentan un gran potencial.

**SAD**

## ONTOLOGÍAS AMBIENTALES

Aunque originalmente el concepto de ontología procede de la metafísica y se refiere al estudio de la existencia, en el entorno computacional en que se inscribe este libro, se considera la ontología como una herramienta que tiene como objetivo definir las relaciones o las categorías de una entidad, en nuestro caso los sistemas de saneamiento. Corresponde al conocimiento relativo al tema, definiendo la estructura de codificación a considerar y, sobre todo, la información que se incorpora de cada elemento.

Un conocimiento que debe ser consensuado, ya que será utilizado por diferentes agentes a lo largo del proceso de construcción del sistema de ayuda a la decisión. En este sentido, las ontologías proporcionan una forma de compartir conocimiento, en forma de conceptos que definen el dominio en estudio (los sistemas de saneamiento), sus propiedades y sus relaciones. Un conocimiento que debe ser consensuado para que pueda compartirse y reutilizarse. Esta capacidad de homogeneización, de base común a diferentes visiones, es la que explica su uso cada vez más generalizado.

## MÉTODOS NUMÉRICOS

Los métodos numéricos, en cuanto el uso de ecuaciones de diferente complejidad, han sido el procedimiento más valorado tradicionalmente para la descripción de procesos de la vida real, como los sistemas de saneamiento. Indudablemente, su fiabilidad ha ido aumentando a medida que se ha ido mejorando el conocimiento de que se dispone sobre estos sistemas y se han podido describir un mayor número de interrelaciones. Este proceso ha ido acompañado sinérgicamente de dos evoluciones significativas: la de los elementos de análisis que han permitido mejorar los procesos de monitorización y calibración, y la de la capacidad de cálculo de los ordenadores. En este último caso, incluso hay autores que ironizan sobre la causa-efecto de esta interrelación. En cualquier caso, la complejidad del problema a afrontar hace que hoy por hoy (y en un futuro próximo) sea difícil pensar que los modelos puedan conseguir describir toda la complejidad de los sistemas de saneamiento, y las interrelaciones entre los diferentes niveles de decisión que tienen lugar en los mismos.

## 3.2 ¿Por qué utilizar SAD?

Desde los inicios de propuestas de SAD a lo largo de los ochenta, éstos se han aplicado a diferentes problemas ambientales, especialmente a los relacionados con la gestión del agua. Queda lejos de los objetivos de este libro hacer una revisión exhaustiva de los SAD aplicados a la gestión ambiental, pero se pueden establecer diferentes criterios de clasificación que nos pueden ayudar a identificar cuáles son sus potencialidades.

- Por un lado, los SAD se han aplicado a tareas de planificación, donde han demostrado su capacidad para incorporar conocimiento cualitativo procedente de diferentes agentes que pueden intervenir en esta etapa. En este sentido, el progresivo incremento de la incorporación de procesos de participación en la toma de decisiones provoca la existencia de un conjunto de información y de detalles de la información cada vez más amplio. La consideración de diferentes tipos de experiencia e intereses que aparecen en estos procesos, muchas veces explicitados de forma no concreta, hace que exista un conocimiento disperso que hace difícil el uso de técnicas numéricas tradicionales. Por ello el uso de ontologías y técnicas de inteligencia artificial especializadas en la emulación del comportamiento humano han permitido que los SAD hayan sido utilizados como sistemas capaces de integrar todo este conocimiento y de ofrecer –de una manera fácilmente comprensible por los usuarios– propuestas razonadas que son utilizadas como elementos de discusión para alcanzar soluciones de consenso.
- Simultáneamente, se ha producido una evolución para la incorporación de los SAD a la gestión en línea de los sistemas. Ello ha implicado la incorporación de tecnologías de monitorización, incluyendo la adquisición de datos, su validación y su uso en tiempo real, para así ser capaces de ofrecer respuestas y actuaciones de acuerdo

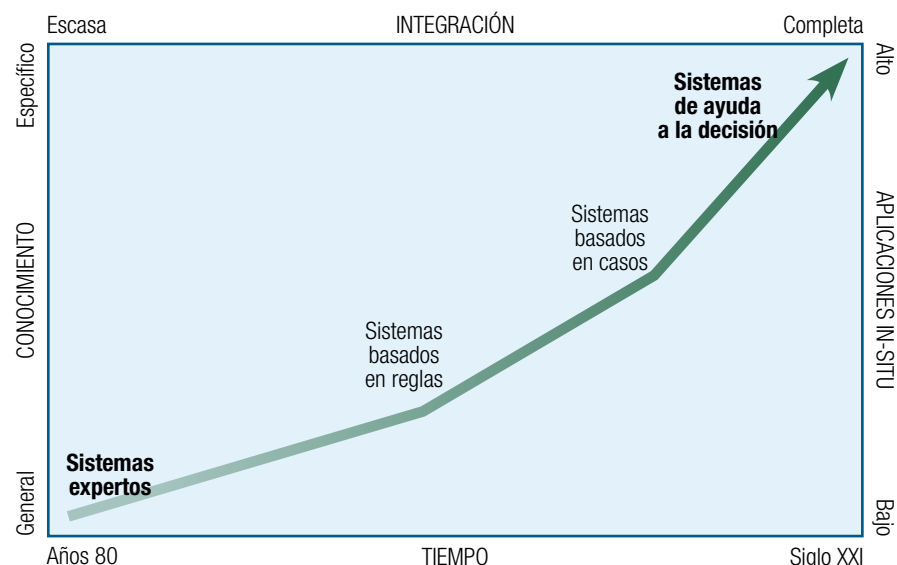
con las necesidades operativas. La incorporación de conocimiento experto para complementar los sistemas de control clásicos puede considerarse uno de los retos importantes en la utilización de los SAD.

De la aplicación de los SAD se ha podido constatar:

- Su capacidad para adquirir, representar y estructurar el conocimiento, siendo capaces de procesar incertidumbre tanto en datos como en conocimiento.
- La capacidad de separar datos de modelos, y por lo tanto la posibilidad de trabajar en espectros más generales y amplios.
- La capacidad de trabajar con las dimensiones espaciales y temporales.
- La capacidad de proporcionar conocimiento experto, incorporando bases de conocimiento específico.
- La capacidad de proporcionar respuestas objetivas tanto *off-line* como *on-line*.
- La capacidad de ser utilizados para diagnóstico, planificación, gestión y optimización.
- La capacidad de ayuda al usuario durante la formulación del problema y la selección de métodos y modelos para su solución, permitiendo evaluar diferentes alternativas.

Los SAD incorporan un procedimiento explícito de decisión basado en un conjunto de principios teóricos que justifican la “racionalidad” del procedimiento. Gracias a esta racionalidad, los SAD

1. pueden dar solución a problemas complejos,
2. permiten afrontar problemáticas donde la experiencia proporciona una ayuda importante y/o imprescindible para encontrar una solución,
3. reducen el tiempo de identificación del problema, y el tiempo que se necesita para tomar una decisión y
4. mejoran la consistencia y la calidad de estas decisiones.



A lo largo de los años, y a medida que su uso permitía ir adquiriendo experiencia, los SAD han ido evolucionando para adaptarse a los problemas a que debían hacer frente. En la figura se ha esquematizado esta evolución centrándose en tres aspectos:

- El tipo de conocimiento utilizado
  - La aplicación a situaciones reales
  - La capacidad de integración respecto a los problemas estudiados
- En el primer caso, en sus inicios los SAD incorporaban conocimiento muy genérico, por lo que su capacidad de abordar problemas concretos se encontraba limitada, ya que para ello era necesario incorporar conocimiento específico del problema en estudio. Esta evolución ha estado muy relacionada con el desarrollo de herramientas de adquisición del conocimiento, que son las que han permitido pasar de la utilización de procedimientos aplicables a situaciones generales a las situaciones concretas requeridas por los usuarios. Es de destacar que en esta evolución han habido aportaciones integradoras desde ámbitos como la inteligencia artificial o las matemáticas para ser capaces de desarrollar herramientas para la adquisición de conocimiento tanto a partir de entrevistas a expertos, como del uso de grandes bases de datos, cada vez más frecuentes.
  - En el segundo caso, es interesante estudiar como los SAD se han ido incorporando al mundo real de una forma significativa. Aunque desde sus inicios ya eran una herramienta nacida con la voluntad de ser útil en la resolución de problemas ambientales complejos, la mayoría de los sistemas desarrollados en los primeros años lo fueron por parte de universidades y centros de investigación, en muchos casos –y aquí a los autores de este libro también les toca entonar un *mea culpa*– más preocupados por el estudio de la propia herramienta que de su aplicación. Hay que tener en cuenta que se trataba de una nueva metodología, que era compleja y, quizá como excusa, puede aducirse que no era fácil su desarrollo. Pero no ha sido hasta que se ha cambiado este paradigma y el foco se ha centrado en el planteamiento del problema ambiental

cuando los SAD se han ido aplicando de forma cada vez más amplia. Un proceso en el que es importante destacar la incorporación, en forma de círculo virtuoso, de los responsables de las empresas o administraciones, que a medida que han ido constatando las virtudes de los SAD los han ido incorporando a su arsenal de herramientas.

- En el tercer caso, teniendo en cuenta la complejidad de los sistemas ambientales en general y de los sistemas de saneamiento en particular, los primeros esfuerzos se centraron en intentar abordar problemas focalizados que pudieran ser afrontados de forma eficiente con la capacidad de los SAD desarrollados inicialmente. A medida que las herramientas que integran los SAD se han ido perfeccionando y los resultados obtenidos en su aplicación práctica han ido siendo más satisfactorios, la ambición de su aplicación ha ido aumentando, de manera que se han ido integrando nuevos elementos del sistema ambiental a ser considerados. En este contexto, entendemos que este libro es un buen ejemplo de esta evolución, por cuanto se presentan SAD desarrollados por los autores con diferentes niveles de integración, tanto en el diseño como en la operación de sistemas de saneamiento, con lo que se obtiene una perspectiva razonablemente amplia de las potencialidades de la herramienta.

Ello ha llevado a que se haya pasado de una situación inicial de sistemas muy estáticos, en que se establecían largos diálogos entre el usuario y el SAD –como los originales sistemas expertos parecidos a los utilizados en medicina para diagnosticar pacientes– a la existencia actual de sistemas de ayuda a la decisión dinámicos, que son capaces de: -adquirir información en línea del sistema que están estudiando; -procesar esta información numérica; -adquirir conocimiento a partir de ella; -procesarlo conjuntamente con conocimiento adquirido previamente; -establecer un proceso de aprendizaje y automejora del propio SAD; todo ello para proponer soluciones, a implementar en forma de planes y acciones para sistemas cada vez más complejos que contemplen integralmente todo un sistema de saneamiento.

## No todo el monte...

Tal como se ha ido indicando, los SAD constituyen herramientas que puede ser muy útiles en el diseño y operación de los sistemas de saneamiento. Actualmente, ya pueden ofrecerse ejemplos –y los que presentamos en este libro constituyen un conjunto representativo de los mismos– de SAD que han sido aplicados de forma eficiente y han demostrado que su aplicación mejora las prestaciones que pueden obtenerse utilizando algunas de las herramientas individualmente (modelos matemáticos, sistemas de información geográfica) o basándose sólo en la experiencia de un técnico o de un experto. Pero ello no quiere decir que ya esté recorrido todo el camino, ni tampoco que puedan considerarse como la panacea que sirva para resolver todos los problemas que se presentan en los sistemas de saneamiento. Todavía queda mucho trabajo a realizar para mejorar sus procedimientos de construcción y operación y para que simplemente puedan ser consideradas herramientas habituales.

En las etapas de construcción, su propia capacidad de integrar diferentes herramientas procedentes de diferentes ámbitos hace que esta integración a veces sea compleja, y en nuestra opinión todavía no está resuelta de una manera completamente satisfactoria, con existencia de protocolos definidos, y todavía se recurre mucho a la experiencia de los propios constructores.

Otro de los aspectos en los que se sigue trabajando y se van obteniendo metodologías más eficientes, pero donde todavía hace falta un mayor esfuerzo de aplicación a la resolución de situaciones reales, es el de la mejora de los métodos de adquisición de conocimiento. Los SAD utilizan diferentes fuentes de conocimiento, lo que conlleva diferentes maneras de representar, extraer y combinar la información. La propia naturaleza de los problemas que los SAD quieren contribuir a resolver hace que la etapa de adquisición del conocimiento sea un auténtico cuello de botella. Para la mayoría de los problemas existen cantidades ingentes de datos acerca del proceso, pero ello no implica que el nivel de información acerca de las relaciones de causa o dependencia entre las variables sea conocido.

Una vez adquirido este conocimiento, y quizá debido a la “juventud” de la herramienta, actualmente no hay soluciones definitivas para compartir el conocimiento adquirido, tanto el genérico como el más general, para el diseño de otros SAD. Este es un aspecto en el que se han obtenido algunos resultados esperanzadores, por lo que es de esperar que en el futuro próximo pueda ser resuelto de forma satisfactoria.

Pero si hay un tema crítico en la utilización de los SAD, este se encuentra en la interrelación con los usuarios finales, y su implicación a lo largo del desarrollo de su construcción. En general, el papel del usuario se encuentra mal definido, especialmente teniendo en cuenta que estos sistemas se desarrollan para dar apoyo a los responsables de la toma de decisiones en problemas complejos. Los usuarios se deben implicar en el proceso global de diseño y desarrollo del sistema, para asegurar la utilidad del sistema final. Será el grado de implicación de los usuarios lo que determinará, finalmente, su nivel de confianza en el sistema final, y en el peor de los casos implicará que el sistema no sea utilizado. Y, finalmente, cabe recordar que son elementos de ayuda a la decisión. Los SAD pueden ser capaces de gestionar el conocimiento existente, de efectuar diagnosis lo más “razonables” posible, pero la decisión final queda en manos del ser humano... al menos de momento.



Figura 3.2.1.  
Evolución de los SAD desarrollados



## 3.3 ¿Cómo construir un SAD?

Aunque puede haber diferentes matices de un caso a otro en función de las características de cada problema, proponemos la realización de cinco etapas que se desarrollan secuencialmente.

Teniendo en cuenta que hay diferentes propuestas de lo que se puede considerar un sistema de ayuda a la decisión, también es posible encontrar diferentes propuestas de cómo pueden construirse. En este capítulo presentamos la que es nuestra propuesta y que hemos utilizado a lo largo de estos años, para construir los SAD que se presentan en el segundo bloque del libro. Aunque pueden haber diferentes matices de un caso a otro, en función de las características de cada problema, proponemos la realización de cinco etapas que se desarrollan secuencialmente. Éstas se inician con el planteamiento del problema que ha de permitir definir qué se espera del SAD y cuáles son los elementos que se ponen en juego para su construcción, incluyendo los aspectos materiales, pero sobre todo la definición de las relaciones entre los agentes que intervienen (quién coordina, a quién se pide información, cómo será el flujo de la misma o quién podrá acceder a qué partes del sistema). En la segunda etapa, creemos que es importante remarcar la complementariedad entre la obtención de datos y la adquisición de conocimiento. Por nuestra experiencia entendemos que es importante extraer conocimiento de los expertos, pero también el uso de herramientas que permitan extraer conocimiento a partir de los datos. Será un conocimiento específico del sistema en estudio, pero importante para complementar el conocimiento teórico que se puede obtener de la bibliografía o de la experiencia de los expertos entrevistados. La tercera etapa de analizar los resultados obtenidos en el análisis cognitivo es importante, ya que suele ser un punto de inflexión en la construcción del sistema. Un punto en el que se pueden replantear algunos de los objetivos iniciales, a partir de la realidad constatada en estas etapas. La cuarta etapa de selección de modelos se encuentra muy condicionada por el tipo de conocimiento adquirido y por la experiencia previa de los desarrolladores, pero en cualquier caso es donde se constata una de las potencialidades de

los SAD, su capacidad de integrar aspectos cuantitativos y cualitativos. Creemos esta etapa es clave y diferencia a los SAD de otras herramientas, también muy útiles, pero más condicionadas en este aspecto. La última etapa de integración e implementación es más técnica. Si en las anteriores el liderazgo lo pueden llevar personas con más experiencia en el área de los sistemas de saneamiento o del agua en general, en este apartado el liderazgo corresponde a los técnicos o científicos con experiencia en sistemas de computación.

Una vez finalizadas estas etapas, cuando parece que el SAD ya está a punto de ser utilizado, restan dos tareas que son decisivas, y de las que esperamos puedan aprender de nuestros errores. Porque corresponden a un trabajo que no debe realizarse al final, como desgraciadamente se hace a veces, sino que debe desarrollarse en paralelo. Por un lado, la validación de cada una de las tareas que se van realizando. No hay que esperar al final para replantearse algunos objetivos o evaluar la fiabilidad de algunos resultados. Por otro lado, la necesaria transferencia al usuario final del producto construido. Un SAD es un producto que normalmente se ha construido con la aportación de mucha gente, pero que será utilizado seguramente por un número más reducido de personas y que debe ir participando en el proyecto desde el inicio para que se lo sienta suyo, sobre todo desde el punto de vista de implicación.

Queremos recordar, finalmente, que esta propuesta se presenta como ayuda a la decisión en la construcción de un SAD para sistemas de saneamiento, y que puede ser tomada como guía general, pero que será el lector, cuando quiera construir uno, quien podrá (y deberá) ir modificando la misma en función de las condiciones de cada caso en particular.

### PROCESO DE EVALUACIÓN

Para que el SAD obtenido proporcione resultados fiables debe ser evaluado en relación con diferentes indicadores, para ir depurando posibles errores cometidos en cada una de las etapas. Esta tarea debe irse realizando simultáneamente a cada una de ellas. Este proceso, además, puede proporcionar información que implique la revisión de alguna de las decisiones que se han tomado en las etapas anteriores, detectar posibles errores en la especificación del sistema, o errores semánticos o sintácticos. Finalmente, realizados todos los procesos de evaluación parciales, el sistema necesita ser validado previamente a su utilización. Como cualquier sistema basado en el conocimiento, el SAD necesita ser evaluado en referencia a lo que es capaz de aprender, y con cuanta rapidez lo hace y también en referencia a lo que “sabe”, a cómo utiliza lo que “sabe”, y a cómo “explica” y “justifica” lo que propone.

Figura 3.3.1

## ANÁLISIS DEL PROBLEMA

Es una etapa clave en la que es necesario plantearse en primer lugar cuál es el objetivo para el que se va a construir el SAD. ¿Qué se espera obtener del mismo? ¿Cuál es el nivel de decisión en el que va a intervenir? ¿Cuál es el sistema que se va a estudiar? ¿Cuáles son los agentes que van a aportar conocimiento? ¿Quién lo va a utilizar y en qué contexto? ¿Cuál es la estimación temporal para su construcción? ¿De qué infraestructura se dispone? ¿Cómo se prevé su utilización y su mantenimiento?

Estas son algunas de las preguntas a las que hay que responder para orientar claramente las etapas posteriores, preguntas para las que, en muchos casos, se obtiene una respuesta que posteriormente se va modificando en el proceso de evaluación.

## OBTENCIÓN DE DATOS Y ADQUISICIÓN DE CONOCIMIENTO

Una vez que el problema se ha definido, empieza la fase de obtener los datos y adquirir el conocimiento, que permitirán soportar las propuestas que realice el SAD. Existen diferentes fuentes en las que apoyarse en esta etapa, que podemos agrupar en tres grandes apartados: la bibliografía existente sobre la problemática general del tema en estudio; las bases de datos que puedan encontrarse sobre el sistema; y las visitas a instalaciones y entrevistas a expertos. El conjunto nos permite incorporar información teórica, empírica y de experiencias. Su combinación nos ha de permitir la integración de puntos de vista, perspectivas y objetivos procedentes de diferentes disciplinas y tradiciones.

## ANÁLISIS COGNITIVO

Una vez obtenidos los datos y adquirido el conocimiento, éste debe ser analizado para obtener el máximo rendimiento del mismo. En el caso de los datos, será necesario seleccionarlos, y utilizar herramientas de minería de datos que nos permitan clasificarlos, identificar agrupaciones y modelos de comportamiento e interpretarlos para extraer conocimiento de los mismos que podamos codificar. En el caso del conocimiento, el uso de las entrevistas permite identificar conocimiento específico adquirido a lo largo del tiempo sobre un dominio, teniendo siempre en cuenta la paradoja del experto, que nos recuerda que cuanto más se sabe de un tema, más difícil es identificar los procesos de razonamiento que se utilizan para dar una respuesta.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

MINERÍA DE DATOS

APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

## SELECCIÓN DE MODELOS (técnicas de inteligencia artificial, estadísticas, SIG, modelos numéricos de simulación y optimización)

Modelo es una palabra con muchas interpretaciones y cuyo significado varía según la especialización del oyente. En el trabajo realizado hemos considerado cuatro tipos de modelos: a) los que provienen del uso de los sistemas de información geográfica (SIG); b) los modelos numéricos, bien en su vertiente determinista, en cuanto utilizan ecuaciones que describen el conocimiento que se tiene de un proceso, bien en su vertiente empírica, en cuanto utilizan ecuaciones que se basan en el comportamiento del sistema; c) los modelos estadísticos que estiman la probabilidad futura de un acontecimiento a partir de su comportamiento previo; d) modelos de inteligencia artificial, especialmente los basados en reglas, casos y agentes.

## INTEGRACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS

En la etapa de integración, los diferentes modelos utilizados se agrupan en una estructura funcional. Hay que tener en cuenta que diferentes modelos pueden trabajar en paralelo para obtener un resultado, o en serie, correspondiendo la salida de uno de ellos a la entrada del siguiente. Todas estas herramientas deben, posteriormente, ser implementadas en un programa informático que realice la integración de los diferentes modelos, y cuyas ejecuciones permitan obtener propuestas, que actúan como ayuda a la decisión.

## SISTEMA DE AYUDA A LA DECISIÓN (SAD)

## 3.4 ¿Cómo opera un SAD?

El esquema que se presenta en este apartado corresponde al caso más general, que incluye cinco niveles de operación, aunque no todos son utilizados en cada caso

De la misma manera que hay diferentes maneras de construir un sistema de ayuda a la decisión, también hay diferentes maneras de operación. En este apartado se presenta la arquitectura utilizada en los SAD que se incluyen en el segundo bloque del libro. El esquema que se presenta en este apartado corresponde al caso más general, que incluye cinco niveles de operación, aunque no todos son utilizados en cada caso.

El SAD inicia su operación a partir de unos datos de entrada, que pueden ser proporcionados por el usuario u obtenidos directamente del sistema de saneamiento, cuando el SAD trabaja en línea.

▶  
Figura 3.4.1

### AYUDA A LA DECISIÓN

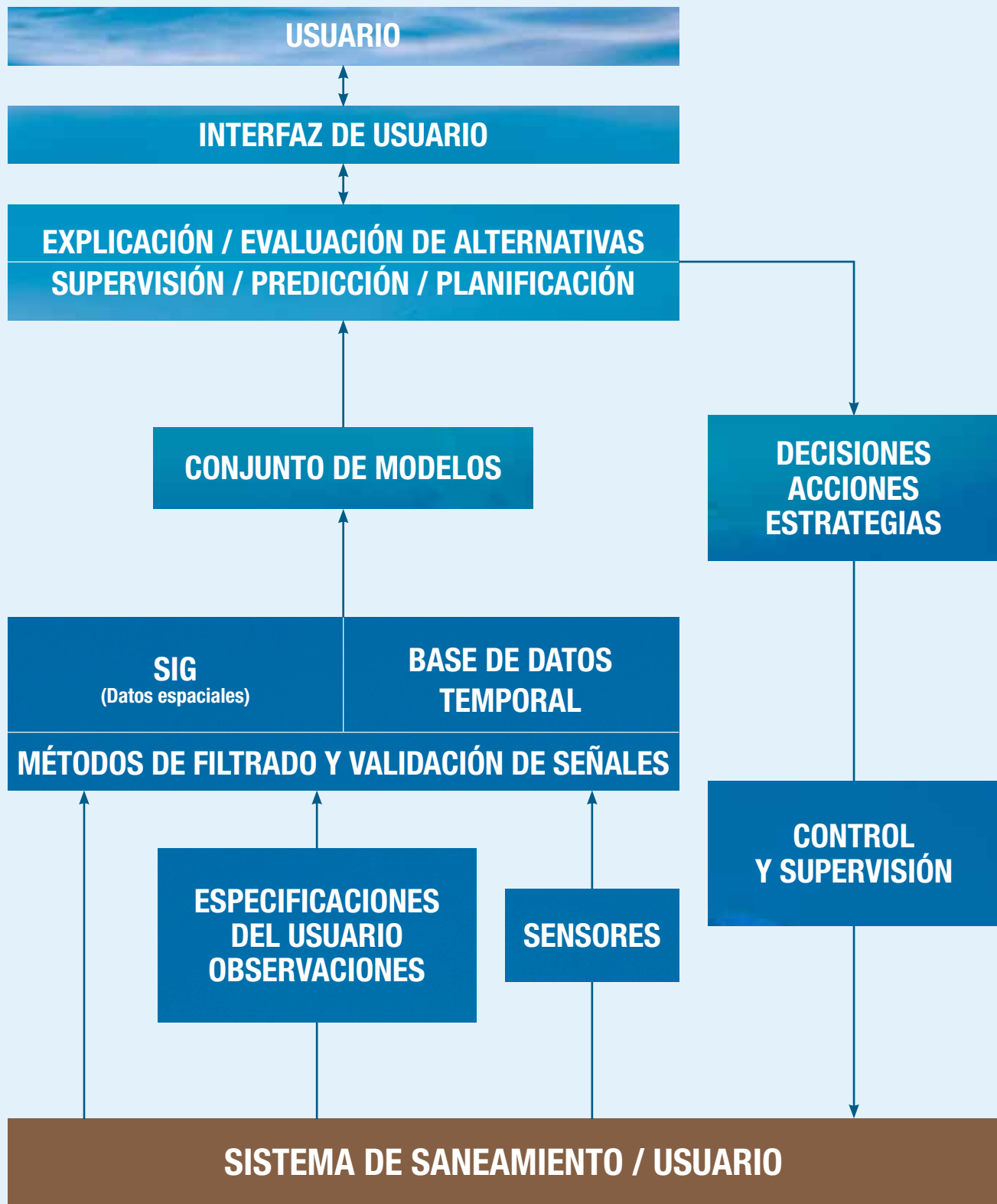
El tercer nivel establece las tareas de supervisión, que integran y procesan las conclusiones derivadas del nivel anterior, hasta alcanzar un diagnóstico del sistema, identificando las causas y aplicando el conocimiento disponible para proponer diferentes alternativas. En este nivel es importante la interacción con el usuario, a través de una interfaz interactiva que sea, sobre todo, amigable. En el caso de operación en línea el SAD puede estar conectado con el sistema SCADA de la instalación.

### DIAGNOSIS

El segundo nivel incluye los modelos de razonamiento que se utilizan para inferir el estado del proceso, a partir de la información disponible, y que posteriormente permitirán realizar una propuesta de actuación. Es en esta etapa donde se hace uso de los modelos que se hayan implementado en el SAD.

### ENTRADA DE DATOS

El primer nivel realiza las tareas implicadas en el proceso de obtención de los datos de entrada que van a iniciar el proceso de operación del SAD. Es importante considerar el modo de operación del SAD. En el caso que trabaje fuera de línea la variable tiempo de respuesta no suele ser crítica, y habitualmente los datos de entrada corresponderán a información para la que se habrán establecido las correspondientes pantallas interactivas de entrada, en las que el usuario podrá aportar la información correspondiente de la forma más amigable posible, como ocurre fundamentalmente en los casos de aplicación a diseño. En los SAD aplicados a operación, en los que se prevé una respuesta en línea del sistema, esta entrada de información se complementa con conexiones directas con equipos de medida en línea que proporcionan el estado de la instalación. Hay que tener en cuenta que los datos que se obtienen suelen presentar lagunas, lo que implica la aplicación de procedimientos de procesamiento y filtrado de datos, antes de que puedan ser registrados en un formato comprensible e interpretable.



### PLANES

En el cuarto nivel es donde se formulan los planes que se proponen para la solución del problema, presentándose como un conjunto de acciones sugeridas a los responsables de la gestión. Estas acciones se encuentran, en este nivel, enmarcadas de una forma integral y como un conjunto interrelacionado entre sí.

### ACTUACIONES

Finalmente, en el quinto nivel se proponen las acciones concretas a ser ejecutadas como consecuencia de la aplicación de los planes. El sistema recomienda no sólo una acción (o una secuencia de las mismas) sino también un valor que debe ser evaluado por el responsable de la decisión. Este es el último nivel de la arquitectura, y es el que, con su aplicación, cierra el ciclo.



# 4 Planificación estratégica



De acuerdo con los niveles de decisión que se han considerado en el diseño de sistemas de saneamiento, en este nivel se toman las decisiones que más impacto tienen en los mismos, aunque muchas veces aparecen como efectos colaterales de otras decisiones. Teniendo en cuenta que el objetivo del libro es proporcionar herramientas que ayuden en la toma de decisiones, después de analizar la problemática del contexto, en este capítulo se describen trabajos realizados por los autores que pueden ayudar a predecir cuál es el impacto de las decisiones y optimizar las mismas. Se presenta, en primer lugar, un SAD que permite incorporar las sensibilidades de diferentes agentes sociales para identificar cuál es el impacto de determinadas propuestas de sistemas de saneamiento en la gestión global de la calidad del recurso agua. En el apartado siguiente, se presenta el trabajo realizado en el ámbito de la gestión de nutrientes en una cuenca para obtener criterios de diseño y operación de los sistemas de saneamiento a un nivel más específico. Finalmente, en el último apartado se propone la utilización de una metodología basada en agentes para gestionar el comportamiento de un sistema autoorganizado aplicado a una problemática real, como es la autorización de los vertidos industriales en un sistema de saneamiento.

Para la presentación de los casos de estudio se sigue un esquema basado en la metodología propuesta de construcción y operación de SAD. Así en la primera parte de cada ejemplo se considera el Análisis del problema, la adquisición de datos y conocimiento, la selección de modelos y las etapas de integración e implementación. En la segunda parte se presenta en modo de operación considerando los datos de entrada, el procedimiento de diagnóstico y las respuesta que proporciona el SAD desarrollado.



# 4.1 Gestión integral de una cuenca

“En los temas de gestión ambiental... actualmente ya no sirve una aproximación lineal. Ya no sirve buscar una solución para cada problema”

*Francesc Baltasar (2008)*

Conseller de Medi Ambient. Generalitat de Catalunya

## Análisis del problema

Uno de los problemas complejos a los que se enfrenta la Administración responsable de la gestión del agua de una cuenca es la definición de las actuaciones a realizar para conseguir los objetivos de calidad deseados. En el caso de los países de la Unión Europea, estos objetivos se concretan en alcanzar el adecuado estado ecológico definido por la Directiva Marco del Agua.

El problema puede situarse en la escala de máxima complejidad por cuanto confluyen en él:

- La presencia e intervención de un elevado número de actores de la sociedad civil (entidades, instituciones, empresas, particulares...) que se ven afectados por las diferentes formas de gestión del recurso.
- Las importantes interrelaciones existentes entre las problemáticas, sus desencadenantes y las actuaciones necesarias para la solución del problema. Una problemática puede ser provocada por diferentes desencadenantes, un desencadenante puede originar diferentes problemas, o una medida correctora puede actuar sobre diferentes problemáticas/desencadenantes, o incluso puede provocar efectos colaterales que actúen como nuevos desencadenantes.

Simultáneamente, se puede apreciar que coexisten:

- Diferentes escalas temporales,
  - minutos/horas (tormentas que pue-

den colapsar el alcantarillado, vertidos puntuales, variaciones de caudal provocadas por centrales hidroeléctricas, tiempo de residencia del agua en una estación de tratamiento...)

- días/semanas (crecimiento de algas, variaciones de consumo por fines de semana, impacto de una noticia en los periódicos, tiempo de residencia del agua en un curso superficial...)
- meses/años (construcción de un colector, percolación de vertidos en el suelo, mandato de un gobierno, vertidos al suelo, construcción/remodelación de una estación de tratamiento, variaciones estacionales de lluvias y consumos...)
- años... (construcción de grandes infraestructuras, implantación de nuevos paradigmas en la cultura del agua, tiempo de residencia del agua en un acuífero...)

b) Diferentes niveles de incertidumbre en la descripción de los procesos. Así, los podemos describir:

- con bastante precisión (dinámica de un fluido en una conducción, rendimiento de una operación de tratamiento...),
- sólo de forma aproximada (previsión del consumo a corto plazo...),
- que presentan una elevada incertidumbre (evolución del (de)crecimiento industrial, régimen de lluvias a lo largo de los próximos años...) apareciendo incluso el fenómeno “cisne negro”, que se ha presentado en el apartado 2.7.

Todo ello debe ser coordinado por la Administración competente, a la que le corresponde:

- recabar la información y el conocimiento, procesarlos, hacer propuestas de actuación y aplicarlas, después de haber conseguido el consenso necesario.

Y con un planteamiento de necesaria sostenibilidad en la gestión (económica, ecológica y social), que a veces es difícil de considerar globalmente, puesto que las propuestas:

- tienen que respetar el medio ambiente, pero no a cualquier precio económico y/o social,
- tienen que ser asumibles económicamente, pero no a cualquier precio ambiental y/o social,
- se tiene que procurar la equidad social (personal y territorial), pero no a cualquier precio ambiental y/o económico.

Es por ello que se tienen que hallar soluciones que sean capaces de gestionar esta complejidad, describiendo las interrelaciones y los efectos colaterales. En este contexto se presenta el trabajo realizado para desarrollar un sistema de ayuda a la decisión (SAD) para la **definición las actuaciones a realizar en la cuenca del Baix Ter como experiencia piloto**.

El objetivo era construir el esquema conceptual de un SAD que de manera automatizada fuera capaz de gestionar, de forma integrada, el recurso agua en base a criterios legales, conocimiento experto, recursos disponibles y decisiones políticas, justificando en cada caso las decisiones propuestas.

Como objetivos del sistema se establecieron:

- integrar datos y experiencia,
- incorporar resultados de diferentes ámbitos, diferentes expertos, diferentes niveles de descripción, etc.
- efectuar un análisis de alternativas,
- justificar tanto la elección de las propuestas aceptadas como las desestimadas, indicando cuáles son sus efectos y costes económicos y ambientales.

## Adquisición de datos y conocimiento

En este nivel confluyen diferentes tipos de datos y conocimientos a los que se puede acceder para la construcción del sistema de ayuda a la decisión. En este caso, se seleccionaron:

- Datos hidrológicos y de calidad (caudales e indicadores a las entradas y salidas del sistema).
- Informes previos de evaluación del estado del medio incorporados en el documento IMPRESS.
- La experiencia de entes locales, organizaciones, expertos en los campos de la ecología, tecnología, sociología... Parte de esta información se encontraba en un documento previo de resumen de la diagnosis de las problemáticas, recogidas a partir de un proceso de participación en el que se identificaban las problemáticas existentes en la zona y su posible origen.
- Las actuaciones propuestas por los ciudadanos en diferentes talleres de participación, analizando además, para cada una de ellas, su viabilidad.

## NIVEL 1

Identificación para cada una de las cuencas de las problemáticas existentes y sus posibles causas (una misma problemática puede haber sido originada por más de una causa).

### Documentos / estudios de base:

- Documento IMPRESS (de tipo general)
- Procesos participativos (problemáticas muy localizadas)

## NIVEL 2

Enumeración de cada una de las medidas previstas para solucionar los problemas o para regular las actividades desencadenantes.

Búsqueda de las relaciones entre problemáticas –desencadenantes– medidas.

Justificación de cómo cada una de las medidas puede abordar la problemática tratada.

### Documentos / estudios de base:

- Planes y programas en ejecución/ revisión y previstos/pendientes por la Administración
- Normativa relacionada

## NIVEL 3

Cuantificación de las mejoras que experimenta cada una de las masas de agua después de la aplicación de las medidas previstas en los planes y programas.

### Herramientas / metodologías:

- Programas de simulación de la evolución de los recursos hídricos y de calidad del agua
- Entrevistas con expertos para representar / cuantificar relaciones

## Selección de modelos

Para poder relacionar las problemáticas existentes con las actividades contaminantes y las medidas que potencialmente pueden solucionar las problemáticas o regular las actividades, se ha diseñado una aplicación a tres niveles donde se han incluido todas las posibles combinaciones entre los tres conjuntos de variables. De esta manera es posible gestionar la información en función de la variable que interese. En este sentido, el sistema tiene que ser capaz de recuperar la información facilitando:

- Todas las actividades y procesos que generan un determinado problema.
- Todas las medidas que pueden solucionar un determinado problema
- Todas las problemáticas que pueden ocasionar una misma actividad o proceso
- Todas las medidas que pueden regular una cierta actividad o proceso
- Todas las problemáticas y actividades/procesos que pueden solucionar y/o regular una determinada medida.

Figura 4.1.1.

Mapa de la Cuenca del Baix Ter.



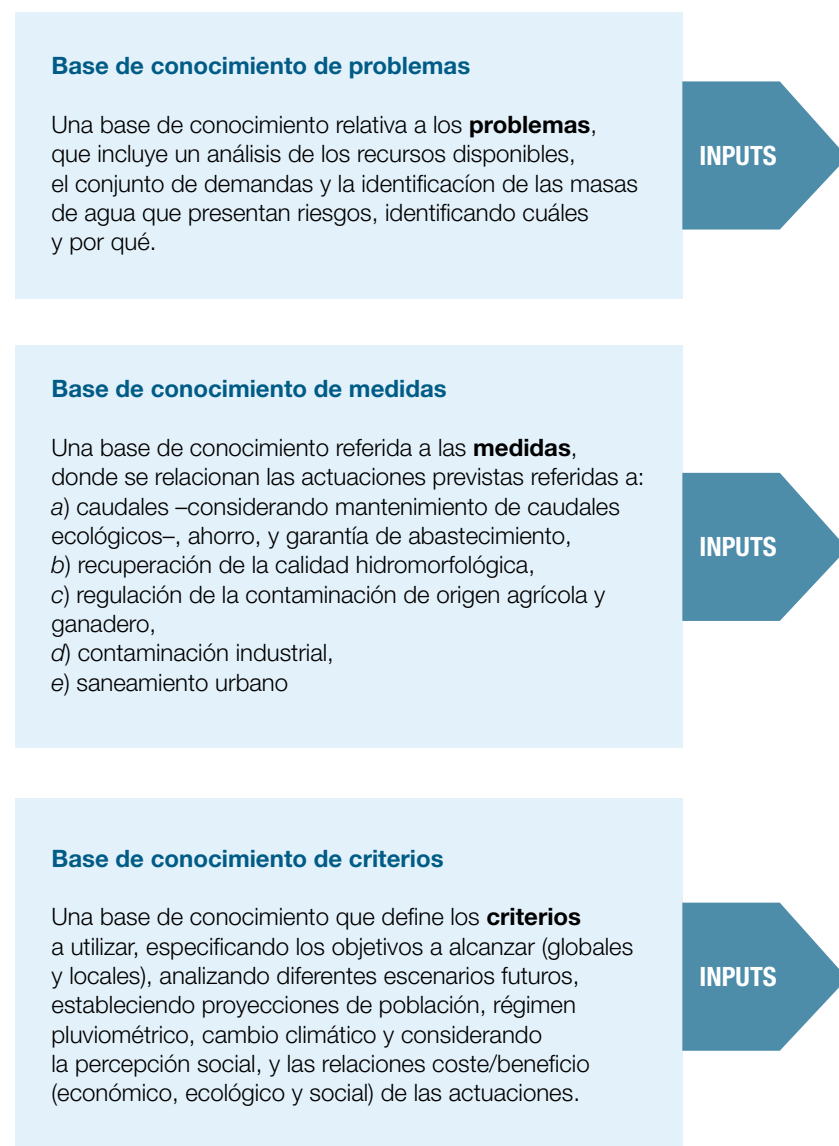


## OPERACIÓN

En el funcionamiento interno del SAD se identifican y se relacionan las problemáticas identificadas, las causas y/o desencadenantes y su relación con las medidas o propuestas de actuación, tal como se esquematiza en la figura (para una parte de ellas, simplificando las relaciones para una mejor representación).

