

196
2eje.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

BASES PARA LA PLANEACION Y LA
IMPLANTACION DEL REUSO
URBANO - INDUSTRIAL DEL AGUA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
RICARDO SANDOVAL MINERO



México, D. F.

1994

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Señor
RICARDO SANDOVAL MINERO
Presente.

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-143/93

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. GASTON MENDOZA GAMEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

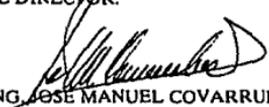
"BASES PARA LA PLANEACION Y LA IMPLANTACION DEL REUSO URBANO-INDUSTRIAL DEL AGUA"

- I . EL REUSO DEL AGUA COMO RECURSO ADICIONAL
- II . ASPECTOS TECNICOS Y ECONOMICOS BASICOS DE LA CAPTACION, LA CONDUCCION Y EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES.
- III. ASPECTOS TECNICOS, SANITARIOS, LEGALES Y ACEPTACION SOCIAL DEL REUSO DEL AGUA.
- IV . ANALISIS DE FACTIBILIDAD DEL REUSO DEL AGUA.
- V. PROYECTO E IMPLANTACION DE PROGRAMAS DE REUSO
- VI . CONCLUSIONES
PERSPECTIVAS DEL REUSO DEL AGUA EN MEXICO

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 15 de noviembre de 1993.
EL DIRECTOR.



ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLÍS

JMCS/RCR*nl

agradecimientos

Agradezco al Ing. Gastón Mendoza Gámez la abundante información que me proporcionó sobre el tema de esta tesis, su orientación, sus sugerencias y el tiempo que dedicó a su revisión. Valoro especialmente la experiencia humana y profesional que me ha transmitido cuando he tenido la oportunidad de trabajar con su dirección.

A César Calvo Lugo le debo el acceso a su colección de normas y reglamentos, sus comentarios relativos al marco legal de la cuestión ambiental y su crítica y paciente revisión de la edición y la redacción de este trabajo; a Tere Méndez y Agustín Luna, el acceso a su sistema de información sobre las plantas de tratamiento de la República Mexicana; a Paula Noreña Franco, los comentarios y la orientación sobre el reúso del agua en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México; y a Carlos Lara González la información sobre planeación del control de la contaminación y el manual de operación y mantenimiento de plantas de tratamiento por aeración extendida.

De otros buenos amigos recibí constantemente el ánimo para concluir con este esfuerzo. Estoy seguro de que comparten la satisfacción que representa haberlo conseguido. Ojalá que Uriel, compañero de todos, estuviera todavía con nosotros. Recordamos su franca amistad con gratitud, aunque eso no compensa la confusión y la tristeza que nos dejó su pérdida.

Finalmente, agradezco el esfuerzo de mis mejores maestros y el invaluable apoyo material y moral de mis padres.

índice general

<i>Agradecimientos</i>		<i>i</i>
<i>Índice general</i>		<i>iii</i>
<i>Índice de cuadros</i>		<i>ix</i>
<i>Índice de figuras</i>		<i>xi</i>
1	El reúso del agua como recurso adicional	1
1.1	Introducción.	1
1.2	Consideraciones generales para evaluar la factibilidad del reúso.	3
1.3	El reúso en la planeación de los recursos hidráulicos.	4
1.4	Definición de sistema de reúso.	5
1.5	Proceso de planeación y programación del reúso del agua.	7
2	Aspectos técnicos y económicos básicos de la captación, la conducción y el tratamiento de las aguas residuales	9
2.1	Captación y conducción de las aguas residuales crudas	9
2.1.1	Sistemas de alcantarillado sanitario.	10
2.1.2	Sistemas de alcantarillado pluvial y combinado.	13

2.1.3	Captación y conducción de aguas residuales a plantas de tratamiento para reúso.	13
2.2	Conceptos de calidad del agua	15
2.3	Tratamiento de aguas residuales	19
2.4	Criterios para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales	20
2.4.1	Criterios para el proyecto de plantas de tratamiento para saneamiento.	25
2.4.2	Tratamiento de aguas residuales para reúso.	28
2.5	Costos de conducción de aguas residuales	29
2.6	Costos de tratamiento de aguas residuales	30
2.6.1	Elementos que integran los costos de tratamiento.	30
2.6.2	Principales elementos del costo del tratamiento terciario.	32
2.6.3	Métodos para la estimación preliminar de costos de tratamiento.	32
2.6.4	Estimación de costos a nivel de anteproyecto.	34
3	Aspectos técnicos, sanitarios, legales y aceptación social del reúso del agua	37
3.1	Regulación y distribución del agua renovada	37
3.1.1	Características de la producción y la demanda de agua renovada.	37
3.1.2	Bases de diseño de las redes de distribución de agua renovada.	38
3.2	Aspectos cualitativos. Requisitos de calidad para reúso según categorías.	39
3.2.1	Calidad de efluentes de plantas para saneamiento.	39
3.2.2	Criterios de calidad del agua renovada para riego de áreas verdes.	40

3.2.3	Criterios de calidad del agua renovada para uso recreativo.	43
3.2.4	Criterios de calidad del agua renovada para uso industrial	43
3.2.5	Criterios de calidad del agua renovada para recarga de acuíferos.	50
3.2.6	Criterios de calidad del agua para consumo humano.	51
3.3	Control de los riesgos sanitarios del uso del agua renovada	52
3.4	Marco legal del reúso del agua.	58
3.4.1	Marco legal de los sistemas de agua potable y alcantarillado	58
3.4.2	Marco legal del reúso del agua	60
3.4.3.	Reglamentos y criterios ecológicos relacionados al reúso.	64
3.4.4	Elementos de un reglamento de reúso del agua	66
3.5	Aceptación social del reúso.	68
4	Análisis de factibilidad del reúso del agua	71
4.1	Formulación del proyecto.	72
4.2	Antecedentes, marco general y formulación definitiva del proyecto.	74
4.3	Análisis de prefactibilidad del sistema de reúso.	76
4.3.1	Balance hidráulico del sistema.	79
4.3.2	Investigación preliminar de mercado.	81
4.3.3	Ubicación de puntos de oferta.	83
4.3.4	Aspectos económicos de las categorías de reúso.	83
4.3.5	Asignación del agua renovada.	84
4.4	Estudio de factibilidad del sistema de reúso.	86

4.4.1	Estudio de mercado.	86
4.4.2	Estudios de campo.	94
4.4.3	Interpretación de los estudios de campo.	97
4.4.4	Asignación del agua renovada.	98
4.4.5	Anteproyecto de los sistemas e integración de costos.	99
4.4.6	Evaluación financiera.	100
4.4.7	Evaluación económica.	102
4.4.8	Evaluación por objetivos múltiples.	104
5	Proyecto e implantación de programas de redso	109
5.1	Ingeniería básica.	109
5.1.1	Selección de la tecnología.	111
5.1.2	Ingeniería de proceso.	112
5.1.3	Ingeniería civil y arquitectura.	115
5.1.4	Ingeniería eléctrica.	115
5.1.5	Ingeniería mecánica.	116
5.1.6	Instrumentación.	116
5.1.7	Tiempo y costo de la ingeniería básica.	117
5.2	Ingeniería de detalle.	117
5.2.1	Programación y control.	118
5.2.2	Ingeniería de proceso.	118
5.2.3	Ingeniería civil y arquitectura.	121
5.2.4	Ingeniería eléctrica.	122
5.2.5	Ingeniería mecánica.	122
5.2.6	Instrumentación.	123
5.2.7	Tiempo y costo de la ingeniería de detalle.	123
5.3	Desarrollo de aspectos organizativos y administrativos	124

