

## **Capítulo 4**

### **Metodología para el Análisis Técnico-Económico de los Sistemas de Regeneración y Reutilización de las Aguas Residuales.**

#### **4.1 Introducción**

Establecer el coste y el precio del agua regenerada es importante en el diseño y explotación de un Sistema de Regeneración y Reutilización de Aguas Residuales (SRRAR). Si bien es cierto, que se puede tener una aproximación detallada del coste de un SRRAR, no sucede lo mismo con el precio del agua regenerada. Esto se debe básicamente a que no existe un mercado de agua regenerada que permita determinarlo y, por tanto, el único valor de referencia es el precio del agua de las fuentes convencionales. Sin embargo, este precio no refleja todos los impactos que conlleva la regeneración y reutilización de las aguas residuales.

En la literatura relacionada con la regeneración y reutilización de las aguas residuales no se encuentra una metodología para el análisis económico de los SRRAR, tal y como quedo expuesto en el capítulo 3.

Las metodologías generales para la planificación de los SRRAR solamente indican la necesidad de realizar un análisis económico, y centran su atención en los costes privados de los SRRAR.

Asimismo en la literatura especializada se mencionan y describen impactos, tanto positivos como negativos por la implantación de los SRRAR. Sin embargo no se hallan documentos que recojan y agrupen, de una manera metodológica, la identificación y descripción de los impactos más relevantes a ser considerados cuando se implanta y explota un SRRAR.

De tal forma que en el terreno de la regeneración y reutilización de las aguas residuales no existe una metodología que relacione los impactos biofísicos de un SRRAR y sus repercusiones económicas.

Por ejemplo esta afirmación es respaldada por las recomendaciones realizadas por el grupo multidisciplinario denominado "Recycled Water Task Force", cuyo objetivo es el de identificar las limitaciones, los impedimentos y las oportunidades para aumentar el uso de agua regenerada en el estado de California, EE.UU. (Katz et al, 2003).

Este grupo reconoce la necesidad de crear un marco metodológico sobre el análisis de la viabilidad económica de los SRRAR. Dentro de las tareas que estos especialistas consideran necesarias para la creación de este marco metodológico están (Katz et al, 2003):

1. Identificar los impactos que deberán ser considerados en el análisis de la viabilidad económica, basados en las ventajas y costes reales de los SRRAR en California.
2. La revisión de los impactos ya existentes con base en el punto anterior y la agregación de nuevos impactos que consideren los expertos deben ser tomados en cuenta.
3. Desarrollar un procedimiento práctico y viable para valorar económicamente las ventajas y costes de aquellos impactos que no tienen valor de mercado.
4. Desarrollar los mecanismos que permitan favorecer los esquemas equitativos del financiamiento basados en las ventajas y los costes.
5. Desarrollar una guía metodológica para el análisis de la viabilidad económica de los SRRAR.
6. Desarrollar los mecanismos de información del análisis de la viabilidad económica que soporten el posterior el análisis financiero y la toma de decisión.
7. Desarrollar las metodologías apropiadas para comparar los costes marginales de producir agua reciclada versus el coste de obtener una cantidad equivalente de agua proveniente de otras fuentes de suministro.

El objetivo de este capítulo es desarrollar una metodología para el análisis técnico-económico de los SRRAR. Esta metodología considera incorporar los impactos privados, así como los impactos externos del sistema.

El interés de este capítulo se basa en establecer una metodología para el análisis técnico-económico de los SRRAR, que permita facilitar a los tomadores de decisión resolver sobre la incertidumbre de implantar y explotar un SRRAR. En la literatura reciente relacionada con los SRRAR no existe un procedimiento metodológico que vincule los aspectos técnicos con los económicos. Las metodologías relacionadas con los SRRAR reconocen que las variables económicas inciden de manera significativa en el modelo de planificación, pero el modelo no incide sobre estas variables, por lo que actualmente existe un problema de exógeno para la toma de decisión.

Una parte fundamental de esta propuesta metodológica es la relativa a los impactos generados por los SRRAR. La práctica de regenerar y reutilizar aguas residuales conlleva una serie de impactos privados y externos, que no son valorados. Por ejemplo, impactos externos negativos como la afectación a terceros por la reutilización de aguas regeneradas o impactos externos positivos como la reducción de la contaminación de las masas de agua, la recuperación de materiales y energía, y/o el aumento de la disponibilidad de agua. Estos impactos en conjunto pueden provocar que regenerar y reutilizar las aguas residuales sea una actividad rentable desde el punto de vista económico.

Esta metodología basa una de sus principales aportaciones en la identificación y discusión de estos impactos. En la actualidad, los impactos más relevantes de los SRRAR han sido

documentados de manera aislada, generalmente como un reflejo a soluciones puntuales de casos de estudio específicos. Apoyados en la información bibliográfica reciente, la consulta a expertos y la experiencia profesional, se busca conjuntar los principales impactos y su descripción con el fin de considerarlos dentro de la evaluación económica para la implantación y explotación de un SRRAR.

Es importante dejar claro que en este capítulo no persigue una revisión bibliográfica a profundidad de los impactos, ya que cada impacto por si solo justifica una disertación que conllevaría un trabajo de investigación por si mismo. El objetivo es más bien una identificación y discutir los elementos fundamentales de estos impactos, es decir una búsqueda de información que permita concentrar y describir el mayor número de impactos, soportado en las más recientes investigaciones.

De esta manera, el presente capítulo muestra una metodología para el análisis técnico-económico de los SRRAR. La finalidad es generar una herramienta que permita a los responsables de la toma de decisión, en el ámbito del sector hidráulico, emitir un juicio soportado tecnológica y económicamente para invertir o no en estos sistemas. Esta metodología evalúa los SRRAR, desde una perspectiva multidisciplinaria e interdisciplinaria. El objetivo principal es determinar la maximización de los beneficios del proyecto. Para lo cual se identifican y documentan una gran cantidad de impactos, tanto privados como externos que tienen efectos significativos sobre la viabilidad económica de los SRRAR.

Es importante destacar que la presente metodología se fundamenta en una estrecha vinculación entre el área técnica y económica, cuya finalidad es visualizar el análisis desde una perspectiva interdisciplinaria. Con esta óptica se busca solventar el problema exógeno que presentan las metodologías para la planificación de los SRRAR.

## **4.2 Descripción de la metodología**

La metodología que a continuación se presentará, persigue avanzar en el soporte metodológico que permita disminuir la incertidumbre y el riesgo de invertir en los SRRAR. Asimismo, esta metodología puede ser aplicada en todas las fases de la vida útil del proyecto, de acuerdo con las etapas descritas en la figura 4.1.

Hasta ahora las evaluaciones económico-financieras realizadas a los SRRAR se han centrado en el proceso de una firma privada. Esta inversión se fundamenta en los siguientes puntos (Brent, 1996):

1. Solo los ingresos y costes privados que pueden ser medidos en términos financieros se incluyen.

2. La tasa de interés de mercado es la que se usa para el descuento del beneficio anual.
3. La restricción principal es la disponibilidad de fondos.

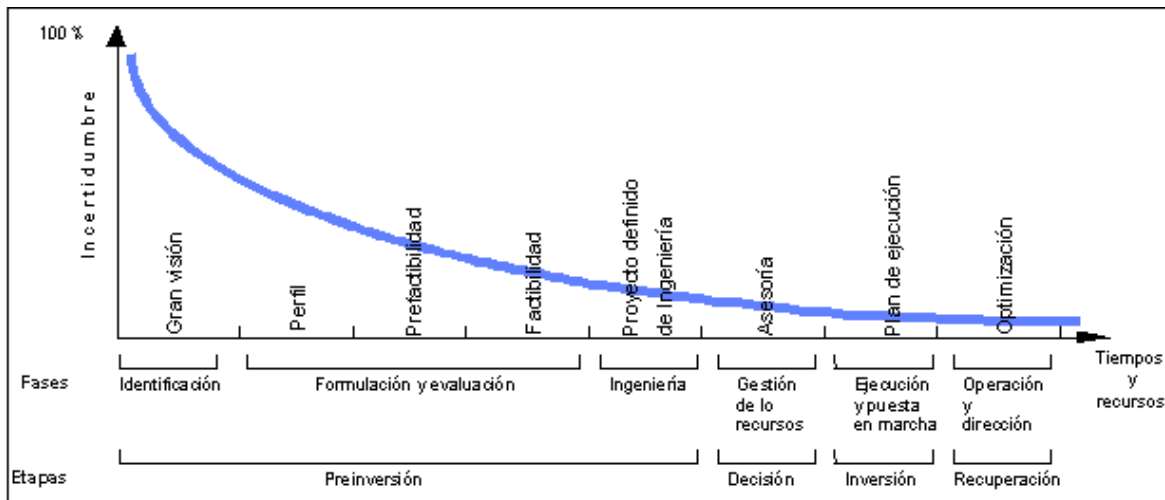


Figura. 4. 1 Nivel de análisis para los proyectos en regeneración y reutilización de aguas residuales (Nacional Financiera,1997).

La propuesta metodológica aquí desarrollada, además de considerar los impactos privados, incorpora las externalidades del SRRAR a través del análisis de los impactos externos tanto positivos como negativos que afectan al mismo. Esto es, asumimos el ACB desde un punto de vista social.

Consideramos que para la evaluación de un SRRAR es el ACB social el que debe aplicarse, ya que la ejecución de un proyecto de este tipo conlleva efectos mas allá de los circunscritos en los de una firma privada.

Esta metodología de ACB social ha sido adaptada a las características y particularidades de los SRRAR, con el fin de proporcionar al tomador de decisiones una herramienta “a la medida”, que le permita emitir un juicio sobre la conveniencia o no de implementar este tipo de proyectos.

La figura 4.2 describe esquemáticamente los pasos que deberán realizarse para la aplicación de esta metodología y que son descritos detalladamente en el presente capítulo.

#### 4.2.1 Definición de objetivos

El objetivo del análisis técnico-económico es evaluar el SRRAR, mediante la maximización de la diferencia entre los ingresos y los costes asociados con la producción de agua regenerada.

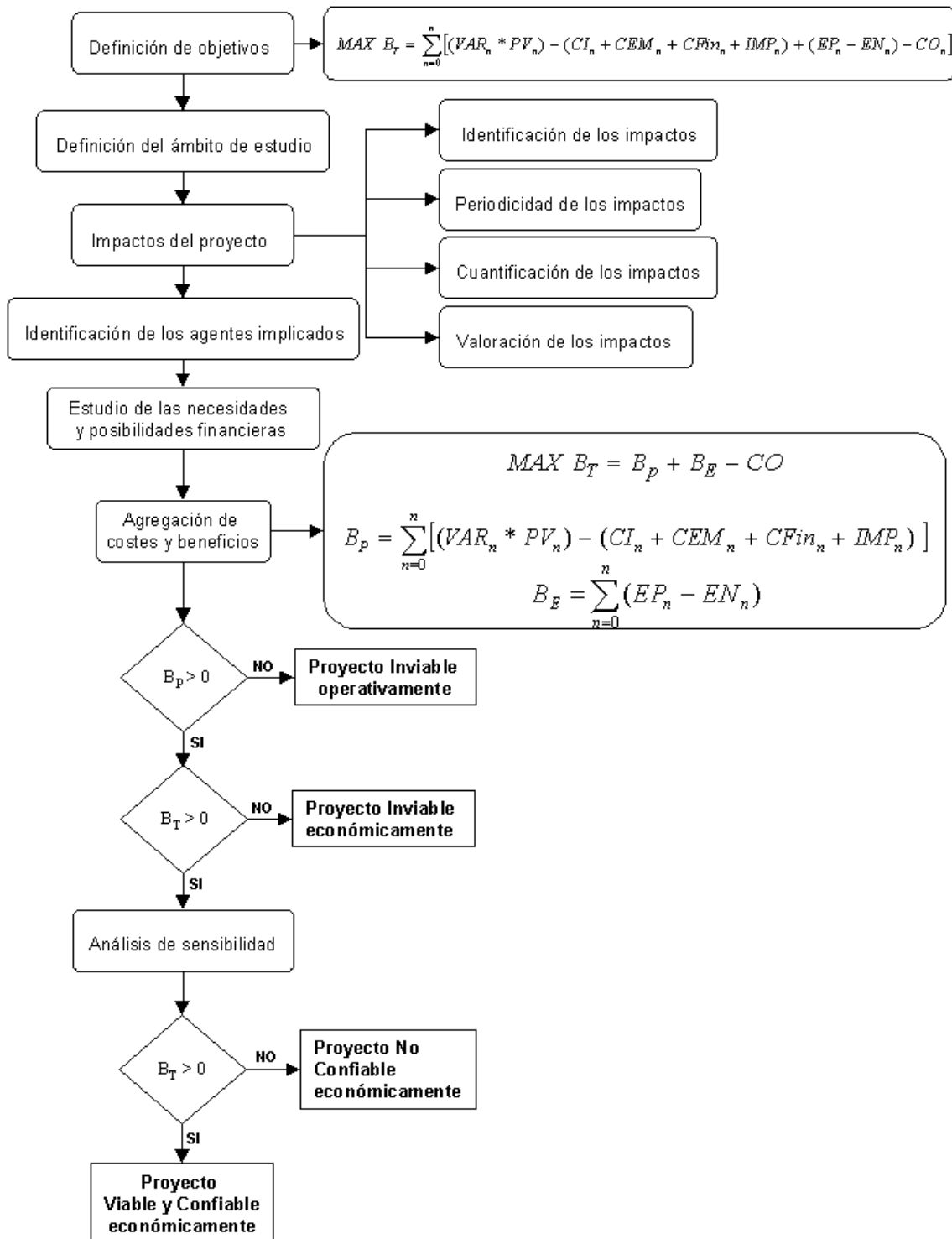


Figura. 4. 2 Etapas para el análisis económico de los proyectos de regeneración y reutilización de aguas residuales (Elaboración propia).

Esta maximización considera tanto los impactos privados como los impactos externos, tal y como se aprecia en la ecuación 1.

Este criterio de optimización económica fue seleccionado debido a su intuitiva interpretación, así como a su aplicabilidad en el tipo de problemas que se desean evaluar.

La función objetivo a optimizar es:

$$MAX B_T = \sum_{n=0}^n [(VAR_n * PV_n) - (CI_n + CEM_n + CFin_n + IMP_n) + (EP_n - EN_n) - CO_n] \quad (1)$$

De donde:

$B_T$  = Beneficio Total

$VAR$  = Volumen anual de Agua Regenerada

$PV$  = Precio de Venta del Agua Regenerada

$CI$  = Costes de Inversión

$CEM$  = Costes de Explotación y Mantenimiento

$CFin$  = Costes Financieros

$IMP$  = Impuestos

$EP$  = Externalidades Positivas del impacto  $ep_j$

$EN$  = Externalidades Negativas del impacto  $en_j$

$CO$  = Coste de Oportunidad

$n$  = Año

En el apartado 4.2.6 se detalla cada uno de los componentes de esta ecuación, así como la deducción de la misma.

#### 4.2.2 Definición del ámbito de estudio

La cuenca hidrológica deberá ser el ámbito inicial y más general de análisis (Dourojeanni A., 1999, Directiva CE, 2000). A partir de aquí, y dependiendo el nivel del proyecto, el ámbito podrá reducirse a unidades de gestión menores, como sub-cuenca, microcuenca o acuífero. La figura 4.3 representa estos ámbitos.

Definir el ámbito de estudio es fundamental para poder delimitar la influencia del proyecto y así poder determinar los impactos que se producen dentro de este ámbito.

#### 4.2.3 Los impactos del proyecto

Definiremos como impacto a cualquier consecuencia producto de la implantación de un SRRAR, deseada o no, promovida o casual, generalmente susceptible de medición, en un área concreta de la unidad de gestión hidráulica. Distinguiremos en una primera instancia entre impactos internos y externos.



Figura. 4. 3 Unidades de gestión hidráulica (CNA, 2003).

Los impactos internos o privados son aquellos que están directamente ligados al proceso de producción del agua regenerada y su posterior reutilización. Corresponden básicamente a los ingresos (impactos privados positivos) por la venta del agua regenerada o algún subproducto, o por los costes de inversión, explotación y mantenimiento del SRRAR (impactos privados negativos).

Los impactos externos, (por ejemplo la afectación a terceros, el control de la contaminación, el aumento en la disponibilidad del agua o la garantía en el suministro), si bien pueden ser mas difícilmente computables, no por ello son de menor importancia, pues un impacto de estas características puede prácticamente provocar la censura del proyecto o la viabilidad económica del mismo.

#### 4.2.3.1 La identificación de los impactos.

La identificación de los impactos que provoca el SRRAR es la tarea de mayor complejidad y dificultad para la evaluación. La detección de los impactos varía dependiendo del SRRAR del que se trate y los objetivos que este persiga. En muchas ocasiones es necesaria la participación de un equipo multidisciplinario de especialistas que sean capaces de identificar estos impactos.

La presente metodología establece como una de sus mayores aportaciones, la recopilación e inventario de los impactos relacionados con los SRRAR. Esta recopilación de fuerte base empírica, se soporta en tres fuentes de información: 1) bibliográfica, 2) consulta a expertos y 3) experiencia profesional.