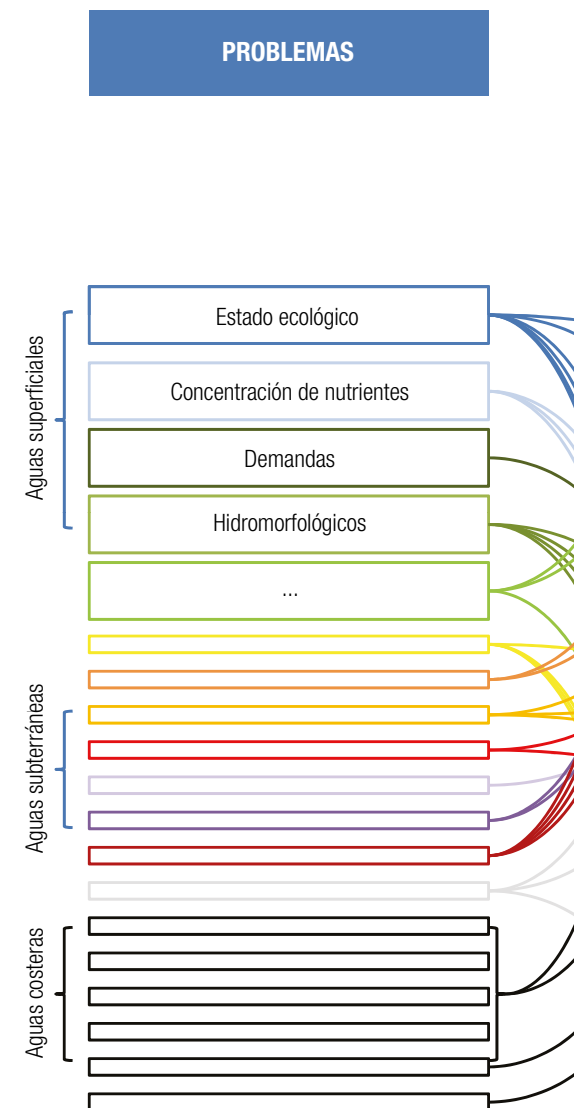
### Entrada de datos

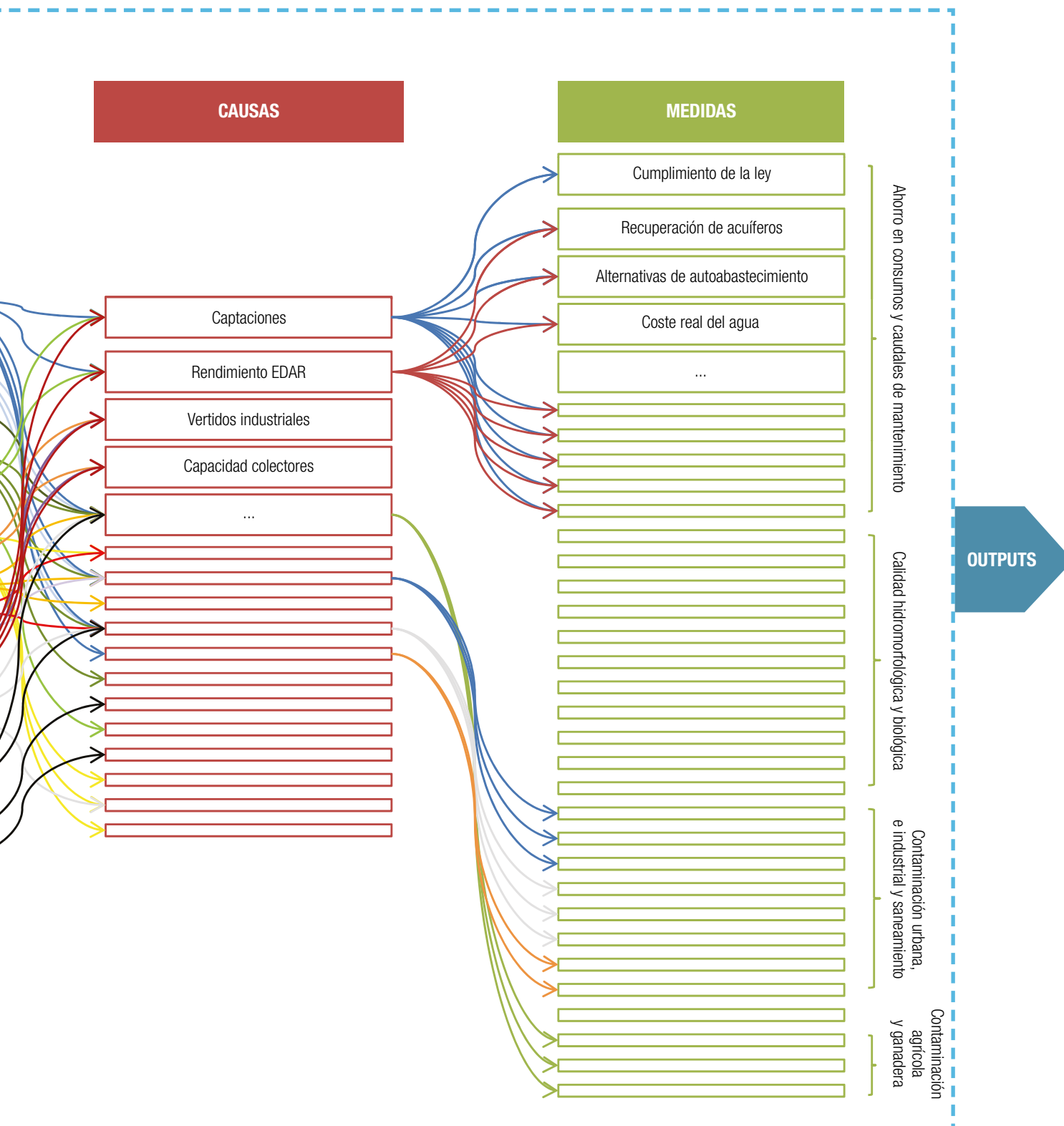
La estructura de operación del SAD se basa en la utilización de tres bases de conocimiento:



### Diagnóstico

Este conocimiento es procesado en el SAD, de acuerdo con el esquema de operación presentado en la figura. En el mismo se relacionan las propuestas de actuación con las diferentes problemáticas y las relaciones coste/beneficio. Su evaluación mediante modelos matemáticos o con el conocimiento de expertos (codificado en forma de reglas) sirve para determinar si el conjunto de medidas es el adecuado para alcanzar los objetivos deseados. En esta etapa, y teniendo en cuenta que el conocimiento es aportado por diferentes agentes (técnicos de la administración, científicos, entidades del territorio, público participante en los talleres, etc.) es importante identificar en la codificación el origen del conocimiento incorporado.





## Resultados

### Resultado general:

interrelaciones entre problemáticas, actividades, procesos desencadenantes y medidas propuestas por la Administración o en los procesos participativos.

### Resultados concretos:

- Diagnóstico del estado de cada masa de agua de la zona en estudio (Baix Ter)
- Identificación del desencadenante de cada problemática y su localización en el territorio
- Relación de todas aquellas medidas propuestas por la Administración o en los procesos participativos, identificando su coste e impacto.

### Resultado final:

Explicación de por qué y cómo las medidas propuestas permiten alcanzar los objetivos al menor coste económico y con el mayor grado de consenso a partir del proceso de participación.

## 4.2 Gestión de nutrientes en una cuenca

### Análisis del problema

La gestión de nutrientes a nivel de cuenca es una tarea compleja, debido a la existencia de diferentes impactos procedentes de fuentes puntuales y no puntuales, a las diferentes respuestas del ecosistema a estos impactos y a los diferentes usos y demandas del agua que se pueden producir en la cuenca. Todavía existe un importante desconocimiento de algunos de los impactos producidos por la actividad humana, especialmente en ríos de tipo mediterráneo con grandes variaciones de caudal, y de cuál es el comportamiento del sistema cuando se enfrenta a alteraciones hidromorfológicas o vertidos significativos.

La toma de decisiones en este contexto, en línea con las recomendaciones de la Directiva Marco del Agua, requiere de la incorporación de diferentes disciplinas que tengan en cuenta aspectos cuantitativos y cualitativos (químicos, físicos, biológicos, hidromorfológicos, ...) integradas en herramientas capaces de una gestión eficiente del conocimiento.

**En este apartado se presenta el trabajo realizado en el desarrollo del SAD Streames**, realizado en el marco de un proyecto europeo en el que participaban grupos de investigación y agencias del agua de diferentes países. Su objetivo era el de identificar y gestionar de forma eficiente la capacidad de retención de nutrientes de diferentes tipos de tramos de río, la diagnosis de los problemas que se pueden presentar, especialmente los relacionados con cargas excesivas de nutrientes, las causas de los problemas diagnosticados y las acciones posibles para resolver o mitigar las consecuencias de los problemas.

### Adquisición de datos y conocimiento

Dada la complejidad del problema, se recurrió a diferentes fuentes para obtener el conocimiento necesario a incorporar al sistema de ayuda a la decisión. El conocimiento general se obtuvo mediante la revisión de la bibliografía existente y la colaboración de expertos, mientras que para el conocimiento heurístico se recurrió a los gestores de las cuencas y a ecólogos especializados. Para obtener un conocimiento más exhaustivo respecto a la respuestas de los ríos, se realizaron un conjunto de campañas experimentales en diferentes cuencas de la región mediterránea, de Portugal a Israel, y en algunas cuencas centro europeas, para identificar diferencias relativas. En ellas se analizaron las relaciones existentes entre las capacidades de retención de nutrientes por parte del río en función de sus condiciones funcionales o estructurales. Finalmente, la existencia de un fórum entre los componentes del equipo de trabajo se reveló como una herramienta eficaz de interacción.

### Selección e implementación de los modelos

Los modelos seleccionados incluyeron:

- Un sistema experto basado en reglas, como soporte de la respuesta del sistema a aquellos problemas cuya diagnosis y solución implica información cualitativa y procesamiento de conocimiento. El conocimiento adquirido se organizó en forma de árboles de decisión para facilitar su revisión por parte de los expertos, como paso previo a su implementación en la base de conocimiento. La lista final de árboles de decisión considerados incluyó: exceso de amonio, exceso de nitrato, eutrofización, exceso de materia orgánica/anoxia/anaerobiosis, alteración del bosque de ribera, estrés hídrico, alteraciones de la morfología del lecho, vertidos tóxicos, metabolismo del oxígeno disuelto y alteraciones antropogénicas de la salinidad.
- Un modelo numérico (Moneris) adaptado a las condiciones de la región

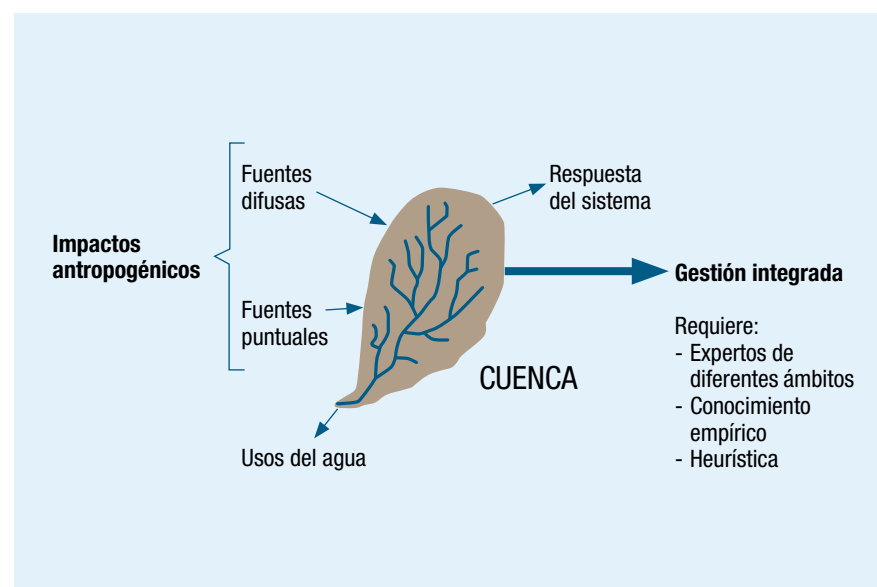
mediterránea, para estimar las cargas puntuales y no puntuales que recibe la cuenca. También se incluyeron modelos empíricos para evaluar el grado de alteración de la vegetación, la capacidad de autodepuración potencial del medio, la capacidad de asimilación y su estado ecológico como medida integradora de evaluación.

- Un sistema de información geográfica (SIG) para gestionar la información espacial referente a tipo de suelo, pendientes, usos del terreno, etc.

Los diferentes elementos se codificaron conjuntamente con una interfaz para la interacción fácil con el usuario, permitiéndole

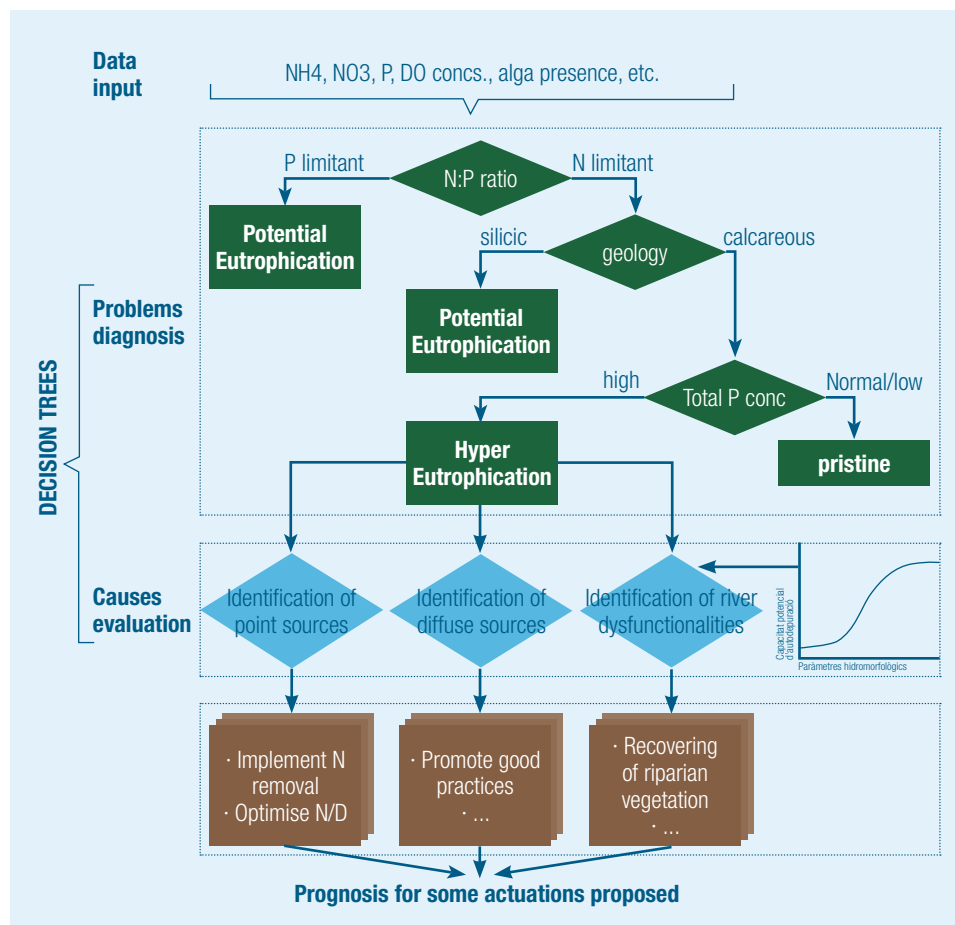
- inferir el estado de la calidad del tramo de río considerado, en relación no sólo con parámetros estructurales o físico-químicos, sino también a la funcionalidad del ecosistema, por ejemplo a la capacidad de autodepuración relativa al poder de retención de los nutrientes,
- evaluar las fuentes y cargas de nutrientes que afectan al tramo en estudio.

Figura 4.2.1.



Es necesario conocer la respuesta del río para poder gestionar los nutrientes de una cuenca

Figura 4.2.2. Esquema simplificado del árbol de decisión referido a la eutrofización.



## Consideración de la eutrofización Un problema complejo

Uno de los problemas más importantes relacionados con elevadas concentraciones de nutrientes en los ríos es la aparición del problema de la eutrofización, que podemos definir como los cambios en las condiciones del ecosistema debidos a elevadas cargas de nutrientes y que provocan un crecimiento excesivo de la plantas acuáticas y/o algas.

En el SAD el árbol general de decisión relativo a la eutrofización se dividió en tres niveles de clasificación del problema, cada uno de los cuales especializado en un aspecto de la gestión, con el objetivo de optimizar la diferenciación entre las diferentes etapas del razonamiento.

- Un primer árbol que contiene el conocimiento para diagnosticar la existencia y grado de severidad de cualquier problema de eutrofización, en el que tanto la información cuantitativa como cualitativa son cruciales. Por lo que respecta a la información cuantitativa, la más relevante son las concentraciones de nitrógeno y fósforo (total y soluble), con las que se puede calcular la relación molar N:P e identificar cuál es el factor limitante. Los límites se obtuvieron en parte de la bibliografía y en parte de las campañas experimentales realizadas en el proyecto. Otra parte importante de la información cuantitativa hace referencia al pH y al substrato del lecho del río. Dependiendo de sus valores, el sistema determina la severidad del problema. Respecto a la información cualitativa, el sistema es capaz de proporcionar un diagnóstico aunque no existan datos analíticos, basándose tan solo en la presencia de algas filamentosas, limitación de la luz, velocidad del agua, estabilidad de los sedimentos y presencia de macrófitas.
- En el segundo árbol el conocimiento se estructura para detectar las causas y efectos de la eutrofización. Este bloque se inicia una vez se ha detectado el problema y su magnitud. Su objetivo es identificar las causas que pueden ser las responsables. Se han agrupado en cuatro apartados. Dos de ellos están relacionados con aportes puntuales como los efluentes de los sistemas de saneamiento y descargas de aguas residuales, y dos relacionados con aportes difusos, con un bloque en el que se agrupan las actividades agrícolas y ganaderas y otro en el que se incluyen las zonas urbanas sin redes de saneamiento. Asimismo, se han incorporado dos causas adicionales relacionadas con disfunciones del comportamiento del propio ecosistema, bien sea por alteraciones de la vegetación de ribera, bien por limitación de la capacidad de autodepuración en comparación con tramos de río equivalentes.
- En el tercer bloque se integran las diferentes estrategias de actuación, en función de la información obtenida en las etapas anteriores. Estas pueden ser a diferentes escalas y afectando a diferentes aspectos. En cada caso, se identifica la relación entre la actuación y las causas a las que afecta.



## OPERACIÓN

### Entrada de datos

Para la operación del sistema, se le pide al usuario a) la descripción general del lugar a ser estudiado (anchura,

Es importante que la entrada de datos sea sistemática, pero al mismo tiempo interactiva y intuitiva para el usuario

longitud y profundidad, velocidad del agua, caudal, naturaleza geológica de la cuenca), b) la caracterización del tramo (tanto de la zona de ribera, con información sobre su anchura, tipo de

vegetación, cobertura, características del suelo y del freático, y presencia de estructuras antropogénicas en los márgenes, como del lecho fluvial, indicando pendiente, sinuosidad, coeficiente de Manning, tipo de substrato dominante, zona de lentos y rápidos, presencia de pequeñas presas, presencia de algas, micrfitos o biofilms), c) información respecto a la calidad del agua del río (con datos cuantitativos de concentraciones de materia orgánica, nutrientes, pH, conductividad, temperatura, o datos cualitativos que indiquen la presencia de algas y macrófitos, o que proporcionen información sobre luz solar, turbidez, color de los sedimentos, olor), d) información de las fuentes puntuales (estaciones de tratamiento de aguas residuales, vertidos) y difusas de nutrientes (usos del suelo, erosión, cultivos...).

Esta información, que se introduce utilizando pantallas como la presentada en la figura, permiten obtener una visión integrada de los factores que influyen en las condiciones biológicas de la zona en estudio.

▼ Figura 4.2.3.

The screenshot shows the 'STREAMES' software interface for 'Site description for Tordera (TORTalPalau)'. The main window is titled 'Stream water quality (sampling points)'. It contains several sections for data entry:

- Physical Data:** Includes fields for 'Sampling date' (27.07.2004), 'Temperature' (7 °C), 'Latitude', and 'Longitude'.
- Water Quality:** Includes 'Dissolved oxygen' (8.91 mg O2/L), 'Turbidity' (quantitative), 'Specific conductivity' (200.7 µS/cm [20°C]), 'pH' (8.6 [20°C]), 'Total Suspended solids' (mg TSS/L), 'Water color' (Normal\_none), and 'Water odor' (No\_odor).
- Nutrient concentrations:** Includes 'Nitrate' (5 mg N/L), 'Ammonium' (5 mg N/L), 'Ammonia' (2793.732418 mg N/L), 'Phosphate' (0.061 mg P/L), 'Total N' (5.53 mg N/L), 'Total P' (mg P/L), 'BOD' (mg O2/L), and 'TOC (DOC)' (2.38 mg C/L).

On the right side, there is a photograph of a river. The top part of the photo is labeled 'undisturbed riparian zone' and the bottom part is labeled 'lack of riparian zone'. The interface also has 'Save', 'Close', and 'Run' buttons at the bottom.

### Ayuda a la decisión

En el proceso de ayuda a la decisión, se establecen tres fases:

- Diagnósis, en la que se diagnostica el estado del río y las causas que provocan los problemas.
- Soluciones, en la que se ofrecen propuestas de cómo resolver el problema.
- Prognosis, donde se evalúa el efecto de alternativas, respondiendo a preguntas del tipo ¿qué pasaría si...?

En la **fase de diagnóstico**, el SAD infiere la calidad del agua fluvial, determina, mediante el cálculo de ciertos parámetros funcionales y estructurales (por ejemplo, la capacidad de autodepuración, el coeficiente de asimilación del nutriente, el coeficiente de transferencia de materia, o el tiempo de recuperación) si el sistema fluvial funciona correctamente, y finalmente identifica los problemas del tramo evaluado. Para identificar estos problemas, se sigue un proceso de siete etapas:

1. Se evalúan los síntomas del río para poder detectar los problemas potenciales que puede sufrir el tramo, ya que pueden ser uno o varios.
2. Se evalúan los parámetros que permiten diagnosticar los problemas existentes.
3. Para cada problema detectado se proporciona su grado de afectación mediante índices o categorías de calidad.
4. Se determinan los efectos colaterales de cada uno de los problemas.
5. Se proporciona un listado de todos los problemas detectados y jerarquizados de acuerdo con el grado de afectación de cada uno de ellos.
6. Se determina el grado de "alteración fluvial" del tramo estudiado, integrando las características de todo el ecosistema fluvial.
7. Se determinan las fuentes causantes de los problemas.

En la **fase de soluciones**, el SAD genera propuestas de gestión para resolver los problemas detectados. El sistema tiene incorporados más de cien tipos de actuaciones diferentes, cada una de las cuales incluye la siguiente información:

- Nombre de la actuación, técnica, descripción, beneficios, limitaciones, comentarios, escala de aplicación, eficacia de la actuación en el escenario considerado y tiempo de respuesta de la misma, relación entre el beneficio ambiental y el esfuerzo aplicado.

Las actuaciones que ofrece el SAD se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Control y reducción de las cargas de nutrientes, tanto de fuentes puntuales como difusas,
- Prácticas de restauración y recuperación de la vegetación de ribera,
- Medidas para incrementar la capacidad de retención de nutrientes tanto del medio acuático (capacidad de autodepuración) como de la vegetación de ribera.

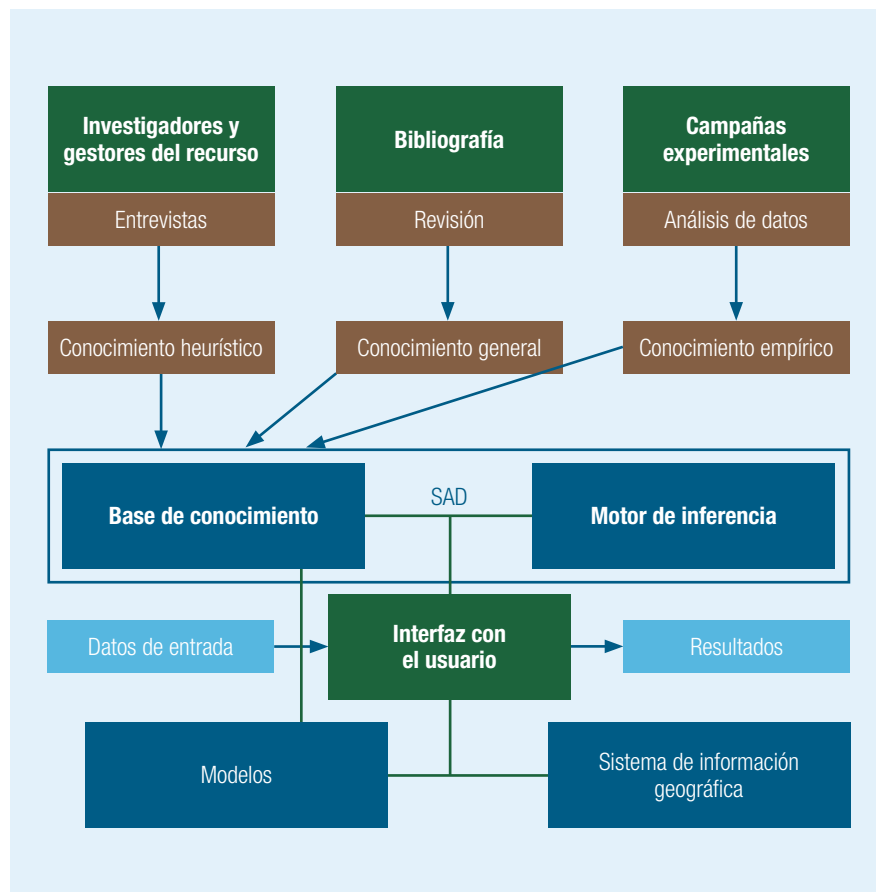
Las propuestas se generan en cada caso, a partir de la identificación de la diagnóstico y las causas identificadas en la etapa anterior. Estas actuaciones se proporcionan al usuario organizadas según la escala de actuación (cuenca, zona de ribera o lecho fluvial) y según los parámetros que afectarán (hidrogeomorfología, aspectos químicos, biota, buenas prácticas o régimen del caudal fluvial). En este caso, la categoría corresponde al tipo de parámetros que se verían afectados por las acciones propuestas. Paralelamente, también se incluye una valoración de cada una de las actuaciones propuestas en referencia a los costes ambientales versus los esfuerzos para llevar a cabo la acción en el caso concreto.

La **fase de prognosis** permite la evaluación de nuevos escenarios a partir de las actuaciones propuestas o simplemente a partir de la modificación de ciertas concentraciones. Dependiendo

de la actuación se puede prever, por ejemplo, una reducción de la concentración de los parámetros que generan el problema y a partir de los nuevos valores se evalúa el efecto de la actuación mediante un balance de materia. En este aspecto el modelo numérico Moneris es de gran utilidad para la generación del nuevo escenario, ya que permite hacer estimaciones mucho más ajustadas de las concentraciones de las diferentes sustancias evaluadas, especialmente los nutrientes.

Figura 4.2.4.

Esquema de la operación del SAD Streames para la gestión de nutrientes en una cuenca.



## Resultados

Figura 4.2.5.  
Ejemplos de propuestas de actuación.

Estimation of the self-purification capacity	Potential capacity under pristine conditions	Necessary distance to achieve concentration (conc.)	distance
0.004	0.004	1.1	6103.276331 m
0.004	0.004	10	21486.32519 m
0.004	0.004	0.002	3293.337776 m

## 4.3 Gestión de vertidos industriales

### Análisis del problema

Las autorizaciones de vertidos industriales a los sistemas de saneamiento se realizan fundamentalmente a partir del análisis de las características de las instalaciones industriales que los generan (según el tipo de productos que se fabrican o la previsión de su evolución), de las condiciones del sistema de saneamiento, y de la sensibilidad del medio receptor. También se tiene en cuenta cual es el estado de la evolución de las tecnologías para producir aquellos productos, para lo que sirven como marco de referencia las directrices de prevención integrada de la contaminación. Estas autorizaciones se conceden por períodos determinados de tiempo (escala anual), estableciéndose simultáneamente protocolos de seguimiento y control para evitar que puedan producirse desviaciones al alza de los vertidos respecto a los valores autorizados.

Desde el punto de vista de la Administración, puede ocurrir que las concesiones de las autorizaciones y los gestores de los sistemas de saneamiento pertenezcan a distintas administraciones, o a diferentes unidades dentro de la misma administración. Ello implica, a veces, que haya diferencias entre los valores de vertidos que se autorizan y la capacidad de las instalaciones que tienen que recibirlos. Además, hay que tener en cuenta que las autorizaciones, en este contexto, corresponden necesariamente a valores máximos con la intención de que no sean sobrepasados por la instalación industrial. Pero muchas veces éstos no son utilizados hasta el límite, bien sea por situaciones operativas de la actividad industrial (paradas, limpiezas, vacaciones) o porque la programación de la producción (y por tanto de la generación de aguas residuales) puede ir variando a lo largo del tiempo.

Visto desde el sistema de saneamiento, esta metodología de autorizaciones, que

es muy habitual, provoca dos factores distorsionantes:

- Por un lado, durante una parte del tiempo los caudales que se reciben son inferiores a los máximos autorizados, y inferiores a los que el sistema de saneamiento puede tratar, o incluso para los que ha sido diseñado, lo que provoca ineficiencias.
- Hay situaciones en las que el caudal de aguas residuales, y las concentraciones que se reciben, son superiores a las que el sistema puede tratar, ya que incluso cumpliendo todas las industrias con los límites que les

han sido fijados, la suma de todas las autorizaciones puede ser superior a la capacidad de diseño de la instalación de saneamiento.

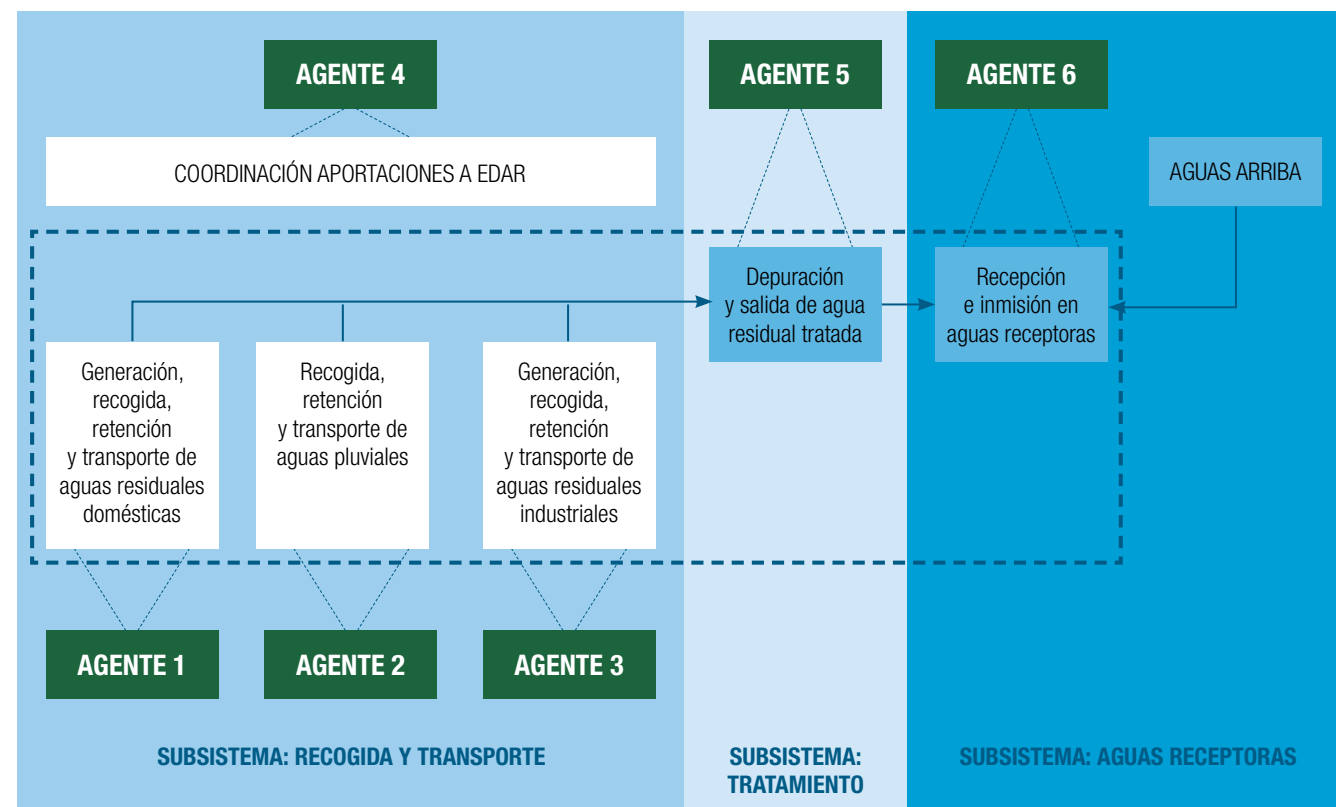
Hay diferentes vías para afrontar el problema, pero sin duda **la vía más eficaz desde el punto de vista de gestión de todo el sistema global sería procesar en tiempo real la información** de cuáles son las intenciones de vertido para cada una de las instalaciones industriales, conjuntamente con la capacidad real, en cada momento, del sistema de saneamiento. En este caso el propio sistema puede ir fijando los límites de autorización de vertidos en

tiempo real, en función a) de las características del medio receptor, b) del estado del sistema de saneamiento y c) de las necesidades de vertidos, es decir, que el sistema se autoregula. No hace falta que la autoridad los establezca constantemente, más allá de una labor de supervisión.

### Adquisición de datos y conocimientos

Para conseguir este objetivo hace falta que diferentes elementos se coordinen en tiempo real:

Figura 4.3.1. En el modelo de roles de los agentes, un rol puede estar compartido por más de un agente y un agente puede estar asociado a más de un rol. Los agentes captan el estado de su entorno (características del agua residual generada, volumen y cargas de contaminantes en el tratamiento, etc.) por medio de sensores de medida, y deben ser capaces de tomar las decisiones más adecuadas para la mejor ejecución de sus funciones específicas. Asimismo intercambian información sobre su estado con otros agentes y modifican su entorno para adecuarlo a un óptimo funcionamiento global, de forma tal que consigan que la cobertura de sus necesidades sea la máxima posible sin perjudicar el buen funcionamiento global.



- Información de cuáles son los vertidos (o su propuesta),
- Conocimiento del estado del sistema de saneamiento,
- Capacidad para predecir el estado del sistema, en función de los vertidos que se autorizan en cada momento, teniendo en cuenta su cantidad y tipos de contaminantes,
- Capacidad de procesar de forma inteligente toda esta información,
- Capacidad operativa y de control de que las acciones propuestas sean ejecutadas de acuerdo con el resultado de la etapa anterior.

Algunos de estos elementos requieren de equipos de hardware (instrumentación), mientras que otros requieren de elementos de software (comunicaciones, interacciones entre los diferentes elementos que intervienen).

## Selección de modelos

Desde un punto de vista de sistema de ayuda a la decisión se trata de un proceso en que cada componente (considerado como un agente) dispone de información incompleta para ejecutar de forma individual una óptima gestión del funcionamiento global. En este caso el óptimo global debe tener en cuenta las interacciones entre los diferentes componentes, de forma que se puede obtener una respuesta del sistema mejor que la suma estricta de la mejor situación individual para cada uno de los componentes.

Para resolver el problema se ha propuesto un SAD en el que las diferentes funciones básicas del sistema se han esquematisado como “roles” o funciones de un conjunto de agentes. En este contexto, se ha definido un agente para cada uno de los elementos que intervienen en el proceso:

- Un agente para cada una de las actividades industriales que están autori-

zadas a verter. En este caso se considera que estas actividades disponen de un depósito de regulación con un tamaño fijado, a fin de poder laminar el flujo del agua residual generada,

- un agente para las aguas pluviales (o de origen meteorológico en general), recogidas hasta su descarga al sistema de tratamiento o, en caso de darse una excesiva sobrecarga (por fenómenos meteorológicos adversos), su desvío al medio receptor,
- un agente para las aguas residuales domésticas hasta su descarga al sistema de tratamiento.
- un agente que corresponde al sistema de tratamiento,
- un agente para el medio receptor del agua residual tratada, con el fin de poder armonizar adecuadamente sus características.

Figura 4.3.2.

Las flechas del modelo indican la dirección de la comunicación. Se puede observar que casi todas las vías de comunicación son bidireccionales. Estas vías se han establecido en base a los protocolos de interacciones entre roles, en los que se han desglosado: la naturaleza de la interacción, el rol iniciador, el contestador, la entrada de información, la salida y el procesamiento de datos durante la interacción. La información de datos aportada en muchas de las comunicaciones es relativa a los volúmenes y concentraciones de contaminantes de las aguas residuales (generadas en el tratamiento o en el medio receptor).

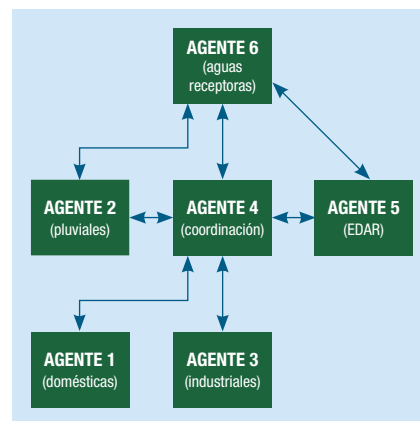
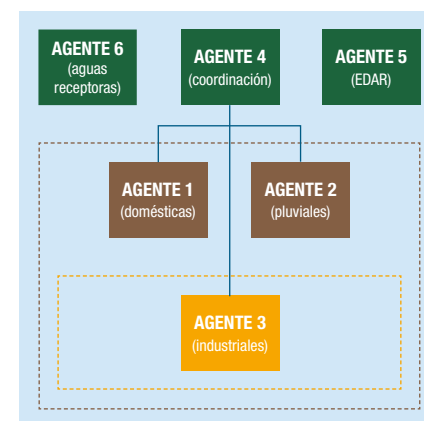


Figura 4.3.3.

Primero se coordinan las decisiones de los agentes para la EDAR y para las aguas receptoras. En segundo lugar, el agente de coordinación va a considerar las aportaciones de los agentes para las aguas residuales domésticas y pluviales. Y supeditado a los anteriores procesos, va a autorizar o priorizar los vertidos gestionados por los agentes para actividades industriales.



## ¿Qué es un agente?

En este contexto se considera agente a un ente computacional situado en un determinado entorno con el que puede interactuar y que en mayor o menor grado presenta las siguientes propiedades:

- Autonomía, entendida como capacidad para tomar sus propias decisiones respecto a la consecución de sus propias metas. Su toma de decisiones se ejecuta individualmente en base a su entorno y sin la intervención directa de personas.
- Reactividad, o capacidad para percibir su entorno y tomar decisiones que ofrezcan respuesta a los cambios que se producen en él.

- Pro-actividad, para mostrar un comportamiento claramente dirigido a un objetivo mediante la adopción de iniciativas (planes).
- Sociabilidad, para interactuar con otros agentes, intercambiando información. Con ello se adquiere capacidad para poder coordinar sus acciones.

Algunos agentes, además, pueden presentar características de movilidad, veracidad, benevolencia, racionalidad, etc.