5.4	Procuración de los equipos.	126
5.5	Construcción y equipamiento.	127
5.6	Puesta en marcha y operación.	132
5.6.1	Puesta en marcha de la planta de tratamiento.	132
5.6.2	Parámetros por monitorear.	133
5.6.3	Inspección y operación de los equipos de tratamiento.	134
5.6.4	Operación de la red de distribución de agua renovada.	135
6	Conclusiones - Perspectivas del reúso del agua en México	137
6.1	El agua en México.	137
6.2	Estado actual y demanda potencial del reúso en México.	144
6.2.1	Industria.	144
6.2.2	Agricultura.	147
6.2.3	Recarga de acuíferos.	147
6.2.4	Otros usos potenciales.	148
6.3	Conclusiones.	149
Anexo A	CRITERIOS ECOLOGICOS DE CALIDAD DEL AGUA (CE-CCA-001/89)	153
Referencias		161

Índice de cuadros

Cuadro 2.1	Principales parámetros de calidad del agua	16-17
Cuadro 2.2	Procesos ambientales que afectan la calidad del agua	18
Cuadro 2.3	Sistemas de tratamiento de aguas residuales	22-24
Cuadro 2.4	Eficiencia de remoción de los principales contaminantes	26-27
Cuadro 2.5	Vida útil de los principales elementos de una planta de tratamiento de aguas residuales	36
Cuadro 3.1	Criterios de calidad para plantas para saneamiento del agua residual (condiciones particulares de descarga)	41
Cuadro 3.2	Calidad del agua renovada para el riego de áreas verdes	42
Cuadro 3.3	Criterios de calidad del agua renovada para uso recreativo	44
Cuadro 3.4	Criterios de calidad del agua renovada para enfriamiento	45
Cuadro 3.5	Criterios de calidad del agua renovada para uso en generación de vapor	46
Cuadro 3.6	Criterios de calidad del agua renovada para uso industrial	48
Cuadro 3.7	Criterios de calidad del agua renovada para su uso en la industria alimenticia	49
Cuadro 3.8	Criterios de calidad del agua para recarga de acuíferos por infiltración	51

Cuadro 3.9	Criterios de calidad para el agua potable	53
Cuadro 3.10	Influencia del tratamiento de las aguas residuales en la concentración de microorganismos patógenos	55
Cuadro 3.11	Procesos de tratamiento sugeridos para satisfacer criterios sanitarios en el reúso del agua	57
Cuadro 3.12	Conceptos básicos de la Ley de Aguas Nacionales	62
Cuadro 3.13	Disposiciones legales vigentes relacionadas con el reúso del agua en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente	63-64
Cuadro 3.14	Principales artículos de un proyecto de reglamento para el reúso del agua en el Distrito Federal	67
Cuadro 4.1	Datos básicos para evaluar el uso eficiente y la factibilidad del reúso del agua en la industria	90
Cuadro 5.1	Estimación del consumo de horas-hombre promedio por plano y por especialidad	124
Cuadro 5.2	Plantilla de personal para plantas de tratamiento de aguas residuales	126
Cuadro 5.3	Observaciones sobre la construcción de instalaciones de tratamiento y reúso	128-131
Cuadro 5.4	Monitoreo de parámetros de calidad en una planta de tratamiento biológico	133
Cuadro 6.1	Problemática del sector hidráulico al inicio de la década de los noventa	142
Cuadro 6.2	Problemática regional del agua (en 1990)	143
Cuadro 6.3	Porcentajes de consumo industrial de agua	145
Cuadro 6.4	Principales plantas de tratamiento para reúso industrial en la República Mexicana	146

Índice de figuras

Figura 1.1	Sistema hidráulico urbano-industrial	6
Figura 2.1	Principales sistemas de tratamiento de agua	21
Figura 4.1	Gráficas oferta-demanda sin reúso del agua y con él	77
Figura 4.2	Enfoque macroeconómico de la planeación del reúso (estudio de prefactibilidad)	78
Figura 4.3	Enfoque microeconómico de la planeación del reúso (estudio de factibilidad)	87
Figura 5.1	Diagrama de flujo de la ingeniería básica	110
Figura 5.2	Diagrama de flujo de la ejecución de un proyecto de tratamiento de aguas residuales	119

"...el agua, los ríos, los arroyos me dicen mucho... Me gusta mucho el agua como objeto. En primer lugar, es una cosa muy enigmática... pero no es eso lo que importa. Lo importante es que el agua es muy dinámica. Transmite movimiento, profundidad, cambio, luz, reflejo. No hay nada más hermoso que el agua. No hay un fenómeno natural que no se refleje en ella... No imagino un filme sin agua..."

Andrei Tarkovski.

1

el reúso del agua como recurso adicional

1.1 Introducción.

El aprovechamiento de los recursos hidráulicos, indispensable para el desarrollo de la actividad humana, ha sido conducido a márgenes de acción cada vez más estrechos.

En muchos casos, el incremento en la demanda del agua potable rebasa la capacidad de las fuentes accesibles y escasean aquellas con calidad adecuada. Al mismo tiempo, se tiene más conciencia de las consecuencias negativas de la explotación indiscriminada del recurso y de su degradación, por lo que la exigencia de saneamiento de las aguas residuales es mayor.

Dentro del esquema de utilización del agua existen consumidores de grandes cantidades de agua potable que podrían utilizar agua de inferior calidad, reciclar parte de sus aguas residuales o modificar sus procesos para abatir el consumo.

En conjunto, la escasez de agua potable, el desarrollo tecnológico del tratamiento de las aguas residuales, la disponibilidad de efluentes tratados de mejor calidad y la existencia de usuarios potenciales de aguas renovadas pueden hacer del reúso del agua una opción digna de ser tomada en cuenta.

En esta Tesis, el término reúso se refiere al uso intencional de agua residual remanente de un uso anterior.

Dicha reutilización puede hacerse del agua *cruda* (sin tratamiento previo) o *renovada*, como se denomina al agua tratada para su reúso en alguna aplicación específica.

Se hace la distinción entre recirculación, reúso directo y reúso indirecto, como se indica a continuación:

- recirculación Cuando hay un solo usuario que utiliza el agua residual de sus propios procesos.

- reúso

directo	Existen varios usuarios de las aguas residuales generadas en su propio sistema hidráulico.
indirecto	Aprovecha las aguas de un cuerpo receptor de las aguas residuales de otro sistema hidráulico, generalmente de manera no intencional.