1. La revisión bibliográfica se realizó a partir de las fuentes especializadas en materia de agua, entre ellas destacan las bases de información de la International Water Association (IWA), Banco Mundial, UNESCO, FAO, Econlit y ScienceDirect entre las más importantes. De estas bases de datos se obtuvieron los diversos artículos científicos, a partir de los cuales se identificaron y analizaron los diversos impactos relativos a los SRRAR, posteriormente se clasificó y sintetizó la información recopilada.
2. La consulta a expertos se centró en la revisión de la información recopilada, analizada y sintetizada de estos impactos por parte de especialistas en el ámbito de la regeneración y reutilización del agua residual. Los expertos pertenecen a centros de investigación como el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), así como a entidades promotoras de la regeneración y reutilización como el Consorcio de la Costa Brava (CCB). Estos especialistas realizaron observaciones y aportaciones sobre la identificación y clasificación de los impactos identificados.
3. La experiencia profesional obtenida a través de 13 años en trabajos relacionados con el sector hidráulico, particularmente en lo relacionado con los SRRAR.

Es importante volver a resaltar en este apartado, que el análisis de los impactos que se presentará a continuación no persigue una revisión formal de la literatura. Pues cada impacto aquí descrito está soportado por una gran cantidad de información que conllevaría por sí solo un trabajo de investigación específico.

El objetivo de este apartado es proporcionar al responsable de aplicar la metodología una visión global de los impactos más relevantes. De tal manera que se cuente con todos los elementos necesarios que deberá considerar al aplicar la metodología en un caso de estudio específico. Así pues, los impactos aquí identificados pretenden solamente proporcionar los elementos fundamentales para su conceptualización.

La descripción de los impactos identificados busca abarcar la mayor cantidad de ellos, de tal forma que esta metodología cumpla con un principio de generalidad y pueda ser aplicada en cualquier parte. Así, se presentan los elementos fundamentales de un impacto tan fehaciente como el relacionado con la disminución de la contaminación a las masas de agua, hasta impactos tan novedosos, como la recuperación de la energía contenida en el agua residual, para ser utilizada en el deshielo de calles.

A partir de las fuentes de información citadas y con el fin de facilitar la identificación y análisis de los impactos relacionados con los SRRAR, se han definido 6 grandes grupos (ver tabla 4.1):



1) infraestructura, 2) acondicionamiento y reutilización de contaminantes, 3) uso del recurso, 4) salud pública, 5) medio ambiente y 6) educación.

Tabla 4. 1

Resumen de los impactos de la regeneración y reutilización de las aguas residuales.

Grupo de Impactos	Descripción de los impactos
La infraestructura	La captación y almacenamiento de agua
	La potabilización de agua de abastecimiento
	La conducción y transporte de agua potable
	La rehabilitación y ampliación de las redes de alcantarillado
	El tratamiento y/o vertido del agua residual
	La regeneración y reutilización del agua residual
El acondicionamiento y reutilización de contaminantes	El nitrógeno
	El fósforo
	Los fangos
	La energía
El uso del recurso	La cantidad de agua
	Las garantías de suministro
	La calidad del agua
La salud pública	Los riesgos biológicos
	Los riesgos físico-químicos
El medio ambiente	El agua superficial
	El agua subterránea
	La contaminación de las masas de agua
	El hábitat de humedales y ríos
La educación	Técnica
	Cultura del agua

A continuación se definirán y explicarán los 6 grupos en los se agrupan los diferentes impactos que pueden presentarse al implantar un SRRAR.

#### 4.2.3.1.1 Infraestructura hidráulica.

Bajo los impactos de la infraestructura hidráulica se consideran todos los costes privados (costes de inversión, explotación y mantenimiento) relacionados con las instalaciones hidráulicas involucradas en la gestión del agua (captación-almacenamiento-potabilización-distribución-recolección-depuración-vertido y/o regeneración-reutilización, ver figura 4.4) de una determinada región, idealmente esta región debería coincidir con la unidad de gestión.

Este grupo de impactos es el que habitualmente más se ha estudiado y descrito dentro del sector hidráulico. En este grupo se pretende resaltar solamente los elementos fundamentales entre la infraestructura hidráulica y los SRRAR.

Esencialmente se busca evaluar los costes privados de las diversas opciones de solución dentro de una zona de estudio. Las posibilidades convencionales de suministro como son: la explotación de acuíferos, los transvases de agua, la potabilización con tratamientos avanzados, son evaluadas considerando la incorporación de las fuentes alternativas de abastecimiento: la regeneración y reutilización de las aguas residuales y la desalación.

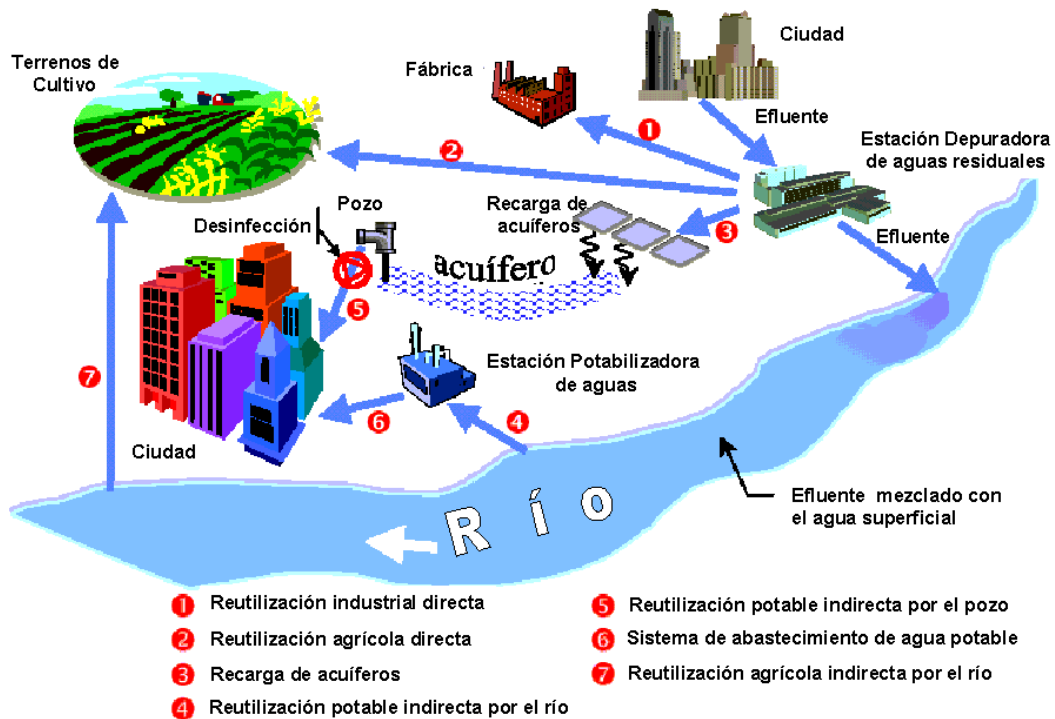


Figura. 4. 4 Gestión de la infraestructura hidráulica (Katz et al, 2003).

Los impactos a ser analizados dentro de este grupo son: a) la captación y almacenamiento de agua b) la potabilización de agua, c) la conducción y distribución de agua potable, d) la rehabilitación y ampliación de las redes de alcantarillado, e) la depuración y/o el vertido de agua residual, y f) la regeneración y reutilización del agua residual.

a) La captación y almacenamiento de agua

La primera fase de la gestión del agua es la captación y almacenamiento del agua, ya sea de fuente subterránea o superficial, el agua debe ser captada y en algunos casos almacenada para su posterior acondicionamiento para el uso al que se destine.

Conforme se agotan los recursos más cercanos, es necesario la búsqueda de nuevas fuentes de suministro, lo que muchas veces implica nuevas obras de captación y almacenaje con altos costes de inversión y por ende costes de oportunidad.

Actualmente las fuentes de suministro no convencionales, como la regeneración y reutilización de aguas residuales, permite aumentar el recurso hídrico disponible. La producción de agua regenerada y su posterior reutilización, en algunas ocasiones, proporcionará ventajas importantes al momento de evaluar esta práctica contra las alternativas de fuentes convencionales, sobre todo cuanto más alejadas se encuentren estas. En el peor de los casos

---

se requiere regular la producción de agua regenerada mediante infraestructuras de almacenamiento.

#### b) La potabilización del agua

La sustitución de agua de primer uso por agua regenerada ofrece la posibilidad de reducir el consumo de agua potable. La reutilización de agua regenerada en usos público-urbanos como: limpieza de calles y contenedores, jardinería, fuentes ornamentales y bocas de agua contra incendios, puede sustituir al agua potable procedente de fuentes convencionales.

Esta sustitución permite alargar la utilidad de la Estación Potabilizadora sin la necesidad de ampliaciones. En el caso del diseño de una nueva estación potabilizadora, la consideración de reutilizar aguas regeneradas favorecerá una menor dimensión de la estación.

Además, estas acciones redundan de manera significativa en el aumento de la garantía en el suministro de agua, pues se mantienen en reserva volúmenes de agua que han sido sustituidos. El aplazamiento, la reducción o incluso la eliminación de instalaciones adicionales de tratamiento de agua para el suministro repercute directamente en los costes de inversión, explotación y mantenimiento de la estación potabilizadora.

#### c) La conducción y distribución del agua potable

La reutilización de agua regenerada disminuye los volúmenes de agua de abastecimiento provenientes de fuentes convencionales. Esto permite evitar inversiones y consumos de energía relacionados con la conducción del agua, especialmente cuando las zonas de abastecimiento de agua de primer uso se encuentran más alejadas que los puntos de regeneración. En resumen, la posibilidad de reutilizar agua regenerada evita tener que “pasear” el agua, con todos los costes que esto comporta. Esto cobra especial relevancia cuando la reutilización se lleva a cabo a escala local y la fuente de abastecimiento convencional está situada lejos del lugar de consumo.

#### d) Rehabilitación y Ampliación de las Redes de Alcantarillado

El crecimiento urbano obliga a la rehabilitación periódica de las redes de alcantarillado, ya que los diámetros de las tuberías adoptados inicialmente han quedado pequeños para las demandas actuales. Esto es especialmente aplicable en poblaciones con crecimiento radial, como las zonas costeras.

La rehabilitación de las redes provoca una serie de inconvenientes, sobre todo de cara a la apertura de vialidades y a la afectación de servicios. Una forma de evitar estos costes es la

implantación de pequeñas plantas regeneradoras (plantas satélites) que den servicio a las zonas que van surgiendo con el crecimiento urbano, obviamente esto dentro de un contexto de crecimiento urbano planificado.

#### e) Tratamiento y/o Vertido de Agua Residual

Las acciones de saneamiento y/o vertido de aguas residuales se derivan básicamente de dos situaciones; 1) un marco legal de vertidos y 2) el uso más sensible al que se destina la masa de agua que recibe el vertido.

En algunas ocasiones las exigencias de calidad del agua de una alternativa de reutilización son menos restrictivas que las definidas para el vertido del agua residual. En estos casos la reutilización del agua regenerada es una solución que puede ofrecer ventajas técnicas, ambientales y económicas.

Por ejemplo, el verter agua residual a una masa de agua sensible, usada con fines recreativos de contacto directo y ecológicos, requerirá de un nivel de tratamiento avanzado. Sin embargo, si se plantea una regeneración y reutilización del agua residual en usos menos estrictos (agrícolas, industriales, urbanos no potables), existirá un abanico de alternativas con un nivel de tratamiento menos complejo. Este cambio no sólo presenta ventajas técnicas significativas, como es la adopción de proyectos más sencillos o la necesidad de personal con una menor capacitación, sino que también refleja una ventaja económica por la reducción de costes, así como una ventaja ambiental al suprimir el vertido de agua depurada a una masa de agua sensible.

#### f) Regeneración y Reutilización de Agua Residual

Los costes de inversión de un sistema de regeneración vienen determinados por el conjunto de asignaciones, que es necesario realizar para conformar la infraestructura física de la estación regeneradora (equipamiento, terreno, edificios, instalaciones, etc.). Los costes de inversión en la reutilización del agua regenerada vienen establecidos por las inversiones en los almacenamientos y conducción (terrenos, depósitos, estaciones de bombeo y tuberías). Además de la inversión inicial, se requiere de un flujo de dinero que permita la explotación y mantenimiento tanto del sistema de regeneración como del sistema de reutilización.

Es importante destacar que la regeneración y la reutilización de agua residual está considerada como una fuente alternativa de suministro, y por lo tanto, debería contemplarse como cualquier otro sistema de abastecimiento (Asano y Mills, 1990). Por este motivo un sistema de reutilización deberá incluir no solamente el sistema de regeneración y distribución, sino también

los sistemas necesarios para su regulación y almacenaje, así como los sistemas necesarios para su vertido cuando el agua no sea necesaria.

Debido a que ni la producción, ni el consumo de agua regenerada es constante, (como por ejemplo en el riego), es importante considerar el almacenamiento y la regulación del agua, por lo cual los sistemas de reutilización pueden implicar inversiones significativas para el almacenamiento del agua regenerada.

La descripción de estos impactos en el contexto de la infraestructura hidráulica ha sido ampliamente documentado por Young, et al (1987), Lambert y Nebeker (1996) y Jones, et al (1998). Cabe resaltar los notables trabajos de Aguilera (1992), Mills y Asano (1996); Fields, et al (1997); Richardson y Gross (1999) y Platt, et al. (2001).

Particularmente, Richardson y Gross (1999) reconocen que el valor económico de los proyectos de regeneración y reutilización de aguas residuales esta en función de las ventajas potenciales del proyecto y su valor asociado. Estos autores, analizan un SRRAR comparando el coste de producir y de transportar el agua regenerada al coste de otras nuevas opciones de abastecimiento de agua. Para ello consideran la reducción de costes en la infraestructura, garantía en el suministro, ahorros en los costes del tratamiento y ventajas ambientales. Considerando los proyectos bajo esta perspectiva, el SRRAR es una alternativa de suministro de agua viable económicamente.

Richardson y Gross presentan como ejemplo el análisis económico aplicado al proyecto de reutilización de aguas del valle del Este (EVWRP) en la ciudad de los Ángeles California. En la primera fase se considera que el coste total del SRRAR es de 0.39 USD/m<sup>3</sup>, mientras que el Departamento de Agua y Energía (DWP) de la ciudad considera que el coste neto es de 0.16 USD/m<sup>3</sup>, después de restar los subsidios por parte de financiamiento estatal y federal.

Sin embargo, aun sin considerar estos apoyos el EVWRP proporcionaría una fuente alternativa de agua a un coste menor que otras fuentes de suministro. Según el DWP considera que desalar con nuevas tecnologías le costará 0.65 USD/m<sup>3</sup>, mientras que con la tecnología actual el coste es de 1.62 USD/m<sup>3</sup>. Además, el EVWRP considera que tiene otras ventajas que no ha cuantificando en este caso, como son los costes (económicos-ambientales) por la reducción del agua importada de las cuencas cercanas o la garantía de suministro resultando de contar con una nueva fuente local de agua.

#### **4.2.3.1.2 Acondicionamiento y reutilización de contaminantes.**

La acción de depurar o regenerar aguas residuales es en síntesis la separación y/o eliminación de componentes no deseados en el agua, con el fin de que el agua regenerada cumpla unas condiciones de calidad que permitan que ésta pueda ser nuevamente reutilizada.

Existen contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos, que para algún uso en particular pueden ser aprovechados convirtiéndolos en sustancias nuevamente útiles y con un valor comercial. Así pues, el acondicionamiento y reutilización de contaminantes, como el nitrógeno, el fósforo, los fangos y la energía, puede ser una opción interesante para evitar la disposición y/o confinamiento. En la actualidad, existen diversas tecnologías que permiten el acondicionamiento y reutilización de contaminantes, por lo que se puede decir que no hay limitación técnica para desarrollar este tipo de prácticas.

Los impactos a considerar de cara al acondicionamiento y reutilización de contaminantes son: a) el nitrógeno, b) el fósforo, c) los fangos y d) la energía.

#### a) Nitrógeno

La reutilización con fines agrícolas del nitrógeno proveniente de las aguas residuales domesticas es una de las prácticas más antiguas y documentadas en la literatura (Mujeriego, 1990 y Sala y Millet, 1995, Asano, 2001) El destino final del nitrógeno aportado por las aguas residuales, depende principalmente de la proporción de nitratos presentes en la disolución que percola a través de las capas del suelo, donde éstos son interceptados y absorbidos por las plantas.

Las especies químicas del nitrógeno normalmente presentes en un agua residual son: el nitrógeno orgánico, el amoníaco y el nitrato; así mismo, un agua residual puede contener pequeñas concentraciones de nitritos. La proporción relativa de estas diversas formas varía según el origen del agua residual, y de la serie de tratamientos a que ésta ha sido sometida. El amoníaco es la especie predominante en la mayoría de los casos, con concentraciones que oscilan entre 5 y 40 mg N/l. Cuando el agua residual es sometida a un tratamiento aerobio, y dependiendo del grado de oxidación, el amoníaco presente en el agua será convertido normalmente en nitratos por acción de las bacterias nitrificantes, esta forma química del nitrógeno es la asimilada por las plantas. En general, la asimilación de nitrógeno aportado tiene una eficiencia que no supera normalmente al 50%, siendo con frecuencia inferior a dicho valor.