El nivel de complejidad del proceso de toma de decisiones define el tipo de “razonamiento”, que se relaciona con el grado de “inteligencia” asociado a cada agente. Los distintos tipos de agentes se pueden enmarcar entre dos tipos básicos:

- Agentes reactivos, que no disponen de representación explícita de conocimiento simbólico complejo sino que ofrecen respuestas inmediatas a estímulos del entorno.
- Agentes deliberativos, que sí disponen de representación explícita de conocimiento complejo y toman decisiones basadas en el razonamiento lógico. Dentro de este tipología, quizás el modelo más representativo es el modelo de agente BDI (Belief-Desire-Intention).

A partir de aquí, un sistema multiagente es aquel que está formado por un conjunto de agentes, generalmente heterogéneos, que se coordinan para resolver un problema complejo a modo de organización computacional consistente en varios “roles” interactuando.



## OPERACIÓN

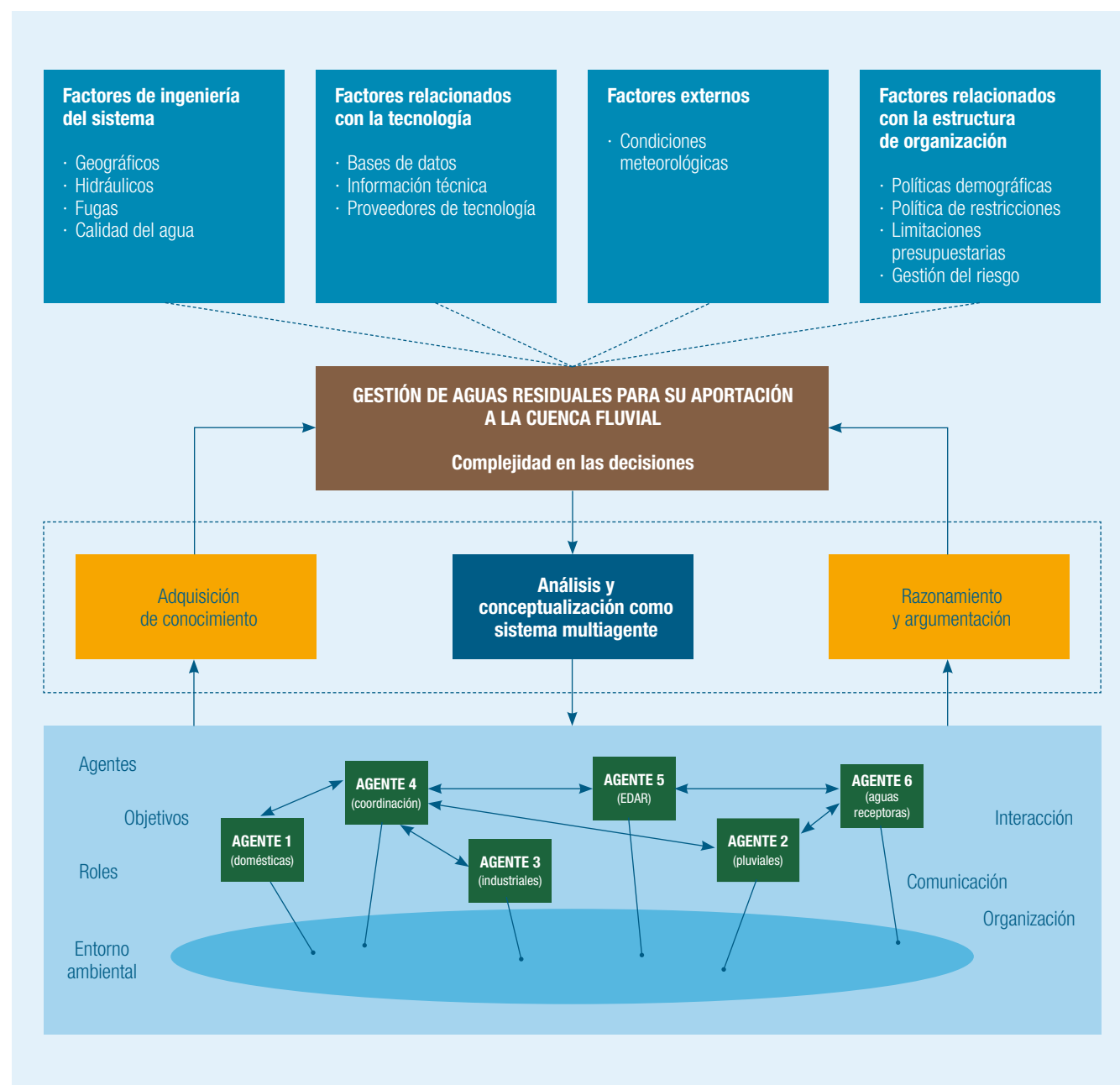
### Entrada de datos

En el SAD propuesto, la adquisición de datos empieza cuando una industria pretende realizar un vertido de aguas residuales con un determinado volumen y determinadas concentraciones de sólidos en suspensión, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, nitrógeno total y fósforo total. Envía la información al agente coordinador, el cual también recibe información de otras industrias que quieren realizar descargas de agua residual. Al mismo tiempo, solicita información del estado del sistema de saneamiento en tiempo real.

En base a esta información y a la recibida respecto a la estimación de la cantidad de aguas pluviales y residuales de origen doméstico que puede recibir el sistema de saneamiento, el SAD efectúa la etapa de diagnóstico para determinar la disponibilidad del sistema para recibir aguas industriales. Si la capacidad disponible es suficiente para aceptar todas las propuestas, estas son aceptadas; en caso contrario, empieza un proceso de priorización de vertidos industriales. Este proceso de priorización consigue encontrar una solución optimizada que proporciona una combinación de los máximos posibles volúmenes de descarga para cada industria que se pueden realizar sin sobrepasar los límites admisibles por el sistema de saneamiento, que corresponde a la etapa de definición de planes y ejecución de acciones.

Figura 4.3.4.

En el sistema de saneamiento, multitud de factores añaden incertidumbre a la toma de decisiones, desde factores que se enmarcan en el ámbito tecnológico y de ingeniería, a factores sociales, económicos y meteorológicos. Las decisiones sobre su gestión implican una elevada complejidad, que puede tratarse en el marco de un sistema multiagente. El comportamiento de los agentes deriva hacia una adquisición de conocimiento que puede constituirse en una nueva ayuda para la adecuada gestión del sistema y que puede reforzarse con la adquisición de capacidad de razonamiento y argumentación dentro del sistema.



## Diagnosis

Los agentes propuestos se organizan como sistema multiagente de forma similar a cómo se organizan y colaboran los individuos en la sociedad. La abstracción necesaria para definir la configuración del sistema multiagente se ha realizado en base a la estructuración del sistema de saneamiento, en subsistemas (colectores, tratamiento y aguas receptoras), y al análisis de las interacciones que presenta el funcionamiento de sus componentes. Para los agentes se ha definido:

- un entorno dinámico,
- una estructura organizacional de roles,
- y una estructura de comunicaciones en la que éstas se intercambian, informándose de datos relativos al estado de los roles que permiten reflejar las interacciones de los componentes. Cada comunicación conlleva la definición de un protocolo específico de interacción de roles. La estructuración de las interacciones permite definir una cierta jerarquización de decisiones.

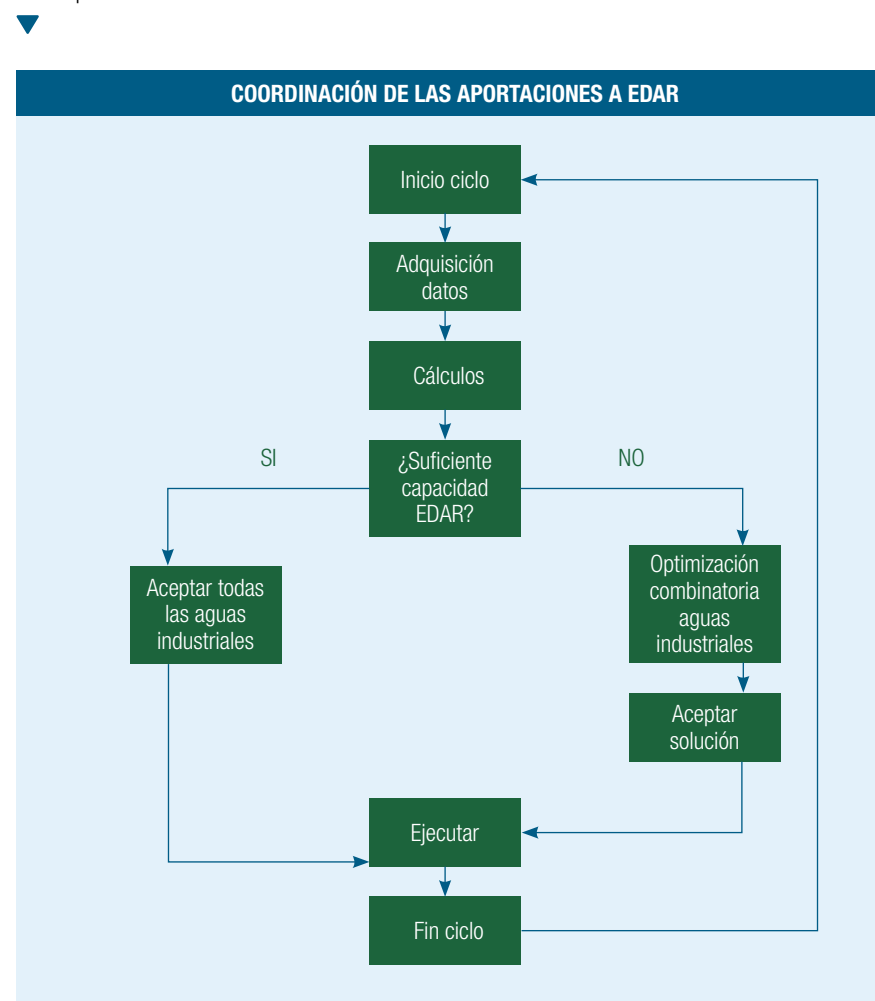
En base a la relativa jerarquización de decisiones, en el entorno multiagente, se han definido tres niveles estructurales:

- el nivel más alto corresponde al agente de coordinación y a los agentes definidos para el sistema de tratamiento y para las aguas receptoras,
- el nivel intermedio es para los agentes correspondientes a las aguas residuales domésticas y a las pluviales,
- el nivel más bajo corresponde a los agentes para las actividades generadoras de aguas residuales industriales. Estos agentes se encuentran en este nivel porque la decisión de autorización o no de vertidos, en un momento dado, va a depender de la capacidad disponible en la EDAR una vez contabilizadas las aguas domésticas y pluviales.

Figura 4.3.5.

El funcionamiento de un proceso de autorización de vertidos es cíclico, siguiendo el orden indicado en el diagrama de flujo.

- Recepción de datos provenientes del agente para las actividades industriales, con sus correspondientes datos de generación o previsión de generación y características de composición.
- Recepción de datos provenientes del agente para la EDAR, relativos a su capacidad de tratamiento para ese ciclo.
- Recepción de datos provenientes del agente para aguas residuales domésticas, relativos al volumen generado y a sus características de composición.
- Recepción de datos provenientes del agente para aguas pluviales, relativos al volumen colectado, si lo hay, y sus características de composición.



## Resultados

Se ha aplicado el SAD a diferentes condiciones de trabajo, referidas a valores muy dispares de generación de vertidos por parte de los agentes industriales, tanto en cantidad como en calidad, implicando la mayoría de las veces la necesidad de utilizar el proceso de priorización, que se realizaba a través de un algoritmo de colonia de hormigas. Como resultado final, se ha constatado que el SAD es capaz de asegurar que la entrada a la estación de tratamiento se mantiene prácticamente constante, lo que redundaba en beneficio de su funcionamiento. En nuestra opinión, puede considerarse que la etapa de procesar de forma inteligente la información, considerando el sistema como una entidad autoregulada, se ha resuelto satisfactoriamente. Ya hay una restricción menos para hacer viable la gestión de vertidos en tiempo real, siempre que se cumplan las otras condiciones (información en tiempo real del estado del sistema de vertidos, capacidad de regulación en los momentos en que la suma de solicitudes sea superior a la capacidad instantánea del sistema de tratamiento...) y una reglamentación que lo reconozca. Puede considerarse un buen ejemplo de interacción entre los diferentes niveles de decisión, con soluciones técnicas que pueden ser viables pero que pueden encontrarse con restricciones de otros agentes, como los normativos.

# 5 Selección de alternativas





De las decisiones tomadas en el nivel de planificación estratégica se obtiene un conjunto de información que es la base de las decisiones a tomar en el segundo nivel, que corresponde a la selección de alternativas, para traducir los objetivos del sistema de saneamiento y sus condiciones a la integración del conjunto de tecnologías que puedan cumplir de forma satisfactoria estas condiciones. El primer problema que se presenta es identificar el número posible de alternativas. Hay que tener en cuenta que a lo largo de los años se han desarrollado diferentes tipos de tecnologías que pueden satisfacer, en diferente grado, las condiciones requeridas, y por tanto se trata de seleccionar aquellas que presentan la mejor combinación para el problema concreto. En este libro, y según la experiencia de sus autores, aunque la problemática general puede ser la misma, se presentan diferencias entre las poblaciones con mayor número de habitantes y los núcleos pequeños (que se cifran en poblaciones con menos de 2000 h-e) recomendándose diferentes aproximaciones. Es por ello que en los siguientes apartados se presentan dos SAD desarrollados para ambas situaciones, indicando les etapas que se han seguido, para que el lector pueda evaluarlas, y aprovechar aquellos aspectos que puedan serle más útiles.



# 5.1 La problemática de la selección de tecnologías

## Análisis del problema

Una vez definidas las condiciones que tiene que cumplir el sistema de saneamiento y las restricciones que se presentan en cada caso concreto (espacio, presupuesto, entorno...) la selección del conjunto de tecnologías que permita alcanzar estos objetivos, de la manera más eficiente posible, no es una tarea fácil. No existe una solución única, en el sentido de que no hay una tecnología única que permita alcanzar los objetivos prefijados en cualquier caso, sino que la solución pasa por la combinación de diferentes elementos que, agrupados en diferentes niveles de tratamiento, permiten ofrecer soluciones al problema.

Hay que tener en cuenta, además, que en el caso del tratamiento, el número de tecnologías para la depuración de las aguas residuales se ha ido incrementando a lo largo del tiempo, y cada vez más están apareciendo nuevas tecnologías que presentan mejores prestaciones desde el punto de vista del rendimiento (para los parámetros tradicionales –sólidos, materia orgánica, nutrientes– o para nuevos contaminantes emergentes), o desde el punto de vista de consumos energéticos y minimizando impactos en general.

La necesidad de combinar diferentes tecnologías, y la existencia de un número progresivamente mayor de las mismas como posibles elementos a utilizar, hace que el número de alternativas a contemplar sea elevado. Hay autores que, haciendo uso de la combinatoria, estiman que si tenemos en cuenta las combinaciones de los elementos disponibles, el número de alternativas a considerar es de miles de millones. De manera más realista, otros autores cifran en algunas decenas de millares las opciones que permiten abordar el problema.

Simultáneamente, los criterios a utilizar para evaluar la bondad del diseño son

cada vez más elaborados. Ya no se trata sólo de alcanzar unos niveles de calidad de agua a la salida, sino que hay que considerar aspectos complementarios, como la seguridad en el funcionamiento, los costes (con especial atención a los costes energéticos), el impacto ambiental que las propias instalaciones provocan en cuanto a emisiones, la posibilidad de reutilización... Ello implica la utilización de herramientas cada vez más completas tanto para identificar los elementos a tener en cuenta, como el análisis de ciclo de vida que integra diferentes impactos, o para evaluar el efecto de diferentes ponderaciones mediante la utilización de herramientas matemáticas de análisis multicriterio.

Finalmente, el conocimiento se encuentra distribuido entre diferentes agentes cuya colaboración puede permitir obtener efectos simbióticos. Por un lado, investigadores que desarrollan nuevas tecnologías (habitualmente a escala laboratorio o piloto) y que permiten la innovación. Por otro lado, las empresas o ingenierías especializadas, que tienen amplia experiencia en el diseño de instalaciones y en algunos casos con patentes propias que las diferencian de la competencia. Finalmente, la Administración correspondiente con su propio personal técnico y que tiene la responsabilidad de conseguir la mejor calidad del agua posible con los recursos de que dispone. Se trata de alcanzar la mejor tecnología disponible a un coste no excesivo (las llamadas BATNEEC).

Un aspecto que añade incertidumbre a la decisión es la capacidad de flexibilidad del proceso propuesto para hacer frente a cambios que puedan ocurrir en el futuro, ya que hay que recordar que la vida media de estas instalaciones es de decenas de años. En este período las instalaciones se tienen que ir adaptando tanto a los cambios tecnológicos de su propio equipamiento, como a los cambios que provocan decisiones que se van tomando en el primer nivel. Un ejemplo de esta

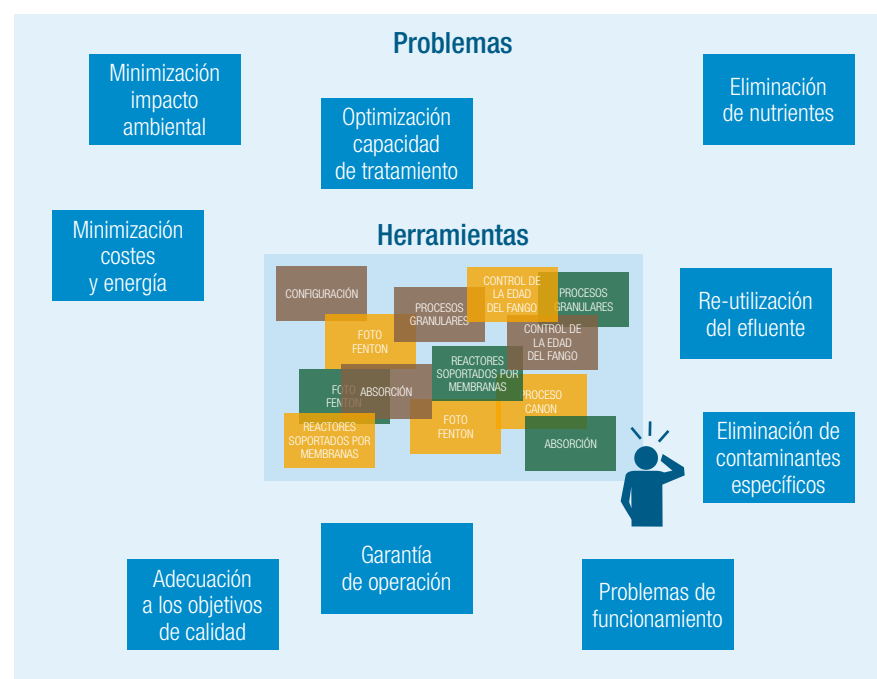
evolución es la del sistema de saneamiento de Zurich que tenemos la suerte que ha sido narrada por Willy Gujer al unísono con la evolución de sus intereses de investigación.

## Adquisición de datos y conocimientos

Tradicionalmente se ha considerado la integración de todos estos elementos prácticamente como un arte. Y como tal arte, difícil, cuando no imposible, de sistematizar. Manteniendo la idea de que siempre habrá elementos que requerirán la experiencia humana, recientemente se está haciendo un esfuerzo en proporcionar elementos que puedan ayudar en esta etapa, sistematizando el conocimiento adquirido y especialmente estableciendo sistemas en el que los diferentes tipos de conocimiento puedan integrarse y, por tanto, ofrecer respuestas que vayan más allá del conocimiento específico. En definitiva se trata de ayu-

Figura 5.1.1.

Aunque el nivel de complejidad de esta situación se puede considerar inferior al del primer nivel, no hay que olvidar que las decisiones a tomar implican un elevado número de opciones que deben cumplir una multiplicidad de objetivos. Este nivel de complejidad hace que los sistemas de ayuda a la decisión puedan ser útiles en tanto que permiten la integración de diferente tipo de conocimiento y, por tanto, que permiten ayudar en la difícil tarea de proporcionar la mejor solución posible a un coste no excesivo.





▲  
Figura 5.1.2.

dar en el proceso de toma de decisiones para pasar de un número muy amplio de alternativas a un número manejable en la etapa posterior de diseño detallado, donde los elementos de evaluación más sistematizados, como los que ofrecen los modelos matemáticos, puedan ofrecer soluciones óptimas al problema.

**El desarrollo del SAD para la sistematización del diseño de estaciones depuradoras se realiza en el marco del proyecto Concepción de la EDAR del siglo XXI. “Desarrollo, implementación y evaluación de tecnologías para el tratamiento y recuperación de recursos en aguas residuales” (Novedar – Consolider)**, en el que participan 11 grupos de investigación, 29 empresas y 14 entidades administrativas encargadas de la gestión del agua, lo que ha permitido disponer de un amplio abanico de expertos que, conjuntamente con la bibliografía, han sido los elementos básicos de adquisición del conocimiento ([www.novedar.com](http://www.novedar.com)).

## Selección de modelos

Para organizar el conocimiento se han definido dos tipos de estructuras:

- Una que corresponde a la organización de las unidades de tratamiento, para las que se han definido tres niveles de abstracción.
  - Un nivel genérico (*meta-units*) que corresponde a las etapas que se asume que pueden existir en todo proceso de tratamiento (tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento terciario, tratamiento de fangos, retornos y tratamiento de olores).
  - El segundo nivel (*sub meta-units*) engloba grupos de tecnologías que serán necesarias en el proceso en función de los objetivos (por ejemplo, en el tratamiento de olores se consideran los tratamientos químicos y los biológicos).
  - El tercer nivel (*units*) identifica las operaciones unitarias individualizadas.
- Otra que corresponde a las características de las unidades, para las que

La consideración de los diferentes elementos en los diferentes niveles se basa en las propiedades estructurales (conectividad), de comportamiento (como operan), funcionales (su papel dentro del proceso) y teológicas (su objetivo y justificación). Esta estructuración, basada en los criterios del proceso de decisión jerárquico, permite descomponer el problema en un conjunto de elementos más simples de analizar y evaluar, ya que los diferentes niveles de abstracción modifican la cantidad de conocimiento y detalle en cada etapa, permitiendo que la decisión se focalice en un número más reducido de conceptos en cada momento. Así, si se define un nuevo requerimiento, todas las opciones que no cumplen las especificaciones quedan descartadas a nivel más genérico, evitando la generación de alternativas que ya se puede determinar que no cumplirán las especificaciones.

se han definido tres bases de conocimiento:

- **Base de conocimiento de compatibilidad (C-KB)**, que contiene la información referida a las diferentes interacciones entre las tecnologías de tratamiento y determina los diferentes niveles de compatibilidad entre ellas, habiéndose establecido cinco niveles de interacción desde alta compatibilidad a compatibilidad nula.
- **Base de conocimiento de especificaciones (S-KB)**, en la que para cada una de las 274 unidades de tratamiento consideradas se especifican, de acuerdo con la información disponible: información sobre el influente que puede tratar, información sobre el efluente esperado, generación de subproductos, condiciones de operación, costes e impactos ambientales.
- **Base de conocimiento de información legal y ambiental (E-KB)**, necesaria para identificar límites de operación y para la evaluación posterior de los impactos globales.

La imagen muestra una gran tabla de datos con múltiples columnas y filas. Las columnas están encabezadas por 'Operación', 'Subproductos', 'Impactos' y 'Rendimiento y Operación'. Las filas contienen datos numéricos y textuales, con algunas celdas resaltadas en colores como amarillo y rojo. La tabla parece ser un resumen de los resultados de la selección de modelos para diferentes unidades de tratamiento.

◀  
Figura 5.1.3.

## OPERACIÓN

El SAD propuesto, como elemento de ayuda para la selección de alternativas en el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales presenta dos interfaces y opera siguiendo las tres etapas de: entrada de información, diagnóstico y propuesta razonada de soluciones.

### Entrada de datos

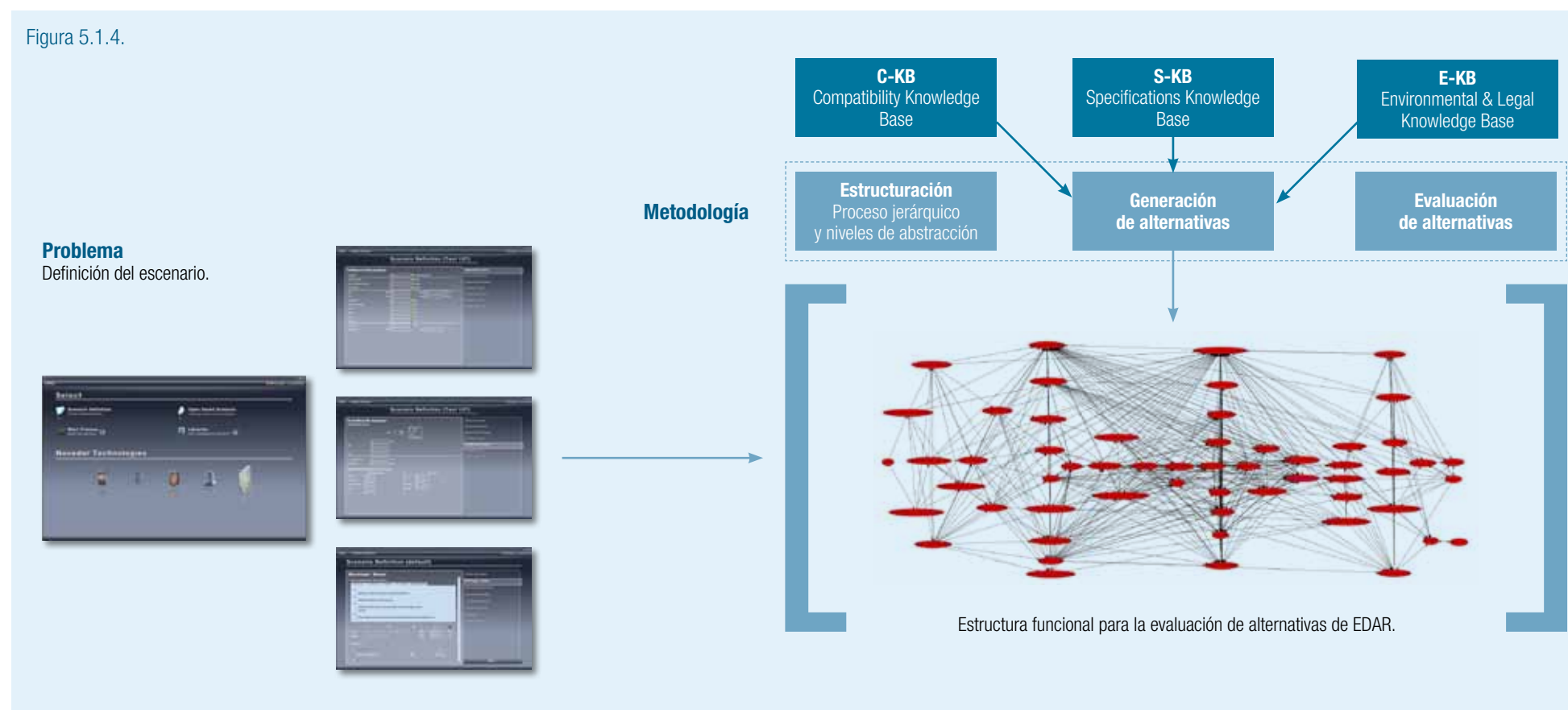
En la entrada de información, el usuario define, mediante un conjunto de pantallas, en forma jerarquizada, el escenario en el que se va a situar la instalación. Para ello se le solicitan en primer lugar las características del agua a tratar y la calidad del agua que se espera a la salida de la instalación (incluyendo si el destino final es el retorno al medio o la reutilización, para lo cual el usuario dispone de un conjunto de alternativas relacionadas con las especificaciones normativas para cada caso). A continuación, el usuario puede ir indicando su priorización respecto a disponibilidades de espacio, importancia de la presencia de olores, costes, consumos energéticos... Esta priorización puede irse modificando en diferentes etapas del diseño, de manera que se puede evaluar el impacto de establecer diferentes priorizaciones en la propuesta de diseño.

## Diagnosis

En la **primera fase** se procede a la generación de alternativas. Para ello se establece una estructura en red compuesta por nodos, donde cada nodo representa una tecnología y se encuentra relacionado con la base de conocimiento de especificaciones, de manera que puede acceder a toda la información relacionada con la unidad correspondiente, y por conexiones que relacionan las propiedades de conectividad entre las unidades especificadas en la base de conocimiento de conectividad. Inicialmente en los niveles de *meta-unit* se realiza una primera selección de las tecnologías para establecer qué combinaciones son capaces de alcanzar las especificaciones solicitadas por el usuario. Ello permite una primera reducción del espacio de búsqueda para posteriormente, a los niveles de *sub-meta unit* y unidades, identificar las posibles combinaciones que dan lugar a diferentes diagramas de flujo, compuestos por la combinación de unidades de tratamiento cuya compatibilidad se ha evaluado mediante la correspondiente base de conocimiento.

En la **segunda fase**, a partir de los diagramas de flujo generados, que corresponden a soluciones que satisfacen las especificaciones proporcionadas por el usuario, se procede a la evaluación de los mismos. Para ello se establece una etapa de propagación de la información a través de los nodos llamada evaluación recursiva. En esta etapa se tienen en cuenta 54 factores que caracterizan cada tecnología y que son susceptibles de ser evaluados (concentración final de contaminantes, coste total, posibles problemas operacionales...) bien de forma cualitativa por el usuario, bien de forma cuantitativa por métodos de análisis de decisión multicriterio. A partir de aquí se ordenan las soluciones propuestas en función de una puntuación. Hay que recordar que esta puntuación puede ser modificada por el usuario, ya que podrá variar sus prioridades definiendo diferentes escenarios. Teniendo en cuenta que en la definición de las bases de conocimiento se ha ido incorporando el origen de cada una de las informaciones, el sistema puede reconstruir la traza de las propuestas realizadas.

Figura 5.1.4.



## Resultados

La obtención de alternativas viables viene dada sobre un proceso jerárquico donde los usuarios pueden ir diseñando su opción más favorable a medida que se incrementa el nivel de detalle. Una vez el escenario ha sido definido, el SAD evalúa inicialmente las opciones de tratamiento secundario viables y ofrece un listado de aquellas tecnologías que más se ajustan a las especificaciones introducidas, y donde se tendrá total capacidad para explorar los diferentes parámetros de rendimiento y demás indicadores. Posteriormente, la selección de una de las tecnologías activa el proceso de evaluación y permite mostrar al usuario las diferentes líneas de tratamientos primario, terciario y de biosólidos que más se ajustan a dicha tecnología, a la vez que al escenario definido. Nuevamente, el usuario puede valorar los resultados de las líneas recomendadas e ir seleccionando aquellas que se ajustan más a sus prioridades. Finalmente, a través de esta evaluación integrada y jerárquica, se consigue obtener la configuración completa más realista y adaptada al escenario propuesto.

### Solución

Alternativas específicas a EDAR.



## Evaluación integrada

Uno de los aspectos que están evolucionando de forma más rápida en la selección de la mejor alternativa de tratamiento es el proceso de evaluación del mismo. Actualmente, ya no se trata únicamente de cumplir con unos criterios de calidad del agua a la salida, sino que el proceso debe ser óptimo respecto a un conjunto de indicadores de sostenibilidad, entre los que evidentemente se encuentran los económicos, implicaciones técnicas de operación y los aspectos ambientales que permitan evaluar su impacto en diferentes ámbitos. De este modo, se seleccionaron un conjunto de métodos analíticos que permiten un análisis integrador de cada alternativa. Los indicadores más destacados escogidos para el SAD son los siguientes:

- **Análisis coste-beneficio (ACB):** Uno de los instrumentos más ampliamente aceptados a nivel económico. Es una herramienta de apoyo racional y sistemático de toma de decisiones, y está hecho para comparar la viabilidad económica asociada a la aplicación de diferentes propuestas. Este indicador se obtiene a partir de los costes teóricos (inversión, costes de operación, mantenimiento y consumo energético) y los beneficios (venta de agua reutilizada, valorización de biosólidos y producción de biogás).
- **Análisis coste-beneficio con evaluación de las externalidades ambientales:** Esta técnica permite la consideración, en términos económicos, de los beneficios ambientales asociados al tratamiento de aguas residuales. En esta metodología se cuantifican los beneficios teóricos de evitar la descarga al medio de un conjunto de contaminantes (DQO, DBO, TSS, nitrógeno y fósforo).
- **Análisis de ciclo de vida (ACV):** Indicador imprescindible para evaluar el impacto ambiental (contribución al calentamiento global, agotamiento de recursos naturales, etc.) asociado al proceso de tratamiento. Las variables que se precisan para su cálculo son: Consumo eléctrico (Kwh), Kg Nitrógeno, Kg Fósforo, Kg DQO, Kg biosólidos producido, Kg de CO<sub>2</sub> eq., Kg reactivos químicos, Kg. Sólidos obtenidos durante el pretratamiento y transporte (km/tonelada biosólido).
- **Huella de carbono (Carbon Footprint GHG Analysis):** Técnica para calcular a nivel teórico el conjunto total de gases de efecto invernadero (GEI) que se generan durante el proceso seleccionado. Los gases de efecto invernadero considerados son CO<sub>2</sub> (emisiones indirectas por construcción, transporte, consumo eléctrico), CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O.
- **Análisis de datos cualitativos:** Existe un conjunto de variables difícilmente cuantificables que sin duda también precisan tenerse en cuenta. En ese sentido, datos como la seguridad del proceso, la robustez, el impacto visual, el potencial de generación de olores, facilidad de operación, frecuencia de problemas, necesidad de personal especializado, etc., tienen que ser incorporadas en la evaluación, y por ello se desarrollaron un conjunto de rangos para expresar estos valores de manera numérica.

El cálculo de los anteriores indicadores permite aplicar a los resultados obtenidos diferentes metodologías que nos ayudan a la selección de la mejor alternativa. De este modo, se pueden aplicar desde algoritmos de clasificación hasta métodos de análisis multicriterio que permiten la conciliación entre un conjunto integral de datos objetivos y las prioridades del usuario interesado en diseñar la planta de tratamiento.



## 5.2 La problemática de los núcleos de menos de 2.000 habitantes

Las comunidades de menos de 2.000 habitantes presentan unas características diferenciadas respecto a los núcleos de mayor población

### Análisis del problema

Estos núcleos presentan algunas características diferenciales.

**En primer lugar**, una dimensión social. A diferencia de los grandes núcleos donde difícilmente nadie conoce las condiciones del sistema de saneamiento o la ubicación de la planta de tratamiento, estos núcleos viven muy directamente la implementación de sus sistema de saneamiento, con una mayor sensibilidad, tanto para los impactos negativos que pueda presentar, como para los beneficios que sobre el medio significa.

**En segundo lugar**, una dimensión ambiental. En muchos casos estos núcleos pequeños se encuentran situados en zonas a las cabeceras de los ríos donde su caudal es menor, o en zonas de especial protección ambiental, por lo que el impacto de la instalación es significativo. Es por ello que el impacto sobre la calidad ecológica del medio receptor debe ser tenido muy en cuenta.

**En tercer lugar**, una dimensión tecnológica. Aunque pueden existir diferencias entre las diferentes alternativas de sistemas de tratamiento para los núcleos de mayor población, las mismas se agrupan en torno a modificaciones del proceso de lodos activados. Sin embargo, en el caso de pequeñas poblaciones, aparece, un conjunto de sistemas de tratamiento que, agrupados bajo epígrafes como sistemas naturales o de bajo coste o extensivos, ofrecen unas prestaciones que deben ser tenidas en cuenta.

La conjunción de estas tres dimensiones provoca una complejidad añadida a la selección de los sistemas de saneamiento para estos núcleos, que se ve reflejada en el hecho de que algunas normativas, en lugar de fijar unos límites numéricos de calidad del agua a la salida del sistema de saneamiento, introducen un concepto más difuso como es el de *tratamiento adecuado*.

La gestión de esta complejidad no es fácil, puesto que para obtener soluciones adecuadas es necesario combinar valores cuantitativos con variables cualitativas, o incluso con sensaciones subjetivas. Para ello será necesario incorporar no sólo ecuaciones de diseño, sino también conocimiento de diferentes ámbitos, desde el ámbito específico del núcleo donde va a instalarse el sistema de saneamiento, hasta expertos en la dinámica del medio receptor, o personas con experiencia en tecnologías más intensivas o más extensivas (curiosamente, es difícil encontrar personas con experiencia en ambos ámbitos). Si para una situación específica puede pensarse en la realización de un *brain storming* que permita obtener una solución de consenso, de lo que se trata es de hacer propuestas para un territorio donde se plantea la solución de centenares o miles de núcleos, parece claro que es necesaria la utilización de un sistema que permita gestionar de forma inteligente el conocimiento y que sea capaz de ofrecer respuestas razonadas para cada situación teniendo en cuenta las diferentes dimensiones del problema.

**La necesidad de integrar diferentes conocimientos, disciplinas y puntos de vista fue la que llevó a la Agència Catalana de l'Aigua a encargar un**

**sistema de ayuda a la decisión (SAD - PSARU) para establecer cuales debían ser las propuestas más adecuadas para sus núcleos de menos de 2000 habitantes.** Bajo la coordinación de los responsables de la Agència, el trabajo fue realizado por un conjunto de universidades y centros de investigación agrupados en una red temática, en la que participaban investigadores de diferentes ámbitos, y por un conjunto de ingenierías y empresas consultoras que aportaron conocimiento de los diferentes aspectos en que se distribuyó el trabajo.

### Adquisición y gestión del conocimiento

Para la obtención de datos y adquisición de conocimiento se utilizaron, fundamentalmente, tres fuentes:

- Expertos/as, tanto en la gestión y depuración de aguas, como en la definición de calidad del medio receptor.
- Conocimiento extraído de la bibliografía y de otros lugares donde había experiencia en el desarrollo de programas de saneamiento para este tipo de núcleos.
- Análisis de datos históricos, que permitieran conocer la problemática de los núcleos a sanear y el estado del medio receptor.

Las tres fuentes de conocimiento se trabajaron de forma simultánea ya que permiten obtener información complementaria. En el caso de las personas expertas, la obtención del conocimiento se basó en la realización de una serie de entrevistas tanto a personas de la administración como de sectores sociales implicados, así como del mundo científico y de ingenierías con experiencia en el tema. Estas entrevistas permitieron obtener conocimiento heurístico y específico de la zona en estudio, obtenido a partir de años de experiencia de trabajar en el mismo campo, que se con-

sideró necesario para el buen funcionamiento posterior del sistema de ayuda a la decisión. Este conocimiento específico obtenido de la experiencia se completó con el precedente de libros o revistas especializadas, y de las visitas a lugares donde ya se habían desarrollado programas de saneamiento para pequeños núcleos. Finalmente, ello se complementó con el estudio de datos históricos de la calidad del agua de los medios receptores y de los sistemas de saneamiento en aquel momento operativos ya que permitían identificar puntos fuertes y débiles de diferentes tipologías de instalaciones.

### Análisis cognitivo

Los resultados obtenidos en la etapa anterior se organizaron en tres bases de conocimiento:

- Una base de conocimiento con las características del medio receptor. Se entiende como medio receptor aquel ecosistema que recibirá el efluente del sistema de saneamiento que sea seleccionado en cada núcleo (o agrupación de los mismos). En esta base de conocimiento se incorpora la información referente a la cantidad de agua, la presencia de acuíferos, zonas sensibles, contaminación por nitratos, vulnerabilidades y zonas protegidas. Además de los datos históricos de caudales y calidades, se consideró importante incorporar el aspecto del posible punto de vertido del sistema de saneamiento y su entorno. Esta base de conocimiento permitió definir el tratamiento (mínimo) necesario para cada caso, en concordancia con el estado del medio receptor.
- Una base de conocimiento con las características del núcleo a sanear, con mención de las características de la comunidad y la identificación de los lugares disponibles para el vertido del sistema de saneamiento. Esta base de conocimiento se obtuvo a partir de



Figura 5.2.1. Esquema general del SAD-PSARU desde la obtención de datos y conocimiento a los resultados que permite obtener.

encuestas realizadas a representantes de todos los ayuntamientos afectados, realizadas por las empresas consultoras, en las que se incorporaban datos del núcleo, de su entorno y del saneamiento existente.