El uso del agua residual o renovada se divide, a su vez, en las cinco categorías siguientes:

- irrigación

agricultura reforestación paisaje vegetación natural

- embalse

recreativo (con contacto directo y sin él) otros propósitos (piscicultura, paisaje, etc.)
--

- industria

procesos enfriamiento generación de vapor servicios como insumo

- recarga de acuíferos

por inyección directa por enlagonamiento

- doméstico

usos que no requieren de calidad potable consumo humano
--

En esta Tesis se trata específicamente el reúso directo de aguas renovadas dentro de un sistema hidráulico urbano-industrial. Se propone un proceso de planeación para el estudio, proyecto, evaluación y programación del reúso, para lo cual se presenta un resumen de los aspectos básicos del tratamiento y el reúso del agua, y se detallan los pasos a seguir en las etapas de planeación.

1.2 Consideraciones generales para evaluar la factibilidad del reúso.

La disponibilidad de agua renovada depende del volumen de agua residual generado por el conjunto de usuarios de agua potable; su demanda del gasto de agua renovada que puede ser abastecido, a un costo competitivo, al mayor número de usuarios. Además del costo, existen otros factores que condicionan o favorecen el reúso del agua ^(1,2,3):

- a) **Uso eficiente del agua.** Como instrumento del Organismo operador para complementar las medidas para el uso eficiente del agua.
- b) **Escasez del agua.** Cuando se requiere incrementar el abastecimiento en una región con carencia de fuentes accesibles o de calidad adecuada.
- c) **Transporte del agua.** Dependiendo de la distancia a la que se encuentren las fuentes de abastecimiento, su transporte genera efectos ambientales adversos en la región aportadora del recurso y significa elevados costos de inversión y de operación.
- d) **Sobreexplotación de las fuentes.** El transporte del agua entre cuencas o regiones puede generar desbalances hidrológicos graves, incuantificables en términos de costo. Ocurre lo mismo con la sobreexplotación de cuerpos naturales, superficiales o subterráneos, cuya conservación puede obligar a considerar la explotación de fuentes de abastecimiento alternativas.
- e) **Costos relacionados.** Todos los procesos del sistema hidráulico urbano-industrial, como transporte, potabilización, distribución, saneamiento y descarga, requieren consumos elevados de energía eléctrica, combustibles, reactivos y otros bienes. El reúso disminuye el gasto por transporte del agua de primer uso, al disminuir su consumo, y permite recuperar parte del costo del saneamiento.
- f) **Restricciones de descarga.** Cuando las aguas residuales generadas por una población deben ser tratadas a un nivel medio o avanzado, se cuenta con efluentes de calidad adecuada para distintos usos potenciales, muchas veces más cercanas que las fuentes de agua en explotación.

En cada caso deben analizarse factores básicos antes de tomar decisiones relativas al reúso del agua, como son:

- Condiciones locales y regionales del suministro de agua,
- requisitos de calidad para cada usuario,
- nivel y confiabilidad de las instalaciones de tratamiento existentes o proyectadas,
- mitigación de daños potenciales a la salud y
- aspectos ambientales y de aceptación pública.

1.3 El reúso en la planeación de los recursos hidráulicos.

La planeación es la consideración ordenada de un proyecto, desde la proposición original a la decisión final sobre un curso de acción, a través del análisis y la evaluación de las alternativas de decisión.

Existen dos orientaciones básicas:

- a) El grado de detalle que se puede alcanzar en las distintas fases está en función de la información existente, así como de los recursos y el tiempo disponibles para ampliar la información y desarrollar los anteproyectos y proyectos.
- b) En cada fase de la planeación, los pasos a seguir deben ayudar a identificar los aspectos críticos para proponer opciones de decisión, indicar las prioridades en la obtención y la organización de los datos y definir el grado de incertidumbre en las proyecciones, así como su influencia en los criterios de diseño; igualmente, deben definir la metodología más adecuada para la cuantificación de beneficios y costos, y para la evaluación de alternativas.

Se desarrolla en varias fases y a varios niveles. Las fases de la planeación son el estudio de reconocimiento, los estudios de prefactibilidad y factibilidad, y el diseño ejecutivo de las instalaciones. Existen también cuatro niveles de planeación: el nacional, el sectorial, el regional y el específico o de proyectos, en ese orden de subordinación⁽⁴⁾.

En México, la planeación se rige por la Ley de Planeación; a nivel nacional, la de los recursos hidráulicos se ajusta a las directrices y objetivos del Plan Nacional de Desarrollo y el Programa Nacional de Aprovechamiento del Agua. A nivel sectorial es atribución de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), por medio de la Comisión Nacional del Agua (CNA), misma que, como órgano desconcentrado de la SARH, cuenta con gerencias a nivel

regional y estatal, además de las direcciones a nivel central. Estas se coordinan con los organismos operadores, estatales y municipales, dependientes de los gobiernos de los Estados, para la planeación regional y específica.

En este contexto, la planeación de un programa de reúso corresponde, al nivel específico o de proyecto, al Organismo operador y a la CNA. Antes de su implantación, si está incluida la concesión del servicio a particulares, se desarrollan estudios de factibilidad financiera, basados en los programas oficiales de desarrollo urbano y de la infraestructura hidráulica.

1.4 Definición de Sistema de Reúso.

En este trabajo se entiende como **programa de reúso** el conjunto de disposiciones administrativas y técnicas que permiten satisfacer la demanda de agua renovada de usuarios específicos, mediante la operación del sistema de reúso. Este último comprende los elementos del sistema hidráulico relacionados con la captación, la conducción, el tratamiento, la regulación, la distribución y el control de las aguas residuales destinadas al reúso directo.

El sistema de reúso se encuentra dentro del **sistema hidráulico urbano-industrial (SHUI)**, que abarca los elementos físicos y administrativos que permiten la prestación de los servicios de abastecimiento de agua potable y renovada, y el de drenaje de las aguas residuales de origen doméstico, comercial, industrial y mixto; en el sistema hidráulico se establecen las relaciones entre los subsistemas de aprovechamiento, de potabilización, de regulación, de distribución y consumo del agua potable y renovada, de captación, conducción y saneamiento de aguas residuales, y de saneamiento y disposición de los efluentes finales del sistema. La Figura 1 muestra una concepción gráfica del sistema hidráulico.

Se puede definir un **balance hidráulico** según los volúmenes de agua que ingresan y abandonan los elementos o subsistemas. Del agua captada en los aprovechamientos hidráulicos, una parte se distribuye potabilizada al sistema; ésta se divide entre las demandas doméstica, industrial, comercial y pública, cada una de las cuales genera un retorno de agua residual. Cuando existe reúso en un sistema hidráulico, el caudal de agua residual se convierte en una fuente de abastecimiento para usuarios de agua renovada, de la cual retorna también una parte como agua residual. Es necesario calcular dicho balance una vez que se haya implantado el programa de reúso, para evaluar los efectos que tendrá en la cantidad y la calidad del agua en el sistema.