#### b) Fósforo

El fósforo es el undécimo elemento más abundante de la litosfera, localizándose principalmente en las rocas sedimentarias (apatitos). Una parte importante de él va a parar al mar, donde se deposita y está inmovilizado durante largos periodos. La importancia de este elemento es por la

función que tiene en el metabolismo biológico y por su relativa escasez en la hidrosfera. Los compuestos que tienen fósforo desempeñan un papel importante en todas las fases del metabolismo de los seres vivos, en particular en la transformación energética asociada con las reacciones de fosforilación en la fotosíntesis. El fósforo es requerido para la síntesis de nucleótidos, fosfátidos, fosfoglucidos y otros compuestos fosforilados intermedios.

En comparación con la abundancia natural de otros componentes nutritivos y estructurales de la materia viva (C, H, N, O, S) el fósforo es el más escaso y normalmente actúa como limitante de la productividad biológica. Proyecciones realizadas por la asociación internacional de la industria de los fertilizantes (IFA, 2003), estiman que para garantizar la producción de alimentos en el ámbito mundial, los consumos de fertilizante pueden aumentar entre el 1% y el 3% anual. Las proyecciones realizadas y comparadas con las reservas mundiales de fósforo que oscilan en torno a los 700 millones de toneladas. Esta organización visualiza que para un escenario pesimista, con un incremento anual en el consumo del 3%, las reservas se agotaran en el año 2045, mientras que para un escenario optimista las reservas duraran hasta el año 2060.

De este análisis se desprende la necesidad de regenerar y reutilizar al máximo posible el fósforo extraído de sus fuentes originales. La recuperación del fósforo que se encuentra en las aguas residuales provenientes de las ciudades e industrias es una posibilidad interesante de cara al agotamiento de las reservas mundiales, misma que puede lograrse mediante procesos tecnológicamente viables y que económicamente serán cada vez más factibles, debido a las condiciones de oferta y demanda que el mercado del fósforo experimentará en los próximos años. (Zhao y Sengupta, 1996).

Los fosfatos añadidos al suelo pueden ser absorbidos por el cultivo, acumulados en la fase sólida del suelo, mediante reacciones de absorción y precipitación, o escaparse del sistema con el agua de percolación, el agua de escorrentía y la erosión. El fósforo retenido mediante las reacciones con el suelo y la absorción por parte de las plantas, representa la fracción más importante de todo el fósforo añadido. Las cantidades de fósforo que se han podido detectar en las aguas de drenaje son pequeñas inferiores generalmente al 3% de la cantidad añadida anualmente.

El acondicionamiento y reutilización del nitrógeno y fósforo es uno de los impactos más citados en la literatura, ejemplo de ello son los trabajos de Oswald (1989), Teltsch, et al (1989), Ouazzani (1996), Lambert y Nebeker (1996), Mujeriego, et al (1996), Hamouri, et al (1996), Boyden y Rababah (1996), Vázquez, et al (1996), Bahri (1999), Randall (2003). Destaca de manera significativa el trabajo económico de Haruvy (1998), quien realiza un excelente análisis económico incorporando el valor de los fertilizantes como parte de los beneficios de la reutilización de aguas residuales. Este investigador realiza un análisis coste-beneficio del riego con aguas regeneradas en huertos cítricos del área central de Israel. Mediante un modelo de

optimización determina la combinación óptima de cultivos con el fin de maximizar los beneficios netos. Este modelo es una herramienta útil para la toma de decisión en la gestión de las aguas residuales e incorpora el posible ahorro económico de fertilizantes por los nutrientes provenientes de las aguas residuales. Así mismo, considera el riesgo que existe en el medio ambiente por la lixiviación de nitrógeno al agua subterránea y lo incorpora al modelo matemático como una restricción.

Haruvy concluye que la transferencia de las aguas regeneradas del centro hacia el sur del país puede favorecer el aumento de huertas en la región, con un incremento en la producción de fruta cítrica. El modelo desarrollado favorece la toma de decisión para la disposición de las aguas regeneradas, permitiendo la planificación de las inversiones agrícolas. Respecto a la gestión de las aguas regeneradas para el riego, este investigador, considera que estas aguas deben ser evaluadas regularmente y su aplicación debe realizarse con cautela, de acuerdo con políticas óptimas de fertilización para disminuir los riesgos de lixiviación, salinidad y de otros agentes contaminantes.

### c) Los fangos

Los componentes que son separados en el proceso de regeneración del agua quedan básicamente conjuntados en lo que definimos como “lodos o fangos”, y que son el subproducto de someter a un tratamiento determinado las aguas residuales.

En el proceso de regeneración de las aguas residuales municipales, además de obtenerse agua regenerada de posible reutilización, se generan enormes cantidades de residuos orgánicos (aproximadamente 70 –100 g de materia seca /persona /día).

En función del grado de estabilización se distingue principalmente dos tipos de fangos: frescos y digeridos. Los lodos frescos, son aquellos que no han recibido ningún tratamiento de fermentación, se caracterizan por un olor muy desagradable y por su alto grado de contaminación por gérmenes patógenos. Los lodos digeridos, se originan al someter los lodos frescos a un proceso de digestión aerobia o anaerobia. Este tipo de lodos tiene un olor menos desagradable y un menor contenido de microorganismos patógenos. Los fangos, tanto los frescos como los digeridos, suelen someterse a una deshidratación mediante eras de secado o mediante distintos sistemas mecánicos (filtro de bandas, centrifugación, secado térmico, etc.) obteniéndose un producto más o menos pastoso.

Dentro de la gestión de cualquier sistema de depuración y/o regeneración de aguas residuales los fangos deben ser considerados como parte del problema a resolver, de lo contrario se estaría incurriendo en una externalidad negativa al trasladar un agente contaminante al medio ambiente con la consecuente afectación a terceros. Por consiguiente, se tienen dos opciones:



1) el confinamiento controlado de este residuo o 2) su reutilización en alguna actividad que permita su aplicación.

La tendencia actual sobre la disposición final de los fangos es la utilización de los mismos como materia prima en la fabricación de productos con demanda en el mercado actual, o la utilización directa de los mismos en sustitución de otros convencionales.

La reutilización de los fangos básicamente se realiza en: 1) La utilización directa en la agricultura, 2) la fabricación de compost y 3) la producción de energía mediante su eco-incineración o por la generación de biogás, con la posterior reutilización de las cenizas en materiales para la construcción. Trabajos como los de Donovan y Garvey (1991), Grace y González (1993) y Hook, et al (1993), Wiebusch et al (1997 y 1998), Van Oorschot et al (2000), Pan y Tseng (2001), Bartlett y Killilea (2001), exponen casos particulares de la reutilización de los fangos.

#### d) Energía

La reutilización de la energía térmica contenida en las aguas residuales es una práctica novedosa que se realiza en Japón (Funamizu y Ogoshi, 2001). La fluctuación de la temperatura del efluente de un SRRAR es menor que la del aire, razón que permite reconocer al agua regenerada como una fuente de calor estable, cuando la temperatura ambiente es menor que la temperatura del agua. Sin embargo, la calidad de la energía es muy baja desde el punto de vista termodinámico, debido a la baja temperatura (aproximadamente 13° C) por lo que es difícil utilizar esta energía térmica como fuente de suministro. Los usos a los que se puede destinar esta energía son: 1) para la calefacción y el aire acondicionado, y 2) para derretir la nieve.

1) La reutilización de la energía térmica de las aguas residuales para la calefacción y enfriamiento en los distritos metropolitanos de Tokio.

La energía térmica que se pierde anualmente en el sistema de las aguas residuales de los distritos metropolitanos de Tokio es equivalente a la energía consumida por 0.4 millones de casas para la calefacción y el enfriamiento. Para el año 2001 funcionaban 12 Sistemas de Reutilización de Energía Térmica (SRET) que utilizan 70,000 m<sup>3</sup>/día, 4 SRET utilizaban aguas residuales sin tratamiento y 8 SRET aguas regeneradas de sistemas secundarios o terciarios.

La capacidad total de producción de energía es de 32,200 MJ/hr para la calefacción y de 41,900 MJ/hr para el enfriamiento. La reutilización de esta energía es principalmente para el aire acondicionado de los edificios administrativos de las EDAR's. Especialmente, el

SRET de Kohraku proporciona energía para la calefacción y el enfriamiento de las zonas aledañas al sistema.

2) La reutilización de la energía térmica para derretir la nieve en la ciudad de Sapporo

La ciudad de Sapporo enfrenta el problema de quitar la nieve de sus calles y su posterior vertido. Este problema implica cuatro aspectos: 1) los ciudadanos de Sapporo no están satisfechos con el actual servicio para quitar la nieve de las calles y áreas residenciales, 2) No se cuenta con suficiente espacio para el almacenamiento de la nieve recolectada, 3) El derretir la nieve almacenada en los jardines causa problemas de contaminación del agua, y 4) los métodos convencionales para derretir la nieve generan altos consumos de combustibles y energía eléctrica.

La idea fundamental es, en época invernal, utilizar la energía producida en los SRET para derretir la nieve en situ, esta nieve derretida es recolectada en el sistema de alcantarillado de la ciudad y posteriormente el agua es depurada en las EDAR's de la ciudad. El coste de derretir la nieve por este método es similar a los métodos convencionales.

#### **4.2.3.1.3 Uso del recurso.**

El uso del recurso está íntimamente ligado con las necesidades a satisfacer con su utilización, por un lado están los usos productivos (agrícola, industrial, urbano, turístico y recreativo) y por otro los usos ambientales (abastecimiento de agua potable y ecológico).

La sustitución del agua procedente de fuentes convencionales por agua regenerada en los usos mencionados esta dada por factores físicos, tecnológicos, económicos, sociales y culturales. Sin embargo, los factores físicos como son la disponibilidad, la garantía en el suministro y la calidad del agua son predominantes para que los demás factores se ajusten a nuevos escenarios.

Actualmente, las diversas corrientes económicas trabajan en establecer el precio que el agua tiene en los diversos sectores productivos. A pesar de los esfuerzos realizados, en la realidad sigue existiendo una distorsión en el mercado debido a que el agua, además de ser un bien económico tiene evidentes características socioculturales. Este grupo de impactos esta compuesto por: a) la cantidad de agua, b) la garantía de suministro y, c) la calidad del agua.

a) La cantidad de agua

Las diferentes actividades realizadas por el ser humano requieren de una cantidad mínima de agua, la cual esta en función de la disponibilidad espacial y temporal del recurso. Parecería

lógico pensar que el hombre se instalará cerca de donde pueda contar con la cantidad de agua suficiente para realizar estas actividades, sin embargo, a medida que la población aumenta y el desarrollo económico de una región crece las demandas de agua llegan, en algunos casos, a superar la disponibilidad del recurso. Esto provoca que se tengan que buscar nuevas fuentes de suministro de agua de primer uso cada vez más alejadas del lugar de la demanda, siempre y cuando técnicamente sea factible.

Cuando técnicamente los recursos hídricos ya no son disponibles para satisfacer las demandas comienza a existir un déficit de agua, lo cual puede llevar a una demanda excedente, entendiendo esta como la diferencia entre la demanda total y la demanda satisfecha. Es decir, se puede llegar a la situación de tener un grupo de usuarios que no tendrían acceso al líquido para poder desempeñar sus actividades. Es importante puntualizar en este nivel de reflexión que la única acción tecnológicamente viable que mantendría el desarrollo sostenible de una cuenca, es la regeneración y reutilización de sus aguas residuales, ya que las demás alternativas (trasvases, sobreexplotación de acuíferos y desalación) son contrarias a los principios del desarrollo sostenible.

Las fuentes alternativas de agua son una posibilidad viable al aumento de la disponibilidad de los recursos hídricos, a fin de cubrir la demanda excedente de una región determinada. Estas fuentes han cobrado una gran relevancia sobre todo cuando en una región la disponibilidad de agua ya no aumentará más debido básicamente a cuestiones climatológicas y/o de sobreexplotación de las fuentes de suministro existentes.

Trabajos como los de Simpson y Willet (1994), Jaber, et al (1997) y Juanico y Friedler (1999), ejemplifican situaciones donde se obtiene un aumento del recurso hídrico por la práctica de la regeneración y reutilización de aguas residuales.

Simpson y Willet (1994), demuestran que una gestión adecuada de las aguas en una pequeña región puede favorecer a los usuarios, la EDAR del condado de Hannover, Virginia, fue modificada recientemente para proveer aguas regeneradas para la producción de energía, lo que ha propiciado varias ventajas: 1) la disminución de vertidos a las aguas superficiales, 2) el usuario industrial dispone de un agua a un coste menor y 3) se aumenta la disponibilidad de agua potable para los usuarios domésticos.

Jaber, et al (1997), reflexionan sobre el incremento en los consumos de energía por el bombeo de agua subterránea para lograr satisfacer el aumento de las demandas de agua en Jordania. Argumentan que se pueden generar ahorros económicos mediante el uso de fuentes de agua no convencionales con el fin de satisfacer el déficit de agua en Jordania. Alternativas como: la regeneración de las aguas residuales y su posterior reutilización; la desalación del agua para usos industriales en la generación de energía y la recolección sistemática del agua de lluvia cuando sea factible, son acciones que permitirían disminuir la escasez de agua en este país.

Juanico y Friedler (1999) argumentan que la mayoría de los ríos en Israel solamente conducen agua durante el invierno. Al ser un país semiárido en donde literalmente cada gota de agua se utiliza, las aguas residuales regeneradas son una fuente de agua factible para la recuperación de los ríos. Una asignación de 122 Millones de m<sup>3</sup> por año de las aguas residuales para la recuperación de 14 ríos en Israel, puede motivar la reutilización ambiental de estas aguas residuales, dando por resultado un aumento de los recursos de agua disponibles al país.

b) Las garantías de suministro

En casi cualquier actividad del ser humano poder contar con agua es fundamental, por ejemplo en la agricultura, solo basta ver la diferencia que existe en la renta agraria de las producciones en secano y en regadío. Datos del plan hidrológico nacional establecen para España que el rendimiento medio relativo de producción entre el regadío y el secano es aproximadamente de 30 a 1. (PHN, 2000)

En una situación crítica como podría ser la sequía, el uso público-urbano es el uso predominante, esto provoca que la producción de aguas residuales existirá en todo momento. En el peor de los casos solamente disminuirá debido a las posibles restricciones en el suministro de agua potable.

Por tanto, al tener una generación constante de aguas residuales se puede garantizar la producción de agua regenerada. Esta reflexión sitúa al agua regenerada como una fuente de suministro fiable en todo momento, situación que muchas veces no presentan las fuentes convencionales de agua.

Así pues el regenerar y reutilizar agua residual no solo es una alternativa viable para el suministro de agua, sino que también es una fuente que garantiza el recurso hídrico en todo momento.

La importancia de garantizar el suministro de agua se ve reflejado en el trabajo de Ward y Michelsen (2002), ellos realizan un análisis a las instituciones del agua, particularmente en aquellas zonas de baja disponibilidad. Establecen que la información sobre el valor económico del agua permite a los tomadores de decisión, la conservación, la asignación y el uso eficiente del agua en situaciones de escasez.

Estos autores evalúan la variación del precio del agua al modificar la disponibilidad, dejando de manifiesto que sin una garantía en el suministro el precio del agua se eleva. Analizan estas políticas en un caso de estudio para la reciente sequía de la cuenca del Río Grande en la zona fronteriza México-EUA.

### c) La calidad del agua

El disponer de agua en cualquier momento no es garantía para satisfacer una demanda. Se requiere, además, que ésta sea de la calidad adecuada para cubrir las exigencias solicitadas. Tradicionalmente se ha preferido la búsqueda de fuentes de suministro que presenten una excelente calidad de agua, sin embargo, no todos los usos requieren de la misma calidad de agua, es decir, no se requiere la misma calidad de agua para la limpieza de calles o contenedores, que para el riego agrícola, la industria o el consumo humano. Esto hace que se planteen una serie de criterios dependiendo del uso al que se destine el agua.

La regeneración y reutilización del agua residual, permite contar con agua de calidad, que en algunos casos, puede ser superior a la existente en las fuentes convencionales.

Una práctica que permite mejorar la calidad del recurso hídrico es la dilución, es decir, el mezclar agua regenerada con agua procedente de una fuente convencional de menor calidad, con el fin de obtener una calidad de agua intermedia que permita al volumen de líquido total ser utilizada para alguna actividad previamente determinada.

Los trabajos de Marecos et al (1996), Asano et al (1998), Lazarova et al (2001) y Kamizoulis (2003) presentan discusiones sobre los criterios de calidad del agua aplicable al agua regenerada. Particularmente los trabajos de Lazarova y Kamizoulis buscan establecer unos criterios mínimos, en el ámbito europeo y particularmente mediterráneo, que regulen el uso de aguas regeneradas.