- Una base de conocimiento de las alternativas tecnológicas de tratamiento, con información sobre las características, prestaciones, requerimientos de espacio, restricciones climáticas, geológicas y hidrogeológicas, alturas máximas donde los sistemas son aplicables, pendientes del terreno o restricciones debidas a la presencia de acuíferos. También se consideraron en esta base de conocimiento los costes de instalación y mantenimiento, además de otras consideraciones que podrían afectar a aspectos sociales, como la generación de olores.

### Codificación del conocimiento e implementación

En función del tipo de conocimiento se recurrió a diferentes modelos para su codificación.

Respecto a los sistemas de tratamiento, el conocimiento se codificó en forma de matrices. Una permitía comparar cualitativamente, en base a criterios económicos, de impacto, tecnológicos y sociales los diferentes sistemas de saneamiento considerados. Otra asociaba los niveles de tratamiento especificados, en función del medio receptor, con los niveles de tratamiento por los diferentes sistemas de saneamiento. A partir de estas dos matrices se construyó una tabla jerarquizada discriminante, que a partir de diferentes revisiones para evitar contradicciones y redundancias –lo que se ob-

tuvo a partir del consenso con diferentes expertos que tenían distinto nivel de experiencia en los diferentes tratamientos– se constituyó como elemento central en el proceso de ayuda a la decisión.

Las cuatro variables que se establecieron como fundamentales de la tabla jerarquizada fueron: los habitantes equivalentes, estableciéndose diferentes intervalos; el nivel de tratamiento requerido (primario, secundario, secundario con nitrificación, secundario con desnitrificación y secundario con desnitrificación y reducción de fósforo); las condiciones de caudal del medio receptor y meses al año que presentaba caudal de agua y las condiciones de la parcela disponible (superficie, pendiente).

Se consideró la conveniencia de introducir un conjunto de reglas de seguridad, para incorporar conocimiento relacionado con información geográfica (zonas

vulnerables, planes especiales), o específica de alguna zona (población estacional) que podían favorecer, desaconsejar o incluso descartar algunos tratamientos que no se adaptaran a las condiciones climáticas (temperaturas, días de niebla, altura sobre el nivel del mar).

## OPERACIÓN

La operación del SAD-PSARU sigue las etapas propuestas de entrada de datos, diagnóstico y ayuda a la decisión.

En la **entrada de datos**, el usuario introduce el código del sistema o el nombre de la cuenca a sanear. A partir de aquí el sistema accede a la base de datos que contiene las características del núcleo, obtenidas a partir de la encuesta (excepto la altura sobre el nivel del mar o las zonas vulnerables, que se obtienen del sistema de información geográfica). Estos datos son filtrados para evitar datos erróneos y en algunos casos categorizados para establecer categorías que son las utilizadas en el proceso de diagnóstico (por ejemplo, una superficie disponible de 3 m<sup>2</sup> por habitante se considera baja, mientras que más de 8 m<sup>2</sup> se considera elevada). El caudal de agua del medio receptor se utiliza como primera aproximación a la capacidad de dilución del medio, mientras que la superficie disponible permitirá diferenciar donde se podrán utilizar sistemas extensivos.

En la **diagnóstico**, el sistema activa un conjunto de reglas para evaluar los habitantes equivalentes, el nivel de tratamiento que se requiere del sistema de saneamiento, la calidad del agua del medio y la superficie disponible. Esta etapa concluye con una lista de sistemas de saneamiento que cumplen con los requisitos establecidos. A continuación se activan las reglas de seguridad –que pueden invocar otras reglas o procedimientos– hasta obtener un listado de tratamientos posibles.

Un aspecto importante a considerar en este momento es la necesidad de decidir entre las diferentes alternativas cuando se han de seleccionar sistemas de saneamiento y estaciones depuradoras para dos o más núcleos relativamente cercanos. En este caso, hay que contemplar también las opciones de sanearlos individualmente o conjuntamente. En

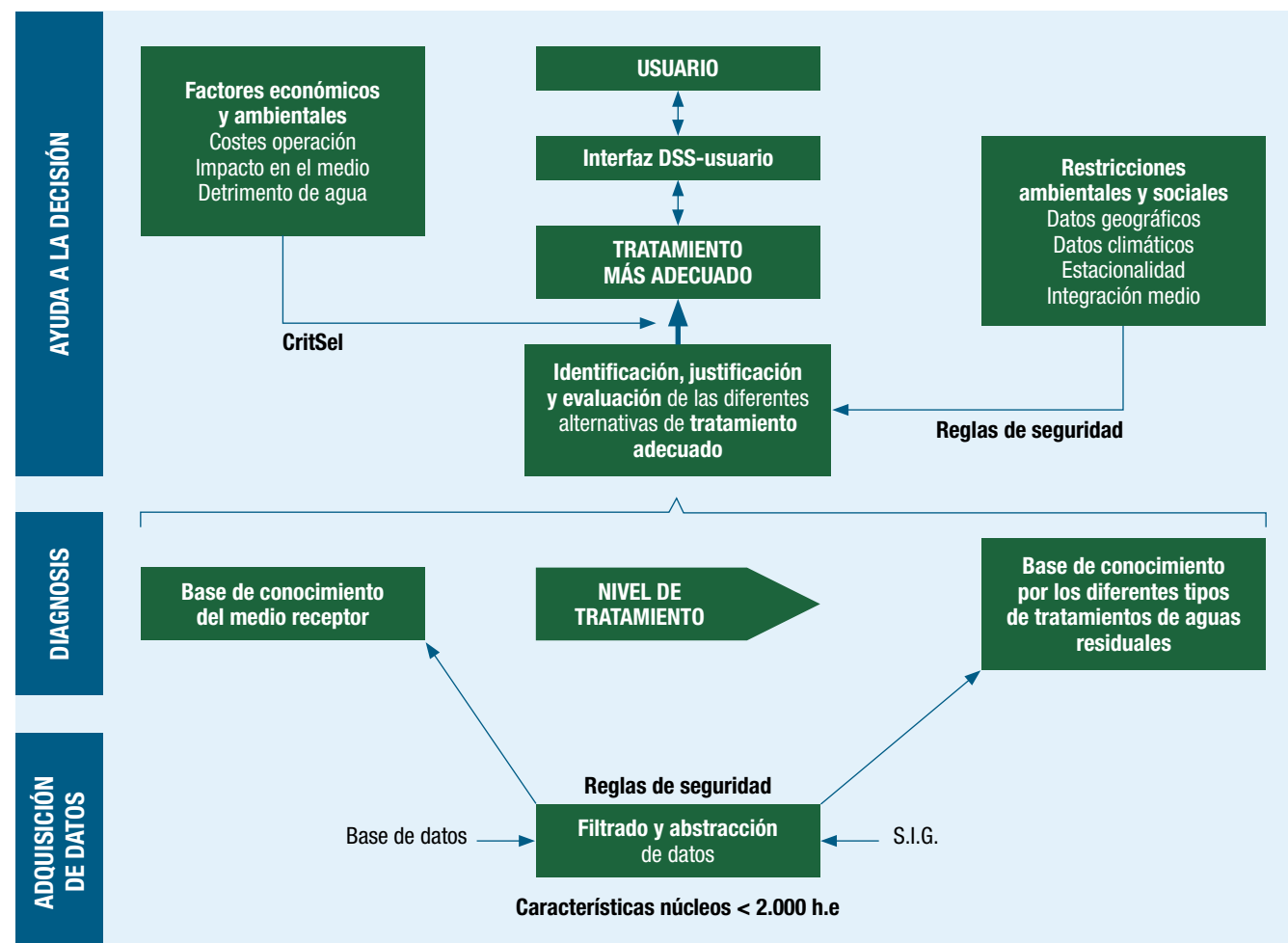
este último caso, considerando las opciones de una nueva estación de tratamiento en uno de los núcleos o en un sistema de saneamiento ya existente. Para este problema se desarrolló una expresión que contiene tres términos que se pueden ponderar de manera diferente según el objetivo a priorizar en cada caso. Esta expresión fue consensuada entre representantes de los expertos en tratamientos, en medio receptor bien de la administración o de otros agentes sociales y permite evaluar para cada alternativa de sistema de saneamiento: el impacto energético o económico; el impacto ambiental en el medio receptor por cuanto se modifican las relaciones de di-

lución, y el efecto sobre el caudal del medio receptor, reflejado en la distancia que el agua circula por colectores en lugar de hacerlo por el medio natural.

En la **ayuda a la decisión**, el SAD propone un conjunto de alternativas factibles, ordenadas jerárquicamente desde la opción más adecuada (según el criterio especificado) a la que lo es menos adecuada.

Para cada alternativa, el sistema proporciona una justificación de las razones de selección de las alternativas propuestas y de las descartadas, así como la correspondiente evaluación económica de los costes de construcción y explotación.

▼  
Figura 5.2.2.  
Representación del proceso de funcionamiento del SAD para la selección de sistemas de saneamiento en núcleos de menos de 2000 hab.



## El caso de la cuenca del río Fluvià

El sistema de ayuda a la decisión se aplicó a las diferentes cuencas gestionadas por la Agència Catalana de l'Aigua, obteniéndose para cada núcleo un conjunto de propuestas razonadas de sus posibles sistemas de saneamiento. Como ejemplo de los resultados obtenidos, se presenta una síntesis de la propuesta del SAD para la cuenca del río Fluvià.

El río Fluvià tiene su cuenca en el nord-este de Catalunya y fluye a través de las comarcas de la Garrotxa, Pla de l'Estany y Empordà. Presenta un régimen permanente, de un comportamiento mediterráneo con una disminución significativa de su caudal en los meses de verano. Sus afluentes presentan unas características parecidas permaneciendo muchos de ellos secos durante largos períodos del año. En su cuenca se ubican 76 pequeñas comunidades para las que se necesitaba identificar el tratamiento adecuado. La distribución de la población en esta cuenca en el momento del estudio

respecto a estas comunidades indica que hay un número elevado de poblaciones con una población inferior a los mil habitantes.

Como elementos complementarios, se puede destacar la contribución de la población estacional y la existencia de actividades agroindustriales especialmente artesanales. Esta últimas implican la aparición de algunos problemas relacionados con el saneamiento como la presencia de grasas, lo que influye en la definición de los tratamientos primarios. El medio receptor de estas comunidades se identificó en un 40% como río, mientras que el resto se encuentra dividido entre flujos intermitentes y secos. Un aspecto importante en esta cuenca es la existencia de espacios protegidos de interés natural y zonas especialmente sensibles a la contaminación por nitratos.

Como resultado de la aplicación del SAD se recomendó que 51 comunidades deberían tratar sus aguas individualmente, 9 podrían tratarlas

conjuntamente y 16 podían tratar las aguas en sistemas de saneamiento existentes, estableciendo las correspondientes conexiones.

Fue curioso analizar las diferencias entre los resultados obtenidos en esta cuenca con otras localizadas en diferentes zonas de Catalunya. Así por ejemplo, en la cuenca de la Tordera, con un número de comunidades parecido pero con una distribución de población diferente, el número de plantas de lodos activos propuesto fue superior, una alternativa que presenta unos costes de operación más elevados y con un mayor impacto visual, pero con una eficacia mayor para poblaciones con más habitantes. En el caso de la Noguera Ribagorçana, con una relación de núcleos más pequeños de 200 habitantes y a una mayor altura sobre el nivel del mar, el número de humedales construidos es significativamente inferior y aumentan los sistemas con biomasa inmovilizada.



Rango de habitantes	Número de comunidades
<50	1
50-100	20
51-200	33
201-1000	20
10001-2000	2

Humedales construidos	31
Reactores secuenciales	1
Lagunas de estabilización	3
Filtros de arena intermitentes	5
Filtros de arena enterrados	4
Aplicación al suelo	3
Lodos activados	2
Biodiscos	1
Otros	5



Figura 5.2.3.

En esta cuenca destaca el elevado porcentaje de humedales construidos (*wetlands*) que se proponen como tratamiento secundario.



# 6 Diseño de los procesos





A medida que se avanza en el diseño de los sistemas de saneamiento, el problema se va concretando, disminuye el riesgo y el impacto de las decisiones, mientras aumenta la información disponible, lo que permite una mayor concreción y un mayor uso de herramientas numéricas, que codifican esta información.

En este contexto, el desarrollo de modelos matemáticos ha experimentado en los últimos años un incremento significativo tanto en el desarrollo de nuevos modelos, que son capaces de describir cada vez mejor las complejas relaciones que tienen lugar en los sistemas de saneamiento, como en su aplicación. Después de muchos años de participar en este ámbito nuestra experiencia es que su uso se ha ido generalizando y que las nuevas generaciones, que han crecido en un entorno donde los ordenadores reinan, los utilizan de forma generalizada. En un ejemplo claro de retroalimentación positiva, a medida que más se utilizan de más información se dispone lo que redundará en mejores modelos, que incrementan su fiabilidad y por tanto, cada vez son más utilizados.

En este apartado se ha considerado conveniente introducir un capítulo de presentación de algunos conceptos básicos de planteamiento de los modelos y un ejemplo de evolución del que en estos momentos es más ampliamente utilizado para describir el comportamiento de los procesos que tienen lugar en las plantas de tratamiento que utilizan lodos activos.

Esta generalización del uso de modelos en este apartado de diseño no debe hacernos olvidar sus limitaciones. Limitaciones derivadas de la dificultad de describir la complejidad de los procesos que tienen lugar en los sistemas de saneamiento, limitaciones en las calibraciones de los modelos, pero también limitaciones más conceptuales, derivadas de la dificultad de expresar en forma de ecuación matemática la experiencia adquirida, siguiendo la paradoja del experto, que nos indica que cuanto más se conoce de un proceso más difícil es expresar de forma sistemática el razonamiento empleado.

Otra de las problemáticas en las que se está haciendo un esfuerzo importante es en el tratamiento de la incertidumbre y la necesidad de incorporar la existencia de múltiples criterios en el momento de la toma de decisiones. En este sentido, el desarrollo de nuevas metodologías y nuevas herramientas basadas en modelos y en su incorporación a sistemas de ayuda a la decisión, tal como se presenta en el segundo apartado, creemos que puede dar un salto significativo en los próximos años, modificando sensiblemente los procedimientos utilizados hasta el momento.

## 6.1 Modelos matemáticos

El **modelado matemático** permite disponer de un conjunto de ecuaciones que representan el mundo real de un modo aproximado. La naturaleza de estos modelos puede ser **determinista** (cuando se conocen los mecanismos que rigen el proceso) o **estadística** (cuando se desconocen los mecanismos pero se dispone de suficientes datos fiables para proponer ecuaciones que, sin necesidad de incorporar una descripción de los procesos, tengan la capacidad de describir su comportamiento). Estos últimos también se conocen con el nombre de modelos **caja negra**, en contrapartida a los modelos híbridos (**caja gris**), que combinan correlaciones numéricas con cierto conocimiento empírico del comportamiento del sistema.

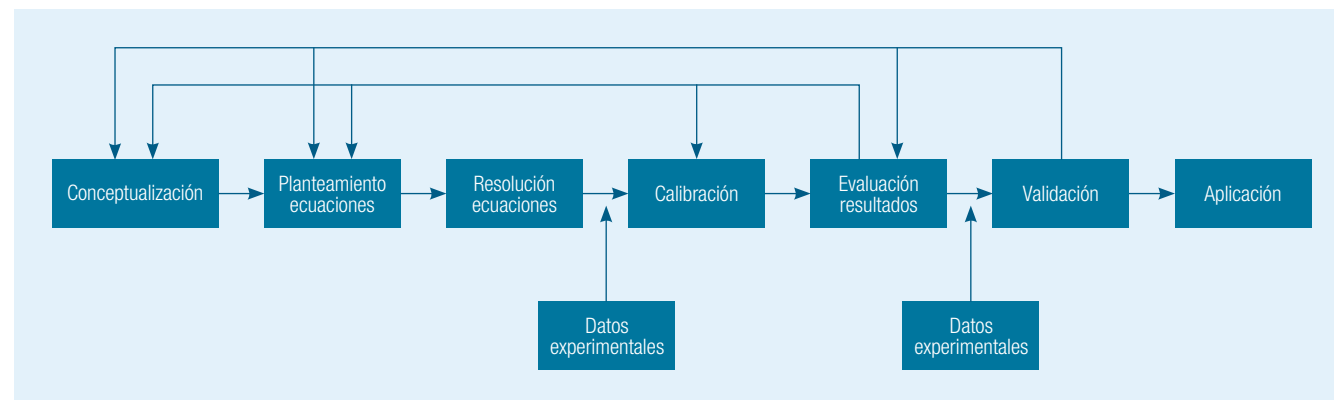
### Etapas para la construcción de un modelo

La construcción y aplicación de un modelo requiere la ejecución de un conjunto de etapas:

- En primer lugar, identificar *cuál es el problema que se quiere resolver* con la utilización del modelo. El nivel de descripción necesario y el esfuerzo para desarrollarlo debe ser adecuado a los objetivos del mismo. No es lo mismo plantear una planificación a medio plazo, para lo que puede ser útil un modelo en estado estacionario, que el impacto sobre el sistema de saneamiento de una lluvia puntual.
- En segundo lugar, llevar a cabo el *planteamiento de las ecuaciones* que darán lugar al modelo matemático. En el caso de los modelos deterministas, que serán los considerados en este texto, estas ecuaciones están basadas en los conceptos generales de la conservación de la materia y de la energía, y de los fenómenos de transporte.
- La tercera etapa se refiere al proceso

Figura 6.1.1. ▼

Los modelos intentan describir el comportamiento de un sistema real prediciendo la respuesta a partir de datos de entrada y de un conjunto de ecuaciones donde se ha incorporado el conocimiento que se tiene del sistema a simular. En la figura se presenta un esquema general del proceso de construcción.



de calibración, en el que se determinan los valores de los parámetros que aparecen en las ecuaciones del modelo. Habitualmente, la determinación de los parámetros se realiza comparando los valores de salida proporcionados por las ecuaciones del modelo con los que se han determinado experimentalmente.

- Finalizado el proceso de calibración con un ajuste razonable, el modelo puede pasar a ser utilizado de manera operativa, para evaluar el efecto de diferentes alternativas al modificar los datos de entrada. Su fiabilidad estará siempre condicionada a las hipótesis de partida y a la bondad del ajuste obtenido.

### Submodelos e interrelaciones

Cuando se pretende simular la totalidad del **sistema de saneamiento**, hay que tener en cuenta los diferentes procesos que tienen lugar en cada elemento, puesto que se producen movimientos asociados al flujo de agua, pero también se pueden producir variaciones térmicas, y las interrelaciones entre los diferentes indicadores de calidad o contaminación. Ello implica que para construir un buen

modelo será necesario construir tres submodelos: un submodelo hidráulico, un submodelo térmico y un submodelo (bio)químico. Aunque conceptualmente los tres modelos se encuentran interrelacionados, las interrelaciones entre el térmico y el hidráulico (correspondería a la variación de flujo de agua debido a la temperatura) o entre el térmico y el (bio)químico (correspondería a la variación de la temperatura debido a las reacciones (bio)químicas) son suficientemente pequeñas para que el sistema pueda resolverse en cascada. Así pues, a partir del balance de materia en un elemento tridimensional, que considerará los términos

de flujo convectivo, difusivo y de generación, se puede obtener la ecuación general que describe el sistema.

En la práctica esta ecuación general es difícil de resolver, por lo que es necesario establecer diferentes hipótesis simplificativas adaptadas a las características de cada elemento en estudio. Así, en los sistemas de colectores se acepta generalmente un flujo modelo pistón, mientras que en los reactores de las estaciones depuradoras la hipótesis de mezcla completa suele ser la más utilizada. No es lo mismo hablar de modelar un proceso que de **simular** su comporta-

Figura 6.1.2.

Ecuación general del balance de materia para un elemento diferencial de volumen considerando un modelo unidimensional.



$$\frac{\partial(CA)}{\partial t} = - \frac{\partial(uCA)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( DA \frac{\partial C}{\partial x} \right) + S$$

“donde

C = concentración de la sustancia en estudio

A = área de flujo

u = velocidad de flujo promedio

D = coeficiente de difusión

x = distancia

t = tiempo

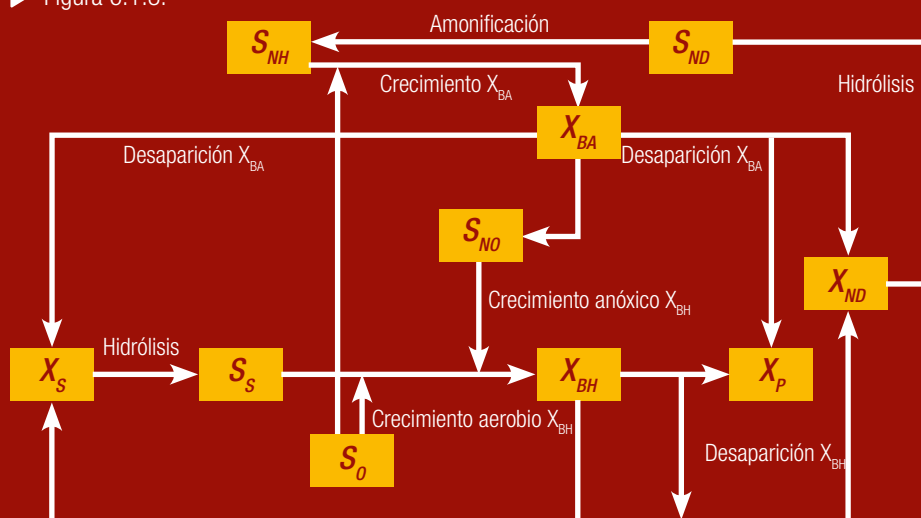
S = términos asociados a generación, crecimiento...”

## El proceso de lodos activos como ejemplo de codificación de conocimiento de un sistema complejo, en forma de modelos matemáticos

Si bien todos los elementos del modelo para describir un sistema de saneamiento son importantes, el modelado de modelo (bio)químico del **sistema de lodos activos** es el que a lo largo de los años ha recibido más atención y cuyo uso se encuentra más extendido y validado. De hecho los fundamentos matemáticos de dicho modelo se remontan a 1914, cuando Arden Lockett describieron por primera vez una aproximación de los procesos biológicos de depuración del agua residual. Desde entonces, multitud de estudios experimentales han permitido desarrollar aspectos relacionados con las cinéticas, las variables para la determinación de sustrato y biomasa, los mecanismos de eliminación de nutrientes, etc. hasta disponer en la actualidad de un conjunto de modelos suficientemente estandarizado, con una notación común, y ampliamente aceptado por la comunidad internacional. Dicho conjunto de modelos se conoce con el nombre de **familia ASM** (*Activated Sludge Modeling*), promovido desde la IWA (International Water Association), y que incluye ASM1, ASM2, ASM2d y ASM3.

**ASM1:** Se trata del primer modelo lanzado por la IWA, e incorpora las principales transformaciones y componentes necesarios para describir la hidrólisis, la oxidación del carbono en condiciones aerobias y anóxicas (desnitrificación), y el proceso de nitrificación, en el que el nitrógeno amoniacal es oxidado a nitratos. El modelo se basa en cinéticas de Monod y las reacciones biológicas más consolidadas para el crecimiento de bacterias, y mantiene el balance de oxígeno mediante el uso de la demanda química de oxígeno (DQO) para expresar las concentraciones de sus componentes. El afluente se define en base a sus fracciones solubles, particuladas, degradables e inertes, tanto para la fuente de carbono como para el nitrógeno. El crecimiento bacteriano tan solo se produce en presencia de sustratos solubles, mientras que la muerte de microorganismos se modela en base a una aproximación regenerativa, donde el producto de la lisis se transforma parcialmente en material inerte y en sustrato particulado, el cual una vez hidrolizado pasa a formar parte del sustrato soluble, que puede ser utilizado de nuevo por la biomasa activa.

► Figura 6.1.3.



**ASM2 y ASM2d:** El modelo ASM2 se desarrolló unos años más tarde con el fin de incorporar la eliminación biológica del fósforo. El metabolismo de los organismos acumuladores de fósforo (PAOs) se describió utilizando productos de almacenamiento interno (polihidroxialcanoatos PHA y polifosfatos Poly-P, pero no glicógeno, pese a que actualmente existe consenso respecto al papel que juega en el metabolismo de los PAOs). ASM2 considera el crecimiento de los PAOs en condiciones anaerobias y no incorpora su metabolismo desnitrificante. Con el fin de minimizar el número de variables de estado, describe de un modo simplificado el nitrógeno y el fósforo particulado, estimándolos a partir de una relación con las variables de estado de DQO particulada.

La incorporación de la actividad metabólica de los PAOs en condiciones anóxicas conllevó la publicación del modelo ASM2d. La cinética lenta de crecimiento de los PAOs en condiciones anóxicas se describió de un modo similar al crecimiento de bacterias heterotróficas en condiciones aerobias y anóxicas en ASM1.

**ASM3:** El último de los modelos de la familia ASM en aparecer fue bautizado con el nombre de ASM3, y aunque no incluye la eliminación biológica de fósforo, describe mediante una nueva aproximación la oxidación de carbono, la nitrificación y la desnitrificación. ASM3 asume que el metabolismo del crecimiento bacteriano precisa una etapa previa de almacenamiento intracelular del sustrato. El modelo permite describir de un modo más específico la descripción de los procesos de acumulación de sustrato orgánico y de respiración endógena, separando la actividad de bacterias heterotróficas y nitrificantes.

De todos modos, en un futuro próximo todavía se prevé una **evolución** significativa de los modelos matemáticos existentes para los sistemas de saneamiento. Aspectos como la formación y proliferación de microorganismos filamentosos, la eliminación de contaminantes emergentes, la producción de  $N_2O$  u otros gases que contribuyen significativamente al cambio climático, las nuevas rutas en distintas etapas para la eliminación de nitrógeno, la granulación de la biomasa, el ensuciamiento de las membranas, la recuperación de fósforo u otros contaminantes, la dinámica del sulfuro, las reacciones que se producen en los decantadores, los procesos físicos de transferencia, etc.

miento. De hecho, la mayoría de usuarios nos limitamos a resolver, para un escenario determinado, los modelos desarrollados previamente por algún experto.

La simulación implica el uso de algún programa que permita la resolución matemática del modelo. Estos programas pueden ser generales (paquetes matemáticos avanzados como Matlab, etc.) o específicos para el campo del saneamiento (Mouse, SWMM, West, GPS-X, Simba, Biowin, etc.).

Los simuladores son cada vez más potentes y fáciles de usar, por lo que también es cada vez más común su uso para distintas aplicaciones por multitud de usuarios. Resulta fundamental conocer unos mínimos detalles de los modelos que se esconden debajo de la agradable interfaz del usuario, y sobre todo de las limitaciones o restricciones que conllevan, ya que si no corremos el riesgo de obtener preciosas gráficas en dinámico del comportamiento de un proceso significativamente distinto al que pretendemos simular. Por ejemplo, un convincente icono de biorreactor de membranas puede contener un modelo que no simula el ensuciamiento de las mismas.

Otros factores claves para no malinterpretar los resultados de las simulaciones son el hecho de llevar a cabo una correcta **calibración** de los parámetros del modelo (aunque a veces es mejor utilizar sus valores por defecto), tener en cuenta que las típicas *rules of thumb* de diseño a las que están acostumbradas las ingenierías suelen incluir el factor de seguridad (mientras que los modelos intentan reproducir el sistema real), y asegurar la calidad y consistencia de los datos de entrada, ya que si los datos son malos, los resultados también lo serán *-garbage in, garbage out-*.



## 6.2 Diseño óptimo

### Análisis del problema

Una vez definida, en la etapa anterior, la configuración de las instalaciones del sistema de saneamiento, se hace necesario determinar los valores numéricos que puedan servir para su implementación. Aunque el diseño óptimo de las operaciones unitarias implicadas en los sistemas de saneamiento se corresponde al tercer nivel de decisión, y por lo tanto la complejidad e incertidumbre se hayan visto significativamente reducidas, el margen de maniobra es lo suficientemente amplio como para apoyarse en las mejores tecnologías disponibles durante el proceso de toma de decisiones. Actualmente, el dimensionamiento de las unidades previamente seleccionadas suele estar basado en una combinación de arte y ciencia para optimizar una función objetivo, donde la experiencia de la persona responsable del proceso se complementa con correlaciones empíricas, hojas de cálculo, estimaciones, factores de seguridad, modelos, vicios, modas, etc. algunos de ellos recuperados de viejos apuntes o de manuales de diseño más o menos actualizados, otros incorporados de aproximaciones más innovadoras que permiten contemplar la dinámica del proceso de un modo más ambicioso. El resultado final puede dar lugar a propuestas más o menos conservadoras, con mayores/menores costes de operación en contrapartida a una menor/mayor inversión inicial, que cumplan estricta o sobradamente los límites legales de vertido, más o menos fáciles de operar, con mayor o menor consumo de reactivos, más o menos flexibles, con mayor o menor margen de optimización, más o menos robustas frente a perturbaciones, más o menos seguras frente a eventuales accidentes o desastres naturales, etc. La mayoría de estos criterios ya se han tenido en cuenta en la toma de decisiones de primer y segundo nivel, pero su cuantificación no se ha llevado a cabo de un modo riguroso hasta llegar al detalle del dimensionamiento óptimo de las unidades.

**Una reflexión importante en este nivel es la necesidad de diseñar las instalaciones pensando no sólo en su comportamiento en unas condiciones estacionarias óptimas, sino también dinámicas, previendo las oscilaciones que sufrirá durante su funcionamiento.** Por tanto, será importante considerar simultáneamente las especificaciones de los equipos y el control de los mismos. La planta debe ser eficiente, no sólo para unas condiciones fijadas de diseño, sino que debe serlo también cuando se producen perturbaciones y variaciones en las condiciones de entrada, o en su operación.

La gestión de un modo objetivo y sistemático de criterios tan dispares durante el proceso de optimización, y la existencia de modelos y otras técnicas de análisis cognitivo, combinado con la incertidumbre de los datos, el conocimiento de partida y los objetivos del diseño, favorece el uso de sistemas de ayuda a la decisión frente a aproximaciones más convencionales. De este modo, el proceso de diseño resulta más transparente y se puede justificar cualquier decisión tomada, además de favorecer la reutilización de determinados aspectos en el diseño futuro de procesos similares, la revisión de determinados cálculos frente a un cambio de escenario, etc.

Simultáneamente, como ya se ha ido indicando a lo largo del libro, cabe destacar el hecho de que el análisis exhaustivo que se lleva a cabo en este tercer nivel de optimización puede poner en cuestión alguna de las decisiones tomadas previamente en los niveles superiores, por lo que sería conveniente generar un flujo de retroalimentación del conocimiento, que no siempre tiene lugar.



### Gustaf Olson. Lunds Universitet

Un modelo matemático puede ser considerado como un paquete de conocimiento de la dinámica de procesos. Disponiendo de los modelos apropiados, estos pueden ser usados como poderosas herramientas por los diseñadores de procesos o los operadores. Pueden dar consejos para posibles acciones de control y ser usados para hacer predicciones. Probablemente, la precisión del modelo nunca será la suficiente como para que puedan hacerse predicciones cuantitativamente fiables para periodos largos de tiempo ( $\approx$  semanas), pero aún así pueden describirse las interacciones entre

las diferentes unidades de proceso y los valores, o al menos las tendencias estarían en el orden correcto de magnitud. Es importante entender que un modelo nunca va a satisfacer todas las necesidades. Al contrario, se requiere un amplio espectro de modelos, dependiendo del propósito y el usuario. En el tratamiento de aguas residuales, la necesidad de modelos dinámicos es evidente para varios grupos de personas:

- *el diseñador*, que quiere explorar no sólo el promedio de propiedades de una planta, sino también su solidez a las alteraciones dinámicas. Este análisis tiene que realizarse antes de que la planta se construya. Evidentemente, el modelo no es capaz de dar respuestas precisas de concentraciones para una planta específica;
- *el ingeniero del proceso*, que quiere explorar diferentes configuraciones o los principios de funcionamiento de una planta existente;
- *El operador*, que necesita un sistema de ayuda a la decisión, donde pueda explorar diferentes situaciones de "qué pasaría si";
- *el docente* que utilizará el modelo para enseñar la dinámica de la planta a diferentes tipologías de personas, que van desde los operadores hasta los investigadores;
- *el investigador*, que usará el modelo como una versión condensada de los conocimientos actuales. El modelo permite explicar los diversos fenómenos básicos y las interacciones del proceso.

Es bastante evidente que los diferentes usuarios quieren encontrar respuestas diferentes en los modelos. Algunos tienen que calibrar el modelo para una planta existente, mientras que otros tienen que utilizar las mejores estimaciones disponibles de los parámetros de la planta. Los diferentes usuarios están interesados en diferentes escalas de tiempo y a su vez tienen demandas diferentes de los detalles del modelo. Mientras que el investigador quiere ser capaz de modificarlo casi todo en el modelo, el operador en la planta hace hincapié en la facilidad de uso y la fiabilidad del modelo para sus propósitos. Lo más importante: el modelo no es la realidad, es nuestro mejor conocimiento de la realidad. Así pues, ¡no hay que enamorarse del modelo!

## Integración e implementación

La optimización de un problema convencional consiste en encontrar una solución que represente el valor óptimo para una función objetivo. Sin embargo en el caso del diseño de los sistemas de saneamiento, se constata que se requiere la optimización simultánea de más de un objetivo. Es por eso que una aproximación multiobjetivo, donde el cumplimiento de cada objetivo se mida en base a los distintos criterios seleccionados, parece ser la aproximación más adecuada.

La clasificación de los criterios contemplados en distintas categorías (por ejemplo económicos, ambientales, técnicos y sociales) permite asignar pesos globales por categoría y facilita el uso de análisis de sensibilidad para determinar la importancia relativa de los criterios en el proceso de optimización. Dicho proceso también puede realizarse dentro de cada categoría, jugando con los valores de los pesos asignados a cada criterio.

Una de las claves del diseño óptimo radica en la correcta cuantificación de los cri-

terios con los que se pretende medir el alcance de los objetivos. En el mejor de los casos, especialmente por lo que respecta a la hidrodinámica del proceso y a los procesos biológicos, disponemos de modelos mecanicistas suficientemente estandarizados que permiten la cuantificación -detallada y en dinámico- de los criterios correspondientes a rendimientos, calidad del agua, costes, etc. Por otro lado, correlaciones, *rules of thumb*, modelos tipo caja negra, modelos basados en conocimiento empírico, o la propia experiencia de la persona encargada del diseño, permiten llevar a cabo una cuantificación del resto de criterios.

Respecto a la optimización, conviene recordar la **incertidumbre** inherente a los datos y a los modelos que utilizamos, hecho que nos impide predecir su comportamiento con absoluta certeza. Ésto resulta especialmente importante para el caso de las EDAR. La poca predictibilidad de ciertos aspectos durante el tratamiento de aguas residuales, como las características del influente, la respuesta de las diferentes comunidades bacterianas o simplemente la aparición de sucesos que están fuera de nuestro control,

(como fallos en los equipos) ha forzado a los ingenieros de proceso a aplicar factores de seguridad elevados, sobredimensionando los diseños. El análisis de incertidumbre permite identificar cuáles son las principales fuentes de esta variabilidad y evaluarla (cualitativamente y cuantitativamente) para así finalmente proporcionar diseños más ajustados.

Finalmente, la implementación del SAD para la optimización del diseño requiere un marco de referencia que permita gestionar los datos y la información de partida, que facilite la cuantificación de los criterios (algunos de ellos precisan la ejecución de modelos) en dinámico y para distintos escenarios; que cuadre los balances de materia, y que permita llevar a cabo los análisis de sensibilidad de los pesos asignados y las simulaciones para predecir el impacto y la propagación de la incertidumbre (por ejemplo, mediante análisis de Monte Carlo). La integración de las distintas prestaciones y programas informáticos en un solo SAD facilita la interacción con el usuario y permite el análisis riguroso e iterativo con los distintos agentes implicados en el proceso.

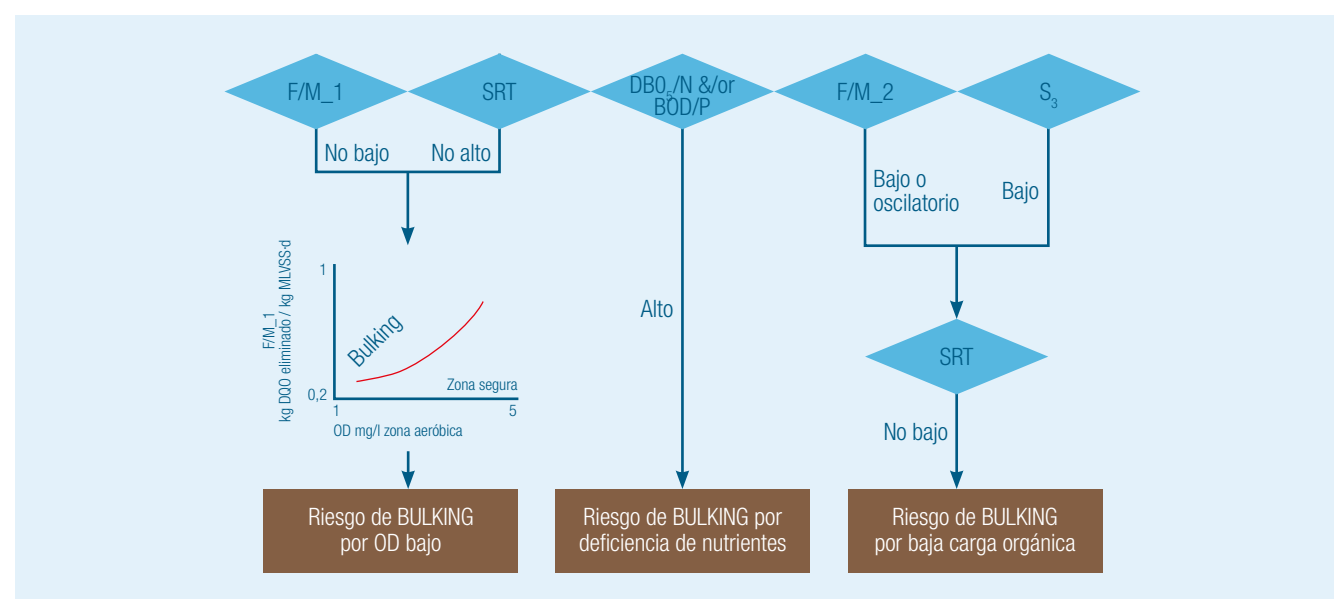


Figura 6.2.1.

Una de las capacidades del SAD es la posibilidad de incorporar y gestionar diferentes tipos de conocimiento. Por ejemplo incorporar la posibilidad de evaluar el riesgo de que se produzca *bulking* filamentoso en la planta, para cuya descripción todavía no existen modelos deterministas suficientemente fiables, por lo que es necesario recurrir a reglas de operación proporcionadas por expertos.