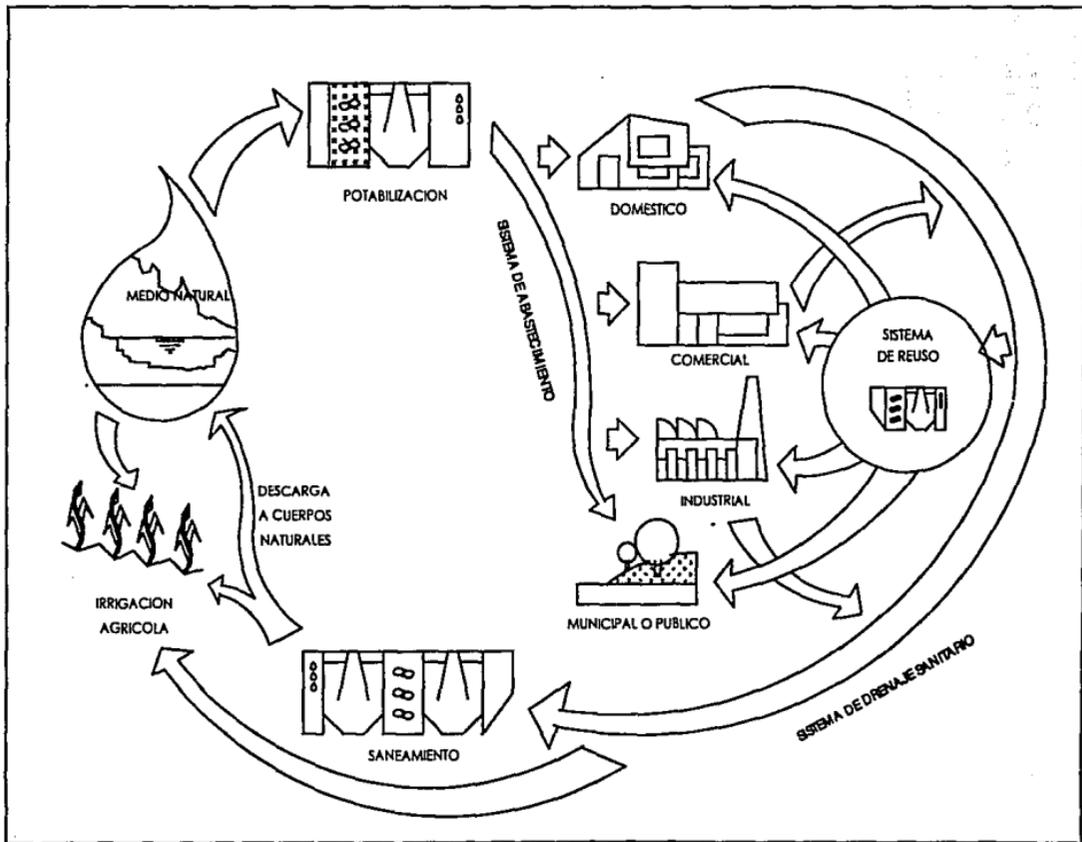


Figura 1.1 Sistema hidráulico urbano-industrial

1.5 Proceso de Planeación y Programación del Reúso del Agua.

La planeación y la programación del reúso del agua se ajustan al esquema básico de tres fases: estudio de reconocimiento, análisis de factibilidad y proyecto ejecutivo.

Hay dos enfoques de planeación del reúso, dentro de un esquema de planeación de los recursos hidráulicos: el macroeconómico y el microeconómico ⁽⁵⁾.

El primero busca identificar si se generan beneficios colectivos vía disminución de la explotación. El segundo, evaluar como proyectos de inversión, mediante estudios de factibilidad, los casos específicos de implantación del reúso.

El primer enfoque considera una condición esencial: el reúso del agua debe representar una ventaja clara en comparación con la explotación de fuentes naturales y las medidas de uso eficiente del agua, o bien, configurar la mejor solución posible en combinación con las mismas. El agua renovada suple parte del abastecimiento y ayuda a diferir inversiones en explotación de nuevas fuentes.

Ambos enfoques comprenden la identificación y la confrontación de la oferta y la demanda potenciales dentro de un periodo de proyecto, aunque partiendo de datos de diferente grado de exactitud. El objetivo básico en el primer caso es lograr la mayor sustitución posible de aguas de primer uso, en segmentos de la demanda para los que sea factible y redituable el uso de agua renovada contra el cambio de dispositivos o instalaciones para disminuir consumos, así como contra la inversión en nuevas obras de captación, conducción y tratamiento. En el segundo caso, una vez definida la conveniencia del reúso, el objetivo es ofrecer agua renovada a precio competitivo al mayor número de usuarios potenciales.

En este trabajo se propone un esquema de planeación y programación del reúso, que comprende una serie de pasos a seguir y de bases metodológicas para la obtención y organización de la información, el planteamiento de opciones de decisión y su evaluación.

En primer lugar se exponen los aspectos básicos del tratamiento y el reúso y se presentan los pasos a seguir en la planeación de los proyectos relacionados. La exposición no puede agotar la información técnica disponible; sólo da una visión general de los aspectos básicos y un marco metodológico, dejando los aspectos especializados para su consulta en las fuentes adecuadas.

Finalmente, en el último capítulo se presentan un panorama del estado actual del reúso del agua y una evaluación de sus perspectivas en nuestro país.

2

aspectos técnicos y económicos básicos de la captación, la conducción y el tratamiento de las aguas residuales

En este Capítulo se exponen los aspectos técnicos y económicos básicos relativos a la conducción y el tratamiento de las aguas residuales. La información se divide en tres temas: captación y conducción de aguas residuales, aspectos técnicos sobre calidad y tratamiento de las mismas, y costos asociados al tratamiento de las aguas residuales. Se presentan detalles importantes sobre algunos aspectos técnicos con objeto de formar una imagen completa de las variables de diseño que pueden afectar la planeación.

2.1 Captación y Conducción de las Aguas Residuales Crudas

Las aguas residuales que se generan en un núcleo urbano se recolectan mediante una red de tuberías y un conjunto de equipos que integran el sistema de alcantarillado; éste se denomina **sanitario** si conduce únicamente el agua residual de usos urbanos, **pluvial** si conduce solo agua de lluvia y **combinado** si desaloja ambos flujos. Si existen en una misma zona una red sanitaria y una pluvial, se les denomina **sistemas separados**.

La configuración del terreno y la extensión del área urbana definen el patrón o modelo de la red y el número de puntos de descarga, de manera que se logre el mejor aprovechamiento de la capacidad hidráulica de los tubos.

El gasto que conduce el sistema depende del uso del suelo en cada zona drenada y tiene variaciones horarias y estacionales. Su valor crece al urbanizarse las áreas de aportación hasta un máximo correspondiente a la saturación urbana, mismo que fija el gasto de proyecto de las estructuras colectoras.