#### **4.2.3.1.4 Salud pública.**

Este grupo de impactos es el que da origen a los sistemas de regeneración de las aguas residuales como una respuesta a la prevención y control de la contaminación, y cuya finalidad es la de evitar enfermedades de origen hídrico y disminuir los riesgos de epidemias.

Para los responsables de implementar programas de reutilización de aguas regeneradas, es perfectamente válida la preocupación que existe por la presencia en las aguas residuales de los contaminantes químicos o microbiológicos que repercuten negativamente en la salud, y que por lo tanto implican un riesgo para la reutilización de estas aguas.

Para poder regenerar adecuadamente el agua residual y alcanzar la calidad requerida para determinado tipo de reutilización, es necesario conocer cuáles son los principales contaminantes presentes en el agua residual, tanto de tipo químico como biológico, entender el significado de su presencia y cómo realizar el adecuado tratamiento para lograr la eliminación

de los contaminantes en cuestión con el fin de alcanzar la calidad deseada para el uso específico.

La presencia de compuestos químicos tóxicos y de microorganismos patógenos en el agua residual crean el riesgo potencial adverso para la salud de los individuos que estén en contacto con ella.

La transmisión de las enfermedades puede ser por contacto directo con el agua, por inhalación o por ingestión de los contaminantes en cuestión. Las medidas de control incluyen la eliminación o disminución en la concentración de estos constituyentes en el agua regenerada, además de realizar prácticas adecuadas que limiten o prevengan el contacto directo o indirecto con el agua a reutilizar. Los riesgos por la reutilización de agua residual o agua regenerada se clasificarán como riesgos biológicos y riesgos químicos.

#### a) Riesgos biológicos

Los principales agentes infecciosos que pueden estar presentes en el agua residual se pueden clasificar en tres tipos principales de acuerdo con el agente infeccioso: 1) parásitos (protozoarios y helmintos) 2) bacterias, y 3) virus. El anexo 4.A presenta los principales agentes infecciosos que se encuentran en las aguas residuales sin tratar.

Los virus patógenos, bacterias, protozoarios y helmintos se escapan del cuerpo de personas infectadas en sus excretas y pueden pasar a otras por medio de la boca (es decir, cuando se ingieren alimentos o bebidas contaminadas) o de la piel (como en el caso de los anquilostomas y esquistosomas). Las excretas en las aguas residuales contienen generalmente elevadas concentraciones de agentes patógenos excretados, sobre todo en los países donde predominan las enfermedades diarreicas y los parásitos intestinales. Muchas de esas infecciones de importancia para la salud pública se transmiten de varias formas. Las características de los agentes causales también varían y son de gran importancia para determinar en qué circunstancias se puede fomentar o controlar una infección con las prácticas del aprovechamiento de aguas residuales.

Las pruebas existentes indican que casi todos los agentes patógenos excretados sobreviven en el suelo y en los estanques el tiempo suficiente para representar un peligro para los agricultores y piscicultores, así como para quienes manejan y consumen pescado y macrófitos acuáticos. Los agentes Patógenos sobreviven en las superficies de los cultivos por periodos más cortos que en el suelo, ya que en ese medio los microorganismos están menos protegidos contra los efectos nocivos de la luz solar y la desecación. Sin embargo, los periodos de supervivencia pueden ser suficientemente prolongados en algunos casos para poner en peligro la salud de

las personas que manejan y consumen los cultivos, sobre todo cuando esos periodos son más largos que los ciclos de crecimiento del cultivo, como sucede a menudo con las verduras.

Existe una extensa información sobre las enfermedades de origen hídrico, así como casos documentados de epidemias relacionadas con la contaminación microbiológica de aguas residuales, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2003) contempla dentro de sus acciones la vigilancia y control de la reutilización de las aguas residuales. Casos como los del río Ganga en la India, el río Huangpu en Shanghai, China, regiones de Filipinas, Nigeria, Brasil, el Valle del Mezquital en México, considerada la zona de riego con aguas residuales más grande de Latinoamérica, la región de Moscú en Rusia, Jordania o Yemen, han sido ampliamente estudiados y documentados (OMS, 1997 y 2000).

A pesar de relacionarse a las enfermedades de origen hídrico con los países en vías de desarrollo, existen evidencias de que en países desarrollados surgen brotes epidémicos de enfermedades gastrointestinales erradicadas, como el sucedido en la comunidad de Walkerton, en Canadá a finales de mayo de 2000. Esta comunidad se vio afectada por una epidemia relacionada con el suministro de agua. Se recomendó a los ciudadanos que hirvieran el agua destinada al consumo desde el 21 de mayo hasta el 5 de diciembre de 2000. El número total estimado de casos de gastroenteritis relacionados con la epidemia ascendió a más de 2,300 personas en una comunidad de 5,000 (Lewin et al, 2002).

Un grupo de riesgo potencialmente alto son los trabajadores de los SRRAR. Las bacterias, los virus y otros microorganismos causantes de enfermedades se encuentran frecuentemente presentes en aerosoles y brisas alrededor de algunas unidades del SRRAR. Principalmente en aquellos procesos donde existe turbulencia, como el mezclado o aireación, estaciones de bombeo y el área de vertido del efluente. De igual forma, los trabajadores involucrados en la disposición final de los fangos y responsables del compostaje, corren el riesgo de infectarse a través de la ingesta, inhalación o contacto directo con los polvos producidos y que siguen conteniendo algún residuo infeccioso.

Trabajos recientes como los de Devaux et al (2001) y Chu et al (2003) dejan de manifiesto la preocupación por la vigilancia y control de los contaminantes biológicos presentes en el agua regenerada.

#### b) Riesgos químicos

Es generalmente aceptado que los compuestos químicos presentes en las aguas residuales son preocupantes para la salud pública. Cuando se reutilizan las aguas regeneradas existe la posibilidad de que estos compuestos entren en contacto con el ser humano, particularmente en los usos: potable (directo o indirecto), ambiental, acuícola y agrícola.

La concentración de compuestos inorgánicos presentes en el agua regenerada depende de la fuente de donde provenga el agua residual y del grado de tratamiento. Un agua residual municipal tiene aproximadamente 300 mg/l de sólidos inorgánicos disueltos. Sin embargo, el rango es de 150 a 500 mg/l. La presencia de sólidos disueltos totales, nitrógeno, fósforo, metales pesados y otros compuestos inorgánicos puede afectar la aceptabilidad del agua regenerada para diferentes tipos de reutilización.

Los principales compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales incluyen a los ácidos húmicos, materia fecal, desechos de cocina, detergentes, grasas, aceites y otras sustancias que se incorporan a las aguas residuales de diferentes procedencias. Los desechos industriales y municipales pueden aportar cantidades significativas de compuestos orgánicos sintéticos. La necesidad existente de eliminar los compuestos orgánicos está directamente relacionada con el uso final al que se destine el agua regenerada.

Los parámetros clásicos para determinar la concentración de materia orgánica como la Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) o el Carbono Orgánico Total (COT) son comúnmente utilizados como indicadores de la eficiencia de tratamiento y de la calidad del agua para muchos usos no potables del agua regenerada, pero tienen una mínima importancia con la evaluación de la toxicidad y efectos en la salud.

Actualmente el desarrollo tecnológico para la identificación y cuantificación de los diversos compuestos orgánicos e inorgánicos en el agua es posible realizarla utilizando técnicas instrumentales muy sofisticadas como la cromatografía de gases y la espectroscopia de masas. Estas técnicas instrumentales están obligando a cambio en los criterios de calidad del agua para aquellos usos relacionados con la salud pública a medida que se identifican y cuantifican contaminantes que antes no se detectaban.

Por ejemplo, la Agencia de Protección al Ambiente de los EE.UU. ha revisado sus criterios nacionales para la calidad del agua, estableciendo 83 criterios químicos cuya finalidad es la protección de la salud humana. Estos criterios de la calidad del agua para la protección de la salud humana se recalcularon bajo una nueva metodología. Esta metodología integra varios factores entre los que se destacan: 1) las contribuciones naturales de la fuente de agua, 2) cualquier nuevo factor potencialmente cancerígeno, 3) factores de bioacumulación y 4) factores de bioconcentración. Estos nuevos criterios son más rigurosos que los que se aplicaban anteriormente (EPA, 2002).

Olivieri et al (1996) publicaron los resultados de un estudio realizado en el sistema piloto de regeneración y reutilización de la ciudad de San Diego, California. Este SRRAR está diseñado para lograr producir una agua regenerada apta para el consumo humano. El objetivo primordial



del estudio era investigar si el SRRAR avanzado reduce de manera confiable los contaminantes químicos hasta niveles que no generan riesgos a la salud pública. Los resultados de la investigación indicaron que el SRRAR estudiado puede producir un agua regenerada confiable, con una calidad igual o mejor que la procedente de las fuentes convencionales de suministro.

#### **4.2.3.1.5 Medio ambiente.**

El cambio del paradigma en los usos del agua reconoce la existencia del uso ecológico. Según estos nuevos principios, este uso debe ser incluido dentro de la gestión integral de los recursos hídricos. Los impactos identificados afectan a: a) el agua superficial, b) el agua subterránea, c) la contaminación de las masas de agua y, d) el hábitat de humedales y ríos.

##### a) El agua superficial.

La falta de un flujo adecuado de agua, resultado del desvío del recurso para usos agrícolas, urbanos e industriales puede causar el deterioro de la calidad del agua y el buen estado del ecosistema. Los diferentes usuarios del agua pueden suplir sus demandas mediante el uso de agua regenerada posibilitando la liberación de volúmenes para el medio ambiente, permitiendo mantener los flujos vitales para los ecosistemas. Para los ríos que tienen problemas por la pérdida de caudal debido al desvío de agua, el agua regenerada puede ser una solución interesante que permita aumentar los caudales circulantes, logrando de esta manera preservar y mantener el hábitat acuático.

A pesar del interés en reutilizar agua, en algunas ocasiones la acción de regenerar y reutilizar pueden provocar el efecto contrario. Es decir, el agua depurada que se envía normalmente a un cauce receptor, al ser regenerada y reutilizada en otro uso, provoca un déficit hídrico que afecta al ecosistema inicial.

Algunos trabajos recientes como los de López et al, (1998); Lazarova et al, (2001); Yanbo, (2001) y Lewin et al, (2002); reflexionan sobre el aumento de los caudales ecológicos en los ríos mediante la reutilización de aguas regeneradas.

López (1998) describe el plan para la reutilización integral de las aguas residuales de la ciudad de Vitoria-Gasteiz. Con este plan se persigue la reutilización de 20 Hm<sup>3</sup> de aguas regeneradas anualmente. De estos 12 Hm<sup>3</sup> de aguas regeneradas son destinadas para los caudales ecológicos en los ríos que cruzan la ciudad. Esta reutilización alternativa de caudales, permitirá a Vitoria-Gasteiz resolver sus problemas de abastecimiento de agua pues con estas acciones ha duplicado su disponibilidad.

Lazarova et al, (2001) presenta un ejemplo de la reutilización del agua regenerada para el mantenimiento del caudal del río Chelmer en el Reino Unido. Las fuentes locales (los ríos Chelmer, Blackwater y Stour) y las importaciones de otros condados, son los recursos utilizados para satisfacer los 410,000 m<sup>3</sup>/día de agua que el condado de Essex demanda para abastecer a 1.7 millones de habitantes. Se estima que para el año 2025 la demanda será de 480,000 m<sup>3</sup>/año aproximadamente. Para cubrir la demanda a corto plazo, Essex and Suffolk Water (ESW), con el visto bueno de las Autoridades, desvía 30,000 m<sup>3</sup>/día de aguas regeneradas del SRRAR de Chelmsford al río Chelmer, que abastece al embalse de Hanningfield, de donde se extrae agua potable.

Yanbo (2001) presenta el caso de la reutilización en usos público-urbanos no potables de las aguas regeneradas de la ciudad de Tianjin, China. De los seis sistemas de reutilización que han sido puestos en explotación, uno de ellos esta destinado al mantenimiento del caudal ecológico del río del Weijinhe.

Lewin y sus colaboradores (2002) exponen el caso de la ciudad de Harare en Zimbabwe, esta ciudad regenera 90,000 m<sup>3</sup>/día de aguas residuales para mantener los caudales ecológicos. Las aguas regeneradas que se vierten en el río, llegan a los embalses antes de la extracción para someterlas nuevamente al tratamiento de potabilización, de tal forma que se realiza una reutilización indirecta en usos potables.

b) El agua subterránea.

El intercambio de aguas regeneradas por aguas subterráneas puede disminuir y evitar la sobreexplotación de acuíferos, mediante una buena gestión hidráulica, pueden aumentarse los niveles freáticos ya sea por el intercambio antes mencionado, o bien por la inyección directa o indirecta de agua regenerada a los acuíferos.

Uno de los ejemplos más representativos es la recarga de acuíferos en la región del Dan, Israel. Este SRRAR regenera 330,000 m<sup>3</sup>/día de aguas residuales que posteriormente son infiltrados en cuatro zonas para recargar capas freáticas de la costa (sistema SAT, Tratamiento Suelo-Acuífero). El agua permanece por dos meses en el acuífero; después es extraída por bombeo y conducida por tubería hasta el desierto de Negev, 87 Km al sur de Tel Aviv, donde destina para usos agrícolas (Idelovitch et al 2003; Friedler, 1999).

c) La contaminación de las masas de agua.

La presencia de contaminantes orgánicos sintéticos, metales y contaminantes biológicos presentes en las aguas regeneradas actúan como factores selectivos para la biota afectada. Especialmente, los sistemas acuáticos son muy vulnerables a cualquier cambio en la calidad

---

del agua, debido a que, a diferencia de los sistemas biológicos terrestres no han generado sistemas eficientes de inducción; esto favorece en el corto plazo, a la desaparición de organismos sensibles, sobre todo en las fases de desarrollo crítico como los primeros estadios de formación.

Las características fisicoquímicas de los contaminantes presentes en las aguas regeneradas tales como solubilidad, interacción con otros componentes del agua, estructura molecular, coeficientes de partición, etc., determinan su acceso a los sistemas biológicos. La estructura molecular de los contaminantes determina las posibilidades de ser biodegradados y/o bioacumularse.

Los compuestos solubles, tienen acceso al fitoplancton, primer nivel trófico afectado; el grado de afectación dependerá del organismo considerado, de su metabolismo y del tipo y dosis del compuesto.

Las especies químicas insolubles generalmente llegan al sedimento el cual juega un papel relevante en la biotransformación de especies químicas inertes en especies bioquímicas tóxicas y accesibles a otros niveles tróficos. Para que este proceso de biotransformación se realice se requiere la presencia de microorganismos específicos y condiciones ambientales adecuadas (temperatura, pH, potencial redox, etc.).

Las especies neotónicas debido a su composición en las tramas tróficas, se pueden considerar sensibles a la acción de ciertos contaminantes como mercurio, plomo, clordano, DDT, toxafeno etc., su sensibilidad depende principalmente de factores genéticos y ambientales. Los contenidos de éstos contaminantes en las aguas regeneradas municipales son generalmente bajos, de ahí que su acción se ejerza a largo plazo y asociada a mecanismos como bioconcentración, biotransferencia, sinergismo y su magnificación a través de la cadena alimenticia.

El uso de bioensayos permite establecer las concentraciones de contaminantes presentes en aguas regeneradas y sus efectos en la Biota acuática. Sin embargo, generalmente se señalan niveles tóxicos con base en la dosis letal media, excepcionalmente con base en dosis subletales, por ello se requieren estudios a este nivel con especies sensibles y en diferentes estadios de desarrollo.

En lo que respecta a ecosistemas terrestres, el suelo presenta una acción amortiguadora a los contaminantes presentes en las aguas regeneradas, la microbiota del suelo juega un papel relevante en cuanto a su eliminación y/o transferencia a las plantas.

Los trabajos de Xu et al (2001), Lazarova et al (2001), la Agencia de Aguas de Reciclaje de la Bahía Sur de San Francisco (South Bay Water Recycling, 2003) y de Barbagallo et al, (2001) son ejemplos recientes de la aplicación de los SRRAR con el fin de evitar la contaminación de las masas de agua.

Xu et al, (2001) expone el caso de la reutilización de las aguas regeneradas de la Isla de Noirmoutier en Francia, no solo incrementa la disponibilidad de agua, sino que también previene la contaminación de las zonas costeras, al lograrse “el vertido cero”. La demanda agrícola de la zona, 350,000 m<sup>3</sup>/año, es cubierta al 100% con aguas regeneradas. De esta manera, La evaluación técnico-económica demostró que la reutilización del agua residual en el riego agrícola y de jardinería es la solución más atractiva y económica para solucionar la escasez de agua y mejorar la calidad ambiental de la isla.