## OPERACIÓN

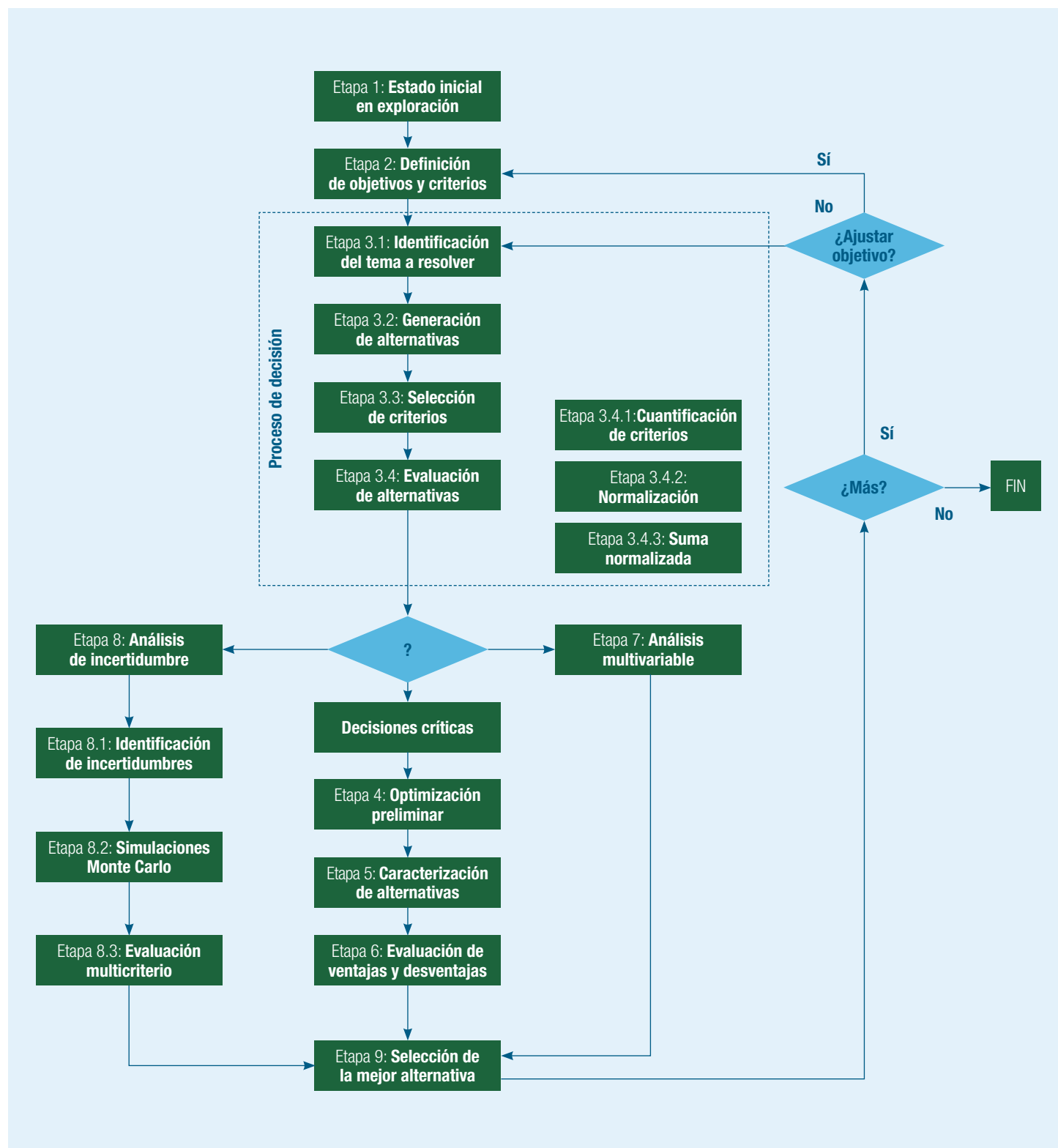
### Entrada de datos

La cantidad y calidad de los datos y el conocimiento de partida condicionan las posibilidades reales de optimización del diseño de un sistema de saneamiento. En algunos casos estos datos son proporcionados por la Administración o por el cliente (aunque en este caso algunas decisiones también están previamente tomadas), mientras que en otros es el diseñador el que tiene que llevar a cabo las medidas, estimaciones y predicciones futuras.

Asumido el marco legal que regula los límites finales de vertido, de emisiones, de seguridad, la calidad para la posible reutilización del agua, etc. y las restricciones respecto a espacio y presupuesto, la optimización del diseño precisa de detalles respecto a la cantidad y calidad del caudal a tratar. En el peor de los casos se dispone de una estimación de la población conectada al sistema de saneamiento, pero un diseño óptimo necesita disponer del perfil del influente (con medianas, picos, perfiles horarios, estacionalidad y todo ello para la cantidad y la calidad), la proyección de futuro, la estimación de eventos que alteren el sistema (algunos de los cuales pueden ser impredecibles, como corresponde a sistemas complejos), las posibles medidas ya existentes para la mitigación de dichos eventos (tanques de regulación, derivaciones, etc.), la contribución industrial, comercial e institucional, las infiltraciones y/o pérdidas del sistema, etc.

Figura 6.2.2.

Diagrama de flujo de operación del sistema desarrollado indicando las opciones que se pueden establecer para la realización del diseño óptimo.





## Diagnosis

En este caso, el sistema propuesto opera siguiendo nueve etapas.

- **Etapa 1.** Analiza la información proporcionada con el objetivo de definir el contexto en el cual se va a proceder a realizar el diseño del sistema.
- **Etapa 2.** Incluye la definición de los objetivos y de los criterios de evaluación para medir el grado de satisfacción de los mismos. Para determinar su importancia relativa se recurre a factores de peso.
- **Etapa 3.** Se realiza la identificación del problema a resolver, la generación de alternativas y su evaluación para obtener la medida del grado de satisfacción de los objetivos propuestos. Para la evaluación de las alternativas se establecen tres subetapas:
  - Quantificación de los criterios
  - Normalización
  - Suma normalizada

En esta etapa se puede solicitar al sistema la aplicación de técnicas estadísticas multivariantes (etapa 7) y de análisis de incertidumbre (etapa 8).

- **Etapa 7.** Implica el análisis de los resultados mediante técnicas de estadística multivariable, que incluyen *cluster analysis*, análisis de componentes principales (ACP) y análisis discriminante (AD).
- **Etapa 8.** En primer lugar se realiza una identificación y cuantificación de las diferentes incertidumbres que se hayan identificado en el sistema (etapa 8.1), para a continuación realizar un conjunto de simulaciones de Monte Carlo (etapa 8.2) y finalmente, en la etapa 8.3, realizar una evaluación multicriterio de las alternativas generadas.

En caso de que se decida realizar un análisis de decisiones críticas, el sistema aplica tres etapas.

- **Etapa 4.** Corresponde a una optimización multiobjetivo preliminar, donde se comparan las alternativas más prometedoras ubicadas cerca de las condiciones óptimas obtenidas a partir de las simulaciones dinámicas.
- **Etapa 5.** Se procede a una identificación de los puntos fuertes y débiles de cada opción mediante el uso de reglas obtenidas a partir de árboles de clasificación.
- **Etapa 6.** Implica la evaluación de los *trade-offs* (ventajas y desventajas) entre los beneficios y pérdidas que se obtienen en el proceso globalmente. Ello se realiza con simulaciones dinámicas y el conocimiento cualitativo extraído durante el proceso de diseño.

Finalmente, en la **etapa 9** el sistema procede a la selección de la mejor alternativa, de acuerdo con las especificaciones realizadas a lo largo del proceso.

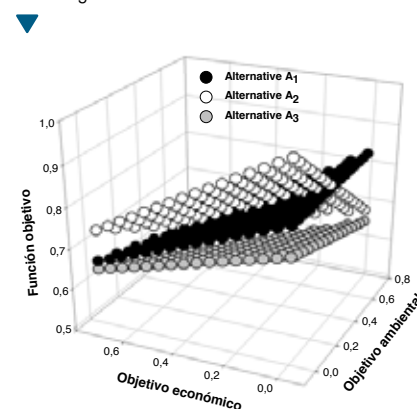
## Ayuda a la decisión

### Rediseño de una instalación de tratamiento

En un estudio realizado sobre el rediseño de una instalación para eliminar nutrientes, a partir de una planta que inicialmente consta de una zona aerobia, se establecieron como objetivos: a) alcanzar los límites fijados por la Directiva 91/271 en cuanto a reducción de nitrógeno y fósforo a la salida del sistema, b) minimizar el impacto ambiental (establecido en este caso como impacto sobre el medio receptor), c) el coste (construcción y operación) y d) la mejora de la operación de la instalación de tratamiento en cuanto a estabilidad, flexibilidad, facilidad de control y minimización de riesgos asociados a problemas de separación. A cada uno de estos objetivos se le asignó un peso. Se evaluaron tres alternativas, para cada una de las cuales se obtuvieron los valores asociados a cada uno de los objetivos. Como aspecto a destacar, la ayuda a la decisión que representó analizar cómo variaban las puntuaciones obtenidas por cada una de las alternativas, al modificar el peso relativo que se daba a cada uno de los objetivos. Ello permite construir un espacio de decisión en el que el usuario final puede evaluar cuál será el impacto de posibles modificaciones y, por tanto, tenerlas en cuenta en el momento de la decisión.

Figura 6.2.3.

El cambio de priorización de los objetivos (ambientales o económicos) modifica la configuración seleccionada.

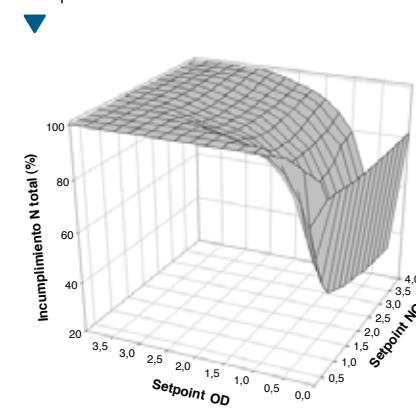


### Selección de sistemas de control

Como se ha indicado al principio del tema, la necesidad de asegurar las condiciones de calidad a la salida de los sistemas de saneamiento, minimizando los impactos de las perturbaciones, hace que el diseño de los lazos de control se esté convirtiendo en un punto clave para la correcta operación de las instalaciones de tratamiento. Como segundo ejemplo se presenta la optimización de los puntos de consigna de dos controladores, uno para el oxígeno disuelto (DO) y otro para el nitrato ( $\text{NO}_3$ ) en una planta de tratamiento que prevé la eliminación de materia orgánica y nitrógeno. En este caso, la existencia de zonas aeróbicas y anaeróbicas condiciona las prestaciones del sistema, por lo que se debe establecer un compromiso entre los puntos de consigna para oxígeno disuelto y nitrógeno. Nuevamente, las prestaciones del sistema desarrollado permiten al usuario identificar cual es el impacto de sus decisiones sobre los diferentes objetivos establecidos, que son los mismos que en el caso anterior.

Figura 6.2.4.

Impacto de la variación de los puntos de consigna de nitrógeno y oxígeno sobre el comportamiento de la instalación de tratamiento.



# 7 Operación y mantenimiento



Una vez construidos, la operación y el mantenimiento de los sistemas de saneamiento resultan clave para obtener sus mejores prestaciones. En esta etapa, en la que es necesaria la toma de decisiones en línea, se está haciendo un esfuerzo significativo para aumentar la cantidad de información que puede extraerse del sistema. Este aumento de la información implica, simultáneamente, la necesidad de disponer de herramientas para su procesamiento, con el objetivo no sólo de aplicar esta información en la gestión inmediata, sino también de extraer conocimiento que pueda mejorar la operación del sistema.

En nuestra opinión, este nuevo conocimiento generado a partir de la experiencia en la operación de los sistemas de saneamiento debería complementar al utilizado en el diseño de las instalaciones, y aunque algunas veces existe una distancia conceptual entre los responsables de las áreas de diseño y los de las áreas de operación, parece claro que es deseable una progresiva integración de estos dos ámbitos. A la vez, se producirá una mayor integración en la operación de los elementos que configuran el sistema de saneamiento, de manera que en el futuro esta mayor integración implicará una mayor complejidad. Este aumento de la complejidad, que tiene que redundar en una operación más eficiente, requerirá de nuevas herramientas, entre las que los sistemas de ayuda a la decisión serán cada vez más habituales.

En este contexto de progresiva evolución a una mayor integración, en este capítulo se presentan cuatro apartados, que corresponden a la construcción de cuatro SAD desarrollados para cuatro situaciones diferentes. En el primer apartado, como ejemplo de integración de importantes volúmenes de datos con conocimiento experto, se presenta un SAD desarrollado para la operación de estaciones depuradoras de aguas residuales que puedan utilizar diferentes variaciones del procedimiento de lodos activados. En el segundo apartado se estudia el caso específico de las estaciones de tratamiento basadas en sistemas naturales, ampliamente utilizadas en pequeñas poblaciones, que presentan como rasgos diferenciales una instrumentación más reducida, y la mayor necesidad de utilizar información cualitativa y conocimiento experto.

En los dos últimos apartados se presentan dos SAD desarrollados más recientemente, en diferente estado de implementación, que corresponden a mayores niveles de integración. En el tercero se presenta una propuesta de gestión del conjunto de sistemas de saneamientos considerando los colectores, la estación de tratamiento y el medio receptor, mientras que en el último apartado se presenta una propuesta para la integración del conocimiento de diferentes sistemas de saneamiento.



# 7.1 Supervisión, control, gestión y optimización energética de EDAR

## Análisis del problema

Una estación de aguas residuales urbanas está constituida por un conjunto de operaciones de tratamiento primario físico o químico, seguidas de un tratamiento secundario biológico que tiene el objetivo de eliminar la materia orgánica, los nutrientes y los sólidos en suspensión del agua a tratar. Como otros procesos ambientales, las EDAR son sistemas complejos en los que se producen interacciones entre fenómenos físicos, químicos y biológicos. Por ejemplo hay que considerar aspectos cinéticos, de catálisis, de transferencia de materia, procesos de separación, etc. La gestión óptima de este proceso es una tarea compleja que implica la integración de diferentes tipos de conocimiento.

Algunas de las características que definen la complejidad del proceso son:

- **Inestabilidad intrínseca.** La composición y cantidad del agua a tratar varía constantemente, lo que provoca cambios en el, ya de por sí complejo, ecosistema encargado de la depuración, modificando la mayoría de las propiedades físicas y químicas, así como la composición de la población de microorganismos implicados.
- **Dificultad de modelización.** Muchos de los procesos que tienen lugar, y que condicionan el dominio, no pueden ser caracterizados mediante un modelo determinista de una forma unívoca. Como se ha indicado en su utilización para el diseño de instalaciones, los modelos desarrollados implican un número elevado de parámetros que, para la gestión en tiempo real de las instalaciones, deberían ser identificados continuamente.
- **Gran cantidad de información.** En los últimos años, se ha desarrollado una nueva instrumentación que ha aumentado de forma espectacular la cantidad de información a procesar, lo

que genera, a veces, un volumen, difícil de procesar.

- **Incertidumbre.** A pesar del aumento del volumen de datos, éstos presentan incertidumbre (problemas con sensores) e imprecisión (se está analizando un medio muy complejo). Simultáneamente, hay un gran volumen de información cualitativa que se presenta, en muchos casos, de forma aproximada y subjetiva.
- **Heterogeneidad y escala.** En la EDAR tienen lugar, simultáneamente, procesos que presentan escalas de tiempo diferentes, desde la transferencia de oxígeno que se realiza en segundos, al crecimiento de microorganismos, que presenta una escala de días, pasando por el tiempo de residencia del agua, de algunas horas. Todo ello dificulta la caracterización por parámetros fácilmente identificables.

Debido a esta complejidad de la gestión del proceso de depuración, incluso los algoritmos de control numérico más avan-

zados han encontrado importantes limitaciones, especialmente cuando tienen que hacer frente a situaciones que requieren información cualitativa y un razonamiento heurístico para su resolución. Para describir estos fenómenos cualitativos, o evaluar las circunstancias que pueden provocar un cambio en la estrategia de control, hace falta algún tipo de representación lingüística basada en los conceptos y métodos del razonamiento humano. Esta es la razón por la que, hasta el momento, operadores humanos constituyen la etapa final en los procesos de control de la instalación. Como se ha ido explicando a lo largo del texto, en este contexto los sistemas de ayuda a la decisión pueden ser una herramienta útil, ya que integran herramientas de gestión del conocimiento con técnicas numéricas, lo que permite un aprovechamiento óptimo de toda la información disponible del proceso. **En este apartado se presenta el trabajo realizado en el desarrollo de ATL, un SAD diseñado para la supervisión, gestión, control y optimización energética de EDAR.**

## Selección de modelos

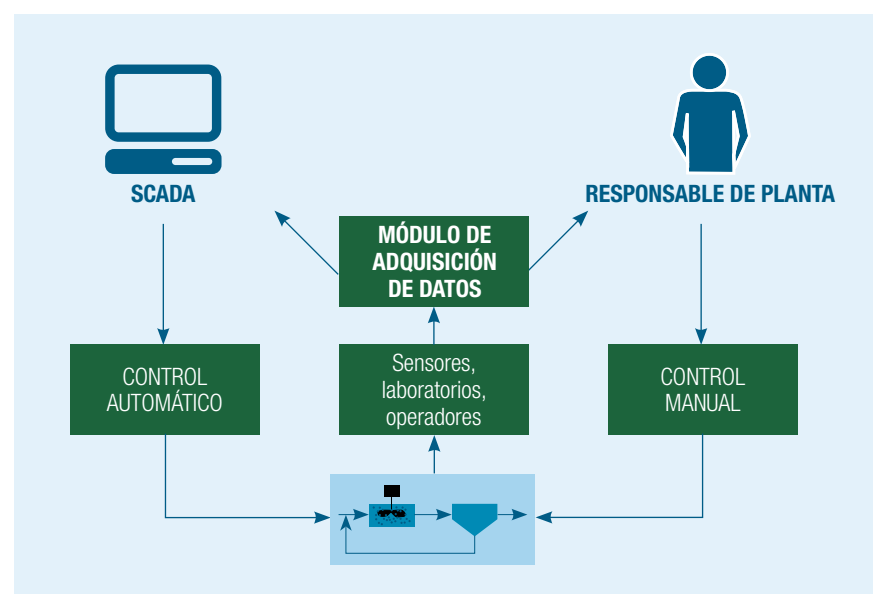
En la etapa de selección de modelos se decidió incorporar dos tipos de herramientas: **modelos matemáticos** (numéricos y estadísticos) y **modelos de inteligencia artificial** (sistemas basados en reglas y sistemas basados en casos), ambas tipologías de modelos complementados con lógica *fuzzy*.

Los modelos matemáticos utilizan expresiones numéricas para aproximar el comportamiento de un sistema (**modelos numéricos**) o bien hacen una caracterización de los datos numéricos disponibles para estimar el comportamiento futuro de un sistema (**modelos estadísticos**).

Entre los modelos de inteligencia artificial, los **sistemas basados en reglas** ofrecen un conjunto de ventajas que permiten mejorar las limitaciones de otras técnicas: facilitan la integración de conocimiento heurístico obtenido a partir de los expertos, incluyendo la capacidad de procesar información cualitativa. El conocimiento se presenta en un formato fácilmente comprensible y reconocible por los expertos (reglas); un sistema bien validado puede proporcionar respuestas adecuadas en forma de planes perfectamente sistematizados para cada situación problemática. Como característica adicional, estos sistemas hacen posible la creación de una base de conocimiento amplia que puede ser aplicada flexiblemente a cualquier EDAR. Simultáneamente presentan limitaciones en cuanto a la dificultad para incorporar nuevo conocimiento una vez se encuentra estructurado.

Por su parte los **sistemas basados en casos** aprovechan el hecho que la segunda vez que tratamos de resolver un problema es más fácil que la primera, ya que recordamos la solución anterior y la repetimos o modificamos en función del resultado obtenido. La idea básica es adaptar soluciones aplicadas en el pasado a problemas particulares que afecten al funcionamiento de la instalación, y aplicar las mismas a los nuevos proble-

▼ Figura 7.1.1. Esquema actual más habitual de operación de las EDAR.





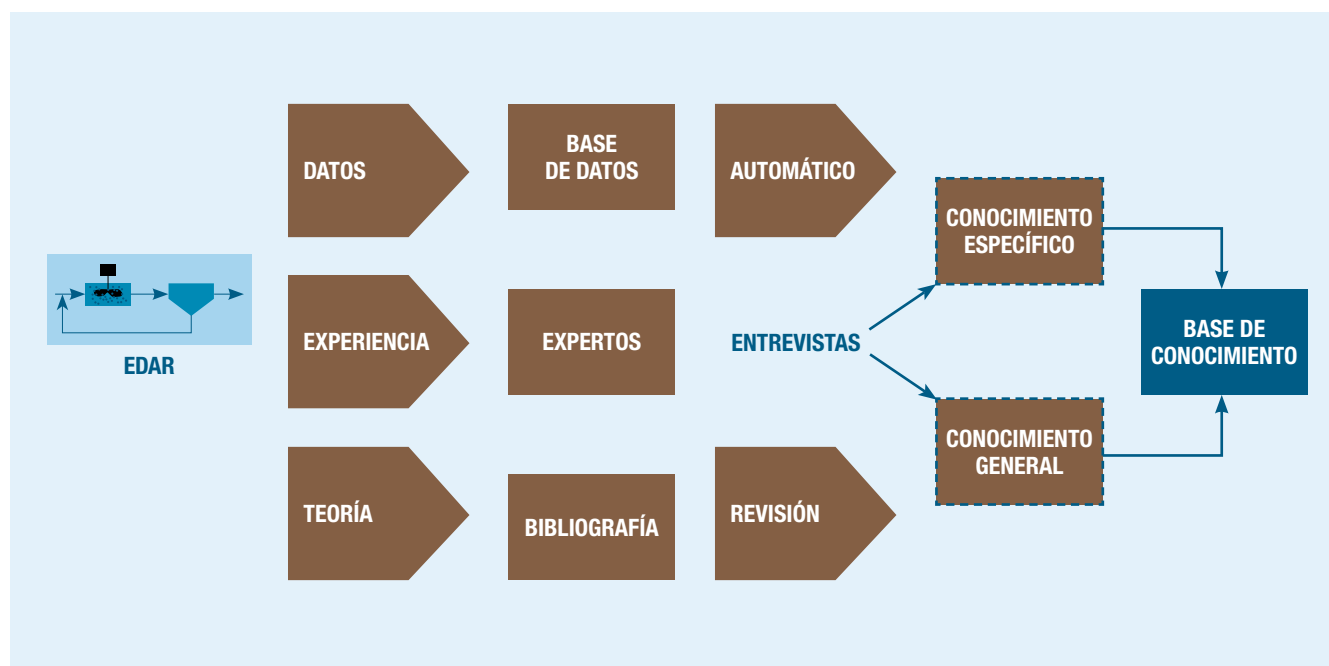


Figura 7.1.2.  
Adquisición de conocimiento

En primer lugar, se llevaron a cabo entrevistas a responsables de EDAR. Este método, que permitió adquirir conocimiento cualitativo, presentó ciertas limitaciones en cuanto a la dificultad de los expertos para explicar de forma sistemática los razonamientos empleados, a medida que su conocimiento aumenta, siguiendo la llamada “paradoja del experto”. A su vez, este conocimiento se presenta fundamentalmente de forma cualitativa. En segundo lugar, se utilizó bibliografía existente en cuanto a información sobre los problemas en la operación de estas instalaciones. En este caso, la limitación recayó en que la información obtenida era genérica y no específica de la instalación cuya operación se quería mejorar. El *know-how* obtenido por estas dos vías fue complementado con el conocimiento extraído del tratamiento automático y objetivo de datos almacenados en bases de datos históricos. El conjunto de las tres metodologías permitió el diseño de una completa y robusta base de conocimiento.

mas que sean similares, lo que permite mejorar el resultado frente a otros métodos que vuelven a empezar de cero. Se define el caso como un conjunto de conocimiento que representa una experiencia que proporciona una lección fundamental acerca de cómo alcanzar el objetivo deseado (en este caso, el correcto funcionamiento de la instalación).

Un sistema basado en casos requiere una biblioteca de casos que permita cubrir el más amplio espectro posible de problemas potenciales. Estos casos se encuentran indexados en la memoria, de forma que puedan ser recuperados cuando las experiencias que codifican puedan contribuir a mejorar el funcionamiento del proceso. En la biblioteca se incluyen tanto éxitos como fracasos, ya que de ambos se aprende. Es recomendable iniciar la biblioteca con un conjunto de situaciones que puedan considerarse genéricas, obtenidas a partir de la bibliografía o de personas con experiencia en el proceso. De esta manera, el sistema basado en casos puede ya desde el principio proponer soluciones a proble-

mas que sean similares a los incluidos en la “siembra”.

La siembra inicial se puede obtener a partir de la base de datos histórica del proceso, permitiendo cubrir un rango suficientemente amplio de los problemas a los que se enfrenta la EDAR, tanto en situaciones habituales, como en situaciones más esporádicas. La biblioteca se va actualizando con nuevos casos a medida que el conocimiento del proceso progresa; de esta manera este tipo de sistemas va evolucionando, mejorando su capacidad para afrontar nuevos casos. Teniendo en cuenta la importante cantidad de información procesada, existe un procedimiento para seleccionar cuáles son los que se incorporan, de entre aquellos que aporten información más relevante.

El SAD desarrollado puede ser implementado en EDAR basadas en la tecnología de los lodos activados, cualquiera que sea su sistema de aireación y configuración (carrusel, flujo pistón, reactores secuenciales por cargas, reactor de mezcla completa, etc.)



## OPERACIÓN

Las diferentes tareas que realiza el sistema de ayuda a la decisión se llevan a cabo de forma cíclica: adquisición de datos, diagnóstico, ayuda a la decisión.

### Entrada de datos

La tarea principal de este nivel es la actualización de las bases de datos. La adquisición de los mismos se realiza *on-line* a través del SCADA en aquellas variables que disponen de los sensores y equipos correspondientes, y *off-line* en los parámetros químicos y biológicos analizados en laboratorio, y en las observaciones microscópicas y otras anotaciones cualitativas. Este nivel de operación implementa métodos de filtrado de señales como paso previo al almacenamiento de la información en las correspondientes bases de datos evolutivas, para que esté disponible para los módulos de control, supervisión y optimización.

## Diagnosis

Una vez actualizada la información, se envía al módulo de control, donde los modelos matemáticos hacen una primera diagnosis de los principales procesos del escenario (sistema de aireación, recirculaciones externa e interna de lodos, purga, llenado / vaciado de tanques pluviales, etc.). Esta valoración es supervisada y complementada por los modelos basados en el conocimiento de los módulos de supervisión y optimización. De esta manera, el SAD no sólo detecta la posibilidad o existencia de un problema, sino que también identifica cual ha sido la causa, propone soluciones basadas en modificaciones de las actuaciones anteriores para adaptarse a las particularidades de la nueva situación y a la vez optimiza energéticamente el proceso, siempre bajo la premisa final de garantizar la calidad del agua tratada.

## Resultados

Las conclusiones alcanzadas en la fase de diagnosis se transmiten al módulo de ayuda a la decisión. El resultado final de este proceso se comunica a la persona responsable de la operación mediante la correspondiente interfaz. En el diseño de la misma han participado de forma muy activa los usuarios finales, siempre con el objetivo de hacer el sistema lo más cómodo posible para quien lo utilice.

Figura 7.1.4.

El SAD sugiere un plan de actuación que resulta de las tareas de supervisión y predicción, integrando los resultados de los modelos matemáticos y las recomendaciones expertas realizadas por el sistema basado en reglas, y la experiencia recuperada por el sistema basado en casos. Este plan de actuación está compuesto por un conjunto de acciones a implementar que se muestran en pantalla, aunque también pueden ser transferidas directamente al proceso gracias a la comunicación del SAD con el SCADA de la EDAR.

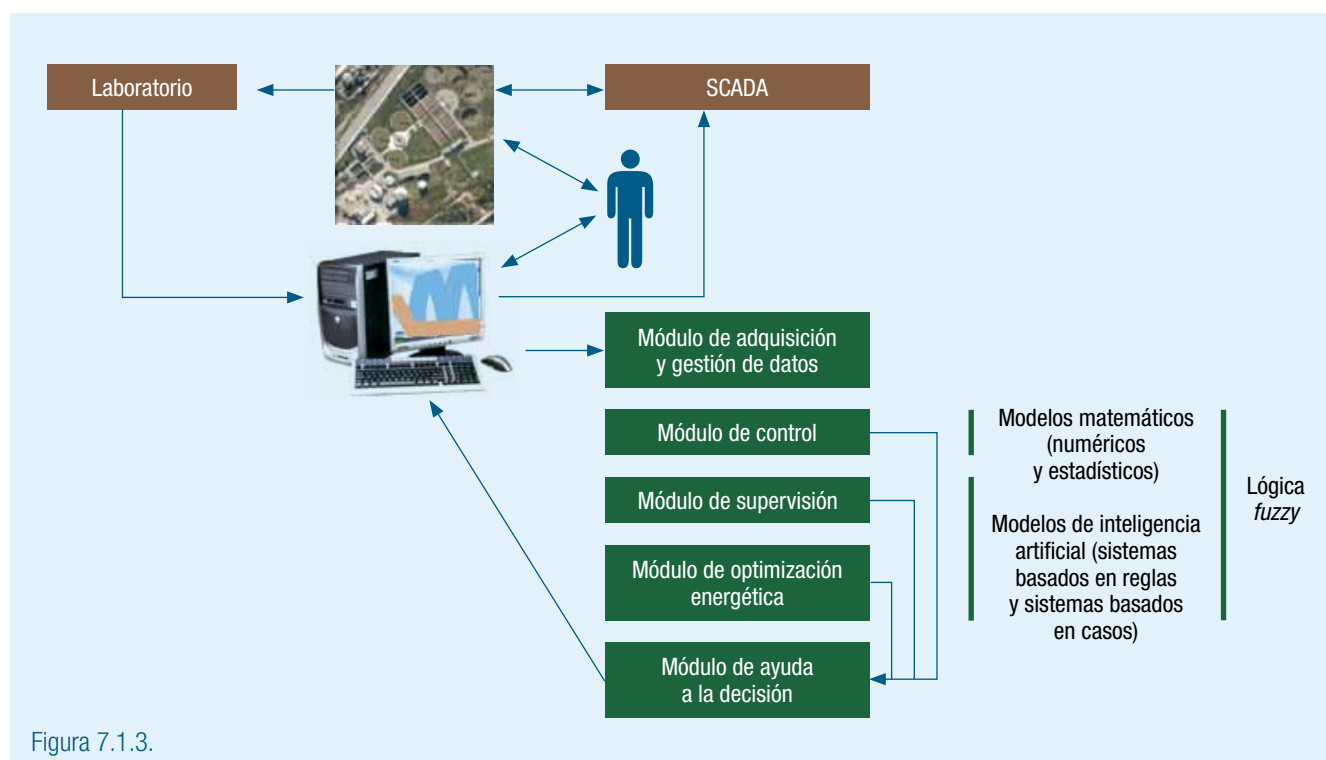
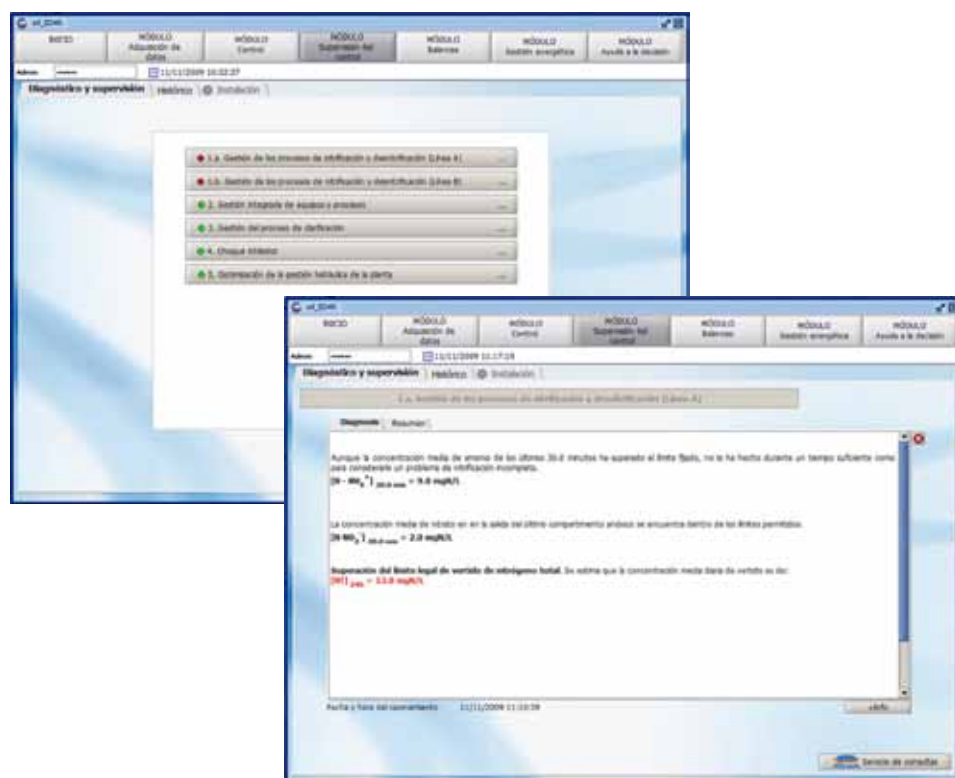
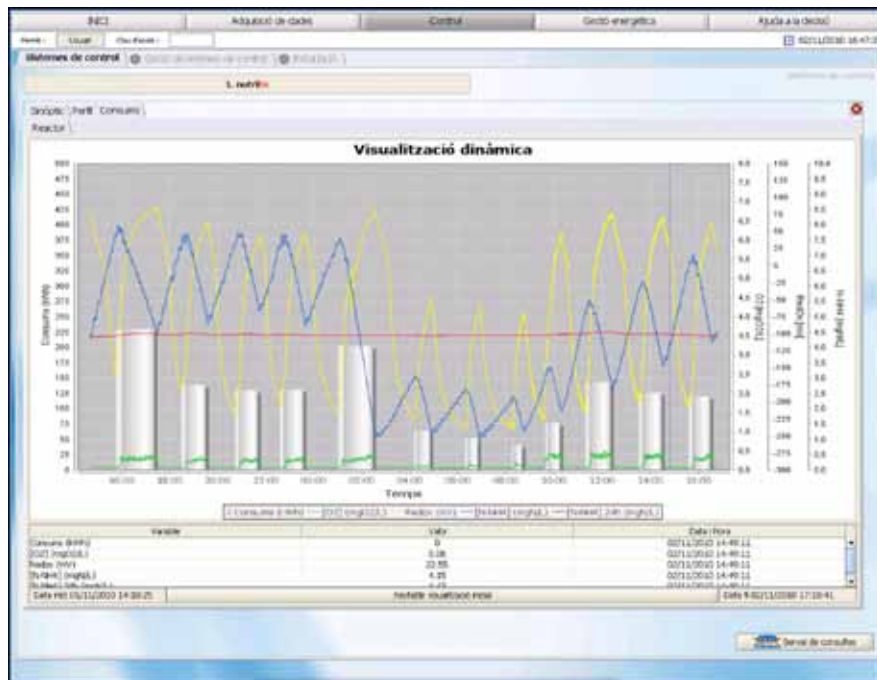


Figura 7.1.3.

Figura 7.1.5.

Los resultados de la aplicación de estas actuaciones (o las modificaciones que considere conveniente el responsable de la instalación) son evaluados posteriormente, para aprender tanto de los resultados positivos como de los negativos. Esta evaluación es realizada por quien ostenta la responsabilidad de la instalación, lo que permite cerrar el ciclo del sistema basado en casos, incluyendo, si es necesario, un nuevo caso para incorporar el nuevo conocimiento.



## Fracasar para triunfar

El sistema de ayuda a la decisión (SAD) para la gestión de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) fue el primero que empezamos a desarrollar. En aquel momento, los SAD apenas eran conocidos y no había mucha experiencia de su aplicación. Ello implicó un doble proceso de aprendizaje. Por un lado, el aprendizaje propio de la construcción del SAD, adquirir el conocimiento, analizarlo, implementarlo en un conjunto de programas que se iban construyendo a medida que íbamos aprendiendo. Pero, sobre todo, implicó un aprendizaje de qué era un SAD y qué posibilidades (y limitaciones!) podía tener. Fue un proceso muy largo, de muchos años, en los que, aprovechando la experiencia adquirida, fuimos capaces de desarrollar otros SAD. Pero nuestra voluntad era la de que fuera útil, que pudiera ser aplicado. Por ello, desde el inicio interaccionamos con otros grupos de investigación para aprender la teoría, pero sobre todo interaccionamos con empresas y administraciones para aprender la práctica de la operación de las EDAR. Y cuando ya llevábamos varias tesis, varios proyectos de investigación y varios convenios de colaboración, fuimos arrastrados por la tendencia imperante de que para que el SAD pudiera ser utilizado en muchas instalaciones. Teníamos que crear una empresa, las llamadas “spin-off”, para que lo pusiera en el mercado y lo comercializara. Así, los autores de este libro hicimos todos los pasos necesarios, presentamos todas la solicitudes que hicieron falta y obtuvimos el apoyo correspondiente por parte de los organismos responsables de la materia, que reconocían que teníamos un buen producto, y que había un mercado emergente para el mismo, puesto que no había nada parecido disponible. Así apareció Sanejament Intel·ligent S.L. (SISLtech) en el mercado, con su producto ATL (ATL= ‘agua’, en la lengua de los aztecas, como homenaje al origen mexicano de uno de nosotros).

Sin embargo, a pesar de que lo teníamos claro, y sabíamos que se necesitaba un grado de implicación importante, y esta era nuestra voluntad, no fuimos capaces de conseguir que el producto tuviera éxito, no éramos capaces de instalar nuestro sistema de ayuda a la decisión en plantas reales, más allá de alguna implementación favorecida por contactos personales. Así, la empresa fue languideciendo durante algunos años, en que a pesar de nuestros esfuerzos los posibles clientes nos repetían que la idea era interesante pero no compraban el producto. Finalmente, descubrimos que habíamos caído en un error de manual de primer curso, aquel que desde el inicio habíamos tenido más voluntad de evitar. A menos de que seas una gran multinacional que es capaz de convencernos de la necesidad de cualquier *gadget*, en el mundo de los sistemas de saneamiento hay que escuchar al cliente. No intentar venderle lo que a nosotros nos parece interesante, sino que hay que desarrollar lo que él necesita. Y cuando ya estábamos a punto de tirar la toalla, la entidad con la que inicialmente habíamos iniciado el proyecto, que nos había acompañado desde el inicio y que había podido comprobar, en sus propias instalaciones, la bondad del desarrollo, acudió a la ampliación de capital y se hizo cargo de la gerencia de la empresa. A partir de aquí, con la responsabilidad asumida por personas del sector de los sistemas de saneamiento, conocedores reales y diarios de sus problemáticas, la empresa puede calificarse como un éxito. Manteniendo la idea original del producto, se ha repensado el mismo desde la perspectiva del usuario, ha identificado cuáles son sus necesidades reales, y no las que un grupo de universitarios, con la mejor voluntad, podíamos crear. El número de implementaciones es espectacular y hasta el momento, más de cuarenta EDAR que tratan cada día más de un millón de metros cúbicos de aguas residuales utilizan alguna versión actualizada y adaptada de aquel SAD original, y creciendo cada día no sólo en España. Quizá es que para que una empresa funcione, le pasa como a los huevos con bacon. Que el grado de implicación necesario ha de ser el del cerdo, no el de las gallinas...