Un sistema de alcantarillado comprende las siguientes obras:

- a) de captación,
- b) de conducción, incluyendo estaciones de bombeo,
- c) de tratamiento para descarga en cuerpos naturales, y
- d) de disposición final.

2.1.1 Sistemas de Alcantarillado Sanitario.

Para el proyecto de los sistemas de drenaje sanitario se requiere de la siguiente información^[6]:

- planos topográficos de la localidad, en los que puedan determinarse longitudes de crucero entre las calles, elevación de cruceros y puntos de cambio de pendiente;
- plano predial, indicando número de predios, habitantes por manzana y ubicación de edificios públicos, jardines, industrias y otros;
- zonificación por tipo de actividades: doméstica, industrial, comercial, recreativa, pública o mixta, indicando también las zonas que cuenten con servicios de agua potable, alcantarillado o ambos;
- planos de la red de alcantarillado existente, incluyendo sus características: longitudes de tramos, cotas de terreno y plantilla, pendientes de proyecto, diámetros y sitios de vertido;
- planos de desarrollo urbano, zonificados por usos del suelo;
- planos de expansión de servicios que cuenten con instalaciones subterráneas, además de planos de las instalaciones existentes;
- censos de población y estimaciones de su crecimiento futuro;
- planes de desarrollo urbano e industrial locales y regionales.

La información anterior debe permitir al proyectista una estimación mas precisa de los caudales que el sistema deberá desalojar, así como la exploración de diferentes soluciones.

Existen factores impredecibles que impiden hacer estimaciones cien por ciento confiables, como la capacidad futura de algunas fuentes de abastecimiento o el establecimiento no planificado de grandes consumidores de agua en zonas domésticas.

Por ejemplo, generalmente se considera una densidad de población uniforme en el área de proyecto y se calcula la aportación de aguas residuales a la red como un porcentaje fijo de la dotación de agua potable. Cuando tampoco se cuenta con este último dato, se utilizan "valores recomendables" según el clima y el tamaño de la población, mismos que en ocasiones rebasan por mucho los valores reales, dada la escasez del líquido en nuestro país.

Otras aportaciones son difícilmente cuantificables. Un caso es la infiltración, cuando la tubería atraviesa zonas con influencia de mantos freáticos. Lo mismo ocurre con las descargas industriales, que varían bruscamente a lo largo del día, y pueden cambiar notoriamente por modificaciones en los procesos productivos; además, las descargas altamente contaminantes se llevan a cabo en forma clandestina. En pocos casos los responsables de las industrias estarán dispuestos a dar información sobre sus descargas de aguas residuales, o permitir el acceso a las instalaciones para efectuar mediciones y muestreos. La aportación industrial al drenaje se calcula con promedios de gasto por superficie, máxime cuando las zonas industriales no se han saturado.

Para el desarrollo del proyecto es necesario definir datos de diseño, procurando aprovechar de la mejor manera posible la información disponible a pesar de la incertidumbre que generan los siguientes factores:

- información insuficiente sobre la estructura predial y usos del suelo,
- información insuficiente sobre los proyectos o redes existentes de alcantarillado y otros servicios,
- planes de desarrollo urbano incompletos, obsoletos o inexistentes,
- datos censales insuficientes, poco confiables o inexistentes,
- incertidumbre propia de los métodos para la predicción del crecimiento poblacional,
- falta de información sobre la cobertura de los servicios de agua potable y la dotación real a los usuarios, e
- incertidumbre en la disponibilidad futura de agua potable.

En lo que concierne al cálculo y el proyecto ejecutivo de los sistemas de conducción, la práctica se ajusta a las Normas de Proyecto para Obras de Alcantarillado Sanitario en la República Mexicana, editadas por la extinta Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas.

Los principales criterios que rigen el funcionamiento hidráulico de la red de drenaje son los siguientes:

- El gasto medio se calcula, para cada tramo, con la densidad de población lineal, la longitud acumulada hasta dicho tramo y un factor de aportación que afecta un valor prefijado de la dotación; es el dato básico de proyecto.
- El gasto mínimo, aceptado como la mitad del gasto medio o como el correspondiente al número de descargas simultáneas según el diámetro, es la base para el cálculo de la velocidad mínima que asegura el arrastre de los sólidos contenidos en las aguas negras.
- El gasto máximo se calcula afectando el medio por los coeficientes de variación o de Harmon, que depende de la población de proyecto, y el de previsión o factor de seguridad, generalmente de 1.50; se le suma también el gasto de infiltración, y se debe verificar que la capacidad de la tubería nunca sea rebasada, así como mantener velocidades moderadas que eviten la erosión de los conductos.
- Con excepción de las líneas de bombeo, los sifones invertidos y otros casos especiales, las líneas de conducción de aguas residuales no trabajan bajo presión, sino en tubos parcialmente llenos o en canales a cielo abierto.
- El trazo de la red debe permitir reducir la distancia entre el primer punto de captación y el de vertido final, minimizando además las pendientes para evitar, según las características topográficas, excavaciones excesivas.
- La velocidad mínima tolerable se ha fijado en 30 cm/s para un tubo parcialmente lleno, y en 60 cm/s para tubo lleno; la velocidad máxima es aproximadamente de 3 m/s.
- Las pendientes mínima y máxima corresponden a las velocidades mínima y máxima, exceptuando los casos en los que la topografía no lo permite; se requieren pendientes menores en terrenos muy planos, para evitar excavaciones o bombeos, o mayores en terrenos accidentados, para evitar pozos con calda.
- Las opciones de pendiente y velocidad se ajustan a los diámetros comerciales de tubería.
- Para el diseño de cárcamos de bombeo se busca obtener el menor tamaño posible y la menor frecuencia de arranque y parada de bombas, generalmente fijando un tiempo de almacenamiento y revisando la capacidad de evacuación necesaria para los distintos gastos.

2.1.2 Sistemas de Alcantarillado Pluvial y Combinado.

En los sistemas combinados el gasto pluvial es más significativo, y es el que define el diseño de los conductos. Los siguientes son los principales aspectos que caracterizan el diseño del drenaje pluvial o combinado:

- El gasto de diseño depende de las características de la zona por drenar y de un valor de la intensidad de lluvia, seleccionado para un período predefinido; considera también el tiempo que tarda en concentrarse la lluvia en la sección analizada, y el tiempo de ingreso.
- Las velocidades y pendientes de operación se rigen por los mismos límites que en los sistemas sanitarios, aunque debe considerarse un mayor arrastre de sólidos; si en la zona se presentan períodos de estiaje largos, debe revisarse el comportamiento del flujo sin aportaciones pluviales y evaluarse las consecuencias.
- En cuanto a la calidad del agua residual, algunos parámetros se presentan en menores concentraciones por efecto de la dilución en el agua pluvial; otros, arrastrados en la atmósfera por la lluvia, pueden originar presencia de metales pesados o ácidos en zonas netamente domésticas. Igualmente, el agua pluvial tiende a arrastrar cantidades mayores de arena y sólidos flotantes que el agua residual sanitaria.