Lazarova et al, (2001) documenta el caso de estudio del SRRAR de la ciudad de Clermont-Ferrant, produce 50,000 m<sup>3</sup>/día de aguas regeneradas. Estas aguas se reutilizan para la irrigación de 700 has de maíz, remolacha y alfalfa. Esta reutilización evita el vertido de aguas residuales a los ríos de la región de Limagne, Francia, evitando de esta manera su eutrofización.

Las autoridades de la ciudad de San José y del condado de Santa Clara California EE.UU., con el fin de reducir el daño ambiental por el cambio en la salinidad en los estuarios de la bahía sur de San Francisco decidieron suspender el vertido de aguas residuales, aproximadamente 450,000 m<sup>3</sup>/día. Las aguas regeneradas del condado de Santa Clara serán reutilizadas para cubrir las demandas de los usuarios urbanos, industriales y agrícolas (South Bay Water Recycling, 2003).

Barbagallo et al (2001) presenta el caso de la zona costera de Emilia Romagna, Italia ahí se ha instalado un SRRAR cuyos objetivos son la reutilización agrícola y el cuidado del medio ambiente, este sistema produce 450,000 m<sup>3</sup>/día de agua regenerada que se destina para el riego de 400 ha de huertos, evitando la posible eutrofización de la masa de agua por el vertido de las aguas regeneradas con alto contenido de nutrientes.

d) El hábitat de humedales y ríos.

Los humedales aportan muchos beneficios, incluido el hábitat de flora y fauna, la mejora de la calidad del agua, la disminución de las inundaciones y las condiciones adecuadas para el desarrollo de la industria pesquera, estos humedales pueden ser mantenidos mediante el vertido de agua regenerada. (PNAE, 2003).

Por ejemplo, los altos caudales de aguas regeneradas vertidas por la EDAR de San José-Santa Clara, en el sur de la bahía de San Francisco, amenazaban el área natural de marismas de agua salada. Para resolver este problema se realizó un proyecto de regeneración de 140 millones de USD en 1997. El Programa de Agua Regenerada del Sur de la Bahía, con una capacidad para proveer 80,000 m<sup>3</sup>/día de agua regenerada para uso agrícola e industrial, ha evitado la conversión de las marismas de agua salada en una marisma de agua salobre, así como la protección de dos especies en peligro de extinción (EPA, 1998).

Trabajos como los desarrollados por: Schwartz, et al (1994), Prime y Lothrop, (1996) y Sala et al (2003), muestran como la reutilización del agua regenerada puede favorecer y mejorar sustancialmente los ecosistemas acuáticos.

Schwartz y colaboradores (1994) describen la restauración de los humedales de Bayou Marcus en el condado de Escambia, EE.UU. El SRRAR está diseñando para restaurar la deforestación y la recuperación de los humedales mediante la reutilización del agua regenerada.

Prime y Lothrop (1996) han concluido que el SRRAR del Water Conserv II (2003) en la ciudad de Orlando, Florida, es uno de los mayores sistemas de reutilización agrícola de los EE.UU. Este sistema beneficia ambientalmente a la región al evitar la entrada de nutrientes a la cuenca de Tohopekaliga. Así mismo, reduce la extracción futura de aguas subterráneas para la irrigación agrícola.

Sala y colaboradores presentan una evaluación de la calidad del agua y la biota de los humedales del Parque Natural del Alto Empordà, Girona, España (Sala et al, 2003). El análisis muestra la recuperación de estos humedales gracias a la reutilización de aguas regeneradas procedentes de la EDAR de Empuriabrava. Recientes resultados han demostrado la alta eficiencia del SRRAR. El sistema ha sido evaluado determinando la carga contaminante del nitrógeno a la llegada y salida del sistema, ya que este contaminante afecta sensiblemente a la biota de los humedales. Así pues, las cargas nitrogenadas a la salida del sistema son notablemente más bajas que a la entrada del mismo. Mientras que en el mes de febrero el caudal de agua es muy bajo, lo que favorece la eficiencia, solamente el mes de junio (época de transición de la primavera al verano) presenta problemas para lograr una alta nitrificación.

#### **4.2.3.1.6 Educación.**

Este grupo tiene por una parte, el considerar los cambios de conducta de los operadores de plantas depuradoras al proveer una materia prima como es el agua regenerada. La idea parte del hecho de que las demandas de exigencia por el cliente de agua regenerada provocaran cambios de actitud en los trabajadores, puesto que están sujetos a una supervisión y control

más riguroso, lo que repercute en la producción de agua de buena calidad de manera constante.

Por otro lado, el contar con sistemas de regeneración ejemplares, así como con personal calificado permite tener un capital educativo de primer nivel, donde se busque sensibilizar a la ciudadanía de la importancia de estas acciones. Los impactos que componen este grupo son: a) la educación técnica y b) la cultura del agua.

a) Educación técnica

El lograr una mayor eficiencia de las estaciones depuradoras tiene repercusiones en el ámbito ambiental, un personal responsable y profesionalizado permite también una reducción de costes en la explotación y mantenimiento de estas estaciones.

Debe tenerse en cuenta que el cambio de conducta de los operadores de los sistemas de regeneración tiene algunas implicaciones económicas, como pueden ser las inversiones en cursos de capacitación especializada.

b) Cultura del agua

Por otra parte, la infraestructura implantada para la regeneración y reutilización del agua residual, forma un patrimonio que junto con su personal, puede ser utilizado con fines didácticos para el cuidado del medio ambiente.

El desarrollo de planes y programas de visitas guiadas para diferentes sectores de la población, puede contribuir en el mediano y largo plazo a un aumento de la demanda de agua regenerada, debido a la sensibilización del público de una región determinada.

El impulso de un programa de sensibilización a la población, conlleva inversiones en personal capacitado para el área de comunicación social y la elaboración de material didáctico, además de gastos en difusión e implantación del programa, así como gastos de transporte.

A continuación se describen algunas de las investigaciones que han indagado sobre los impactos de la educación en los proyectos y programas de regeneración y reutilización de aguas residuales.

Andrade (1996) expone que la educación e información pública son cuestiones claves para captar clientes al implantar un programa de reutilización de aguas regeneradas. La implicación temprana de estos clientes da un plazo para disipar cualquier duda o idea mal juzgada, con el fin de lograr la aceptación y la participación en el programa. Los autores discuten las cinco

principales áreas de la educación pública en el ámbito de los SRRAR: 1) la definición del agua regenerada, 2) la demostración del nivel de la calidad del agua regenerada, 3) la discusión de las ventajas del agua regenerada, 4) la discusión de las ventajas ambientales por el uso de agua regenerada, y 5) Las medidas de seguridad en el uso del agua regenerada.

Grebbien y Sheikh (1996), presentan el caso de un estudio aplicado en un distrito de agua de los EE.UU., donde se analizan los esfuerzos realizados para superar la resistencia al cambio sobre 100 clientes que sustituyeron el agua potable por agua regenerada. Estos esfuerzos incluyeron seminarios educativos y talleres, incentivos financieros, asistencia técnica, modificaciones técnicas del proceso, y en los casos excepcionales, el cambio de la calidad del agua regenerada. El acuerdo definitivo para sustituir el agua potable por agua regenerada fue la perseverancia y la minimización de las legítimas preocupaciones de los usuarios. La estrategia final, la cual consistía en imponer los usos de agua regenerada mediante normativas no fue necesaria.

Los responsables de los SRRAR son regularmente bien entrenados sobre el proceso del tratamiento y las medidas de seguridad que deben seguir para el manejo del agua regenerada, mientras que los usuarios que reutilizan el agua regenerada, como son los agricultores, a menudo desconocen las características del agua regenerada y las prácticas de seguridad para su manejo. Las autorizaciones o permisos para la reutilización de agua regenerada deberían establecer lineamientos sobre los fundamentos de la reutilización de agua regenerada, así como, las normas de uso con el fin de proteger la salud de los trabajadores, del público y del ambiente. En algunos casos es necesario el entrenamiento para los trabajadores de la irrigación en el uso y la gestión del agua regenerada. McHaney (1996), describe un programa de educación para los trabajadores que tienen contacto con el agua regenerada, este programa detalla las ventajas del agua regenerada, su fuente y tratamiento, el uso y los requisitos para obtener el permiso de utilización, este programa tiene como finalidad promover una mejor comprensión de las ventajas de reutilizar el agua regenerada.

Roetzel (1998) describe un SRRAR implantado en una nueva escuela de San Antonio, Texas. Este sistema esta formado por sedimentación primaria, humedales de flujo sub-superficial y superficiales para el tratamiento secundario y un sistema de filtros de arena para pulir el efluente. El agua se desinfecta y almacena en unas lagunas para su posterior reutilización en el riego de áreas verdes. El SRRAR se implanto como parte de un plan educativo que permitiera a los estudiantes experimentar el funcionamiento de un sistema de regeneración y reutilización.

El distrito de agua del rancho de Irvine (IRWD, 2003) en California, proporciona el servicio de suministro de agua y alcantarillado. Wegner-Gwidt (CCME, 2002) considera que la manera de alcanzar la satisfacción de los clientes consumidores de agua regenerada es a través de un programa de comunicación social y educación. Argumenta que el éxito en el proceso de

comunicación social y educación se logra desarrollando una serie de actividades de educación e información, compartiendo la toma de decisión y responsabilidades para la solución del problema, y manteniendo la ayuda de la comunidad. Estas actividades necesitan ser apoyadas con un programa educativo, que requiere del conocimiento del sistema educativo, así como de mantener buenas relaciones con los medios de comunicación.

Una vez identificados los impactos del proyecto así como los agentes implicados, la siguiente etapa del análisis consiste en identificar la relación de impactos para ubicarlos en el tiempo, cuantificarlos y valorarlos.

#### **4.2.3.2 Periodicidad de los impactos**

Cada uno de los agentes involucrados en el proyecto recibe determinados impactos que es preciso ubicar a lo largo de la vida útil del SRRAR. Dado que el agente busca obtener cuanto antes un beneficio y cuánto más tarde incurrir en un coste, por esta razón es importante considerar la fecha en que se produce cada impacto.

#### **4.2.3.3 Cuantificación de los impactos**

Algunos de estos impactos se pueden cuantificar directamente en unidades monetarias. Sin embargo, con frecuencia será necesario traducir – aunque sea tentativamente- los aspectos biofísicos y sociales en valores monetarios, con el fin de trabajar en unidades homogéneas que permitan agregar la totalidad de costes e ingresos del SRRAR.

Así pues, es necesario definir las unidades que estos aspectos biofísicos y sociales tienen para cada uno de los impactos estudiados. Estas unidades posteriormente serán la base para la valoración económica. La tabla 4.2 presenta los diferentes impactos que han sido identificados, así como las unidades en las que se sugiere sean cuantificados.

Todas estas unidades de cuantificación deberán ser referenciadas a un tiempo establecido en la periodicidad de los impactos, con el fin de homogenizar los resultados se propone que todo este referenciado anualmente. La cuantificación de cada impacto puede dividirse entre el caudal anual de agua regenerada; de esta forma el resultado quedará expresado por metro cúbico de agua regenerada.

#### **4.2.3.4 Valoración de los impactos**

A partir de las cantidades para cada impacto y su periodicidad, sólo falta una indicación de valor relativo. Por una parte, tenemos la valoración directa en términos económicos a partir de



los costes e ingresos privados, esta información refleja el valor monetario de los bienes y servicios en los mercados actuales.

Tabla 4. 2

Unidad de la cuantificación biofísica o social de los impactos identificados (elaboración propia).

Grupo de Impacto	Impacto Implicados	Unidades de la Cuantificación biofísica o social.
Infraestructura Hidráulica	La captación y almacenamiento de agua	m <sup>3</sup> de agua
	La potabilización de agua de abastecimiento.	
	La conducción y transporte de agua potable.	
	La rehabilitación y ampliación de las redes de alcantarillado.	
	El tratamiento y/o vertido del agua residual.	
	La regeneración y reutilización del agua residual.	
Acondicionamiento y reutilización de contaminantes	El nitrógeno	kg de N aprovechable
	El fósforo	kg de P aprovechable
	Los fangos	kg de Fango aprovechable <sup>(a)</sup>
	La energía	watt producidos
Uso del recurso	La cantidad de agua.	m <sup>3</sup> de agua
	Las garantías de suministro.	% de confiabilidad
	La calidad del agua.	kg de contaminante <sup>(b)</sup>
La salud pública	Los riesgos Biológicos	Personas expuestas
	Los riesgos Físico-Químicos	
	Los riesgos en los SRRAR	
Medio ambiente	El agua superficial.	m <sup>3</sup> de agua
	El agua subterránea.	m de nivel freático <sup>(c)</sup>
	La contaminación de las masas de agua.	kg de contaminante eliminado <sup>(d)</sup>
	El hábitat de humedales y ríos.	Individuos existentes <sup>(d)</sup>
Educación	Técnica.	% de eficiencia <sup>(e)</sup>
	Cultura del agua.	Personas <sup>(f)</sup>

(a) La cantidad de fango aprovechable puede ser referenciada a alguno de sus constituyentes, por ejemplo: nitrógeno, fósforo, materia orgánica, etc.

(b) Siempre que la unidad de determinación analítica sea másica, de lo contrario será la unidad en la cual se realiza la determinación. Por ejemplo las bacterias presentes en el agua se miden por UFC (Unidades Formadoras de Colonias).

(c) Unidad de referencia para evaluar el incremento o disminución del recurso hídrico en un acuífero.

(d) En el caso del hábitat de humedales y ríos, alternativamente pueden utilizarse para la valoración de uso de un bien ambiental el número de personas que usa dicho bien ambiental.

(e) Capacidad del personal por mantener los niveles de calidad establecidos en la producción del agua regenerada

(f) Personas que son sensibilizadas con la práctica de regenerar y reutilizar agua residual.

Así mismo, existen una serie de impactos externos, para los que no existe un mercado explícito y en el caso de que el mercado exista, este se encuentra distorsionado. Por lo tanto, los impactos no cuentan con una valoración apropiada. Para lograr la valoración de estos impactos externos, existen diferentes técnicas entre las que se deberá escoger la más adecuada a cada problema específico.

Estos métodos de valoración económica suelen partir, bien de datos o escenarios hipotéticos o, bien de comportamientos observados en mercados relacionados. La tabla 4.3 resume estas técnicas de valoración. Es importante dejar claro que, no es el objetivo de este trabajo el análisis de estas técnicas.

Sin ser un objetivo de este capítulo los métodos de valoración ambiental, consideramos útil, presentar una panorámica simplificada sobre las aplicaciones empíricas más frecuentes de estos métodos sobre los problemas ambientales, directa o indirectamente relacionados con el sector hidráulico. La tabla 4.4 agrupa ese tipo de aplicaciones, sin pretender ser más que una

muestra significativa, pero no exhaustiva de algunos de los trabajos específicos de la aplicación de estas técnicas a problemas relacionados con el uso del agua.

Tabla 4. 3  
Técnicas de valoración económica (Edwards-Jones et al, 2000).

Grupo de Metodologías	Técnica de valoración	Abreviatura
Aproximaciones al mercado convencional	Cambio en la Producción o aproximación a la función de producción	CP
	Aproximación al Coste de Oportunidad	CO
	Aproximación Dosis-Respuesta	DR
	Gastos de Defensa o prevención	GD
	Coste de Reemplazo o restauración	CR
	Proyecto Sombra	PS
	Coste Sustituto	CS
Mercados Implícitos	Coste Eficiencia	CE
	Precios Hedónicos	PH
	Salario Diferencial	SD
Mercados Construidos	Coste de Viaje	CV
	Mercado Artificial	MA
No económicos	Valoración Contingente	VC
	Análisis Multicriterio	AM
	Delphi	D
	Evaluación de Impactos Ambientales	EIA
	Programación Lineal	PL

Tabla 4. 4  
Valoraciones económicas sobre impactos relacionados con el agua (elaboración propia).