## 7.2 Operación y mantenimiento de sistemas naturales de depuración

Los sistemas naturales son una buena alternativa para el tratamiento de las aguas residuales, siempre que estén bien diseñados y tengan un mantenimiento adecuado

### Análisis del problema

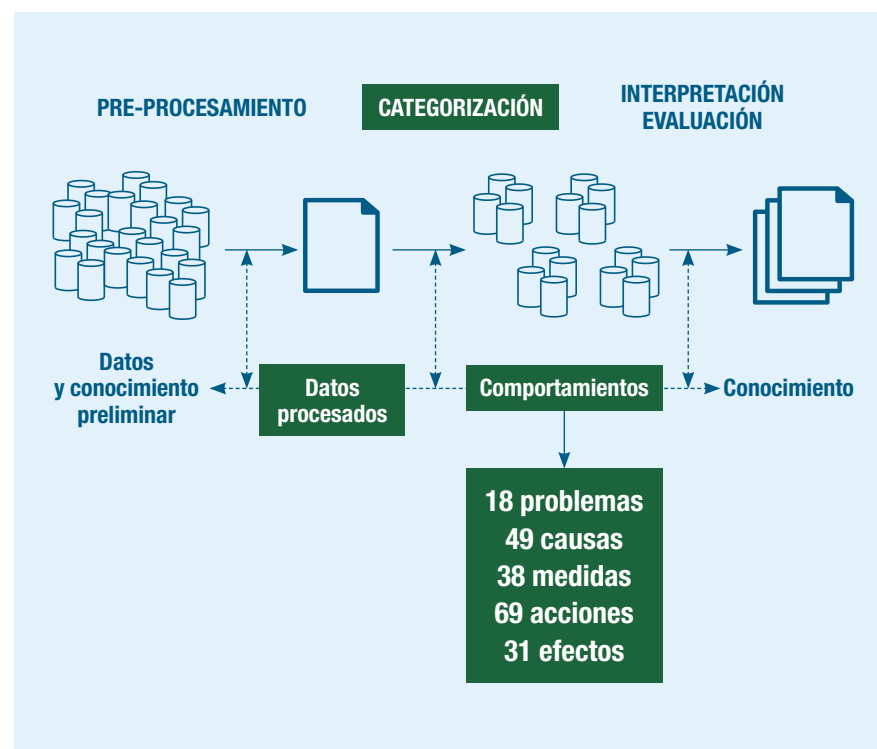
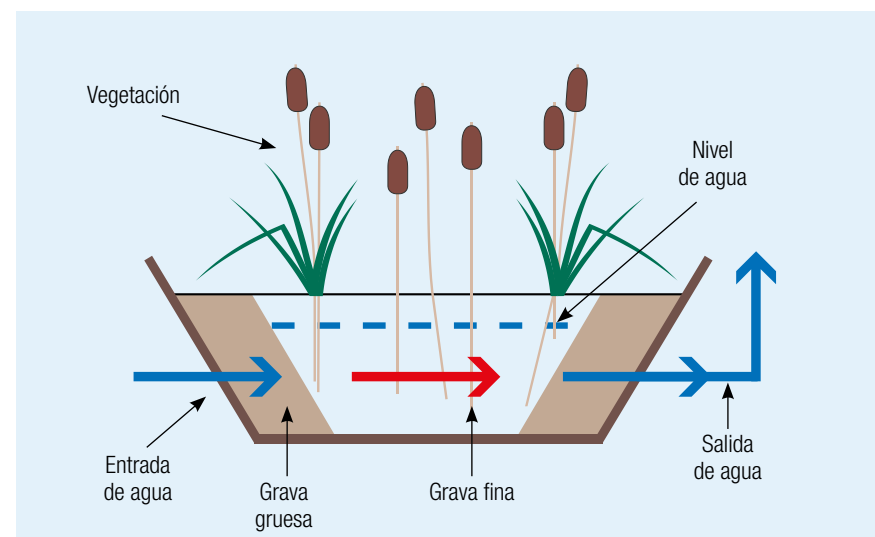
Los sistemas naturales utilizados en los sistemas de saneamiento de pequeñas poblaciones, normalmente de menos de 2000 habitantes, presentan características especiales para su operación. Dado que pueden proporcionar una buena eficacia con un coste de construcción reducido y con un bajo consumo energético, suelen estar entre los sistemas de tratamiento más ajustados. Sin embargo, estas propiedades se dan siempre que el diseño y la construcción sean los adecuados, así como que se proceda a un correcto mantenimiento de las instalaciones. La experiencia demuestra que para obtener los mejores rendimientos es necesario que los procedimientos de operación y mantenimiento sean los más adecuados, aunque pueden diferir de un sistema a otro, por su propio diseño, por el medio receptor, o por el entorno en el que deben trabajar. Ello implica que parece necesario disponer de un sistema que ayude en la definición de protocolos de operación y mantenimiento para este tipo de plantas pequeñas, de manera que pueda orientar y ayudar en la monitorización de los sistemas, de acuerdo con las particularidades de cada instalación.

**Es por esta razón que la Agència Catalana de l'Aigua (ACA) encargó la construcción de un sistema de ayuda a la decisión que se centró en los sistemas de humedales construidos (HC), puesto que se encontraban entre los sistemas de tratamiento más recomendados en diferentes cuencas por parte del sistema de ayuda a la decisión de selección de alternativas de pequeños núcleos, previamente utilizado por la misma agencia.**

Los humedales construidos son siste-

mas de tratamiento de aguas residuales formados por una serie de estanques poco profundos o canales dónde se cultivan plantas acuáticas, y mediante un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos (absorción, precipitación, biodegradación...) se depuran las aguas residuales. Están impermeabilizados del suelo mediante arcilla o revestimientos sintéticos, y con la ayuda de estructuras de ingeniería se controla la dirección del flujo del agua, el tiempo de retención del líquido y el nivel de las aguas. Dependiendo del tipo de flujo (horizontal, vertical, subsuperficial), puede contener un medio inerte poroso como grava o arena.

Como objetivo para el SAD se propuso identificar todos los problemas que pueden aparecer en la operación de un HC, y definir un protocolo para prevenir, detectar y corregir estos problemas. Este protocolo debía proponer un programa de vigilancia y un conjunto de medidas preventivas y acciones correctivas, de acuerdo con las características de cada humedal construido donde se aplicara el sistema de ayuda a la decisión.



▲ **Figura 7.2.2.** El conocimiento se adquirió a través de entrevistas a expertos, documentación, experiencia y análisis de los resultados obtenidos del funcionamiento de diferentes HC en operación, de los que se obtuvo información. Estos datos y conocimiento se procesaron siguiendo el esquema presentado en la figura, procediéndose a una categorización que permitiera sistematizar los comportamientos de los HC agrupando los diferentes problemas, causas, medidas y acciones a realizar.

◀ **Figura 7.2.1.** Esquema de un humedal construido de flujo subsuperficial.

## Adquisición y análisis de datos y conocimiento

El conocimiento adquirido se organizó en cuatro bases de conocimiento:

- Base de conocimiento del entorno. Incluye información sobre las características climáticas, ambientales y de las aguas residuales de las pequeñas poblaciones donde se prevé aplicar el SAD. Permite caracterizar a cada pequeña comunidad y al punto de descarga del efluente tratado.
- Base de conocimiento de características de diseño. Incorpora el diseño de características que pueden variar entre los HC: hidrología (flujo superficial, flujo horizontal subsuperficial o flujo vertical), vegetación cultivada (tipo de plantas, procedimiento de renovación, densidad y épocas de siembra), configuración y estructuras (características de los medios porosos y su distribución, el número y la disposición de los humedales en serie o en paralelo, su forma y profundidad, el tipo de impermeabilización, revestimientos sintéticos o compactados, las estructuras de entrada y salida, el sistema de distribución del agua, los diques), otras unidades de tratamiento de aguas residuales (los humedales podrían ser utilizados después de diferentes tratamientos primarios o como un tratamiento terciario a continuación de un sistema de lodos activados o un filtro de arena intermitente).
- Base de conocimiento de problemas. Incluye información sobre situaciones de fallos potenciales en relación con los HC. Este conocimiento permite identificar cada situación problemática según los siguientes aspectos: modos (manera en que un HC podría presentar un fallo que se evidencia cuando no se alcanza el rendimiento esperado), efectos (las consecuencias de un problema que puede causar un impacto ambiental), causas (las

cosas, eventos o acciones que originan un problema), monitorización (conjunto de los controles que proporcionan información sobre cómo un HC está funcionando y identificación de la aparición de un problema), acciones preventivas (las acciones tomadas para evitar que aparezcan problemas) y acciones correctivas (las medidas adoptadas para resolver los problemas una vez ya han aparecido).

- Base de conocimiento sobre los controles y frecuencias de las acciones. Esta última base de conocimiento incluye los datos y la información que permite dar frecuencias a los controles y a las acciones que se definan. Ciertos controles y acciones deben llevarse a cabo para prevenir, detectar o corregir problemas. Una vez que el problema

se presenta, la intensidad de las consecuencias puede variar, dependiendo de la sensibilidad del medio receptor. Por lo tanto, se tiene en cuenta esta sensibilidad, la capacidad de dilución en el medio receptor, la presencia de estanques o acuíferos, los posibles usos del agua en su reutilización y la sensibilidad ambiental de la zona.

que se consideró que proporcionaba la mejor representación de los conocimientos adquiridos para definir el protocolo de vigilancia y mantenimiento. RBS es un modelo que puede simular muchos procesos humanos en la toma de decisiones ante un problema específico. Se estructura en dos módulos principales independientes: la base de conocimiento y el motor de inferencia. Mientras la primera contiene el conocimiento general del proceso, por lo general codificado mediante reglas heurísticas, el motor de inferencia es el software que controla las operaciones de razonamiento de la RBS. La aplicación de la operación y protocolos de mantenimiento proporcionada por el SAD en plantas reales también debe ser una futura fuente de información y conocimiento.

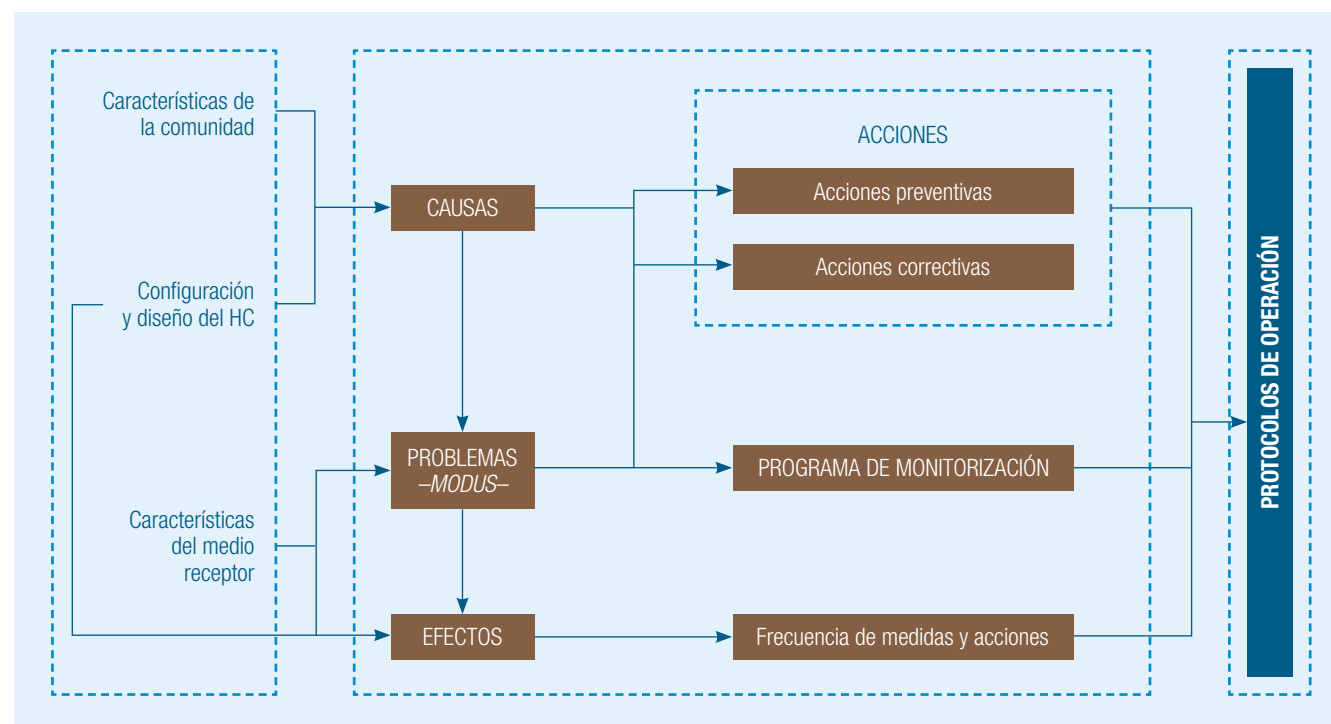
## Selección e implementación del modelo

Entre los diferentes modelos estadísticos, numéricos y herramientas de inteligencia artificial disponibles, se seleccionó el sistema basado en reglas (RBS), ya



Figura 7.2.3.

Esquema de relación entre los aspectos que configuran y definen los problemas que pueden aparecer en un HC, y que se consideran en la correspondiente base de conocimiento.



## OPERACIÓN

El SAD sigue el esquema de operación propuesto por los autores, estableciéndose en este caso las etapas de entrada de datos, diagnóstico y ayuda a la decisión con definición de planes y acciones.

### Entrada de datos

Para cada HC se debe introducir, mediante un conjunto de pantallas, la información correspondiente a:

- Las características de la comunidad en estudio, con aspectos como el número de habitantes, población estacional, información sobre aguas industriales...

- Las propiedades del medio receptor, especialmente por lo que se refiere a su caudal o estacionalidad, sensibilidad, tipo de protección, presencia de acuíferos...
- Las características y el diseño del humedal construido, teniendo en cuenta aspectos como la altura sobre el nivel del mar, distancia de la población, distancia hasta el medio receptor, tamaño de la parcela, sistema de cerramiento de la parcela, fuentes de agua y energía, año de construcción, tipos de pretratamiento, dimensiones, pendientes, sistemas de distribución y recogida del agua, control de nivel, impermeabilización, tipo de plantas, sistema de plantación y año, densidad,...

## Diagnóstico

El conocimiento sobre las características de diseño y las características de la población se estructura en dos matrices que permiten identificar los factores que pueden desencadenar posibles fallos en cualquier HC y proporcionan una lista preliminar de posibles problemas. El conocimiento sobre las situaciones de fallos potenciales se estructura en una matriz que incluye la información relacionada con los modos de fallos, los posibles efectos en el proceso y en el medio receptor, las principales causas, los mecanismos de control, y las acciones a emprender para prevenir posibles fallos o para corregir disfunciones. Estas tres matrices (las características de diseño, características de la población y las situaciones de fallos potenciales) se combinan y, a partir de esta combinación, se definen un conjunto de reglas. La colección de estas reglas ofrece una lista de posibles fallos y modos de prevención, detección y corrección de estas situaciones anómalas.

Finalmente, el conocimiento de las propiedades ambientales de los medios receptores, incluidos en la base de conocimiento de los controles y frecuencias de las acciones, se organiza y documenta en forma de árboles de decisión. Estos árboles de decisión se convierten en reglas que constituyen el árbol desde la raíz a las hojas. Estas reglas permiten clasificar la sensibilidad del medio receptor, y asignan frecuencias a las acciones que se deben tomar y a los controles considerados en el seguimiento de los distintos protocolos.

## Ayuda a la decisión.

La información proporcionada por el SAD son los protocolos que proponen un conjunto de medidas preventivas, los procedimientos de corrección en caso de problemas y un programa de monitorización del HC. También define las frecuencias con que estos procedimientos y controles deben llevarse a cabo. Además, estas guías pueden incluir los modos de los fallos y sus efectos perjudiciales, siempre teniendo en cuenta las características de cada tipo de HC. El SAD ofrece esta información en dos tipos de documentos:

- (1) el cuaderno de control,
- (2) el manual de operación.

### Cuaderno de control

El cuaderno de control es un documento con varias tablas que incluyen los controles necesarios para conocer el estado de funcionamiento de un HC y las acciones preventivas propuestas para evitar que aparezcan problemas. Estas tablas también indican las frecuencias en las que estos procedimientos, controles y acciones deben llevarse a cabo. El cuaderno debe ser rellenado por la persona encargada cuando estos procedimientos y controles se llevan a cabo, y también cuando se encuentran problemas y se aplican los procedimientos de corrección.

### Manual de operación

El manual de operación proporcionado por el SAD es un documento que define los modos de fallos, sus efectos, las causas, y el programa de control y procedimientos para cada una de las situaciones de fallos potenciales identificados para un HC. Al igual que en el cuaderno de control, toda la información incluida en el manual se define teniendo en cuenta las características de cada HC y si algunas de ellas cambian el manual propuesto por el SAD se modifica. Por ejemplo, si la sensibilidad de los medios receptores es alta, aunque el control propuesto para

The figure shows a complex software interface with several overlapping windows. The top window is titled 'PROGRAMA DE SANEJAMENT D'AGUES RESIDUALS URBANES 2001 (PSARU 2001)'. It contains fields for 'Municipi' and 'Núcl'. Below it, there are sections for 'Dades del nucli' (municipality data) and 'Dades de l'entorn del nucli' (surrounding environment data). The 'Dades del nucli' section includes fields for 'Tipus de nucli', 'Població fixa del nucli', 'Població estacional del nucli', 'Tipus d'indústria', 'Sistemes de sanejament', and 'Tenen alguna de l'última anàlisi de l'abornament'. The 'Dades de l'entorn del nucli' section includes fields for 'Zones de baix processat al nucli?', 'Zones amb baix processat al nucli?', 'Embossiments processats al nucli?', 'Nº de contenedors d'aigua residual', 'Tenen dades de temperatura i pluja', 'Influència de les aigües subterranies', 'Protecció dels límits', and 'Tenen dades de cabells de ruïna?'. The 'Dades de Proposta de Parcel·la' section includes fields for 'Número de Vessant del nucli', 'Vessant', and 'Número de límits necessaris'. At the bottom, there is a table with columns for 'Parcel·la', 'Parcel·la', 'Quantificació urbanística', 'Superfície (m²)', 'Tipus', 'Vessant', 'Vessant', and 'Indústria'. The table has 5 rows and 7 columns. The interface is in Catalan and includes various checkboxes and dropdown menus for data entry.

◀ Figura 7.2.4. Esquemas de pantallas de entrada.



detectar el crecimiento de malezas en la superficie es el mismo, la frecuencia propuesta es mayor. Otro ejemplo sería si el HC está diseñado con un flujo superficial, pero se presenta el problema de una alta presencia de insectos en zonas de agua estancada, las acciones a emprender buscaran la reducción del nivel del agua y mejorar su distribución evitando la formación de charcos.

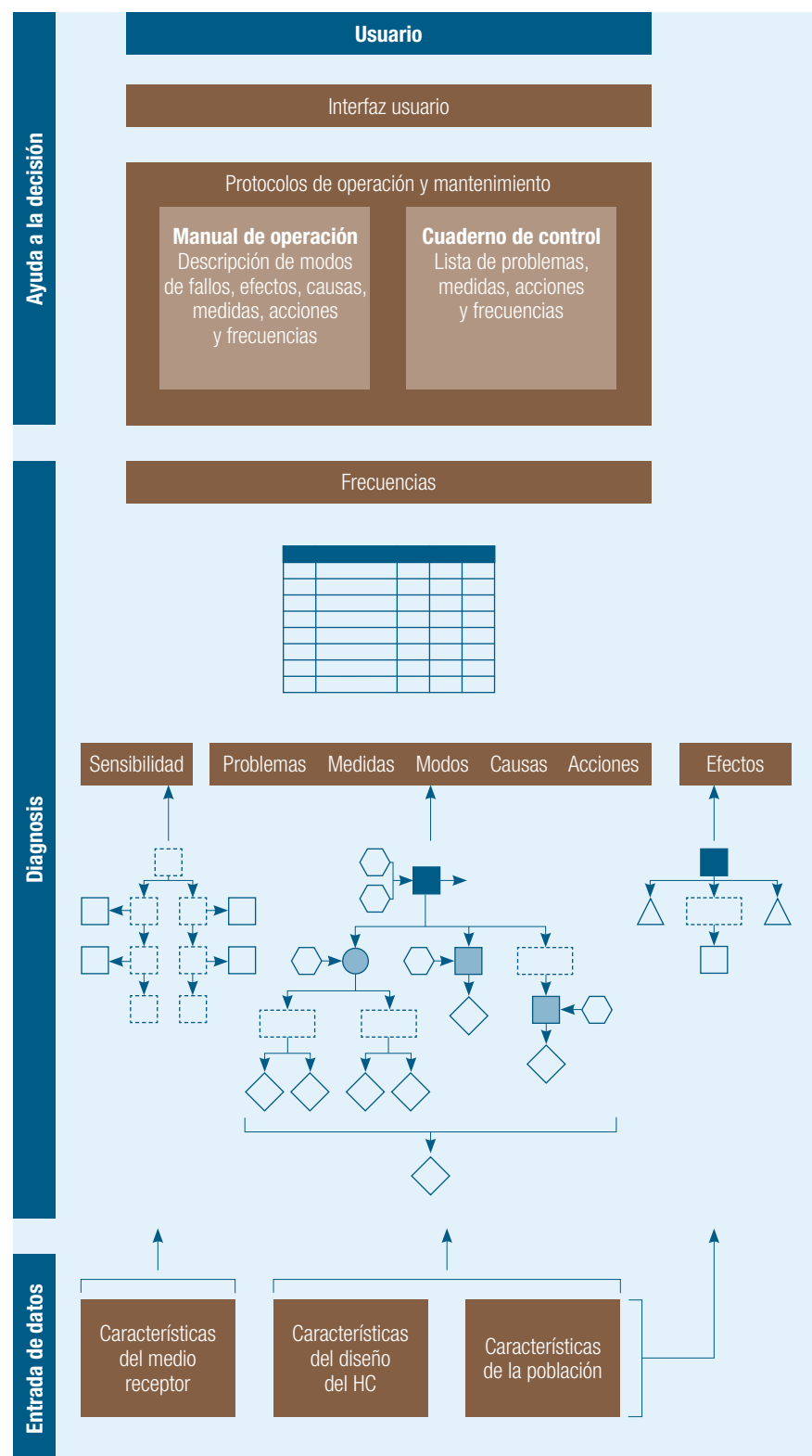


Figura 7.2.5.

Para la definición de los protocolos de operación y mantenimiento de los humedales construidos de poblaciones pequeñas se deben tener en cuenta las características del núcleo, de diseño de la planta y el estado del medio receptor.

La integración de estas tres dimensiones en la definición del protocolo de mantenimiento y operación de los HC conlleva un escenario de indicadores que consideran aspectos de sostenibilidad, técnicos, ambientales y sociales. Para hacer frente a la complejidad de este problema, este SAD puede ayudar a la administración, ingenieros y operadores de plantas a establecer el control más adecuado y programar el mantenimiento para cada uno de los HC en particular

## 7.3 Gestión integral del sistema de saneamiento y medio receptor

### Análisis del problema

En el ciclo urbano del saneamiento, una práctica habitual es que la gestión de las instalaciones de recogida de las aguas residuales y las de tratamiento sea realizada por diferentes entidades administrativas. Entidades, a su vez distintas de la que gestiona el medio receptor. Ello conlleva que exista una tradición de gestión diferenciada entre los tres elementos, dificultando los beneficios que permitiría una gestión integrada.

El motivo de que no se haya generalizado esta gestión integrada no es únicamente administrativo. A los beneficios asociados a la gestión integrada hay que añadir las dificultades técnicas adicionales que deben ser resueltas. Estas dificultades se encuentran directamente relacionadas con el aumento de complejidad asociado. Entre ellos destacaríamos la necesidad de poder disponer de sistemas de monitorización y comunicación en los tres elementos (colectores, estaciones de tratamiento, medios receptores) para poder identificar

el estado de los mismos, la necesidad de herramientas de simulación eficientes que puedan evaluar de forma rápida los efectos de la toma de determinadas decisiones, y sobre todo, la necesidad de herramientas de ayuda a la decisión que dispongan de criterios consensuados que permitan optimizar el funcionamiento del conjunto del sistema, sabiendo que las características de cada elemento son distintas y sus problemáticas también. Es un ejemplo claro en el que la consideración del nuevo sistema integrado presenta una respuesta que va más allá de la operación de cada uno de los subsistemas aislados, y por tanto su optimización global no tiene porqué coincidir con la suma de la optimización de cada uno de los elementos.

Esta voluntad de cambio de paradigma para incorporar la complejidad se aprecia claramente en la evolución de las directivas europeas en materia de agua. Mientras la Directiva Europea 91/271 establece unos límites fijos de calidad de agua a la salida de los sistemas de saneamiento sin considerar las características del medio receptor, la directiva marco del año

2000 hace especial referencia al impacto sobre el medio receptor, promoviendo la gestión integrada del recurso.

En este contexto, **la existencia de una Administración como el Consorci per a la Defensa de la Conca del riu Besòs, con la voluntad de optimizar la gestión de sus infraestructuras y la experiencia previa de haber desarrollado un SAD para la operación de las instalaciones de tratamiento, promovió el desarrollo de un SAD que permitiera la gestión integrada de los tres elementos (colectores, estaciones de tratamiento y medio receptor).**

### Adquisición y análisis del conocimiento

Se trata, en este caso, de obtener conocimiento para un nuevo paradigma de operación. Para ello, en la fase de adquisición del conocimiento se estableció una etapa de utilización de escenarios para obtener información mediante simulación cuál sería la respuesta del sistema al modificar algunas de las condiciones de partida. Se identificaron dos posibilidades para definir las características de los escenarios:

- utilizar sistemas automáticos de generación de escenarios de forma sistemática, construyendo todo el espacio definido por los intervalos de las variables relevantes,
- recurrir a los expertos para identificar cuáles son las variables –y los valores de las mismas– que pueden ser más relevantes, a partir de la experiencia

acumulada.

Uno de los requerimientos para que la técnica de escenarios propuesta pueda ser útil es la necesidad de disponer de modelos matemáticos que sean suficientemente fiables. Como se ha indicado en el apartado de modelos, para que éstos puedan cumplir su objetivo es necesario disponer de las ecuaciones que describen el sistema, y de los datos experimentales que permitan su calibración.

- Por lo que se refiere a las ecuaciones del modelo, se pueden encontrar en el mercado programas de software que codifican las ecuaciones comúnmente aceptadas para cada uno de los elementos, pero es de destacar que la mayoría de los programas de simulación hacen referencia a alguno de los subsistemas. Sin embargo el número de los mismos que permiten describir el sistema integrado es más reducido, lo que muestra una vez más la necesidad de un esfuerzo hacia la integración.
- La obtención de la información y conocimiento necesarios para construir, calibrar y utilizar los modelos requirió la integración de conocimiento cualitativo y cuantitativo, del mismo modo que en la definición de los escenarios.

### Integración del conocimiento

El conocimiento adquirido se ha codificado en forma de árboles de decisión que se estructuran en función de las situaciones problemáticas detectadas en el análisis de escenarios. Así, se han definido cuatro grandes ámbitos que corresponden a la gestión del sistema en tiempo seco, en condiciones de lluvia, ante episodios de contaminación y la gestión de las derivaciones entre sistemas.

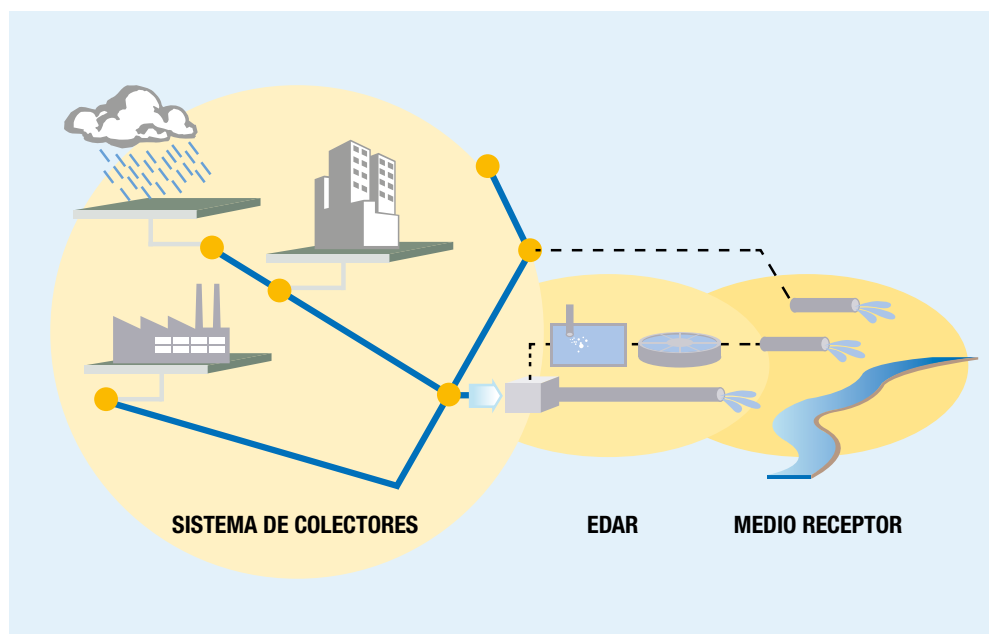


Figura 7.3.1.

En este nivel de complejidad se trata de substituir la gestión individualizada de colectores, estaciones de tratamiento (EDAR) y medio receptor por una gestión integrada que permita la optimización global del sistema, no sólo desde el punto de vista de operación sino también de planificación de las infraestructuras.

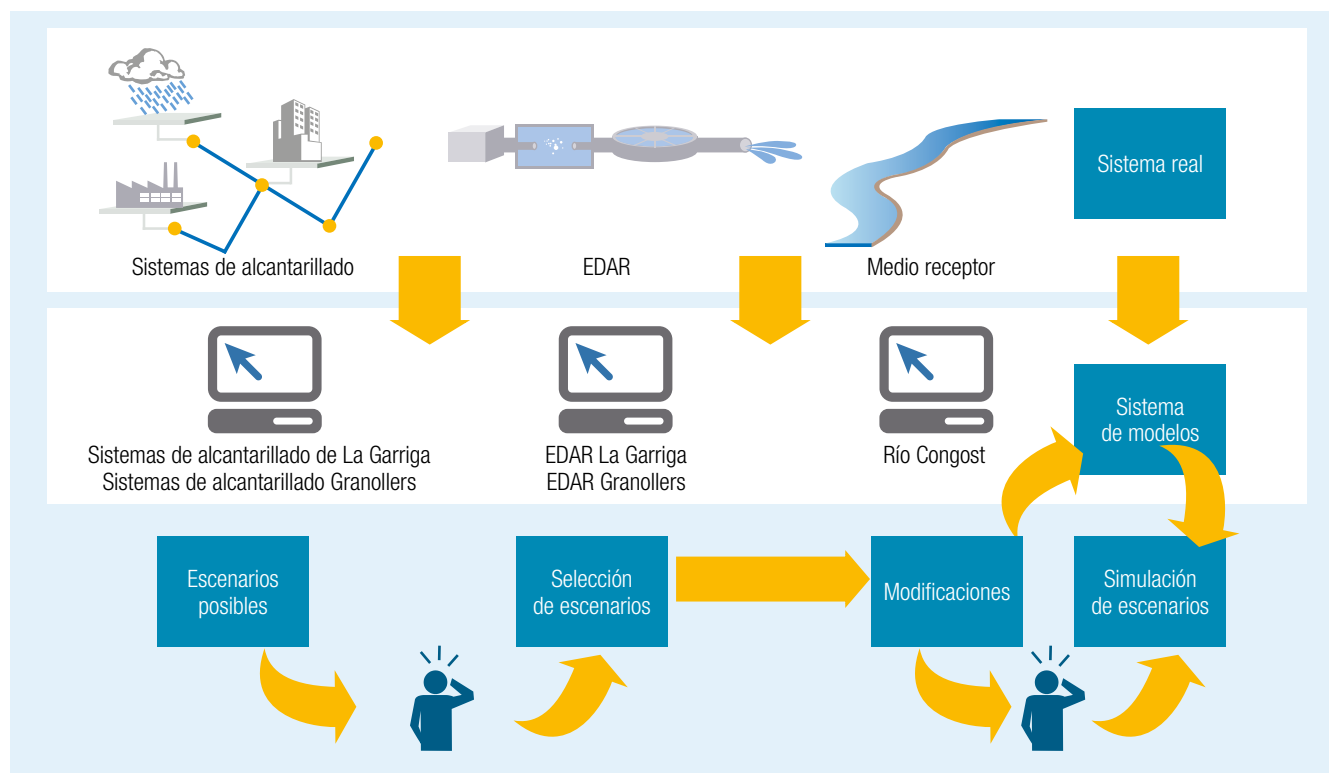


Figura 7.3.2.

Una forma de obtención de conocimiento es la utilización de simuladores para evaluar el efecto de diferentes alternativas de operación o de modificación de las infraestructuras existentes. En este caso se presenta el esquema utilizado para coordinar el trabajo cuantitativo numérico –que permiten los simuladores–, con la experiencia de los responsables de los sistemas de saneamiento para identificar cuáles son las variables relevantes que se quiere evaluar en los escenarios.

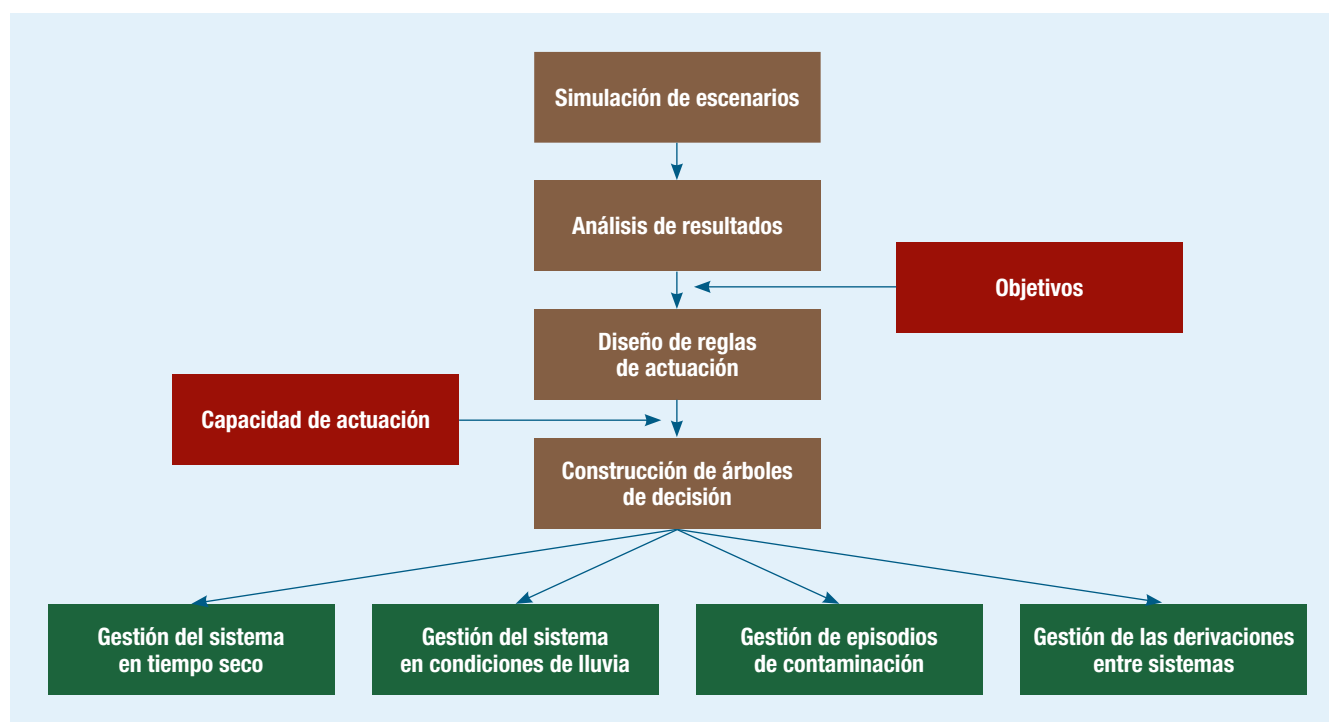


Figura 7.3.3.

Conjunto de escenarios, definidos conjuntamente con los expertos, para evaluar la ubicación y dimensionamiento óptimo de los depósitos de retención a incorporar a las infraestructuras de saneamiento existentes, a partir del impacto en el medio receptor.



## OPERACIÓN

En el SAD de gestión integrada de sistemas de saneamiento para el Consorci per a la Defensa de la Conca del riu Besòs se establecieron dos tipos de objetivos:

- Por un lado, su utilización como herramienta de planificación para mejorar la infraestructura existente y definir la localización y dimensionamiento de depósitos de retención. En este caso, la utilización del SAD se hizo de forma *off-line*, evaluando diferentes escenarios.
- Por otro lado, su utilización *on-line* para mejorar la eficacia de la infraestructura existente en condiciones normales de trabajo y prevenir, identificar y afrontar episodios críticos, especialmente los relacionados con lluvias intensas y/o vertidos industriales puntuales.

## Entrada de datos

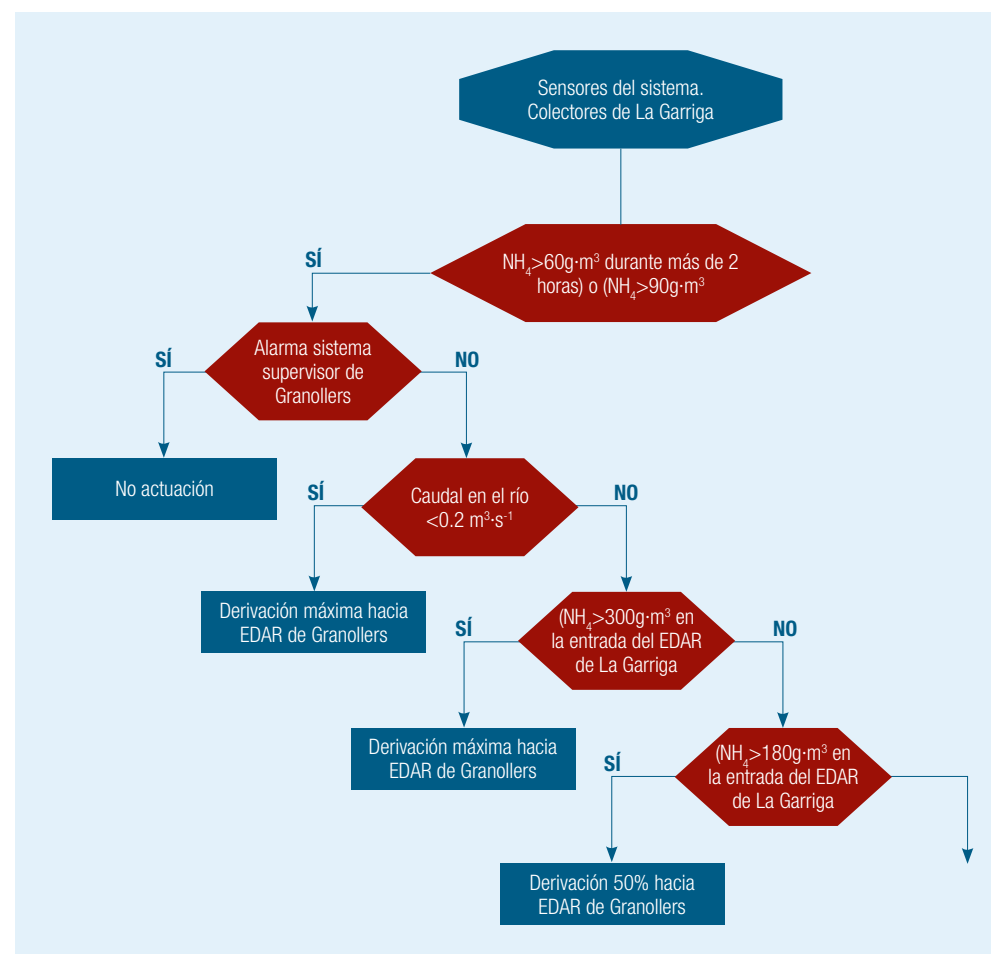
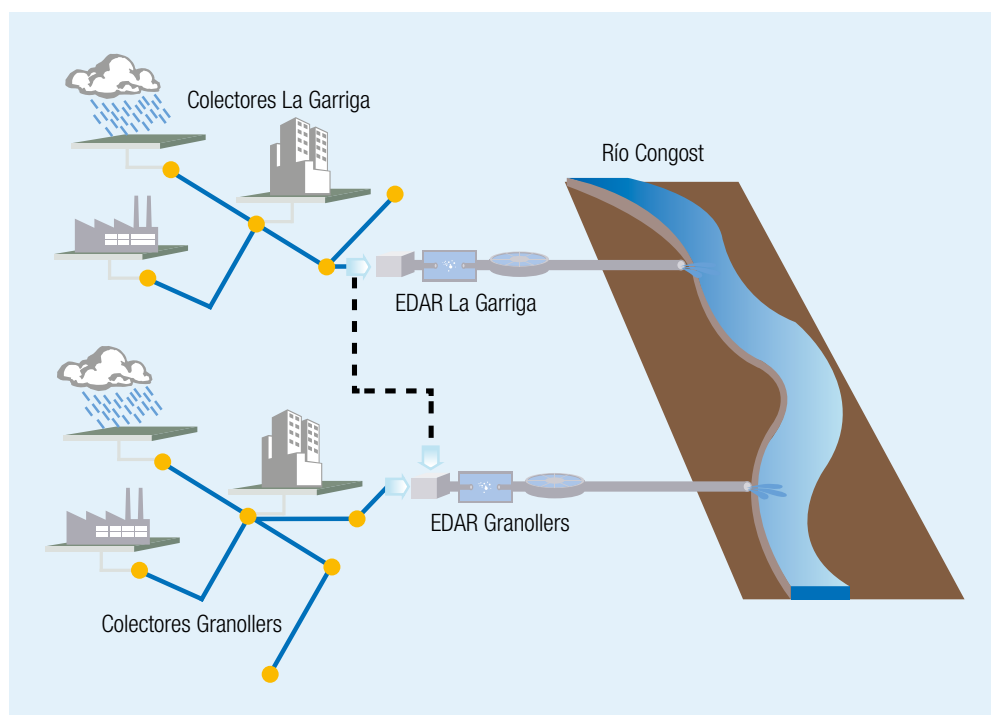
El SAD opera a partir de los datos de entrada correspondientes a los valores de pluviometría, caudales, concentraciones y estado conocido de los colectores, estaciones de tratamiento y del medio receptor.