2.1.3 Captación y Conducción de Aguas Residuales a Plantas de Tratamiento para Reúso.

Para los proyectos de tratamiento con objeto de reúso son de importancia los siguientes aspectos, relativos a la planeación y el diseño de los sistemas de drenaje:

- La zonificación del área drenada permite seleccionar los puntos de captación más confiables, con menores variaciones de gasto y calidad; por ejemplo, en este sentido sería preferible captar el agua de zonas netamente domésticas, sin influencia de estaciones de bombeo ni de mantos freáticos.
- Los criterios para la determinación de gastos de diseño para los proyectos de sistemas de drenaje, que en dichos casos aseguran resultados funcionales, no deben ser aplicados indistintamente a la asignación de capacidades de proyecto para las plantas de tratamiento, debido a que, aunque en su última etapa éstas deberían ser iguales a la capacidad

máxima del sistema de drenaje, en un principio resultaría muy costoso tener capacidad de sobra y equipos de tratamiento parados. En el inciso correspondiente al diseño de las plantas de tratamiento se abundará sobre este punto.

- Las variaciones en el gasto real de las aguas residuales definirán la necesidad de regulación del influente y la capacidad de la planta de tratamiento.

Debido a que los sitios de demanda de aguas renovadas se encuentran en muchos casos dentro de la traza urbana, los puntos de captación de aguas crudas y los predios para la planta se ubican también en la misma zona, muchas veces con limitaciones importantes, como la disponibilidad de un solo predio para la planta. Por lo mismo, la captación y la conducción de las aguas residuales se hacen mediante bombeo.

Los siguientes son los principales criterios de proyecto y operación de plantas de bombeo:

- Aun cuando existen equipos desmenuzadores y bombas que pueden manejar sólidos en las aguas negras, siempre se requerirá de una rejilla gruesa, para eliminar los sólidos de mayor tamaño, aunque una rejilla más fina generalmente resultará menos costosa que la adquisición y operación de equipos inatascables o trituradores.
- Es deseable, para aumentar la vida útil de las bombas, contar con desarenadores antes del bombeo, siempre que la remoción de las arenas o la construcción misma de la instalación resulten prácticas y no signifiquen gran costo.
- Si la estación de bombeo no se encuentra en el predio de la planta, será indispensable que cuente con su propia caseta y las instalaciones electromecánicas necesarias.
- Comúnmente se utilizan bombas centrífugas de tipo voluta, de succión simple, con impulsor radial inatascable o de flujo mixto, según la capacidad requerida.
- En casos especiales debe revisarse que los materiales del impulsor, la carcasa y la tubería sean resistentes a compuestos presentes en el agua residual, que pudieran causar corrosión, acumulación de materia, incrustaciones u otros inconvenientes.

En general, las plantas de bombeo de aguas crudas o renovadas deben cumplir con los siguientes criterios:

- Las bombas se instalan a un nivel adecuado para evitar su cebado, por lo que generalmente se utiliza bombas verticales.

- Cuando el agua ha sido tratada, o bien cribada y desarenada, carece de sólidos grandes y de materiales que pudieran enredarse en las volutas, se puede utilizar bombas de propela en cárcamo húmedo, de flujo axial, con buenos resultados.
- La instalación debe disponer de capacidad extra para emergencias por fallas eléctricas o mecánicas, estructuras para derivación de sobreflujos y sistemas automáticos para el control de niveles, sean éstos neumáticos, por flotadores, eléctricos o electrónicos, especialmente cuando existan varias bombas en operación.
- Se debe fijar un tiempo máximo de operación, dependiendo del equipo, así como la secuencia de rotación, tomando en cuenta que siempre se requieren equipos de reserva.
- La tubería se proyecta para minimizar las pérdidas de carga y la turbulencia, especialmente cerca de la bomba. Para ello se mantienen velocidades inferiores a 3 m/s en gasto extraordinario, y superiores a 60 cm/s a gasto mínimo, de manera que se evite el depósito de sólidos en tramos horizontales o en puntos bajos; los puntos altos deben ser evitados o provistos de válvulas para la eliminación de gases acumulados. Asimismo, se considera en el diseño la incidencia del golpe de ariete.

2.2 Conceptos de Calidad del Agua

El concepto **calidad** del agua se refiere al conjunto de sus características físicas, químicas y biológicas, clasificadas en relación con características modelo definidas según un uso específico.

Por ejemplo, si la calidad que se toma como referencia es el agua potable, se podrá establecer una calificación de la aptitud de cualquier muestra para dicho uso. Existen metodologías para obtener índices de calidad del agua, comparando el valor de los parámetros físicos, químicos y biológicos de una muestra con los correspondientes a la caracterización de base¹. Sin embargo, siempre es necesario analizar detalladamente los parámetros de una muestra, antes de calificarla como adecuada para un uso particular.

El Cuadro 2.1 resume los parámetros básicos de la calidad del agua, sus unidades de medida y su significado.

¹ Por ejemplo, el Índice de Calidad del Agua, desarrollado por la extinta Dirección General de Protección y Ordenación Ecológica de la S.A.R.H., y los Índices de Calidad del Agua Residual y del Agua Renovada (ICAR, ICAREN), utilizados por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal (DGCOH-DDF).

CUADRO 2.1 PRINCIPALES PARAMETROS DE CALIDAD DEL AGUA (Inicia).

PARAMETRO	UNIDAD	DESCRIPCION
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/l	Cantidad de oxígeno requerida por la materia orgánica disuelta para su descomposición.
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	Cantidad de oxígeno requerida para la oxidación de toda la materia oxidable, incluyendo materia orgánica e inorgánica.
Oxígeno Disuelto	mg/l	Oxígeno molecular disuelto en el agua, indispensable para la supervivencia de la mayoría de los organismos aerobios.
Coliformes Fecales y Totales	NMP /100 ml	Grupo de bacterias que tienen su desarrollo en el conducto intestinal de los humanos; su presencia indica contaminación fecal y, posiblemente, por bacterias patógenas.
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/l	(Detergentes) Sustancias solubles que abaten la tensión superficial, desintegran las partículas aglomeradas y emulsifican las grasas. Pueden ser inhibitorias de los procesos biológicos de tratamiento.
Nitrógeno de Nitritos y Nitratos	mg/l	El primero representa una etapa intermedia de oxidación; el nitrógeno de nitratos es el producto final de la oxidación del nitrógeno.
Nitrógeno Amónico	mg/l	Junto con el nitrógeno orgánico integra el nitrógeno total que, aun cuando es un nutriente bioestimulante que beneficia los procesos biológicos, puede causar eutroficación en cuerpos receptores. Se encuentra como sales de amoníaco o como amoníaco libre; en el agua residual indica contaminación reciente con productos nitrogenados.
Fosfatos Totales	mg/l	El fósforo es un nutriente que también puede estimular el crecimiento de algas; proviene de la excreción humana y de los detergentes.
Grasas y Aceites	mg/l	Incluyen grasas de origen vegetal, animal y derivados del petróleo; pueden causar obstrucciones en las líneas de conducción, formación de natas o inhibición del desarrollo de poblaciones bacterianas.
Conductividad	µS/cm	Se relaciona con la concentración de sólidos disueltos, y es proporcional al pH, la turbiedad y el color.
Alcalinidad	mg/l	La acidez y la alcalinidad miden la capacidad de la muestra para reaccionar con los iones oxhidrilos y los iones hidrógeno, respectivamente. Se divide en alcalinidad a la fenolftaleína y al amaranjado de metilo o total. Se expresa en mg/l como CaCO ₃ . Ayuda a amortiguar los cambios en el pH, aunque puede ser perjudicial para los procesos biológicos y causar problemas por incrustaciones en los conductos.
Dureza Total	mg/l	Propiedad debida a la presencia de iones metálicos de calcio y magnesio, principalmente, además del hierro y el estroncio; evita que el jabón haga espuma y produce incrustaciones en los sistemas de agua caliente. Causa desventajas económicas, aunque no representa un riesgo para la salud.
Potencial Hidrógeno (pH)	unidades	Es el logaritmo común negativo de la actividad del ion hidrógeno a_{H^+} . Es una medida del equilibrio ácido-base de compuestos disueltos.