Impacto	Unidad de medida	Método <sup>(a)</sup>	País	Referencia
calidad de la agua subterránea	Coronas suecas / kg N	CR	Suecia	Gren, 1995
Mantenimiento de humedales	Dólares canadienses / actividad lúdica (caza o pesca)	PM	Canadá	McNaughton, 1995
Asignación de agua	USD / acre USD / visitante USD / vivienda	PM	EE.UU.	Piper, 1997
Sequía	USD / acre-pie	CP	EE.UU.	Booker, 1995
Contaminación por la práctica agrícola	USD / acre <sup>(b)</sup>	PR	EE.UU.	Cooper, 1997
Calidad del agua de baño en playa	Aumento en el consumo por mejoría en la calidad del agua de la playa	PR	UK	Hanley, et al, 2001
Caudal ecológico	USD / familia-año	VC	EE.UU.	Berrens, et al, 2000
Garantía en el suministro de agua	USD / mes <sup>(b)</sup>	VC	EE.UU.	Griffin y Mjelde, 2000
Contaminación de aguas superficiales	USD / familia-mes <sup>(b)</sup>	VC	EE.UU.	Loomis, et al, 2000
Contaminación de aguas subterráneas	USD / familia <sup>(b)</sup>	VC	EE.UU.	Poe y Bishop, 1999
Uso recreativo de agua superficial	Libras / familia - año	VC	UK	Bateman et al, 2001
Calidad del agua costera	Libras / usuario <sup>(b)</sup>	VC	UK	Georgiou, et al, 2000
Contaminación de aguas superficiales	USD / propiedad <sup>(b)</sup>	PH	EE.UU.	Boyle, et al, 1999
Valor del agua en la agricultura	USD / acre-pie	PH	EE.UU.	Faux, y Perry, 1999
Calidad microbiológica del agua costera	USD/carga microbiológica	PH	EE.UU.	Leggett et al, 2000
Calidad estética del agua superficial	USD / metro	PH	EE.UU.	Poor, et al, 2001
Calidad fisicoquímica del agua costera	Yen Japonés / usuario <sup>(b)</sup>	CV	Japón	Kawabe y Oka, 1996
Usos del agua superficial	USD / acre-pie	CV	EE.UU.	Ward, et al, 1996
Uso recreativo del agua	Dólar canadiense / ha	CV	Canadá	Boxall, et al, 1996
Contaminación y uso recreativo del agua	Peso filipino / familia - mes <sup>(b)</sup>	CV	Filipinas	Choe, et al, 1996
Uso recreativo del agua	USD / viaje <sup>(b)</sup>	CV	EE.UU.	Kaoru et al, 1995
Uso recreativo del agua	USD / viaje <sup>(b)</sup>	CV	EE.UU.	Parsons, et al, 2000
Uso recreativo del agua	USD / viaje <sup>(b)</sup>	CV	EE.UU.	Train, 1998
Contaminación y uso del agua y suelo	Francos Suizos	MM	Suiza	Goetz y Xabadía, 2000
Contaminación del agua en agricultura	Libras	PM	UK	Pretty et al, 2000
Contaminación y uso recreativo del agua en humedales	USD / ha-año	CV, CR	Canadá	Turner et al, 2003

(a) CR.- Coste de Reemplazo, PM.- Precio de mercado, CP.- Cambio en la productividad, PR.- Preferencias Reveladas, VC.- Valoración Contingente, PH.- Precios Hedónicos, CV.- Coste de Viaje, DR.- Dosis-Respuesta, MM.- Meta-Modelo.

(b) Expresado como la disponibilidad a pagar

#### 4.2.4 Identificación de los agentes implicados

Una vez que se han identificado los impactos del sistema se estará en la posibilidad de reconocer los agentes involucrados. De manera general, dentro del contexto de los SRRAR existen principalmente dos tipos de agentes: 1) Instituciones del agua o entidades gubernamentales y 2) Usuarios del agua.

Es importante en este punto que además de identificar a los agentes, se defina que agente en concreto es con respecto al que se realiza la evaluación, pues de ello dependerá el tratamiento que se le dé a la información y los impactos que serán tomados en cuenta.

#### 4.2.5 Estudio de las necesidades y posibilidades financieras

De poco sirve el SRRAR más rentable que pueda imaginarse si no se puede financiar. Por lo cual es necesario considerar los costes financieros que implica la implantación y ejecución del proyecto, de lo contrario un excelente SRRAR desde el punto de vista técnico, sin tener en cuenta su financiación, sea inviable económicamente al incorporar los costes financieros. Determinar las fuentes y condiciones de financiamiento es un punto importante que deberá tomarse en cuenta antes de la agregación de los costes, así mismo las condiciones de financiamiento deben contemplarse como variables dentro del análisis de sensibilidad.

#### 4.2.6 Agregación de costes e ingresos

En esta etapa, la agregación de los costes e ingresos nos permitirá llegar a una decisión sobre invertir o no en el SRRAR. Es importante tener claro en todo momento, que los costes e ingresos varían a lo largo de la vida útil del proyecto razón por la cual deberán ser homogenizados para poder ser comparables. En la metodología aquí expuesta se propone expresar los costes e ingresos de tal manera que los resultados obtenidos sean en Unidades Monetarias por Unidad de Volumen (U.M./m<sup>3</sup>). Entendiendo que el ingreso es cualquier ganancia en utilidad (bienestar) y el coste es cualquier pérdida de la utilidad del proyecto.

- **Beneficio Total.**

El objetivo central del análisis económico del SRRAR es la maximización del beneficio total. Esta maximización se obtiene de los beneficios privados, los beneficios de las externalidades y el coste de oportunidad, de tal forma que la función objetivo a maximizar es:

$$MAX B_T = B_p + B_E - CO \quad (2)$$

De donde:

$B_T$  = Beneficio Total (Ingresos totales – Costes totales)

$B_P$  = Beneficio Privado (Ingresos privados – Costes privados)

$B_E$  = Beneficio de las Externalidades (Ingresos externalidades – Costes externalidades)

$CO$  = Coste de Oportunidad

- **Beneficio Privado.**

El beneficio privado se obtiene de restar los costos privados ( $CP$ ) al Ingreso Privado ( $IP$ ). Este ingreso es resultado a su vez del producto entre Precio de Venta del Agua Regenerada y el Volumen de Agua Regenerada. Por otro lado, los Costes Privados están formados por la suma de los Costes de Inversión, conjunto de asignaciones que es necesario realizar para conformar la infraestructura física SRRAR ( $CI$ ), los Costes de Explotación y Mantenimiento, que son aquellos costes producto del funcionamiento del SRRAR, siendo los más importantes la mano de obra, la energía, los reactivos químicos y los materiales fungibles ( $CEM$ ), los Costes Financieros ( $CFin$ ) e Impuestos ( $I$ ). Estos costes consideran tanto los costes de producción, como los que se generan por poner el producto (agua regenerada) en el punto de uso (reutilización).

Ahora bien, el problema al que nos enfrentamos con frecuencia es que no existe propiamente un mercado para el agua regenerada y, por tanto, no se dispone de un precio, o en el mejor de los casos, cuando se conoce un precio del agua, este se encuentra distorsionado y en la mayoría de las ocasiones no se consigue la recuperación de los costes.

Por esto, una alternativa para resolver este problema es determinar el coste por metro cúbico, el cual lo consideramos igual al Precio Mínimo de Venta ( $PMV$ ) que garantice la recuperación de los costes.

El  $PMV$  se define como el precio mínimo al cual el agente debe vender el agua regenerada para garantizar la recuperación de los costes y el beneficio esperado, de tal forma que la inversión realizada sea rentable bajo el criterio del Valor Actual Neto ( $VAN$ ). En un proceso de optimización y cuando el mercado presenta condiciones de competencia perfecta, se puede considerar a este coste por metro cúbico como una aproximación del Coste Marginal ( $CMg$ ).

Para obtener el  $PMV$  hemos decidido recurrir a la técnica económica del Valor Actual Neto ( $VAN$ ). Acorde con Tietenberg (1992) la eficiencia se alcanza cuando el ingreso marginal iguala al coste marginal, lo que es equivalente a decir que el beneficio neto es igual a cero. Bajo este criterio buscamos determinar aquel  $PMV$  que satisfaga la condición de un  $VAN$  igual a cero. La figura 4.5 detalla el algoritmo utilizado para la determinación de  $PMV$ .

Una vez que se ha caracterizado el agua residual y que se ha establecido el nivel de calidad del agua regenerada que se desea obtener (objetivo de calidad), se abre un abanico de posibilidades tecnológicas para lograr transformar el agua residual en agua regenerada.

El problema al que se enfrenta el tomador de decisiones es a la selección de la tecnología más idónea. Así, cuando un mismo objetivo de calidad del agua se alcanza con dos o más alternativas tecnológicas, la decisión racional para la selección será por la alternativa menos costosa monetariamente.

Como un primer paso para seleccionar la tecnología más adecuada, que permita reducir significativamente el universo de alternativas a evaluar, se propone utilizar el análisis coste-eficiencia (Hartwick, 1998, OCDE, 2002). Este método valora monetariamente los costes privados del SRRAR y los compara entre ellos, siempre y cuando tengan el mismo nivel de eficiencia. Dejando al responsable de la toma de decisión el optar por un determinado nivel de efectividad. El criterio de selección estará dado por aquel SRRAR que presente el coste más bajo para una predeterminada exigencia de calidad del agua a reutilizar.

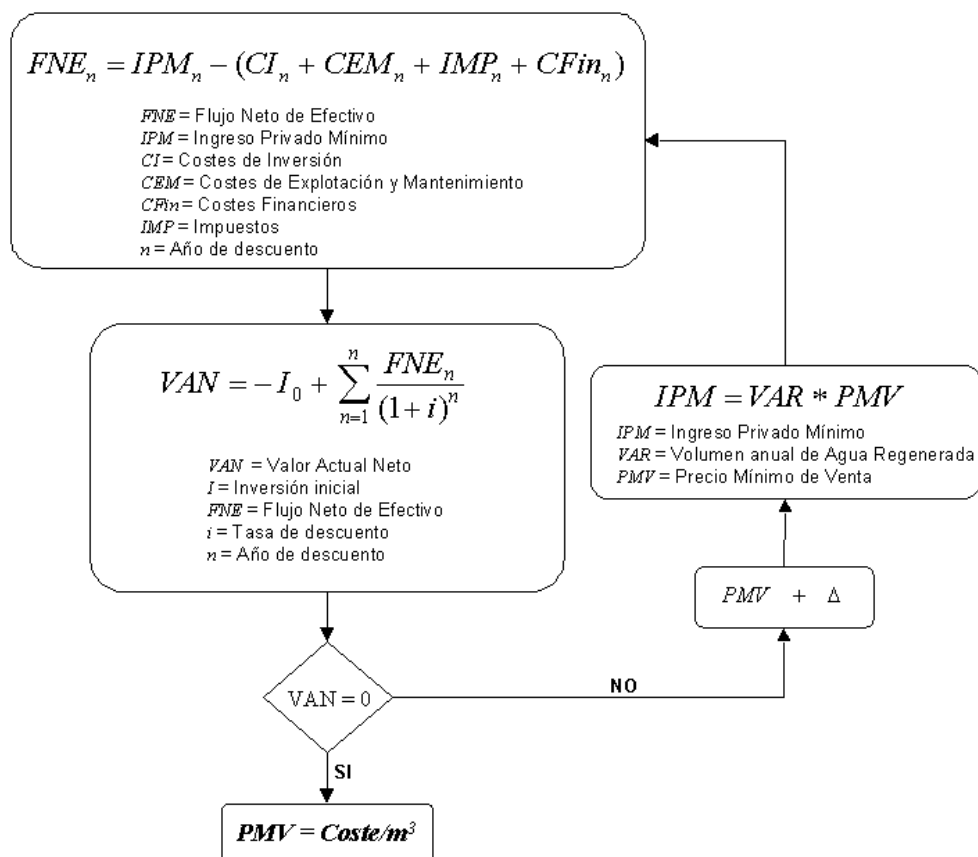


Figura. 4. 5 Algoritmo para la determinación del Coste por Metro Cúbico. (elaboración propia)

De tal forma, una vez establecido un criterio de calidad del agua para reutilizar, la tecnología seleccionada será la que presente el menor coste por metro cúbico ( $Coste/m^3$ ), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Coste_i / m^3 = \underset{i=1...T}{Min} \{ Coste_1 / m^3, Coste_2 / m^3, \dots, Coste_T / m^3 \}$$

Siendo  $\{ Coste_1/m^3, Coste_2/m^3, \dots, Coste_T/m^3 \}$  el conjunto “t” de tecnologías con un mismo nivel de efectividad. La manera de determinar este coste por metro cúbico es el descrito en el algoritmo de la figura 4.5.

Es importante dejar claro que, la técnica de coste-eficiencia ha sido elegida debido a que el objetivo es cuantificable, con la ayuda de un indicador de eficiencia expresado en unidades de calidad del agua. Del análisis coste-eficiencia se obtiene un coste por unidad de volumen, sin embargo, esta técnica económica no da respuesta a la pregunta de saber si este resultado justifica el coste, esto solo se puede responder mediante la determinación del Beneficio Total ( $B_T$ ). De tal forma que el Beneficio Privado estará dado por:

$$B_p = \sum_{n=0}^n [(VAR_n * PV_n) - (CI_n + CEM_n + CFin_n + IMP_n)] \quad (3)$$

De donde:

$B_p$  = Beneficio Privado

$VAR$  = Volumen anual de Agua Regenerada

$PV$  = Precio de Venta del Agua Regenerada

$CI$  = Costes de Inversión

$CEM$  = Costes de Explotación y Mantenimiento

$CFin$  = Costes Financieros

$IMP$  = Impuestos

$n$  = Año

Los impuestos aquí considerados, se refieren al pago del gravamen fiscal según la base impositiva correspondiente a una empresa privada que proporciona el servicio de regenerar agua residual y/o distribuir agua regenerada.

Para el cálculo de los impuestos es necesario considerar la amortización o depreciación del capital invertido. Es importante tener presente que, estas amortizaciones sólo son útiles para determinar el beneficio a efectos fiscales y prever los pagos impositivos que correspondan y en consecuencia, para conocer la rentabilidad privada que obtendrá un agente individual determinado (Pasqual, 1999).

Siempre que se obtenga un Beneficio Privado ( $B_p$ ) mayor de cero será garantía de que el SRRAR es operativo económica y financieramente desde el punto de vista privado.

- **Beneficio de Externalidades.**

Además del beneficio privado, esta metodología considera incorporar las externalidades tanto positivas como negativas, en concordancia con las nuevas tendencias para el análisis económico en el sector hidráulico (Renzetti, 2003, Louis y Siriwadana, 2001).

Estas externalidades se obtienen a partir de los impactos positivos y/o negativos que se generan con la implantación y explotación del SRRAR. Estos impactos han sido descritos detalladamente en el apartado 4.2.3, mismos que deberán ser ubicados a lo largo de la vida útil del proyecto, cuantificados y valorados en unidades monetarias.

De manera que el Beneficio de las Externalidades ( $B_E$ ) estaría dado por:

$$B_E = \sum_{n=0}^n (EP_n - EN_n)$$

tal que 
$$EP = \sum_{j=1}^J (ep_j) \quad ; \quad EN = \sum_{j=1}^J (en_j) \quad \text{Para } j = 1 \dots J \text{ impactos} \quad (4)$$

y de donde:

- $B_E$  = Beneficio de las Externalidades
- $EP$  = Externalidades Positivas del impacto  $ep_j$
- $EN$  = Externalidades Negativas del impacto  $en_j$
- $n$  = Año

Las Externalidades Positivas ( $EP$ ) están dadas por la sumatoria de todas las ventajas. Estos impactos externos positivos deberán ser identificados, cuantificados y valorados económicamente en términos monetarios.

Las Externalidades Negativas ( $EN$ ) son aquellos impactos negativos del proyecto expresados en unidades monetarias, en el caso de las  $EN$  su valor será mayor o igual al Coste Ambiental ( $CA$ ) de la tecnología seleccionada. Esto es,

$$EN \geq CA_i$$

Consideramos como Coste Ambiental de la tecnología seleccionada ( $CA_i$ ), aquellos impactos negativos producto de la implantación del SRRAR. De manera genérica los  $CA$  para los SRRAR están dados por:

1. El nulo o inadecuado tratamiento y disposición de los fangos.
2. La afectación ambiental de la zona por la implantación y explotación del SRRAR, como es la contaminación por olor y ruido. Esta afectación ambiental puede verse reflejada en la disminución del valor de la propiedad de los terrenos cercanos a las instalaciones de regeneración.
3. Los riesgos de salud pública por el contacto con el agua regenerada o algún subproducto.
4. Los riesgos de salud de los trabajadores de los SRRAR por el contacto con el agua regenerada o algún subproducto.
5. La afectación a terceros por la disminución de caudales aguas abajo del vertido a causa de la eliminación o reconducción del vertido.
6. La utilización de tecnologías con un alto consumo energético.

Los beneficios por las externalidades ( $B_E$ ), al igual que los beneficios privados ( $B_P$ ), pueden presentarse de manera irregular a lo largo de la vida útil del proyecto, por esta razón deberán ser anualizados constantemente a lo largo del tiempo que dure el proyecto, de tal forma que el Beneficio de las Externalidades sea expresado en U.M./m<sup>3</sup> de agua reutilizada, con el fin de hacerlo equiparable al Beneficio Privado.

- **Coste de Oportunidad.**

El concepto económico más fundamental del coste de oportunidad es el valor de un bien cuando se renuncia a su uso alternativo (Pearce, 1983). El coste de oportunidad solamente puede presentarse en un mundo donde los recursos disponibles son limitados de modo que no todos pueden quedar satisfechos. Si los recursos fueran ilimitados todos podrían satisfacer su necesidad y el coste de oportunidad sería cero. Aunque la terminología varía, es útil hablar de coste de oportunidad “privado” en los casos donde se renuncia a las ventajas privadas de una acción; y coste de oportunidad “social” cuando la gama de ventajas a las que se renuncia es mucho más amplia.

Así pues, el Coste de Oportunidad ( $CO$ ) para los SRRAR puede obtenerse a partir de dos condiciones principalmente:

1. Cuando existan varias alternativa para la reutilización del agua regenerada, el coste de oportunidad estará dado por aquel uso que proporcione el mayor rendimiento económico, siempre y cuando estos rendimientos sean más altos que los de un instrumento financiero.