## Diagnosis

A partir de esta información, y siguiendo los árboles de decisión incorporados al sistema, éste proporciona propuestas de actuación referidas a cómo gestionar los depósitos de retención de que se disponga, las estaciones de tratamiento y las derivaciones. Hay que remarcar que en este caso el conocimiento ya se encuentra codificado en forma de reglas, por lo que no se hace uso de los simuladores cuando se está trabajando *on-line*. Ello es debido a que el tiempo requerido por la simulación de modelos complejos, para describir todo el siste-

ma de saneamiento, se considera elevado para dar respuestas suficientemente rápidas. Creemos que ello irá variando a medida que existan modelos simplifica-

dos que presenten suficiente fiabilidad, o que nuevos modelos o métodos de cálculo puedan ofrecer tiempos de respuesta aceptables.



▲ **Figura 7.3.5.** Rama del árbol de decisiones correspondiente al control de derivaciones entre sistemas. Es de resaltar que en el funcionamiento del árbol de decisiones se tiene en cuenta información de lo que está sucediendo en los colectores, en las estaciones de tratamiento y en el medio receptor. Es a partir de la información integrada de los tres elementos que el sistema proporciona una propuesta, siempre condicionada a las características de la infraestructura existente.

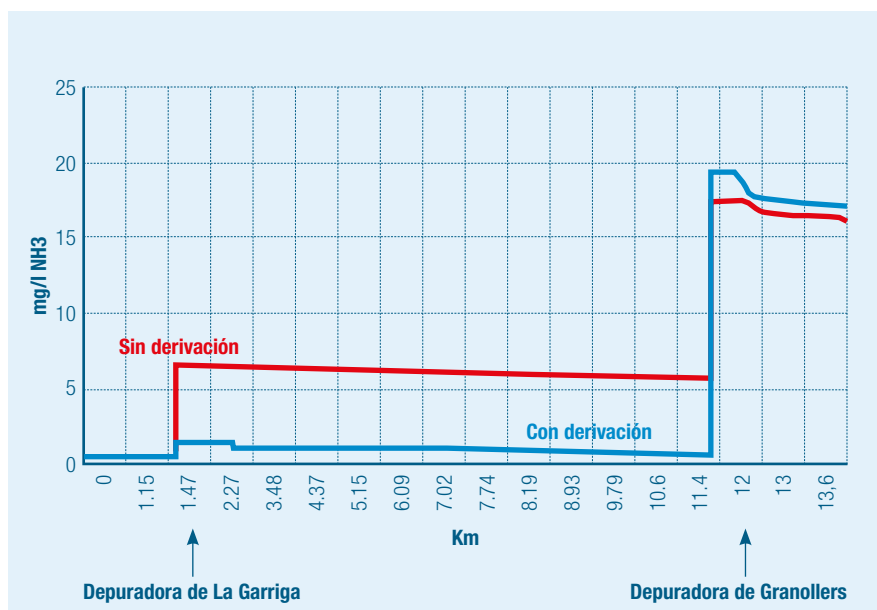
◀ **Figura 7.3.4.** Esquema de los sistemas de saneamiento estudiados en este SAD. En este caso concreto, se tuvo en cuenta la existencia de una interconexión entre dos sistemas de saneamiento, lo que introduce una nueva posibilidad de actuación en tanto que permite derivar caudal de un sistema a otro.

## Resultados

En nuestra opinión, este SAD es un ejemplo claro de sistema que irá evolucionando a lo largo del tiempo y se irá adaptando a las nuevas posibilidades que las herramientas de cálculo y de gestión del conocimiento vayan proporcionando. En este sentido, se ha diseñado para ir incorporando estas nuevas capacidades, pero sin olvidar que “lo mejor es enemigo de lo bueno” y que, mientras tanto, es recomendable que se vaya utilizando, aunque no sea perfecto. Ello por dos motivos:

- Porque será el análisis de sus prestaciones la mejor guía para su mejora.
- Porque ya ofrece mejoras respecto a la no utilización del sistema, como se puede apreciar en la figura, donde se presenta la comparación del valor del nitrógeno amoniacal en el medio receptor como resultado de utilizar el SAD para el aprovechamiento de la interconexión entre los dos sistemas, proponiendo un valor del caudal a interconectar.

▼  
Figura 7.3.6.  
**Comparación de perfiles de amonio a lo largo del río.**



## Gestión integrada e investigación: buenos compañeros de viaje

*Josep Arraez. Gerente del Consorci per a la Defensa de la Conca del riu Besòs*

El río Besòs llegó a ser considerado hace algunos años como uno de los más contaminados de Europa. La gravedad de la situación llevó a que los ayuntamientos de la cuenca constituyeran en 1988 una entidad supramunicipal, el Consorci per a la Defensa de la Conca del riu Besòs (CDCRB) con el objetivo de realizar todas aquellas gestiones, iniciativas y proyectos que pudieran ser soluciones a los problemas de contaminación de la cuenca y del aprovechamiento de sus aguas. Desde el inicio se postuló que establecer una estrecha colaboración con universidades y centros de investigación era sin duda una de las vías para darle la vuelta a la situación y alcanzar el nivel de calidad deseado de las aguas. Esta colaboración tenía que permitir desarrollar conjuntamente herramientas que optimizaran las siempre limitadas infraestructuras para ofrecer un buen servicio a nuestro cliente, el río. Aunque tengo que reconocer que el camino no ha sido fácil, puesto que existen diferencias de objetivos y de dinámicas, la verdad es que los objetivos alcanzados a lo largo de estos años han valido la pena. Actualmente, la gestión del día a día de nuestros sistemas de saneamiento utilizan de forma habitual sistemas de ayuda a la decisión desarrollados conjuntamente con la Universidad, con tanta eficacia que hasta se ha creado una *spin-off* conjunta que está comercializando con éxito este tipo de sistemas. Quisiera acabar remarcando un aspecto que me ha sorprendido agradablemente a lo largo de estos años y es que de los investigadores no sólo hemos obtenido respuestas a muchas de nuestras preguntas, sino que también nos han obligado a hacernos nuevas preguntas que nosotros solos no nos habríamos hecho. ¡Ah! El río se encuentra en estos momentos en un estado ecológico excelente.



## 7.4 Gestión inteligente de la información

### Análisis del problema

El primer nivel de complejidad en la gestión de los sistemas de saneamiento se ha establecido en la operación de sus elementos individualmente, y el segundo en la interacción de los tres elementos (colector, estación depuradora, medio receptor). Creemos que un tercer nivel se establece cuando se aborda la gestión del conocimiento del conjunto de una cuenca o un conjunto de cuencas correspondientes a una administración que los gestiona. De alguna manera, se cierra el ciclo que se iniciaba con el primer nivel de diseño, en tanto que en este nivel los sistemas de saneamiento rinden cuentas de forma global a la sociedad que los financia. Si bien conceptualmente se podría pensar que se plantea el mismo nivel de complejidad en cuanto a la operación integral del conjunto de sistemas, en nuestra opinión no es así, puesto que habitualmente no se produce una interacción con el mismo tipo de agentes, ni el grado de incertidumbre es tan elevado, ni el riesgo es tan grande. Sí que tiene lugar un aumento de volumen de información, que si es bien procesado y genera conocimiento, puede reinvertir en los niveles de selección de alternativas (aprovechando la información obtenida en la operación de las instalaciones para evitar cometer los mismos errores que se pueden haber producido al principio, cuando el nivel de conocimiento es menor) o en el de diseño específico (para mejorar los valores de algunos parámetros a partir de la integración de la información de un conjunto de instalaciones que pueden tratar situaciones equivalentes en una misma zona).

En este contexto, en este apartado se presentan las bases y el diseño conceptual de un SAD encargado por el departamento de explotación de sistemas de saneamiento de la Agència Catalana de l'Aigua (ACA), y que planteaba tres niveles de resultados:

- Almacenar y recuperar de forma inteligente la información documental dis-

ponible, bien fuera sobre los informes realizados por la misma ACA o sobre los encargados a terceros. El usuario que necesite buscar conocimientos sobre algún tema en concreto podrá encontrar las referencias relacionadas. Realizar la supervisión de los sistemas de saneamiento. A partir de la información obtenida sobre su funcionamiento, evaluar el tipo de rendimiento. Si el funcionamiento no se encontrara dentro de los parámetros de normalidad se debería comprobar si la problemática es de operación y/o mantenimiento –caso en el cual se buscarían soluciones en el mercado– o si es una problemática de diseño; en cuyo caso el sistema debería mostrar el abanico de alternativas. Si la EDAR funciona correctamente debería realizar un *benchmarking* para comprobar la posibilidad de mejorar la eficiencia la existencia de posibilidades de optimización. Servir como sistema de ayuda a la decisión para definir la estrategia de gestión de los sistemas de saneamiento, incorporando los aspectos de calidad del servicio, problemáticas asociadas a las tecnologías, costes e impactos.

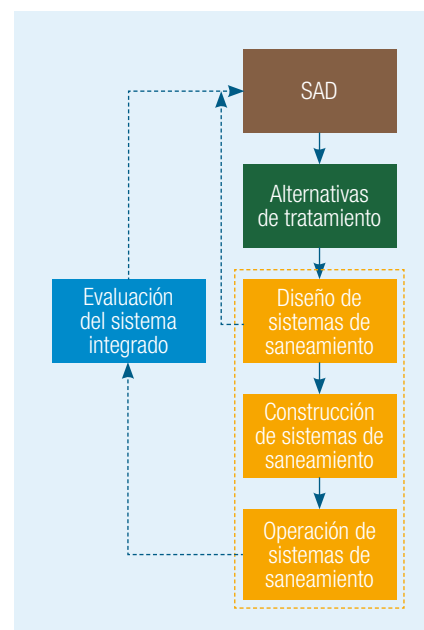


Figura 7.4.2.

Los principales aspectos a tener en cuenta en la buena gestión en operación de sistemas de saneamiento se pueden resumir en cuatro: La calidad del servicio fijado por los límites exigidos por ley (que incluye los análisis y soluciones a problemas de control de calidad de las aguas, variaciones, estacionalidad, contaminantes emergentes, límites de mejora en la calidad, etc.), el coste económico de la explotación del servicio (con los problemas de minimización de costes, mantenimiento, personal, energía y amortizaciones, entre otros), el impacto ambiental generado (traslado del impacto del vector agua hacia el vector energía o al de residuos sólidos, análisis del ciclo de vida de las instalaciones, posible autonomía energética) y finalmente las problemáticas asociadas a las distintas tecnologías (causas de mal funcionamiento de los sistemas, soluciones aplicadas, recomendaciones, fiabilidad de las distintas tecnologías). El conjunto de todas estas áreas de conocimiento tiene que dar respuesta a preguntas de índole estratégica, como puede ser el planteamiento del futuro de este servicio (modelo de gestión, económico y de financiación, mejores tecnologías, sistemas en red, u otros).

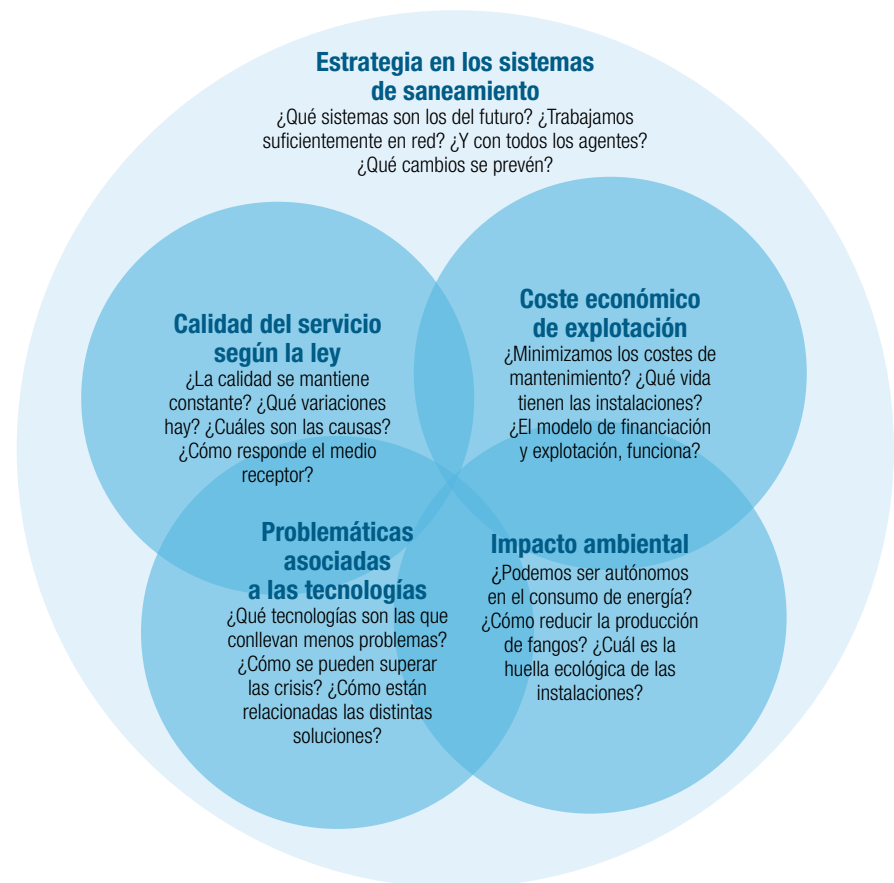


Figura 7.4.1.

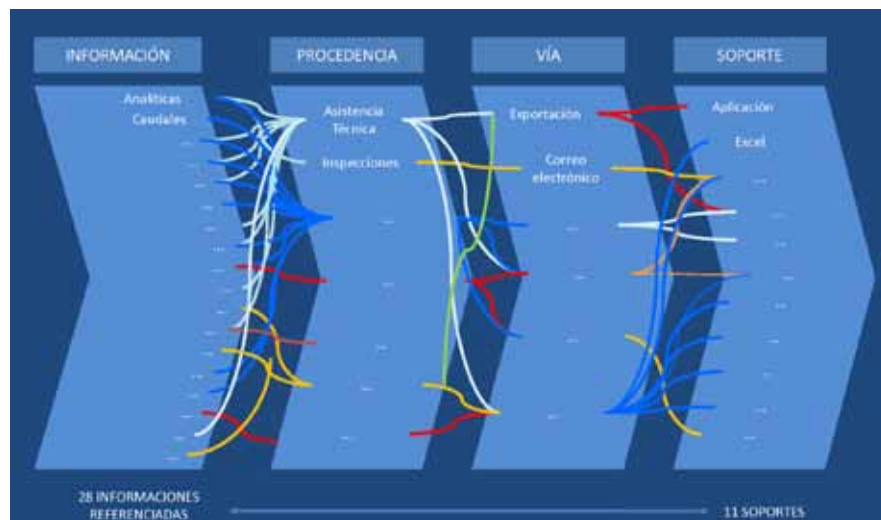
Las organizaciones y administraciones responsables de la correcta operación y gestión de los sistemas de saneamiento acumulan un volumen extraordinario de información, alguna a petición propia y otra que les es proporcionada por otros agentes (empresas explotadoras de instalaciones, proveedores de equipos, centros de investigación, etc.) de diferente tipo (hay información en línea, informes con análisis de datos fuera de línea, información puntual de una instalación o un entorno...) y de temáticas muy diversas, que en conjunto puede generar conocimiento para ser utilizado mediante un SAD como retroalimentación en los otros niveles de diseño y operación.

## Adquisición de datos y conocimiento

En la etapa de adquisición de datos y conocimiento se identificaron dos tipos de estructuras. Por un lado, información correspondiente a características de las instalaciones: datos de diseño, instalaciones y tecnología, infraestructuras asociadas (como bombeos, colectores y emisarios), medio receptor, tipo de influentes, cumplimiento según la legislación vigente, empresas explotadoras y empresas de asistencia técnica. Y por otro lado, información más dinámica y cuantitativa correspondiente a caudales de aguas tratadas, analíticas de los distintos flujos de entrada, salida, procesos y fangos, consumos de energía, materias primas, residuos, costes y gestión económica, incidencias, problemáticas y mejoras.

Figura 7.4.3.

Se pudo constatar la diversidad de tipologías en las que se estructuraba la información existente. Así, por ejemplo, a nivel de datos de explotación de plantas depuradoras, se manejaban unos 28 conceptos, de 7 fuentes distintas, que se recibían a través de 6 vías diferentes y en 11 soportes distintos.



El análisis cognitivo de esta información llevó a plantear dos bases de conocimiento: una de conocimiento general, más abierta en complejidad de conceptos pero simple en número de registros, y la otra, de datos de operación de sistemas de saneamiento, mucho más rígida y con mayor cantidad de registros.

**Base de conocimiento general.** Se definieron 11 clasificadores principales (correspondientes a la Administración y empresa, actividades generadoras, contaminantes y parámetros, infraestructuras, legislación, medio natural receptor, política ambiental, problemáticas, recursos, residuos y reutilización, tecnología), cada una de las cuales contenía varios conceptos (en total se definieron 45, pero pueden llegar a cientos) y cada concepto tenía diferentes términos (pueden llegar a mil). De esta forma, se obtuvieron listas de palabras clave que, definiendo las relaciones entre sí según los 5 tipos distintos estándar de relaciones U-UF-BT-NT-RT (U-término principal, UF-relación de identidad, BT- relación de genérico, NT-relación de específico, RT-relación asociativa) se utilizaron para codificar conocimiento y posteriormente recuperar fácilmente la totalidad de éste más algunas características como la fecha de edición, fiabilidad de la fuente, autores o in-

dice de utilidad. Estas estructuras tienen que ser flexibles y transparentes para el usuario final, ya que son estructuras vivas que pueden variar con el tiempo y los cambios de políticas y estrategias.

### Base de conocimiento de operación.

Esta BC es coherente con la anterior, pero mucho más simple en conceptos, organizados de forma más rígida y estricta y conteniendo un mayor número de registros. Para organizar mejor las consultas de los usuarios, se diseñó un modelo principal en el que se detalla la gestión de la calidad de las aguas tratadas, los fangos generados, los consumos energéticos y los gastos económicos, como un primer modelo de gestión de la operación. Y se separaron otros modelos secundarios como los de gestión de incidencias, la gestión del mantenimiento, la gestión de compras y la gestión de inversiones (no menos importantes pero de no tan alta prioridad). En todos ellos es importante diferenciar los distintos tipos de datos: los **hechos** (datos que se pueden sumar y tienen que ser íntegros y consistentes, sin redundancias, como por ejemplo los m<sup>3</sup> de agua tratada, los kg de materia orgánica en el influente, la energía consumida o los euros de gastos de explotación), los **indicadores** (variables y calculados a partir de los hechos, como por ejemplo el caudal de agua residual de diseño, la carga DBO<sub>5</sub> kg/m<sup>3</sup> influente, los kg materia en suspensión eliminados, el rendimiento en tanto por ciento de eliminación de nitrógeno, o las toneladas de biosólidos totales generadas/m<sup>3</sup> agua tratada) y finalmente las **dimensiones** (características que permiten analizar los hechos, como el tiempo, las infraestructuras, la tecnología o la legislación).

Estos elementos se organizan en una estructura, teniendo en cuenta todas las relaciones, y sobretodo las distintas jerarquías, que permiten navegar por la información en caminos coherentes, desde el nivel superior de máxima agregación de datos a los niveles inferiores

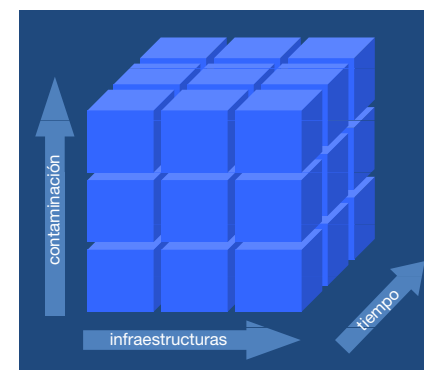
de detalle, llegando al registro. Los distintos análisis pueden ser de índole estratégica, táctica, analítica u operativa. Y la herramienta suministra ayudas para resolver todos los tipos de problemas a todos los niveles, llegando hasta el nivel estratégico, en el que la información construida a partir del detalle tiene que representar un conocimiento apto para que sirva de ayuda a la decisión a los agentes implicados, que puedan tomar las decisiones que les corresponda con transparente coherencia.

## Selección de modelo

Se seleccionaron las funciones *Online Analytical Processing* (OLAP) como modelo que permite una explotación muy rápida por parte del usuario. Utiliza una estructura multidimensional (en forma de cubo) que facilita el análisis de un hecho desde diferentes dimensiones, permitiendo una visualización rápida y en múltiples perspectivas de las distintas dimensiones de la información encapsulada, en cuanto permiten rotar los cubos, cambiar el orden de las dimensiones, seleccionar sólo algunas celdas e incluso agruparlas.

Figura 7.4.4.

Representación de un cubo OLAP, con información encapsulada en distintas dimensiones.





## OPERACIÓN

El diseño del SAD incorpora unos informes diseñados para actualizarse automáticamente, y sobre los cuales los usuarios pueden realizar búsquedas en función de distintos parámetros, como el nombre del sistema, la cuenca, el río, las poblaciones a las que da servicio, los sistemas con vertidos industriales, o con pluviales, empresas explotadoras, o gestores, sistemas que tienen aguas regeneradas, o infraestructuras asociadas como bombeos, colectores o emisarios. Algunos de estos informes prediseñados son los que la agencia recibe de los distintos proveedores. En este caso el

SAD simplifica la búsqueda e interpretación de datos en un único soporte.

Además, los usuarios también tienen las herramientas adecuadas para crear nuevos informes y/o modificar y navegar por estos cuando lo deseen, siempre y cuando tengan el perfil devidamente autorizado para ello. En este caso, estos usuarios avanzados han de tener en cuenta cómo está estructurada la información en las dos bases del conocimiento para explotarla correctamente y mejorar con la experiencia la organización de la información. Son importantes las listas de hechos y indicadores disponibles, las distintas jerarquías en todas las dimen-

siones, las características en que existe definición de los datos y las listas de términos, conceptos y materias que se utilizarán para indexar documentos.

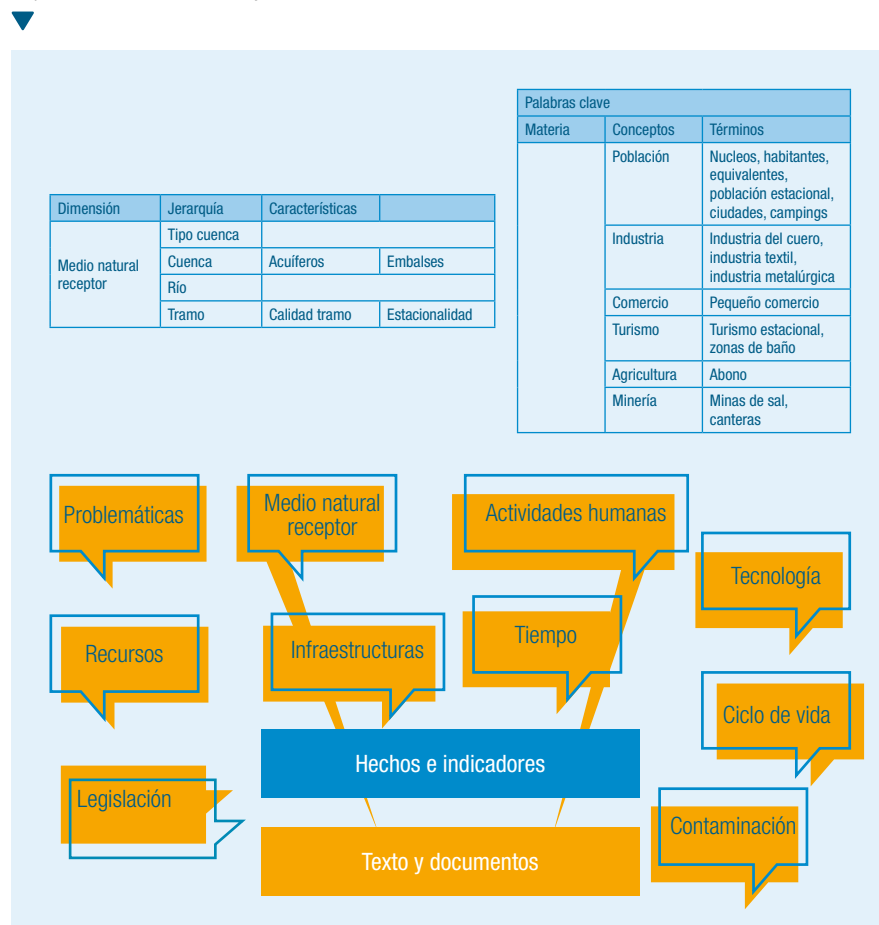
Se identificaron tres tipos de usuarios del SAD.

- Los responsables de proveer nuevos datos o conocimiento. La entrada puede corresponder a datos numéricos o a datos documentales. Los primeros se actualizan de manera automática siguiendo un protocolo consensuado sobre la solución elegida en cada situación de falta, redundancia y/o transformaciones de datos, .

- Los responsables de la explotación de sistemas de saneamiento, que pueden utilizar el SAD para extraer informes periódicos de los sistemas de depuración y documentación operativa relacionada con los mismos.
- Usuarios que, sin trabajar directamente con los datos o análisis periódicos, desean generar informes como ayuda a la toma de decisiones.

La propuesta es que el SAD se soporte vía web, presentando cuatro menús en función del tipo de proceso que se quiera ejecutar:

Figura 7.4.5. Representación de materias y dimensiones sobre las dos bases del conocimiento.



- Primer menú, de introducción de datos y conocimientos (mediante las indicaciones y formularios referentes a la base de conocimientos, o administración de cargas de datos automáticas en la de operación de sistemas).
- Segundo menú, de búsqueda sobre conocimientos. A partir de especificaciones del usuario (siempre guiadas), la herramienta proporciona la localización de los documentos que le pueden ser de utilidad, un resumen y una valoración, en forma de listado que puede ordenarse cómo lo prefiera el usuario, en función de distintos criterios como el cronológico, alfabético de título o de autores, según el uso de la consulta del documento, según valoración del documento...
- Tercer menú, de búsquedas sobre el control de sistemas (individual o integrado, problemáticas, cuencas...).
- Cuarto menú, de búsquedas mixtas (en que el usuario obtiene información de las dos BC). Para recuperar el conocimiento, el sistema tiene que dar herramientas suficientes para poder escoger las palabras clave (en el caso de conocimientos) y los aspectos a analizar (en el caso de los sistemas) que se quieren consultar.

Figura 7.4.7.

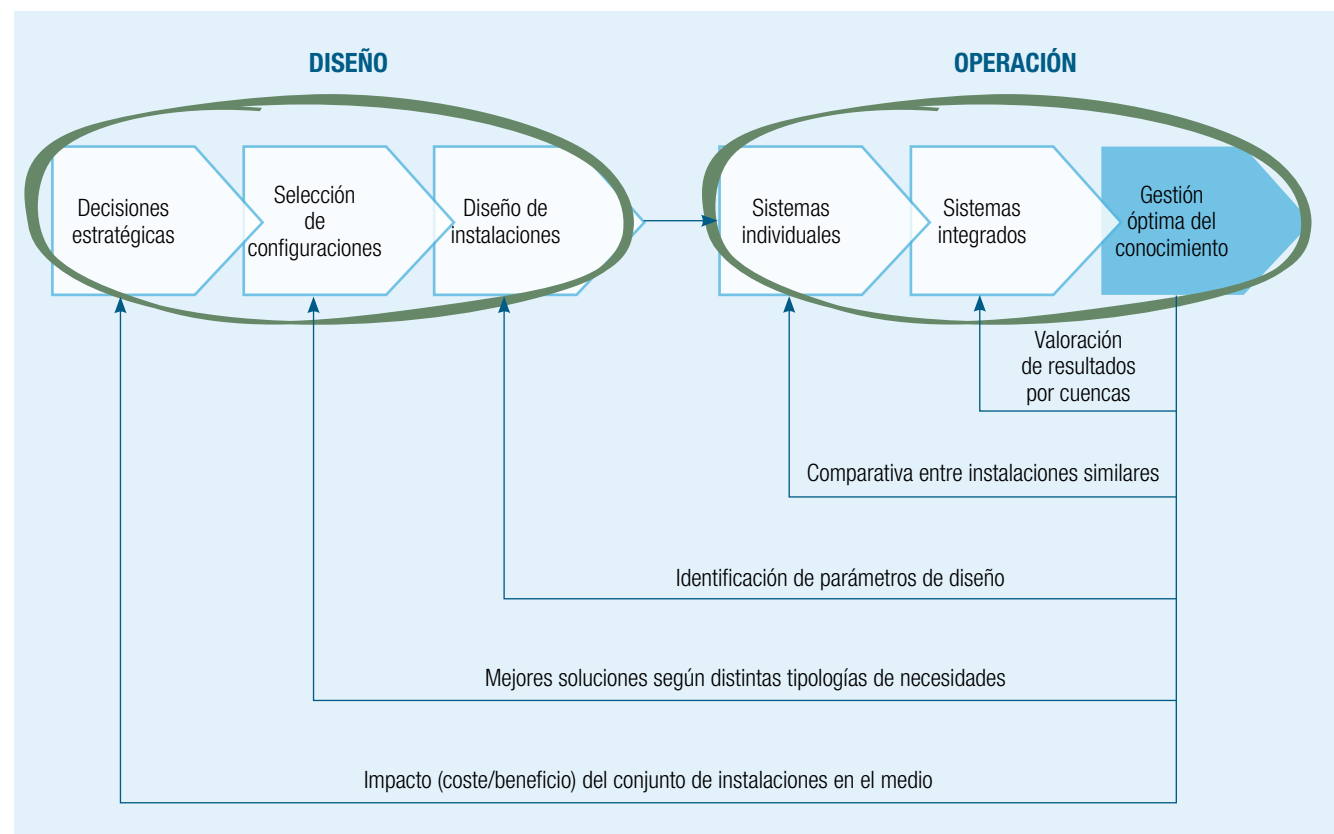


Figura 7.4.6.  
Ejemplos de propuestas de comunicación con el usuario.

## Los círculos se cierran

El tercer nivel de decisión en la operación de los sistemas de saneamiento es el que corresponde al conjunto de los sistemas que se encuentran en una unidad de cuenca. La utilización de un SAD a este nivel permite tener una visión global del comportamiento de los distintos sistemas y por tanto dar respuesta a algunas preguntas relativas al conjunto del saneamiento. De esta manera se cierra un ciclo que hemos iniciado con las decisiones estratégicas en el diseño.

Creemos que esta gestión óptima del conocimiento, en tanto que permite una evaluación global del impacto coste/beneficio del conjunto de instalaciones en el medio, puede incidir de forma positiva en las decisiones estratégicas de gestión del saneamiento. Evidentemente que de forma conjunta con otros condicionamientos de planificación (urbanísticos, legislativos, financieros...) pero sin ir a remolque, sin considerar el saneamiento como un elemento a resolver cuando las grandes decisiones de planificación ya se han tomado. Una incidencia que entendemos que es más difícil sin la utilización de una herramienta como los SAD..

Pero esta no es la única retroalimentación del sistema. Esta gestión de la información debería contribuir a la mejora de otras decisiones, tanto a nivel de diseño, como de operación. En el primer caso, el SAD puede ayudar a identificar los mejores parámetros de diseño para una zona y condiciones determinadas, evaluando resultados del funcionamiento de las instalaciones ya existentes. Así puede permitir identificar las tecnologías más adecuadas o determinar los costes de mantenimiento más reales. En el caso de la operación, la comparativa entre instalaciones en una misma zona permite gestionar de forma eficiente un conocimiento que puede ser compartido entre los distintos responsables de instalaciones para mejorar la gestión de incidencias o la minimización integral de los consumos energéticos.



# 8 Consideraciones finales



Como ya se puso de relieve en la introducción, cada vez es más necesaria una buena gestión del agua, pero simultáneamente a lo largo del texto se ha ido constatando la complejidad del problema. Pero esta complejidad no debe asustarnos, ni podemos afrontarla de forma resignada, pensando que, dado que cualquier solución será parcial e incompleta, no hay ninguna posibilidad de establecer procedimientos que nos permitan obtener soluciones mejores que otras. Al contrario, esta dificultad nos tiene que obligar a superarnos para poder ofrecer mejores respuestas en un tema tan importante. Hemos de ser capaces de convertir el problema de las aguas residuales en un desafío que deje de ser una amenaza para pasar a ser un espacio de oportunidades.

Para ello, en nuestra opinión, tenemos que ser capaces de cambiar algunas cosas. En primer lugar, nuestra manera de afrontar algunos de los problemas. Si Einstein decía que un problema no puede ser resuelto con la misma mentalidad con la que se ha generado, sino que requiere una nueva mentalidad, tenemos que ser capaces de desarrollar nuevas herramientas para una nueva manera de tomar decisiones. Para una nueva cultura de la toma de decisiones.

Pero cambiar una cultura de hacer las cosas no es fácil, y queda lejos de la voluntad y de la capacidad de los autores hacer un planteamiento global de una nueva cultura de la toma de decisiones, como queda lejos hacer un planteamiento de una nueva cultura del agua, o de una nueva cultura de la sostenibilidad. Nuestro propósito ha sido mucho más modesto. Si una cultura no cambia hasta que la siguiente está preparada para dar respuestas al cambio, nuestra voluntad ha sido la de ofrecer herramientas que ayuden a dar confianza y solidez a este cambio para que sea posible.

Por esto hemos empezado el texto analizando, desde un punto de vista con-

ceptual, la problemática de los sistemas de saneamiento y hemos constatado que era posible establecer diferentes niveles en la toma de decisiones, identificando algunos de los elementos que condicionaban la decisión, analizando los agentes que intervenían en cada caso para, finalmente, proponer una herramienta que pudiera ayudar en el proceso de la toma de decisiones, como son los sistemas de ayuda a la decisión (SAD), para los que hemos presentado nuestra propuesta de definición, construcción y operación.

De la misma manera que cuando se aborda un problema complejo hay que aceptar esta complejidad y reconocer que difícilmente existe una única solución, nuestra propuesta de construcción y operación de los SAD es una propuesta abierta. Esta propuesta acepta que para afrontar los problemas derivados del diseño y operación de los sistemas de saneamiento es necesario integrar herramientas de diferentes ámbitos, desde la matemática más tradicional –con el paradigma numérico– a ámbitos como la inteligencia artificial –con nuevos paradigmas de gestión del conocimiento– pasando por los sistemas de información geográfica –que permiten incorporar la dimensión espacial– o las ontologías –que permiten incorporar el conocimiento–. Creemos que es sólo a partir de la aceptación de este principio de complementariedad que podemos situarnos en la posición más adecuada para afrontar el problema de la toma de decisiones en los sistemas de saneamiento.

No existe una receta única, cada problema significa un nuevo reto y cada nuevo sistema de ayuda a la decisión constituye una nueva posibilidad de aprender. Porque en su construcción, en un proceso de prueba y error alejado del éxito apriorístico, no se aplican fórmulas repetitivas sino que, a partir de la metodología general y de los elementos básicos, se van construyendo nuevos sistemas cada vez más evolucionados.

Es por ello que, para nosotros, es muy importante el segundo bloque del libro, donde se presentan diferentes SAD que han ido construyendo los autores para hacer frente a diferentes retos y problemáticas que se nos han ido presentando a lo largo de estos años. No son todos los que hemos ido desarrollando, pero creemos que permiten tener una idea suficientemente ajustada del trabajo realizado. Observándolos en conjunto, una primera constatación es que a lo largo de los años se han ido afrontando situaciones en los diferentes niveles de decisión, y que, por tanto, han ido requiriendo diferentes colaboraciones, diferentes incorporaciones de conocimiento, relaciones con diferentes ámbitos, desde los más generales a los más especializados, con diferentes interlocutores y con diferentes usuarios finales. Y en todos los casos la metodología propuesta ha sido capaz de ofrecer soluciones razonables, lo que permite concluir su aplicabilidad. Una segunda constatación es que la complejidad de los sistemas de saneamiento es variada, pero simultáneamente se han podido identificar expertos en los diferentes ámbitos. Personas que tienen un profundo conocimiento de las diferentes facetas de los sistemas de saneamiento, de tal manera que, puesto en común, permite ir más allá de la simple adición. Hemos podido apreciar efectos sinérgicos que nos han sorprendido muy agradablemente, y a ellos se deben la mayor parte de los éxitos obtenidos.

Existe una amplia variedad en los casos de estudio, tanto por lo que se refiere a la problemática considerada como por su nivel de desarrollo, complejidad y aplicación. Algunos se encuentran operativos y en crecimiento, con éxito comercial; otros fueron diseñados para un fin específico y una vez cumplida su misión –creemos que con relativo éxito– fueron archivados; otros se encuentran en pleno desarrollo; otros son apuestas de futuro cuya vigencia el tiempo dirá... sin olvidar que otros –no hay porque negarlo– se encuentran durmiendo el sueño de

los justos. Teniendo en cuenta esta diversidad, para la presentación se decidió un formato standard para cada uno de los ejemplos presentados, con un apartado para la presentación del problema y la construcción del SAD y otro para su operación. Ello ha implicado una necesaria simplificación que quizá haya dificultado la comprensión de algunos de los sistemas. Si ha sido así, el lector podrá encontrar en el siguiente apartado una relación de nuestras publicaciones donde puede ampliar la información.

Llegados a este punto, esperamos que las personas que hayan leído el libro lo hayan encontrado suficientemente interesante, que les sirva de ayuda y que hayamos podido contagiarles nuestra ilusión por un tema tan apasionante como la toma de decisiones en sistemas de saneamiento.



## 8.1 Conozcamos a los autores



### Manel Poch Espallargas

**Actualmente:**

Catedrático de Ingeniería Química de la Universitat de Girona. Director del Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental (lequia), grupo de investigación consolidado de

la Generalitat de Catalunya y miembro de la red TECNIO de transferencia de tecnología. Responsable del Área de Tecnologías y Evaluación del Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA).