CUADRO 2.1 PRINCIPALES PARAMETROS DE CALIDAD DEL AGUA (conclusión).

PARAMETRO	UNIDAD	DESCRIPCION
Color	unidades	El color aparente indica la presencia de sustancias disueltas y suspendidas en el agua; si las segundas son removidas, se dice que el color es verdadero. Para su determinación existen métodos colorimétricos visuales e instrumentales.
Sólidos Sedimentables	ml/l	Los sólidos presentes en el agua se dividen en sedimentables, disueltos y suspendidos. Los sedimentables se miden mediante su decantación en un cilindro de un litro.
Sólidos disueltos, suspendidos, fijos y volátiles.	mg/l	Los disueltos se deben a materia soluble y los suspendidos son partículas discretas que se retienen en un filtro. Cada uno se divide, a su vez, en sólidos fijos, que son aquellos que quedan después de la calcinación de la muestra, y volátiles, el resto del peso original de la misma; son un índice del contenido de materia mineral y orgánica, respectivamente.
Metales Pesados	mg/l	Algunos metales tienen efectos tóxicos sobre la materia viva, aun en concentraciones mínimas. Los principales son el plomo, el manganeso, el cromo hexavalente, el cadmio y el mercurio.
Turbiedad (UT)	unidades	La turbiedad es la propiedad que impide la penetración de la luz en la muestra. En campo se mide con el disco de Secchi o con un alambre de platino; en laboratorio, con el turbidímetro de Jackson o mediante técnicas nefelométricas. Tiene relación directa con la materia sólida presente en el agua.
Cloruros	mg/l	Son sustancias inorgánicas presentes en la orina, no removibles en procesos biológicos. Indican posible infiltración de aguas salobres o, en combinación con nitritos, nitratos y amoníaco, contaminación de las aguas residuales.

NOTA: NMP = número más probable; UT= unidades de turbiedad.

FUENTES: Refs. [7,8,9,10].

En el sentido más amplio, se habla de contaminación del agua cuando su calidad sufre una transformación que la hace inadecuada para un uso particular. Generalmente se aplica en relación con la calidad del agua natural, aunque no existe una sola calidad de la misma en todo el ambiente natural. Para el análisis del reúso, basta con referirse a la aptitud del agua para cada uso potencial, según la caracterización de parámetros prefijados. Por lo tanto, contaminante es aquel parámetro que genera inconvenientes por un uso determinado. Además, la calidad del agua experimenta, en el medio natural, modificaciones debidas a una serie de procesos naturales, que se presentan en el Cuadro 2.2 . Los sistemas de tratamiento reproducen en distinto grado los efectos de los procesos ambientales.

CUADRO 2.2 PROCESOS AMBIENTALES QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL AGUA.

CLASIFICACION	PROCESO	DESCRIPCION	PROCESOS UNITARIOS RELACIONADOS
FISICO-QUIMICOS	Fotólisis	Transformación química de compuestos presentes en el agua, al entrar ésta en contacto con la luz, dependiendo de la estructura química de aquéllos.	Procesos biológicos y desinfección.
	Hidrólisis	Interacción de un grupo hidroxilo (-OH) con la estructura de compuestos orgánicos, con la pérdida de un grupo funcional; la velocidad de reacción puede incrementarse con la presencia de un ácido o una base.	Precipitación química, coagulación, floculación y oxidación química
	Oxidación	Introducción de un átomo de oxígeno en un compuesto químico. En el caso de la materia orgánica carbonácea, puede inducir su descomposición hasta dióxido de carbono y agua.	Mezcla, transferencia de gases, oxidación química, procesos biológicos y desinfección.
	Especiación Química	Dependiendo de sus características, un compuesto puede ser precipitado, adsorbido o absorbido por materia orgánica e inorgánica, permanecer en fase líquida como ión o formar moléculas complejas.	
DE TRANSPORTE	Volatilización	Se presenta en compuestos químicos orgánicos e inorgánicos con alta presión de vapor o baja solubilidad.	Mezcla y transferencia de gases.
	Sorción	Proceso por el cual un componente se transfiere de una fase para acumularse en otra, particularmente cuando la segunda es sólida. Se divide en absorción y adsorción.	Sedimentación, filtración, adsorción, precipitación química, coagulación y procesos biológicos.
	Absorción:	Se produce cuando las moléculas o átomos de una fase penetran uniformemente en otra, formando una solución en ella.	
	Adsorción:	Es la acumulación de sustancias en una superficie o interfase, ya sea líquido-líquido, gas-líquido o líquido-sólido.	
BIOLÓGICOS	Bioacumulación	Tendencia de ciertos compuestos químicos a acumularse en especies vivas, especialmente importante en compuestos químicos hidrofóbicos solubles dentro de tejidos grasos o lípidos.	Procesos biológicos.
	Biodegradación	Transformación de compuestos químicos en otros más simples, debida a las enzimas propias de organismos vivos, demandantes de energía y carbono.	Procesos biológicos.

Fuente: Ref. [11]

2.3 Tratamiento de Aguas Residuales

El **tratamiento de aguas** consiste en la transformación de su calidad mediante procesos físicos, químicos o biológicos, para alcanzar requisitos prestablecidos.

Como **agua residual** puede calificarse cualquier agua remanente de un uso o proceso. Dependiendo del uso original, un agua residual se clasifica como doméstica, industrial, comercial o mixta, aunque se pueden establecer subdivisiones y rangos de calidad.

El agua residual sin tratamiento previo no puede ser utilizada prácticamente para ningún uso sin inconvenientes serios. Según el empleo a que se destine el agua tratada, deben llevarse a cabo distintas operaciones de tratamiento, de manera secuencial.