2. Cuando no se cuente con usos alternativos para la reutilización del agua producida, el coste de oportunidad estará dado por el rendimiento que proporcione algún instrumento financiero al invertir los costes de inversión, explotación y mantenimiento en este.

En particular, es importante destacar la necesidad del análisis en el coste de oportunidad del terreno destinado a la implantación del SRRAR, ya que tradicionalmente los terrenos seleccionados para la construcción de una estación de regeneración son considerados a coste cero, pues normalmente son terrenos cedidos por los gobiernos municipales, sin embargo, estas superficies en algunas ocasiones pueden tener usos alternativos que presenten una mayor rentabilidad.

Una vez determinados los beneficios privados, los beneficios de las externalidades y el coste de oportunidad, estos deberán ser conjuntados para determinar el beneficio total del proyecto, dando como resultado si el proyecto es viable económica y ambientalmente.

Substituyendo las ecuaciones 3, 5 y el  $CO$  en la ecuación 2 se obtiene la función objetivo final del SRRAR a optimizar:

$$MAX B_T = \sum_{n=0}^n [(VAR_n * PV_n) - (CI_n + CEM_n + CFin_n + IMP_n) + (EP_n - EN_n) - CO_n] \quad (1)$$

Es significativo destacar, que la exactitud del resultado es cuestionable en la realidad debido a que algunas de las variables pueden ser valores aproximados. De aquí, que la mejora para evaluar los impactos relacionados con la regeneración y reutilización de las aguas residuales se produce no solamente mediante avances metodológicos, sino también en la cantidad y calidad de los datos utilizados. Esta mejora en la información es la que permitirá una toma de decisión mejor fundamentada. Para reforzar la validez de la investigación esta metodología considera el análisis de sensibilidad como un instrumento que disminuya el riesgo en la decisión.

A manera de resumen, la tabla 4.5 recoge toda la información que deberá ser registrada para determinar los costes e ingresos que están relacionados con el SRRAR. Esta tabla permitirá visualizar de manera sistemática y sintética la información existente, de tal forma que se pueda acceder hasta la obtención del valor en unidades monetarias de todos los impactos relacionados con el SRRAR. Es importante dejar claro que esta tabla tiene un carácter meramente didáctico, ya que cada SRRAR a ser analizado presentará particularidades que matizarán su aplicación.

#### 4.2.7 Análisis de sensibilidad

Finalmente es necesario evaluar la robustez que el proyecto tiene ante los posibles cambios en las variables económicas más importantes. El análisis de sensibilidad tiene como objetivo el observar como se modifica el resultado al variar marginalmente y por separado, el valor de cada uno de los parámetros que intervienen en el cálculo. Las posibles variables para realizar un análisis de sensibilidad son: 1) la tasa de descuento, 2) las condiciones del financiamiento, 3) el coste de oportunidad, 4) los costes de energía y reactivos y 5) el precio del agua regenerada, entre otras.

Tabla 4. 5  
Resumen para el análisis técnico-económico de los impactos del SRRAR (elaboración propia).

Grupo de Impacto	Impacto Implicados	Identificación (a)	Periodicidad (b)	Unidades de la Cuantificación (c)	Técnica de Valoración Monetaria (U.M./m <sup>3</sup> ) <sup>(d) (e)</sup>	
					Negativo (Costes)	Positivo (Ingresos)
Infraestructura Hidráulica	La captación y almacenamiento de agua	apartado 4.2.3.1.1	Inversión Inicial y durante la vida útil de proyecto	m <sup>3</sup> de agua	PM, CE, CO	
	La potabilización de agua de abastecimiento.					
	La conducción y transporte de agua potable.					
	La rehabilitación y ampliación de las redes de alcantarillado.					
	El tratamiento y/o vertido del agua residual.					
	La regeneración y reutilización del agua residual.					
Acondicionamiento y reutilización de contaminantes	El nitrógeno	apartado 4.2.3.1.2	Durante la vida útil de proyecto	kg de N aprovechable		CS
	El fósforo			kg de P aprovechable		
	Los fangos			kg de Fango aprovechable		
	La energía			watt producidos		
Uso del recurso	La cantidad de agua.	apartado 4.2.3.1.3	Durante la vida útil de proyecto	m <sup>3</sup> de agua	CO	CP, PH, CV
	Las garantías de suministro.			% de confiabilidad		VC
	La calidad del agua.			kg de contaminante		VC, CV, GD, PS
La salud pública	Los riesgos Biológicos	apartado 4.2.3.1.4	Durante la vida útil de proyecto	Personas expuestas		DR
	Los riesgos Físico-Químicos					DR
	Los riesgos en los SRRAR					DR
Medio ambiente	El agua superficial.	apartado 4.2.3.1.5	Durante la vida útil de proyecto	m <sup>3</sup> de agua		VC, CV, PH
	El agua subterránea.			m de nivel freático		CS
	La contaminación de las masas de agua.			kg de contaminante eliminado		CR, VC, CV, PH
	El hábitat de humedales y ríos.			Individuos existentes		CV
Educación	Técnica.	apartado 4.2.3.1.6	Durante la vida útil de proyecto	% de eficiencia		DR, CP
	Cultura del agua.			Personas		
<b>TOTAL</b>					<b>Σ Costes</b>	<b>Σ Ingresos</b>
(a) apartado 4.2.3.1 (b) apartado 4.2.3.2 (c) apartado 4.2.3.3 (d) apartado 4.2.3.4 (e) PM.- Precio de mercado, CP.- Cambio en la productividad, CO.- Coste de Oportunidad, DR.- Dosis-Respuesta, GD.- Gastos de defensa o prevención, CR.- Coste de Reemplazo, PS.- Proyecto Sombra, CS.- Coste Sustituto, CE.- Coste Eficiencia, PH.- Precios Hedónicos, CV.- Coste de Viaje, VC.- Valoración Contingente.						

Una vez que las variables han sido modificadas y el Beneficio Total ( $B_T$ ) se mantiene positivo, podemos concluir que el proyecto evaluado goza de confianza para su implantación y explotación, pues todo parece indicar que a pesar de posibles escenarios pesimistas el proyecto continúa siendo rentable.

### 4.3 Conclusiones

Tradicionalmente el análisis económico-financiero de los SRRAR centraba su atención en los costes y beneficios privados del sistema, la metodología aquí desarrollada además de considerar estos impactos privados, incorpora las externalidades del proyecto a través del análisis de los impactos externos tanto positivos como negativos que afectan al mismo.

La metodología presentada esta adecuada a las particularidades de los SRRAR de tal forma que se convierte en una herramienta “a la medida”, que le permita al tomador de decisiones emitir un juicio sobre la conveniencia o no de implementar este tipo de sistemas. Esta metodología evalúa los SRRAR, desde una perspectiva multidisciplinaria e interdisciplinaria. El objetivo principal es determinar la maximización de los beneficios del proyecto.

La metodología esta conformada por 7 pasos que deberán realizarse para su aplicación, los cuales son: 1) Definición de objetivos, 2) Definición del ámbito de estudio, 3) los impactos del proyecto, 4) Identificación de los agentes implicados, 5) Estudio de las necesidades y posibilidades financieras, 6) Agregación de costes e ingresos y 7) Análisis de sensibilidad.

Una de las aportaciones más importantes de esta metodología es lo referente a la Identificación de los impactos del proyecto, pues en este punto se describen a detalle los impactos, tanto positivos como negativos, relacionados con los SRRAR. Los 6 grupos de impactos descritos son: 1) Infraestructura hidráulica, 2) Acondicionamiento y reutilización de contaminantes, 3) Uso del recurso, 4) Salud pública, 5) Medio ambiente y 6) Educación. Esta información se fundamenta en una revisión bibliográfica, consulta a expertos y en la experiencia profesional.

Otra contribución importante es la concerniente a la agregación de los costes e ingresos, pues en este punto se establece que la maximización de los beneficios estará dada por la sumatoria de los beneficios privados y los beneficios de las externalidades. Esto permite visualizar dos situaciones por separado: 1) Que el SRRAR sea viable económica y financieramente para su funcionamiento, lo cual esta definido por la determinación del beneficio privado (situación que normalmente interesa a los técnicos y políticos); y 2) Que el SRRAR sea viable económica, financiera y ambientalmente (lo cual interesa a los economistas y la sociedad).

La metodología aquí descrita será aplicada para los casos de estudio presentados en los siguientes capítulos. Es importante mencionar que debido a problemas de oportunidad en la información así como su confidencialidad, se realizaron ajustes de manera tal que los datos pudieran adaptarse lo mejor posible a la metodología presentada en este capítulo.

### Anexo 4.A.

Tabla 4. 6  
Agentes infecciosos presentes en aguas residuales sin tratamiento (OMS, 2003)

Agente Patógeno	Enfermedad que causa
<b>Parásitos:</b>	
<b>Protozoarios:</b>	
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amibiasis (disentería amibiana)
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis
<i>Balantidium coli</i>	Balantidiasis (disentería)
<i>Cryptosporidium</i>	Cryptosporidiasis, fiebre, diarrea
<b>Helmintos:</b>	
<i>Ascaris lumbricoides</i> (gusanos redondos)	Ascariasis (lombriz intestinal)
<i>Ancylostoma spp.</i>	Larva cutánea inmigrante
<i>Ancylostoma dudodenale</i>	Anquilostomiasis
<i>Necator americanus</i>	Necatoriasis
<i>Strongyloides stercoralis</i>	Estrongiloidiasis
<i>Trichuris trichiura</i>	Tricuriasis
<i>Taenia spp.</i>	Teniasis
<i>Enterobius vermicularis</i>	Enterobiasis
<i>Echinococcus granulosus spp.</i>	Hidatidosis (fiebre hidatídica)
<b>Bacterias:</b>	
<i>Shigella spp.</i>	Shigelosis (Disentería bacilar)
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea
<i>Salmonella</i> (1700 serotipos)	Salmonelosis
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>Escherichia coli</i> (enteropatógena)	Gastroenteritis
<i>Yersinia Enterocolitica</i>	Yersiniosis
<i>Leptospira spp.</i>	Leptospirosis
<i>Legionella</i>	Enfermedad de los legionarios
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis
<b>Virus:</b>	
<i>Enterovirus</i> (72 tipos) (Polio, eco, coxsackie, enterovirus)	Gastroenteritis, anomalías cardíacas, meningitis
<i>Hepatitis A</i>	Hepatitis infecciosa
<i>Adenovirus</i> (47 tipos)	Enfermedades respiratorias, oculares
<i>Rotavirus</i> (4 tipos)	Gastroenteritis
<i>Parvovirus</i> ( 3 tipos)	Gastroenteritis
<i>Agentes Norwalk</i>	Diarrea, vómito y fiebre
<i>Reovirus</i> ( 3 tipos)	No establecido claramente
<i>Astrovirus</i> ( 5 tipos )	Gastroenteritis
<i>Calicivirus</i> ( 2 tipos )	Gastroenteritis
<i>Coronavirus</i>	Gastroenteritis

## Referencias

- Aguilera K. F. (1992). *Economía de los trasvases de agua: una aproximación al caso español. Economía del agua*, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaría General Técnica, DL 1992
- Andrade, A. J. (1996). Reclaimed Water Public Education and Awareness. Comunicación presentada en la conferencia Conserv 96. Orlando, Florida, EE.UU. Enero 4-8. pag. 453-455.
- Asano, T. (2001). "Water from (waste)water – The dependable water resource the dependable water resource (The 2001 Stockholm Water Prize Laureate Lecture)". *Water Science & Technology* Vol 45 No 8 pag 23–33
- Asano, T. (Editor) (1998). *Wastewater Reclamation and Reuse*. Vol. 10. Water Quality Management Library. Technomic Publishing Inc. Lancaster, PA EE.UU.
- Asano, T. y Mills R. (1990). "Planning and Analysis for Water Reuse Projects". *Journal American Water Works Association*. vol.82, no.1. pag.38-47.
- Bahri, A. (1999). "Agricultural Reuse of Wastewater and Global Water Management". *Water Science and Technology*. Vol. 40, no. 4-5, Pag. 339-346
- Barbagallo, S., Cirelli G.L., y Indelicato, S. (2001). "Wastewater reuse in Italy". *Water Science & Technology* Vol 43 No 10 pag. 43–50
- Bartlett J. y Killilea E. (2001). "The characterisation, treatment and sustainable reuse of biosolids in Ireland". *Water Science & Technology* Vol 44 No 10 pag. 35–40
- Bateman, I.J., I. H. Langford, y R.K. Turner (2001). "Valuation of the Recreational Benefits of a Proposed Sea Defence Scheme at Caister, East Anglia: A Contingent Valuation Study". Chapter 5, Section 5.3, en *Economics of Coastal Water Resources: Valuing Environmental Functions*. Kluwer, Dordrecht.
- Berrens, R. P., Bohara A. K., Silva C. L., Brookshire D., y McKee M. (2000). "Contingent Values for New Mexico Instream Flows: With Tests of Scope, Group-Size Reminder and Temporal Reliability". *Journal of Environmental Management* Vol. 58, no. 1 pag. 73-90
- Booker, J.F. (1995). "Hydrologic and Economic Impacts of Drought Under Alternative Policy Responses". *Water Resources* Vol. 31, no. 5, pag. 889-906
- Boxall, P.C., Watson D.O., y Englin J. (1996). Backcountry recreationists' valuation of forest and park management features in wilderness parks of the western Canadian Shield. *Canadian Journal of Forest Research* Vol. 26, No. 6, pag. 982-990
- Boyden, H. y Rababah, A. (1996). Recycling Nutrients From Municipal Wastewater. *Desalination: The International Journal on the Science and Technology of Desalting and Water Purification*. vol.106, no.1-3. pag. 241-246
- Boyle, K.J., Poor P. J., y Taylor L.O. (1999). "Estimating the Demand for Protecting Freshwater Lakes from Eutrophication". *American Journal of Agricultural Economics* Vol. 81, no.5 pag. 1118-1122
- Brent, J. (1996). *Applied Cost-Benefit Analysis*. Edward Elgar ed. Cheltenham, Reino Unido.
- CCME (2002). *Linking water science to policy workshop series water reuse and recycling*. Canadian Council of Ministers of the Environment. [http://www.ccme.ca/assets/pdf/water\\_reuse\\_wkshp\\_rpt\\_e.pdf](http://www.ccme.ca/assets/pdf/water_reuse_wkshp_rpt_e.pdf)
- Choe, K., Dale W., y Donald T. (1996). "The Economic Benefits of Surface Water Quality Improvements in Developing Countries: A Case Study of Davao Philippines". *Land Economics*, Vol. 72, no. 4, pag. 519-537.
- Chu W.H, Wang J.Y. y Kao C.M. (2003). "A simplified risk-based approach for process screening in municipal wastewater reclamation and reuse". *Water Science & Technology* Vol 47 No 1 pag. 257–262
- CNA. (2003). Consejos de Cuenca. Comisión Nacional del Agua. <http://www.cna.gob.mx/portal/switch.asp?param=5002>
- Cooper, J.C. (1997). "Combining Actual and Contingent Behavior Data to Model Farmer Adoption of Water Quality Protection Practices". *Journal of Agricultural and Resource Economics* vol. 22, no. 1, pag. 30-43
- Devaux I., Gerbaud L., Planchon C., Bontoux J. y Glanddier Ph.Y. (2001). "Infectious risk associated with wastewater reuse: an epidemiological approach applied to the case of Clermont-Ferrand, France". *Water Science & Technology* Vol 43 No 12 pag. 53–60