**Resumen:**

Doctorado en la Universitat Autònoma de Barcelona bajo la dirección del Dr. Carles Solà (1983). Fue profesor titular en esta Universidad hasta incorporarse en el año 1995 al claustro de la Universitat de Girona. En esta Universidad ha sido director del Departamento de Ingeniería Química, Agraria y Tecnología Agroalimentaria decano de la Facultad de Ciencias, y vice-rector de Prospectiva, y de Planificación Estratégica. Sus temas de docencia e investigación se centran en la aplicación de los principios de la ingeniería a la resolución de problemas ambientales, especialmente relacionados con el vector agua. Ha sido director de programa de doctorado reconocido de calidad por el Ministerio, responsable de proyectos del programa nacional de Ciencia y de Investigación de España, socio en diferentes proyectos europeos, y responsable de convenios con empresas, lo que le ha llevado a publicar unos cien artículos SCI y a dirigir veinte tesis doctorales.

**Especialidades:**

Su interés ha ido evolucionando desde el estudio detallado de los procesos de tratamiento de aguas residuales hasta planteamientos más globales relacionados con la gestión integral del recurso agua y la optimización de su uso. Metodológicamente, su experiencia ha ido incorporando modelos matemáticos de descripción de los procesos, con herramientas más heurísticas, para incorporar la experiencia de los responsables técnicos de las instalaciones, y las necesidades de los responsables de la gestión del recurso.

**Webs:**

<http://lequia.udg.cat>  
<http://www.icra.cat>



### Ulises Cortés

**Actualmente:**

Miembro de la Junta de ATICA, catedrático de la Universitat Politècnica de Catalunya. Director de Programas Académicos en el Centro de Supercomputación de Barcelona.

**Resumen:**

Doctor en Inteligencia Artificial por la Universitat Politècnica de Catalunya (1984), e ingeniero industrial y de Sistemas por el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (1982). Presidente de Congreso Catalán de Inteligencia Artificial en el 2009, es coordinador del Programa Máster en Inteligencia Artificial de la Universidad Politècnica de Catalunya y vicepresidente del Comité Europeo de Coordinación para la Inteligencia Artificial.

**Especialidades:**

Tecnologías de apoyo a las plantas de tratamiento de aguas residuales, en ámbitos de sanidad y administración electrónica.

**Webs:**

<http://www.lsi.upc.edu/~ia/>



## Joaquim Comas Matas

### Actualmente:

Profesor titular del Área de Ingeniería Química de la Universitat de Girona, investigador sénior del Laboratori d'Enginyeria Química y Ambiental, grupo de

investigación de la Universitat de Girona miembro de la red TECNIO.

### Resumen:

Licenciado en Ciencias Químicas (1993) por la Universitat Autònoma de Barcelona y doctor ingeniero industrial por la Universitat de Girona (2000) con la tesis *Development, Implementation and Evaluation of an Activated Sludge Supervisory System for the Granollers WWTP*, galardonada con el premio especial de doctorado del curso académico 2000-2001. Sus actividades de investigación se han centrado en el desarrollo y aplicación de sistemas de ayuda a la decisión para mejorar la gestión de sistemas y procesos ambientales, especialmente en sistemas de tratamiento de aguas residuales y ecosistemas fluviales. En este sentido, ha participado en diversos proyectos españoles y europeos de investigación, y más recientemente ha sido investigador principal de proyectos del Programa Nacional de Ciencia e Investigación y responsable de convenios con empresas. En 2006 fue reconocido por la International Environmental Modelling and Software society (iEMSs) con el premio ECRE (*Early Career Research Excellence*). Es autor de más de 50 artículos en revistas del SCI y director de siete tesis doctorales. Miembro de la International Water Association.

### Especialidades:

Desarrollo y aplicación de sistemas de ayuda a la decisión para mejorar la gestión de sistemas avanzados de depuración de aguas; control y supervisión de sistemas con tecnología de membranas (bioreactores de membrana y ósmosis inversa); control integrado del ciclo urbano del agua (alcantarillado, depuradora y río); estudio del sistema *benchmark* para la mejora del control de las depuradoras. Eliminación de compuestos farmacéuticos en aguas residuales.

### Webs:

<http://lequia.udg.cat>



## Ignasi Rodríguez-Roda Layret

### Actualmente:

Investigador Sénior del Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA), centro de la red CERCA de la Generalitat de Catalunya.

Catedrático de Ingeniería Química de la Universitat de Girona.

### Resumen:

Doctor en Ingeniería Industrial (1998), máster en Biotecnología (1994), posgraduado en tratamientos físico-químicos (1992) y licenciado en Ciencias Químicas (1992). Miembro del Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental (LEQUIA) de la Universitat de Girona, de la International Water Association (IWA), de la Water Environment Federation (WEF), y de la Asociación Catalana de Inteligencia Artificial (ACIA), entre otras.

Su actividad investigadora ha dado lugar a más de 60 publicaciones internacionales en revistas indexadas en SCI, a un centenar de comunicaciones en congresos nacionales e internacionales, a una patente de invención y a la creación de una nueva empresa de base tecnológica (SISLtech). Ha sido miembro del comité científico u organizador de unos 20 workshops o congresos internacionales, ha participado en unos 40 proyectos de investigación competitivos (públicos) y correspondientes a contratos de investigación con empresas, nacionales e internacionales, y ha dirigido 10 tesis doctorales.

Ha ocupado diversos cargos de gestión en la universidad, entre los que destacan la subdirección de la Escuela de Posgrado, la dirección del Programa Oficial de Posgrado que da lugar al Doctorado en Ciencias Experimentales y Sostenibilidad, la coordinación del Graduado Superior en Ingeniería Ambiental, la Secretaría del Instituto de Medio Ambiente, y el cargo como adjunto al vicerrectorado encargado de la transferencia y la innovación.

### Especialidades:

Los temas objeto de su investigación son el tratamiento, principalmente biológico, de aguas residuales, el modelado y el control de las estaciones depuradoras de aguas residuales, los biorreactores de membrana y los sistemas de ayuda a la decisión aplicados a dominios medioambientales.

### Webs:

<http://lequia.udg.cat>  
<http://www.icra.cat>



## Miquel Sànchez-Marrè

### Actualmente:

Profesor titular de Lenguajes y Sistemas Informáticos en la Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech (UPC). Responsable del Máster Interuniversitario en

Inteligencia Artificial (UPC-URV-UB). Director del Grupo de Investigación en Ingeniería del Conocimiento y Aprendizaje Automático (KEMLG) de la UPC. Editor asociado de la revista *Environmental Modelling and Software*. Miembro del equipo editorial de la revista *Applied Intelligence*.

### Resumen:

Doctor en Informática (Inteligencia Artificial, IA) por la Universitat Politècnica de Catalunya (1996). Licenciado con Grado en Informática por la UPC (1991) y licenciado en Informática por la UPC (1988). Es profesor en el Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos (LSI) de la UPC desde 1990. Recibió un accésit del premio Oms i De Prat 1991, en el área de Ciencias Aplicadas y Experimentales, por su tesis de licenciatura titulada *DEPUR: una aplicació de los sistemas basados en el conocimiento al diagnóstico en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Responsable de la sección de inteligencia artificial de LSI (1997-2000). Es miembro fundador de la Asociación Catalana de Inteligencia Artificial (ACIA) y estuvo en su consejo rector (1994-1998). Fundador y miembro del equipo director de la International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs). Fue nombrado  *fellow* de la iEMSs en 2005. Ha participado en varios proyectos de investigación, tanto a nivel europeo como español y catalán. Ha organizado varios congresos internacionales en los campos de la IA y del medio ambiente. Es autor de más de 100 publicaciones internacionales revisadas, incluyendo 27 en el SCI, y ha sido autor/editor de 8 libros.

### Especialidades:

Razonamiento basado en casos, descubrimiento de conocimiento y minería de datos, aprendizaje automático, ingeniería del conocimiento, sistemas inteligentes de ayuda a la decisión, aplicación de técnicas de IA al medio ambiente, aplicación de técnicas de IA a la medicina y las tecnologías asistenciales, y aplicación de técnicas de IA a los procesos industriales.

### Webs:

<http://kemlg.upc.edu/menu1/miquel-sanchez-i-marre>  
<http://www.lsi.upc.edu/~miquel/>

## 8.2 Para ampliar información y conocimiento

### Libros

- COMAS, J.; POCH, M.; RODRIGUEZ-RODA, I.; CORTÉS, U.; SÀNCHEZ-MARRÈ, M.  
**Eleven years of experience in designing and building real environmental decision support systems. What have we learnt?**  
Editorial: Servei de Publicacions de la Universitat de Girona  
ISBN: 84-8458-204-3 Depósito legal: B-51989-2002
- ULISES CORTÉS, MANEL POCH (editores)  
**Advanced Agent-Based Environmental Management Systems**  
Editorial: Birkhauser Verlag AG  
ISBN: 978-3-7643-8897-3 2009

### Tesis doctorales

A la mayoría de ellas, especialmente las más recientes, puede accederse libremente a través del portal [www.tdx.cat](http://www.tdx.cat).

- **Modelització i identificació del procés de fangs activats.**  
JORDI ROBUSTÉ CARTRÓ  
Universitat Autònoma de Barcelona, 1990
- **Desenvolupament d'un sistema basat en el coneixement per al control i supervisió de plantes depuradores d'aigües residuals urbanes.**  
PAU SERRA PRAT  
Universitat Autònoma de Barcelona, 1993
- **L'ús de la informació simbòlica en l'automatització del tractament estadístic de dominis poc estructurats.**  
KARINA GIBERT  
Universitat Politècnica de Catalunya, 1995
- **Adquisició de conocimiento en dominios poco estructurados.**  
JAVIER BÉJAR  
Universitat Politècnica de Catalunya, 1995
- **DAI-DEPUR: An integrated supervisory multi-level architecture for wastewater treatment plants.**  
MIQUEL SÀNCHEZ-MARRÈ  
Universitat Politècnica de Catalunya, 1996
- **Automatic Construction of Descriptive Rules.**  
DAVID RIAÑO  
Universitat Politècnica de Catalunya, 1997
- **Desenvolupament d'un protocol per l'aplicació de sistemes basats en el coneixement a la gestió d'estacions depuradores d'aigües residuals urbanes.**  
IGNASI RODRÍGUEZ-RODA LAYRET  
Universitat de Girona, 1998
- **Development, implementation, and evaluation of an activated sludge supervisory system for the Granollers WWTP.**  
JOAQUIM COMAS MATAS  
Universitat de Girona, 2000
- **ONTOWEDSS: An Ontology-based Environmental Decision Support System for the Management of Wastewater Treatment Plants.**  
LUIGI CECCARONI  
Universitat Politècnica de Catalunya, 2001
- **Supervisory systems in wastewater treatment plants: systematise their implementation.**  
CHRISTIAN CORTÉS DE LA FUENTE  
Universitat de Girona, 2002
- **Desenvolupament d'un sistema expert com a eina per a una millor gestió de la qualitat de les aigües fluvials.**  
ESTHER LLORENS I RIBES  
Universitat de Girona, 2004
- **Feature Weighting in Plain Case-Based Reasoning.**  
HÈCTOR NÚÑEZ  
Universitat Politècnica de Catalunya, 2004
- **Metodologia de disseny conceptual d'estacions depuradores d'aigües residuals que combina el procés de decisió jeràrquic amb l'anàlisi de decisions multicriteri.**  
NÚRIA VIDAL ROBERTO  
Universitat de Girona, 2004
- **A Dynamic knowledge-based decision support system to handle solids separation problems in activated sludge systems: development and validation.**  
MONTSERRAT MARTÍNEZ I PUENTES  
Universitat de Girona, 2006
- **Desenvolupament d'un sistema de suport a la decisió ambiental per a la gestió de les infraestructures hidràuliques, amb l'objectiu de garantir la qualitat de l'aigua de la conca del Besòs.**  
FRANCESC DEVESA PEIRÓ  
Universitat de Girona, 2006
- **EDSS-maintenance prototype:**  
**An environmental decision support system to assess the definition of operation and maintenance protocols for horizontal subsurface constructed wetlands.**  
CLÀUDIA TURON PLANELLA  
Universitat de Girona, 2007
- **Conceptual design of wastewater treatment plants using multiple objectives.**  
XAVIER FLORES I ALSINA  
Universitat de Girona, 2008
- **Knowledge-based modelling and simulation of operational problems of microbiological origin in wastewater treatment plants.**  
JORDI DALMAU I SOLÉ  
Universitat de Girona, 2009
- **Management of industrial wastewater discharges in river basins through agents' argumentation.**  
MONTSERRAT AULINAS I MASÓ  
Universitat de Girona, 2009
- **Development of a decision support system for the integrated control of membrane bioreactors.**  
HÈCTOR MONCLÚS SALES  
Universitat de Girona, 2011
- **Integrated management of urban wastewater systems: a model-based approach.**  
PAU PRAT  
Universitat de Girona, 2012

## Publicaciones en revistas científicas

Selección de las publicaciones científicas de los autores en las que el lector podrá encontrar una información más detallada tanto de aspectos metodológicos de desarrollo de los sistemas de ayuda a la decisión, como de los ejemplos presentados en el texto.

### 1993

- SERRA, P., LAFUENTE, J., MORENO, R., DE PRADA, C., POCH, M. (1993) Development of a real-time expert system for wastewater treatment plants control  
*Control Engineering Practice*, 1: 329 - 335

### 1994

- SERRA, P., SÀNCHEZ, M., LAFUENTE, J., CORTÉS, U., POCH, M. (1994).  
DEPUR: a knowledge based tool for wastewater treatment plants.  
*Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 7(1): 23-30.

### 1995

- FU, C.S., POCH, M. (1995)  
Fuzzy modeling and pattern-recognition for dynamic processes and its application for an activated sludge process.  
*Chemical Engineering Science*, 50 (23): 3715 - 3725

### 1996

- SERRA, P., SÀNCHEZ, M., LAFUENTE, J., CORTÉS, U., POCH, M. (1996).  
ISCWAP: a knowledge based system for supervising activated sludge processes  
*Computers & Chemical Engineering* 21(2)211-221.
- SÀNCHEZ, M., CORTÉS, U., LAFUENTE, J., R-RODA I., POCH, M. (1996)  
DAI-DEPUR: a distributed architecture for wastewater treatment plants.  
*Artificial Intelligence in Engineering* 10(3): 275-285.

### 1997

- M. SÀNCHEZ-MARRÈ, U. CORTÉS, I. R-RODA, M. POCH, J. LAFUENTE. (1997).  
Learning and Adaptation in WWTP through Case-Based Reasoning.  
*Microcomputers in Civil Engineering* 12(4): 251-266.
- M. SÀNCHEZ, J. BÉJAR, U. CORTÉS, J. DE GRÀCIA, J. LAFUENTE, M. POCH. (1997).  
Concept formation in WWTP by means of classification techniques: a compared study.  
*Applied Intelligence* 7(2):147-166.

### 1998

- FU, C.S., POCH, M. (1998)  
Fuzzy model and decision of COD control for an activated sludge process.  
*Fuzzy Sets and Systems*, 93 (3) : 281 -29)

### 1999

- I. R-RODA, M. POCH, M. SÀNCHEZ-MARRÈ, U. CORTÉS, J. LAFUENTE. (1999).  
Consider a Case-Based System for Control of Complex Processes  
*Chemical Engineering Progress* 95(6): 39-48.
- LL. BELANCHE, J.J. VALDÉS, J. COMAS, I. R-RODA, M. POCH (1999)  
Towards a Model of Input-Output Behaviour of Wastewater Treatment Plants using Soft Computing Techniques.  
*Environmental Modelling and Software*, 14 (5): 409-419

### 2000

- U. CORTÉS, M. SÀNCHEZ-MARRÈ, L. CECCARONI, I. R-RODA, M. POCH. (2000).  
Artificial Intelligence and Environmental Decision Support Systems.  
*Applied Intelligence* 13(1):77-91

- BELANCHE, LL.; VALDÉS, J.J.; COMAS, J.; RODRIGUEZ-RODA, I.; POCH, M. (2000).  
Prediction of the bulking phenomenon in wastewater treatment plants.  
*Artificial Intelligence in Engineering*, 14 (4) : 307-317
- POCH, M.; RODRÍGUEZ-RODA, I.; COMAS, J.; BAEZA, J.; LAFUENTE, J.; SÀNCHEZ-MARRÈ, M.; CORTÉS, U. (2000).  
Wastewater treatment improvement through an intelligent integrated supervisory system.  
*Contributions to Science*. 1 (3) : 451-462
- RODRIGUEZ-RODA, I., POCH, M., BAÑARES-ALCÁNTARA, R. (2000).  
Conceptual design of wastewater treatment plants using a design support system.  
*Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 75 (1): 73-81.
- RODA, I.R., POCH, M., BAÑARES-ALCÁNTARA, R. (2000).  
Application of a support system to the design of wastewater treatment plants.  
*Artificial Intelligence in Engineering* 14 (1): 45-61.

### 2001

- RODRIGUEZ-RODA, I.; SÀNCHEZ-MARRÈ, M.; COMAS, J.; CORTÉS, U.; POCH, M. (2001).  
Development of a case-based system for the supervision of an activated sludge process  
*Environmental Technology*, 22 : 477-486.
- COMAS, J.; DZEROSKI, S.; GIBERT, K.; RODRIGUEZ-RODA, I.; SÀNCHEZ, M. (2001).  
Knowledge discovery by means of inductive methods in wastewater treatment plant data.  
*AI Communications*, 14 (1) : 45-62.

- CORTÉS, U.; SÀNCHEZ-MARRÈ, M.; SANGÜESA, R.; COMAS, J.; RODRIGUEZ-RODA, I.; POCH, M.; RIAÑO, D. (2001).  
Knowledge management in environmental decision support systems.  
*AI Communications*, 14 (1): 3-12.
- RODRIGUEZ-RODA, I.; COMAS, J.; POCH, M.; SÀNCHEZ-MARRÈ, M.; CORTÉS, U. (2001).  
Automatic knowledge acquisition from complex processes for the development of knowledge-based systems.  
*Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40 (15) : 3353-3360.
- RIBAS, F. RODRÍGUEZ-RODA, I. SERRAT, J. CLARA, P., COMAS, J. (2001).  
Development and Implementation of an Expert System to Improve the Control of Nitrification and Denitrification in the Vic Wastewater Treatment Plant.  
*Environmental Technology*, 29: 583-590.

### 2002

- RODRIGUEZ-RODA, I.; COMAS, J.; COLPRIM, J.; POCH, M.; SÀNCHEZ-MARRÈ, M.; CORTÉS, U.; BAEZA, J.; LAFUENTE, J. (2002).  
A hybrid supervisory system to support wastewater treatment plant operation: implementation and validation.  
*Water Science and Technology*, 45 (4-5) : 289 - 297.
- VIDAL, N., BAÑARES-ALCÁNTARA, R., RODRÍGUEZ-RODA, I., POCH, M. (2002).  
Design of wastewater treatment plants using a conceptual design methodology.  
*Industrial & Engineering Chemistry Research* 41 (20): 4993-5005.
- VIDAL N., POCH M., MARTÍ E., RODRÍGUEZ-RODA I. (2002).  
Evaluation of the environmental implications to include structural changes in a wastewater treatment plant.  
*Journal of Chemical Technology and Biotechnology* (77) : 1206-1211



**2003**

- COMAS, J.; RODRIGUEZ-RODA, I.; SÀNCHEZ-MARRÈ, M.; CORTÉS, U.; FREIXÓ, A.; ARRÁEZ, J.; POCH, M. (2003).  
A knowledge-based approach to the deflocculation problem: integrating on-line, off-line, and heuristic information  
*Water Research*, 37 (10) : 2377 - 2387.
- COMAS, J.; ALEMANY, J.; POCH, M.; TORRENS, A.; SALGOT, M.; BOU, J. (2003).  
Development of a knowledge-based decision support system for identifying adequate wastewater treatment for small communities.  
*Water Science and Technology*, 48 (11-12) : 393-400.
- COMAS, J.; LLORENS, E.; MARTÍ, E.; PUIG, M.A.; RIERA, J.L.; SABATER, F.; POCH, M. (2003).  
Knowledge acquisition in the STREAMES Project: the Key Process in the Environmental Decision Support System development.  
*AI Communications*, 16 (4) : 253-265.
- CORTÉS, U.; MARTÍNEZ, M.; COMAS, J.; SÀNCHEZ-MARRÈ, M.; POCH, M.; RODRIGUEZ-RODA, I. (2003).  
A conceptual model to facilitate knowledge sharing for bulking solving in wastewater treatment plants.  
*AI Communications*, 16 (4) : 279 - 289.

**2004**

- L. CECCARONI, U. CORTÉS Y M. SÀNCHEZ-MARRÈ (2004)  
OntoWEDSS: augmenting environmental decision-support systems with ontologies.  
*Environmental Modelling & Software* 19(9):785-798.

- NUÑEZ, H.; SÀNCHEZ-MARRÈ, M.; CORTÉS, U.; COMAS, J.; MARTÍNEZ, M.; RODRIGUEZ-RODA, I.; POCH, M. (2004).  
A comparative study on the use of similarity measures in case-based reasoning to improve the classification of environmental system situations  
*Environmental Modelling and Software*, 19 (9) : 809 – 819.
- POCH, M.; COMAS, J.; RODRIGUEZ-RODA, I.; SÀNCHEZ-MARRÈ, M.; CORTÉS, U. (2004).  
Designing and building real environmental decision support systems.  
*Environmental Modelling and Software*, 19 (9) : 857 - 873.
- VICENTE, D.; VELLIDO, A.; MARTÍ, E.; COMAS, J.; RODRIGUEZ-RODA, I. (2004).  
Exploration of the ecological status of Mediterranean rivers: Clustering, visualizing and reconstructing streams data using generative topographic mapping.  
*Journal of Management Information Systems*, 10 : 121 - 130.

**2005**

- ALEMANY, J.; COMAS, J.; TURON, C.; BALAGUER, M.D.; POCH, M.; PUIG, M.A.; BOU, J. (2005).  
Evaluating the application of a decision support system in identifying adequate wastewater treatment for small communities. A case study: the Fluvia River Basin.  
*Water Science and Technology*, 51 (10) : 179 - 186.
- TURON, C.; ALEMANY, J.; BOU, J.; COMAS, J.; POCH, M. (2005).  
Optimal maintenance of constructed wetlands using an environmental decision support system.  
*Water Science and Technology*, 51 (10) : 109-117.

- FITER, M.; GÜELL, D.; COMAS, J.; COLPRIM, J.; POCH, M.; RODRIGUEZ-RODA, I. (2005).  
Energy saving in a wastewater treatment process: an application of fuzzy logic control.  
*Environmental Technology*, 26 (11) : 1263 – 1270.
- FLORES, X., BONMATÍ, A., POCH, M., RODRÍGUEZ-RODA, I., BAÑARES-ALCÁNTARA, R. (2005).  
Selection of the activated sludge configuration during the conceptual design of activated sludge plants using multicriteria analysis.  
*Industrial and Engineering Chemistry Research* 44 (10) : 3556-3566.

**2006**

- MARTÍNEZ, M.; SÀNCHEZ-MARRÈ, M.; COMAS, J.; RODRIGUEZ-RODA, I. (2006).  
Case-based reasoning, a promising tool to face solids separation problems in the activated sludge process.  
*Water Science and Technology*, 53 (1) : 209 -216.
- MARTÍNEZ, M.; RODRIGUEZ-RODA, I.; POCH, M.; CORTÉS, U.; COMAS, J. (2006).  
Dynamic reasoning to solve complex problems in activated sludge processes: a step further in decision support systems.  
*Water Science and Technology*, 53 (1) : 191 - 198.
- COMAS, J.; RODRIGUEZ-RODA, I.; POCH, M.; GERNAEY, K.V.; ROSEN, C.; JEPPSSON, U. (2006).  
Demonstration of a tool for automatic learning and re-use of knowledge in the activated sludge process.  
*Water Science and Technology*, 53 (4-5) : 303 - 311.

- COMAS, J.; RODRIGUEZ-RODA, I.; POCH, M.; GERNAEY, K.V.; ROSEN, C.; JEPPSSON, U. (2006).  
Extension of the IWA/COST simulation benchmark to include expert reasoning for system performance evaluation.  
*Water Science and Technology*, 53 (4-5) : 331 - 339.  
Best Paper Award of the 2nd IWA international conference on Instrumentation, Control and Automation in Water&Wastewater Systems (Busan, Korea, 2006).
- MARTÍNEZ, M.; MÉRIDA-CAMPOS, C.; SÀNCHEZ-MARRÈ, M.; COMAS, J.; RODRIGUEZ-RODA, I. (2006).  
Improving the efficiency of case-based reasoning to deal with activated sludge solids separation problems  
*Environmental Technology*, 27 (6) : 585- 597.

**2007**

- FLORES, X., BONMATI, A., POCH, M., RODA, I.R., JIMÉNEZ, L., BAÑARES-ALCÁNTARA, R. (2007).  
Multicriteria evaluation tools to support the conceptual design of activated sludge systems.  
*Water Science and Technology* 56 (6), : 85-94.
- FLORES, X., RODRÍGUEZ-RODA, I., POCH, M., JIMÉNEZ, L., BAÑARES-ALCÁNTARA, R. (2007).  
Systematic procedure to handle critical decisions during the conceptual design of activated sludge plants.  
*Industrial and Engineering Chemistry Research* 46 (17) : 5600-5613.
- VELLIDO, A.; MARTI, E.; COMAS, J.; RODRIGUEZ-RODA, I.; SABATER, F. (2007).  
Exploring the ecological status of human altered streams through Generative Topographic Mapping.  
*Environmental Modelling & Software*, 22 (7) : 1053 - 1065.

- TURON, C.; COMAS, J.; ALEMANY, J.; CORTÉS, U.; POCH, M. (2007). Environmental decision support systems: A new approach to support the operation and maintenance of horizontal subsurface flow constructed wetlands *Ecological Engineering*, 30 (4) : 362 - 372

### 2008

- FLORES-ALSINA, X., RODRÍGUEZ-RODA, I., SIN, G., GERNAEY, K.V. (2008). Multi-criteria evaluation of wastewater treatment plant control strategies under uncertainty. *Water Research* 42 (17) : 4485-4497
- COMAS, J.; RODRÍGUEZ-RODA, I.; GERNAEY, K.V.; ROSEN, C.; JEPPSSON, U.; POCH, M. (2008). Risk assessment modelling of microbiology-related solids separation problems in activated sludge systems *Environmental Modelling and Software*, 23 (10-11) : 1250 - 1261
- TURON, C.; COMAS, J.; TORRENS, A.; MOLLE, P.; POCH, M. (2008). Improvement of sand filter and constructed wetland design using an environmental decision support system *Journal of Environmental Quality*, 37 (4) : 1644 - 1647

### 2009

- DEVESA, F.; COMAS, J.; TURON, C.; FREIXÓ, A.; CARRASCO, F.; POCH, M. (2009). Scenario analysis for the role of sanitation infrastructures in integrated urban wastewater management *Environmental Modelling and Software*, 24 (3): 371 - 380
- BENEDETTI, L.; PRAT, P.; NOPENS, I.; POCH, M.; TURON, C.; DE BAETS, B.; COMAS, J. (2009). A new rule generation method to develop a decision support system for integrated management at river basin scale. *Water Science and Technology* 60 (8), 2035-2040.

- FLORES-ALSINA, X., COMAS, J., RODRIGUEZ-RODA, I., GERNAEY, K. V., ROSEN, C. (2009). Including the effects of filamentous bulking sludge during the simulation of wastewater treatment plants using a risk assessment model. *Water Research* 43 (18), 4527- 4538.
- FLORES-ALSINA, X., COMAS, J., RODRÍGUEZ-RODA, I., POCH, M., GERNAEY, K. V., JEPPSSON, U. (2009). Evaluation of plant-wide WWTP control strategies including the effects of filamentous bulking sludge. *Water Science and Technology* 60 (8), 2093-2103.
- LLORENS, E., COMAS, J., MARTÍ, E., RIERA, J. L., SABATER, F., POCH, M. (2009). Integrating empirical and heuristic knowledge in a KBS to approach stream eutrophication. *Ecological Modelling* 220 (18), 2162-2172.
- PRAT, P., AULINAS, M., TURON, C., COMAS, J., POCH, M., (2009). Role playing games: a methodology to acquire knowledge for integrated wastewater infrastructure management in a river basin scale. *Water Science and Technology* 59 (9), 1809-1816.

### 2010

- FLORES-ALSINA, X., GALLEGO, A., FEIJOO, G., RODRIGUEZ-RODA, I. (2010). Multiple-objective evaluation of wastewater treatment plant control alternatives. *Journal of Environmental Management* 91 (5), : 1193-1201
- COMAS, J.; MEABE, E.; SANCHO, L.; FERRERO, G.; SIPMA, J.; MONCLÚS, H.; RODRIGUEZ-RODA, I. (2010). Knowledge-based system for automatic MBR control *Water Science and Technology*, 62 (12) : 2895 - 2836

- GIBERT, K., RODRÍGUEZ-SILVA, G., RODRÍGUEZ-RODA, I. (2010). Knowledge discovery with clustering based on rules by states: A water treatment application. *Environmental Modelling and Software* 5 (6), 712-723.
- WOTAWA, F., RODRIGUEZ-RODA, I., COMAS J. (2010). Environmental Decision Support Systems based on models and model-based reasoning. *Environmental Engineering and Management Journal* 9 (2), 189-195.

### 2011

- GIBERT, K. M. SÀNCHEZ-MARRÈ (2011). Outcomes from the iEMSs Data Mining in the Environmental Sciences. *Environmental Modelling and Software*, 26:983-985.
- AULINAS, M. J.C. NIEVES, U. CORTÉS, M. POCH (2011). Supporting decision making in urban wastewater systems using a knowledge-based approach. *Environmental Modelling and Software*, 26, (5):562-572.
- DALMAU, J., COMAS, J., RODRÍGUEZ-RODA, I., PAGILLA, K., STEYER, J.-P. (2011). Model development and simulation for predicting risk of foaming in anaerobic digestion Systems. *Bioresource Technology* 101 (12) : 4306-4314
- FERRERO, G., MONCLÚS, H., BUTTIGLIERI, G., COMAS, J., RODRIGUEZ-RODA, I. (2011). Automatic control system for energy optimization in membrane bioreactors. *Desalination*, 268 : 276-280 (2011).
- FERRERO, G., MONCLUS, H., BUTTIGLIERI, G., GABARRON, S., COMAS, J., RODRIGUEZ-RODA, I. (2011). Development of a control algorithm for air-scour reduction in membrane bioreactors for wastewater treatment. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 86(6) 784-789.

- FERRERO, G., MONCLÚS, H., SANCHO, L., GARRIDO, J. M., COMAS, J., RODRÍGUEZ-RODA, I. (2011). A knowledge-based control system for air-scour optimisation in membrane bioreactors. *Water Science and Technology* 63(9), 2025-2031.
- VERDAGUER, M., CLARA, N., POCH M. (2011). Ant Colony Optimization-based Method for Managing Industrial Influent in Wastewater Systems. *AIChE Journal*, en prensa.
- MCINTOSH, B.S., ASCOUGH II, J.C., TWERY, M., CHEW, J., ELMAHDI, A., HAASE, D., HAROU J., HEPTING, D., CUDDY, S., JAKEMAN, A.J., CHEN, S., KASSAHUN, A., LAUTENBACH, S., MATTHEWS, K., MERRITT, W., QUINN, N.W.T., RODRIGUEZ-RODA, I., SIEBER, S., STAVENGA, M., SULLIS, A., TICEHURST, J., VOLK, M., WROBEL, M., VAN DELDEN, H., EL-SAWAH, S., VOINOV, A., RIZZOLI, A.E. Environmental Decision Support Systems (EDSS) development - challenges and best practices. *Environmental Modelling and Software*, en prensa.

# Agradecimientos





Como el lector habrá podido deducir, el trabajo presentado en el libro no ha podido ser realizado únicamente por los autores del mismo. A nosotros nos ha tocado la parte de adaptarlo a este formato, pero en el proceso de construcción y operación de los sistemas de ayuda a la decisión presentados han intervenido muchas más personas. Aunque sea prácticamente imposible referirnos a todas ellas (por lo que desde ya pedimos disculpas a aquellas que no se vean reflejadas en estas líneas) queremos finalizar el documento con un agradecimiento explícito a algunas que nos han ido acompañando a lo largo del camino.

En primer lugar, a los técnicos y responsables de sistemas de saneamiento con los que, a lo largo de estos años, hemos ido interaccionando e intercambiado nuestras experiencias. Su conjunto constituye, sin duda, un enorme caudal de conocimiento que permite que estos sistemas funcionen de manera eficiente y mejoren la calidad de nuestro medio ambiente. Hemos tenido la suerte de encontrar siempre personas preocupadas por su trabajo y abiertas a participar y compartir su experiencia y su conocimiento. Esperemos que el libro les pueda ser útil para poder entender mejor aquello que unas gentes de la universidad estaban haciendo y que - tenemos que reconocerlo - a veces resultaba difícil de explicar.

La estructuración de este conocimiento no es tarea fácil y si no que se lo pregunten a nuestros estudiantes de doctorado que a lo largo de estos años han ido realizando sus tesis en este ámbito. Ya desde los principios de los 90, en los trabajos iniciales de Jordi Robusté i Pau Serra encontramos indicios de la necesidad de búsqueda de nuevas herramientas que complementaran los sistemas de control. ¡Y eso que todavía no sabíamos que aquello acabarían siendo sistemas de ayuda a la decisión!. A partir de aquí, los años 90 son una década de desarrollo conceptual, de discusiones para elaborar las bases teóricas de este tipo de sistemas, y ésto se refleja en las tesis de Miquel Sánchez-Marrè, Karina Gibert, Javi Béjar, David Riaño,

Luigi Ceccaroni, Ignasi Rodríguez-Roda o Quim Comas. Al llegar aquí, el lector ya se habrá apercibido que algunos de ellos son co-autores del libro, y es que en esa época se incorporaron a la Universidad en calidad de profesores. A partir de estos desarrollos conceptuales, la década del inicio del siglo XXI es la de la aplicación de las metodologías desarrolladas a casos reales, a problemáticas prácticas de los sistemas de saneamiento, implicando que algunas de las tesis de esos años coincidan con los diferentes sistemas de ayuda a la decisión presentados en el texto. Las tesis de Esther Llorens, Francesc Devesa, Claudia Turón, Xavier Flores, Montse Aulinas, o Pau Prat podrían incluirse en este apartado, manteniéndose también otras tesis más metodológicas que siguen actualizando las bases conceptuales o abren nuevas perspectivas como son las de Christian Cortés, Hector Núñez, Montse Martínez, Jordi Dalmau, o Hector Monclús. A todos, muchas gracias y mucha suerte, constatando con satisfacción que una gran parte de ellos han iniciado su actividad profesional en ámbitos relacionados con la temática estudiada.

Pero estas tesis doctorales no se hubieran podido llevar a cabo, si además de las ideas y del conocimiento no se hubiera podido disponer de recursos. Recursos que se han obtenido de todas las fuentes imaginables. Queremos hacer hincapié, aquí, en el importante papel que juegan las agencias de financiación de la investigación y la transferencia. En el ámbito más próximo ACC10 y Agaur han contribuido de forma significativa a establecer las bases de algunos proyectos. En el ámbito estatal el reconocimiento debe ser para los diferentes ministerios que a lo largo de los años han asumido la parcela de investigación y transferencia, y cuyos programas (Plan Nacional, Consolider, Petri, PSE, CENIT... ) nos han permitido obtener la financiación básica y la concesión de becas. En el ámbito europeo, la participación en proyectos de los diferentes programas marco de la UE nos ha proporcionado no sólo la financiación, sino sobre todo la posibilidad de establecer relaciones con grupos de estos países. A todas

estas agencias, gracias y que tengan la seguridad que el dinero invertido ha sido plenamente rentabilizado, como creemos que se demuestra en el libro.

Claro que no sólo ha habido investigación básica. Nuestra voluntad era, ya desde el inicio, la de aplicar las herramientas y en este sentido la financiación ha venido de empresas privadas, públicas e instituciones que han apostado por estos proyectos. Entre las últimas no podemos dejar de citar a dos entidades que desde el inicio han sido básicas y con las que se ha establecido una relación simbiótica, creemos que con excelentes resultados por ambas partes, la Agència Catalana de l'Aigua (ACA) y el Consorci per a la Defensa de la Conca del riu Besòs (CDCRB). Esto ha sido posible, sobretodo, porque ya desde el primer momento tuvimos la suerte de encontrarnos con que sus responsables, de una forma inteligente, creyeron en el tema y apostaron por él. ¿Cómo no agradecer a Josep Arráez y a Marta Lacambra su apoyo? Esperamos que la lectura del libro les reafirme en que su intuición era correcta. Pero también debemos dar las gracias a otra gente del ACA. Sin ser exhaustivos quisiéramos citar a Josep Bou, Jordi Cabot, Eduard Martínez, Ramón Queralt, Lluís Godé y sobre todo a los responsables del área de saneamiento Josep María Obis, Lucas Moragas, Jordi Robusté. Sin olvidar, claro está, a Antoni Freixes que nos ha permitido presentar nuestros resultados en las Jornadas que ha ido organizando.

En el CDCRB, no podemos dejar de mencionar a Joan Navarro y Manel Isnard, pero sobre todo a Angel Freixó, la persona que sin duda más horas nos ha dedicado en estos años. ¡Gracias Angel!

Hay aún otro aspecto importante a tener en consideración a la hora de reconocer la ayuda recibida, y éste es el del entorno adecuado de trabajo y debate, sin el cual, y a pesar de la posible bondad de nuestras ideas, no habríamos podido hacer mucho. En este sentido el primer agradecimiento es para nuestros compañeros de grupos de investigación (Iequia i kemlg y mas recientemente ICRA) con quienes a

lo largo de estos años hemos encontrado ese espacio que hace florecer las ideas... y la crítica constructiva que permite fortalecerlas.

Se suman a la consecución de este “caldo de cultivo” compañeros de otras universidades y ámbitos. En lugar destacado, nuestros compañeros de la UAB liderados por Javier Lafuente, que con sus ideas provocadoras fue uno de los detonantes iniciales de todo esto y con el que la relación no sólo se mantiene, sino que mejora como los buenos vinos. No podemos olvidar, tampoco, las colaboraciones con otros grupos de ingeniería química y/o ambiental como la Universitat de Santiago de Compostela (gracias Juan Lema por tantas cosas) o el Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Gipuzkoa con Eduardo Ayesa y Luis Larrea al frente, también grupos de ecología (Eugènia Martí, M. Àngels Puig del CEA de Blanes), de economía (Francesc Hernández de la Universitat de València), de edafología (Miquel Salgot, de la Universitat de Barcelona) y de matemáticas (Narcís Clara de la Universitat de Girona).

Capítulo especial merecen las colaboraciones con grupos más allá de nuestras fronteras... Lunds Universitet (Ulf Jeppson), University of Oxford (René Bañares-Alcántara), INRA- Narbonne (Jean Philippe Steyer), CEMAGREF (Caroline Boutin), Universidad de Lugano (Andrea Emilio Rizzoli) o la Technical University of Denmark (Krist Gernaey).

Un agradecimiento especial a la gente que en estos momentos pilota SISLTech, que han conseguido que ATL-Edar esté ayudando en la gestión de la segunda EDAR más grande de Europa y siguen subiendo!

Finalmente, es de justicia un agradecimiento al director del Departamento de Ingeniería Industrial Eléctrica y Automática de la Lunds Universitet por su amabilidad al acoger a uno de nosotros en su institución y proporcionarle un entorno tan inspirador como el despacho que durante mucho tiempo ocupó el Prof Gustaff Olsson y que permitió que este libro empezara a tomar forma.