- Directiva CE, (2000). Directiva 2000/60/CE, Ed. OCDE
- Donovan, P. y Garvey, D. (1991). Sewage Sludge Utilization at a Superfund Site: From Financial Liability to Business Venture. Comunicación presentada en la conferencia Residuals Management: Residuals Management after 1991. agosto 11-14.
- Dourojeanni A. (1999). *Gestión de cuencas y ríos vinculados con centros urbanos*. Ed. CEPAL, Santiago, Chile.
- Edwards-Jones G, Davies G y Hussain S. (2000). *Ecological Economics*, Blackwell Science, Londres, Inglaterra.
- EPA (2002). Revision of National Recommended Water Quality Criteria: 2002. Environmental Protection Agency. <http://epa.gov/waterscience/criteria/wqctablefs2002.htm>
- EPA. (1998). Water recycling and reuse: the environmental benefits. Ed. Water Division Region IX. <http://www.epa.gov/region9/water/recycling/index.html>
- Faux, J. y Perry G. M. (1999). "Estimating Irrigation Water Value Using Hedonic Price Analysis: A Case Study in Malheur County, Oregon". *Land Economics* vol. 75, no.3, pag. 440-452
- Fields, L. Bogenrieder, P. Sebold, D. y Weinburg, K. (1997). Economic Evaluation of Local Water Resources. Comunicación presentada en la conferencia Water Resources; Water Resources Management: Preparing for the 21st Century; de la asociación American Water Works. Seattle, Washington, EE.UU. Agosto 10-13.
- Friedler E. (1999). "The Jeezrael Valley Project for Wastewater Reclamation and Reuse, Israel". *Water Science and Technology* Vol 40 No 4-5, pag. 347-354
- Funamizu N. y Ogoshi M. (2001). Reuse of Water and Heat Energy in Wastewater in Japan. Comunicación presentada en la conferencia: The 21st Century International Conference & Exhibition on Developing Strategy of Urban Wastewater Treatment and Reuse. noviembre 27-29, 2001, Beijing, China. <http://211.147.14.17/lianmeng/21cnwater/eng-art/2001/nf.htm>
- Georgiou, S., Bateman I.J., Langford I.H. y Day R.J. (2000). "Coastal bathing water health risks: developing means of assessing the adequacy of proposals to amend the 1976 EC directive". *Risk Decision and Policy*, Vol. 5, pag. 49-68
- Goetz R. y Xabadía A. (2000). El uso de meta modelos para la economía agraria ambiental – Teoría y ejemplos-. En Alvarez, A. (ed). *Economía agraria y recursos naturales. Nuevos enfoques y perspectivas*. Asociación española de economía. Madrid.
- Grace, N. y Gonzalez, A. (1993). Assessment of End User Market Constraints for the Distribution and Marketing of Biosolids Products. Comunicación presentada en la 68th conferencia Anual Water Resources Conference: Connecting With Customers--Building. Orlando, Florida. EE.UU. Noviembre 14-17.
- Grebien, V. y Sheikh, B. (1996). Overcoming Obstacles to Conversion of Water Customers From Potable to Recycled Water. Comunicación presentada en la conferencia Water Reuse. San Diego, California, EE.UU. Febrero 25-28.
- Gren, I.M. (1995). "The Value of Investing in Wetlands for Nitrogen Abatement". *European Review of Agricultural Economics* vol. 22 pag. 157-172
- Griffin, R. C. y J. W. Mjelde (2000). "Valuing Water Supply Reliability". *American Journal of Agricultural Economics*. vol. 82. pag. 414-426
- Hamouri B., Handouf A., Mekrane M., Touzani M., Khana A., Khallayoune K. y Benchokroun T. (1996). "Use of wastewater for crop production under arid and saline conditions: yield and hygienic quality of the crop and soil contaminations". *Water Science and Technology*. Vol 33, no. 10-11, pag. 327-334
- Hanley, N., Bell D. y Alvarez-Farzio B. (2001). Valuing the benefits of coastal water quality improvements using contingent and real behaviour. Comunicación presentada en el congreso mundial of Environmental and Resource Economists.
- Hartwick J. y Olewiler (1998). *The economics of natural resource use*. 2ª edición. Addison-Wesley. USA.
- Haruvy N. (1998). "Wastewater reuse—regional and economic considerations". *Resources, Conservation and Recycling*. Vol 23, no. 1-2, pag. 57-66
- Hook, M., Habraken, J., Gianatasio, J., y Hjersted, L. (1993). Benefits of Enhanced Coagulation for Improved Water Quality and Beneficial Reuse of Residual Materials. Comunicación presentada en la conferencia Water Quality Technology. Toronto, Ontario, Canada. noviembre 15-19, 1992.
- Idelovitch E., Icekson-Tal N., Avraham O. y Michail M. (2003). "The long-term performance of Soil Aquifer Treatment (SAT) for effluent reuse". *Water Supply* Vol 3 No 4 pag. 239-246

- IFA. (2003). Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes. <http://www.fertilizer.org/>
- IRWD (2003). Irvine Ranch Water District. <http://www.irwd.com/>
- Jaber J. O., Probert S. D. y Badr O. (1997). Water Scarcity: A Fundamental Crisis for Jordan. *Applied Energy*. Vol. 57, no. 2-3, pag. 103-127.
- Jones, T., Lowe, S., Formby, W. (1998). Evaluation of an Integrated Water Resource Plan for Pinellas County, Florida. Comunicación presentada en la conferencia Water Reuse. Lake Buena Vista, Florida, EE.UU. Febrero 1-4.
- Juanico M. y Friedler E. (1999). "Wastewater Reuse for River Recovery in Semi-Arid Israel". *Water Science and Technology* Vol 40 No 4-5 pag. 43-50
- Kamizoulis G., Bahri A., Brissaud F., y Angelakis A.N. (2003). Wastewater Recycling and Reuse Practices in Mediterranean Region: Recommended Guidelines. MED-REUNET Mediterranean Network on Wastewater Reclamation and Reuse. Case Studies <http://www.med-reunet.com/home.asp>
- Kaoru, Y., Smith V.K., y Liu J.L. (1995). "Using Random Utility Models to Estimate the Recreational Value of Estuarine Resources". *American Journal of Agricultural Economics* vol. 77, pag. 141-151.
- Katz R. (2003). Water Recycling 2030. Recycled Water Task Force. California Department of Water Resources. <http://www.owue.water.ca.gov/recycle/docs/FinalReport.pdf>
- Kawabe, M. y Oka T. (1996). "Benefit from Improvement of Organic Contamination of Tokyo Bay". *Marine Pollution* vol. 32, no. 11, pag. 788-793
- Lambert, B. y Nebeker, B. (1996). Compatibility of Agricultural and Suburban Interests: Agricultural Reuse of Reclaimed Water in the Antelope Valley, California. Comunicación presentada en la conferencia Water Reuse. San Diego, California, EE.UU. Febrero 25-28.
- Lazarova V., Levine B., Sack J., Cirelli G., Jeffrey P., Muntau H., Brissaud F., y Salgot M. (2001). "Role of water reuse for enhancing integrated water management in Europe and Mediterranean countries". *Water Science & Technology* Vol 43 No 10 pag. 25-33
- Leggett, C. G. y Bockstael N. E. (2000). "Evidence of the Effects of Water Quality on Residential Land Prices". *Journal of Environmental Economics and Management* vol. 39, no.2 pag. 121-144
- Lewin et al (2002). Mejora y mantenimiento de la calidad del agua en las metrópolis. Informe de la Comisión. World Association of the Major Metropolises. [www.metropolis.org](http://www.metropolis.org)
- Loomis, H., P. Kent, L. Strange, K. Fausch, y A. Covich (2000). "Measuring the Total Economic Value of Restoring EcoSystem Services in an Impaired River Basin: Results from a Contingent Valuation Survey". *Ecological Economics* vol. 33, pag. 103-117
- López G. J., Garciaecheverría I y Del río F. (1998). La reutilización integral de las aguas residuales urbanas de Vitoria-Gasteiz (España). *Ingeniería Civil*, No. 110. pag. 211-223.
- Louis, G. y M. Siriwardana (2001). "A Procedure for Calculating the Full Cost of Drinking Water" Comunicación presentada en la conferencia CEWorld-a virtual, organizado por la American Society of Civil Engineers. <http://www.ceworld.org/>
- Marecos do Monte M., Angelakis A. y Asano T. (1996). "Necessity and basis for establishment of European guidelines for reclaimed wastewater in the Mediterranean region". *Water Science and Technology* Vol 33 No 10-11 pag. 303-316
- McHaney, S. X. (1996). Development of a Recycled Water Irrigation Training Program for Sonoma Vineyards and Pasture. Comunicación presentada en la conferencia Water Reuse. San Diego, California, EE.UU. Febrero 25-28.
- McNaughton, R.B. (1995). "Economic Benefits of Sport Fishing and Hunting Near Irrigation Developments in Southern Alberta". *Canadian Water Resources Journal* vol. 20, no. 3, pag. 161-170
- Mills R.A. y Asano T. (1996). "A retrospective assessment of water reclamation projects". *Water Science and Technology*. Vol. 33, no. 10-11, pag. 59-70
- Mujeriego R. (1990). *Riego con agua residual municipal regenerada*; traducido y editado por Rafael Mujeriego; ed. la Junta de Saneament de la Generalitat de Catalunya y la Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.
- Mujeriego R., Sala Ll., Carbó M. y Turet J. (1996). "Agronomic and public health assessment of reclaimed water quality for landscape irrigation". *Water Science and Technology*. Vol 33 No 10-11 pag. 335-344

- Nacional Financiera. (1997). *Guía para la Formulación y Evaluación de Proyectos de Inversión*, Nacional Financiera, S.N.C. 3° reimpresión México D.F.
- OCDE. (2002). *Handbook of Biodiversity Valuation. A guide for policy makers*. OECD Publications. París, Francia. <http://www.oecd.org>
- Olivieri A.W, Eisenberg D.M., Cooper R.C., Tchobanoglous G. y Gagliardo P. (1996). "Recycled water -- a source of potable water: City of San Diego health effects study". *Water Science and Technology* Vol 33 No 10-11 pag. 285–296
- OMS (1997). Water Pollution Control - A Guide to the Use of Water Quality Management Principles. Organización Mundial de la Salud. [http://www.who.int/docstore/water\\_sanitation\\_health/wpcontrol/begin.htm#Contents](http://www.who.int/docstore/water_sanitation_health/wpcontrol/begin.htm#Contents)
- OMS (2000). Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 Report. [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/Globassessment/GlasspdfTOC.htm](http://www.who.int/water_sanitation_health/Globassessment/GlasspdfTOC.htm)
- OMS (2003). Water Sanitation and Health (WSH). Organización Mundial de la Salud. [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/about/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/about/en/)
- Oswald, W.J. (1989). "Use of Wastewater Effluent in Agriculture". *Desalination: The International Journal on the Science and Technology of Desalting and Water Purification*. vol.72, no.1-2. pag. 67-80
- Ouazzani N., Bousselhaj K. y Abbas Y. (1996). "Reuse of wastewater treated by infiltration percolation". *Water Science and Technology* Vol 33 No 10-11 pag. 401–408
- Pan S.C. y Tseng D.H. (2001). "Sewage sludge ash characteristics and its potential applications". *Water Science & Technology* Vol 44 No 10 pag. 261–267
- Parsons, G. R., Platinga A. J. y Boyle K. J. (2000). "Narrow Choice Sets in a Random Utility Model of Recreation Demand". *Land Economics* vol. 76, no.1 pag. 86-99
- Pasqual J. (1999). *La evaluación de políticas y proyectos, criterios de valoración económicos y sociales*. Ed. Icaria editorial s.a. Barcelona, España
- Pearce D.W (1983). *The Dictionary of Modern Economics*. General Editor. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts, EE.UU.
- PHN. (2000). Plan Hidrológico Nacional. Ed. Ministerio de medio ambiente. [http://www.mma.es/rec\\_hid/plan\\_hidro/index.htm](http://www.mma.es/rec_hid/plan_hidro/index.htm)
- Piper, S. (1997). "Regional Impacts and Benefits of Water-Based Activities: An Application in the Black Hills Region of South Dakota and Wyoming". *Impact Assessment*, Vol. 15, pag. 335-359
- Platt J.L. y Marie C. (2001). "The cost-effectiveness of water conservation". *Journal AWWA*. Marzo 2001
- PNAE (2003). Parque Natural de los Aiguamolls del l'Emporda <http://www.parcscatalunya.net/aiguamolls.htm>
- Poe, G. L. y Bishop R. C. (1999). "Valuing the Incremental Benefits of Groundwater Protection when Exposure Levels are Known". *Environmental and Resource Economics* vol. 13, pag. 341-367
- Poor, P. J., Boyle K. J., Taylor L. O., y Bouchard R. (2001). "Objective Versus Subjective Measures of Water Clarity in Hedonic Property Value Models". *Land Economics* vol. 77, no. 4 pag. 482-493
- Pretty J. N., Brettb A, C., Geec D., Hine R. E., Masond C. F., Morisond J. I. L., Ravene H., Raymentf M. D. y Bijlg G. (2000). "An assessment of the total external costs of UK agriculture". *Agricultural Systems*. Vol 65, no. 2, pag. 113-136.
- Prime, L. y Lothrop, L. (1996). "Water Conserv II: First Decade of Operation". Comunicación presentada en la conferencia Conserv 96. Orlando, Florida, EE.UU. enero 4-8.
- Randall C.W. (2003). "Potential societal and economic impacts of wastewater nutrient removal and recycling". *Water Science & Technology* Vol 48 No 1 pag. 11–17
- Renzetti S. (2003). "Full Cost Accounting for Water Supply and Sewage Treatment: A Case Study of the Niagara Region, Canada" Comunicación presentada en el World Bank's Water Resources Management Group on Economic Instruments. <http://worldbank.org/>
- Richardson T. y Gross B. (1999). Use of recycled water to augment potable supplies: an economic perspective. The WaterReuse Association. <http://www.watereuse.org/>
- Roetzel, M. (1998). Constructed Wetlands Combine Reuse and Education. Comunicación presentada en la conferencia federal Water Reuse. Lake Buena Vista, Florida, EE.UU. Febrero 1-4.



- Sala LI y Millet X. (1995). *Aspectos básicos de la reutilización de las aguas residuales regeneradas para el riego de campos de golf*. Apuntes de las Jornadas Técnicas del Golf, Madrid, 1995. Publicaciones del Consorcio de la Costa Brava. Girona, España.
- Sala LI., Serra M., Huguet A., Colom J., Carré M., Romero de Tejada S. y Marquès E. (2003). Múltiples beneficios del proyecto de reutilización de aguas para usos ambientales al parc natural dels aiguamolls de l'empordà. Jornades sobre recerca i gestió en espais naturals. 8, 9 y 10 de octubre l'Estartit Girona, España.
- Schwartz, N., Payne, F., Baxley, G., McGuire, W. y Dahl, W. (1994). Escambia County Utility Authority (ECUA) Bayou Marcus Wetlands Restoration System. Comunicación presentada en el Water Reuse Symposium Dallas, Texas, EE.UU. febrero 27 - marzo 2.
- Simpson, L. y Willet, K. (1994). Beneficial Reuse of Treated Wastewater: A Cooperative Public-Private Effort Comunicación presentada en el Water Reuse Symposium Dallas, Texas, EE.UU. febrero 27 - marzo 2.
- South Bay Water Recycling (2003). The City of San José, California. <http://www.ci.san-jose.ca.us/sbwr/>
- Teltsch, B., Ben-Harim, I., Eren, J. y Leventer, H. (1989). "Short Term Effects of Nutrient Enrichment on the Quality of Irrigation Water". *Water Research*. vol.23, no.6. pag. 719-724
- Tietenberg, T. (1992). *Environmental and Natural Resource Economics*, 3rd. ed., Harper Collins Publishers. EE.UU.
- Train, K. E. (1998). "Recreation Demand Models with Taste Differences Over People". *Land Economics* vol. 74, no.2 pag. 230-239
- Turner, R., Paavola, J., Cooper, P., Faber, S., Jessamy, V., y Georgiou, S. (2003). "Valuing nature: lessons learned and future research directions". *Ecological Economics*. Vol. 46, pag. 493 – 510.
- Van Oorschot R., de Waal D. y Semple L. (2000). "Options for beneficial reuse of biosolids in Victoria". *Water Science and Technology* Vol 41 No 8 pag. 115–122
- Vazquez M.O., Horan J. y Mara D. (1996). "Management of domestic wastewater for reuse in irrigation". *Water Science and Technology* Vol 33, no. 10-11, pag. 355-362.
- Ward A. y Michelsen A. (2002). "The economic value of water in agriculture: concepts and policy applications". *Water Policy*, Vol. 4, no. 5, pag. 423-446.
- Ward, A., Brian A., y Jim E. (1996). "The Economic Value of Water in Recreation: Evidence from the California Drought." *Water Resources Research*, Vol. 32, no. 4, pag. 1075-1081.
- Water Conserv II (2003). <http://www.waterconservii.com>
- Wiebusch B. y Seyfried C. (1997). "Utilization of sewage sludge ashes in the brick and tile industry". *Water Science and Technology* Vol 36, No 11, pag. 251–258
- Wiebusch B., Ozaki M., Watanabe H. y Seyfried C. (1998). "Assessment of leaching tests on construction material made of incinerator ash (sewage sludge): investigations in Japan and Germany". *Water Science and Technology* Vol 38 No 7 pag. 195–205
- Xu P., Valette F., Brissaud F., Fazio A. y Lazarova V. (2001). "Technical-economic modelling of integrated water management: wastewater reuse in a French island". *Water Science & Technology* Vol 43 No 10 pag. 67–74
- Yanbo Z. (2001). The Present Condition and Development of Waste Water Utilization in the Central Area of Tianjin City. Comunicación presentada en The 21st Century International Conference & Exhibition on Developing Strategy of Urban Wastewater Treatment and Reuse. November 27-29, 2001, Beijing, China. <http://211.147.14.17/lianmeng/21cnwater/eng-art/2001/zyb.htm>
- Young, E. Lewinger, K. Zenk, R. (1987). Wastewater Reclamation - Is It Cost Effective?: Irvine Ranch Water District - A Case Study. Comunicación presentada en Water Reuse Symposium IV: Implementing Water Reuse. Denver, Colorado, EE.UU. agosto 2-7.
- Zhao D. y Sengupta K. (1996). "Selective removal and recovery of phosphate in a novel fixed-bed process". *Water Science and Technology* Vol. 33, no. 10-11, pag. 139-147