Desde el punto de vista técnico, es necesario considerar dos condiciones:

- La transformación en la calidad del agua mediante un proceso, o mediante la combinación de varios, siempre es limitada. A cada uno se asocia un grado o porcentaje de remoción de cada parámetro, que depende, a su vez, de la calidad del agua original, de la secuencia de los procesos de tratamiento, de las condiciones ambientales en que se desarrollan y del volumen del agua por tratar.
- La calidad de las aguas crudas, lo mismo que el caudal, varía no solamente con la ubicación geográfica de la población, sino con la época del año y la hora del día. La confiabilidad del tratamiento resiente estas variaciones.

El conjunto de procesos de tratamiento se clasifica en los siguientes grupos:

- a) **Tratamiento Preliminar.** Remoción del material grueso mediante su cribado o desmenuzado, así como de arenas, grasas o ambas.
- b) **Tratamiento Primario.** Permite remover, mediante sedimentación, sólidos orgánicos e inorgánicos; comprende también la remoción de natas o grasas flotantes y la espumación, cuando es necesario.
- c) **Tratamiento Secundario.** Se refiere al tratamiento biológico, en el cual la materia orgánica, al servir de alimento a una masa biológica, se convierte en materia removable por sedimentación secundaria. Se divide convencionalmente en procesos de medio fijo y procesos de medio suspendido.

- d) **Tratamiento Avanzado o Terciario.** Corresponde al conjunto de procesos físicos y químicos para remover contaminantes remanentes en un agua tratada a nivel secundario, o bien, aumentar la eficiencia en la remoción de uno o varios parámetros en los niveles primario y secundario.
- e) **Desinfección y Control Viral.** Se aplican al agua tratada a cualquier nivel, para reducir la población de bacterias patógenas y virus.

El Cuadro 2.3 resume las características de los procesos más usuales, y el Cuadro 2.4 los rangos o valores aproximados de su eficiencia en la remoción de los principales contaminantes. La Figura 2.1 presenta los principales procesos de tratamiento, para los distintos niveles.

2.4 Criterios para el Diseño de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales

La ingeniería de los procesos de tratamiento parte de trabajos de campo para la caracterización cualitativa y cuantitativa del agua residual. Esta es evaluada en función de la calidad deseable para el agua tratada, se proponen procesos aplicables y se realizan experimentaciones de tratabilidad, simulando en laboratorio dichos procesos con muestras del agua residual en cuestión, de las que se obtienen los parámetros de diseño para la ingeniería básica de los sistemas de tratamiento. En esta fase se lleva a cabo un análisis conceptual técnico y económico de alternativas de tratamiento, diseñando dimensionalmente las unidades sin considerar la selección de equipos específicos.

Una vez que se selecciona el sistema más conveniente, el diseño básico se ajusta a las características de equipos existentes y se desarrolla el diseño ejecutivo o de detalle, incluyendo diseño hidráulico, arquitectónico, electromecánico, estructural y de instrumentación. En cada planta de tratamiento existirá una secuencia de procesos, llamada **tren de tratamiento**, acorde a los requerimientos del caso.

Para la planeación y programación del reúso son de interés los siguientes aspectos, relativos al diseño de una planta de tratamiento:

- Usualmente el tiempo para los trabajos de campo es restringido, por lo que la información obtenida en pocos casos cubre un periodo suficiente para registrar las variaciones anuales en la cantidad y la calidad del influente.

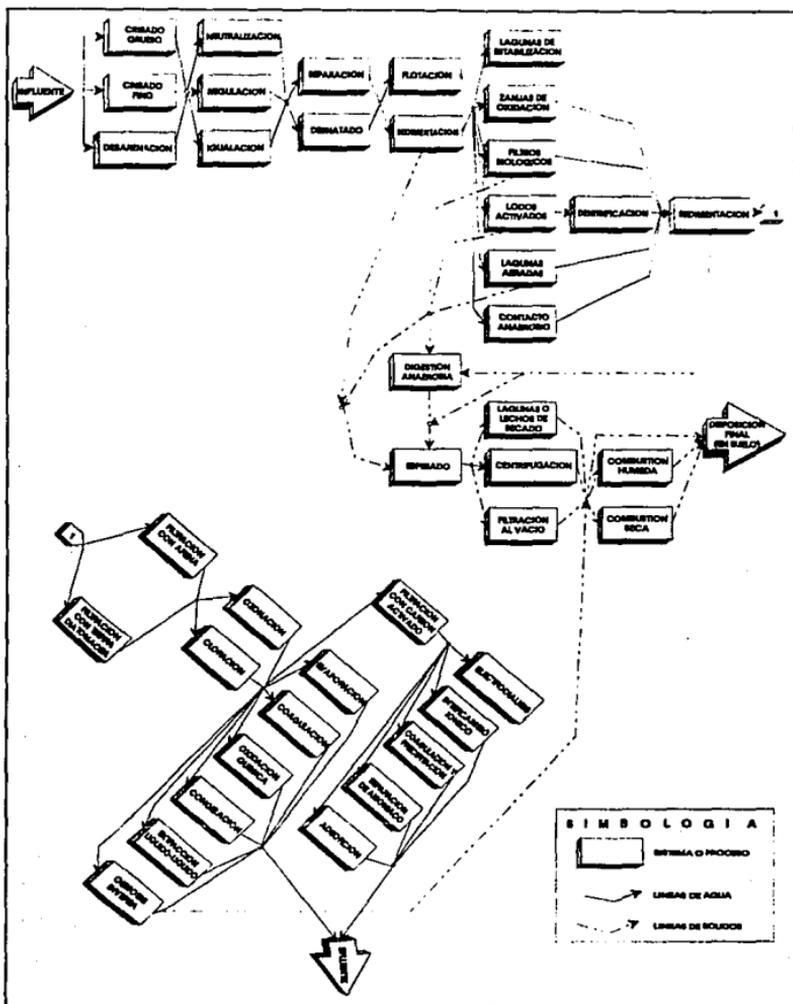


Figura 2.1 Principales sistemas de tratamiento de agua (adaptado de [14]).

CUADRO 2.3 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (inicia).

PROCESO DE TRATAMIENTO	DESCRIPCION
TRATAMIENTO PRELIMINAR Y TRATAMIENTO PRIMARIO	<p>El tratamiento preliminar incluye remoción del material grueso por medio de rejillas, desmenuzando del material removido para su reintegración al agua por tratar y remoción de arenas, gravas y otros sólidos pesados inertes.</p> <p>El tratamiento primario abarca la sedimentación primaria, con aditivos coagulantes o sin ellos, y la remoción de sólidos flotantes y grasas; ocasionalmente se aplica cloro en esta fase.</p>
ESPUMACION	<p>Se basa en la formación de espumas mediante inyección de aire y recolección superficial, con objeto de remover parcialmente la concentración de detergentes refractarios.</p>
TRATAMIENTO SECUNDARIO	
LAGUNAS DE ESTABILIZACION	<p>En ellas se produce la oxidación biológica de las aguas residuales mediante procesos aerobios, caso en el cual se denominan <u>de oxidación o aerobias</u>, aerobios y anaerobios, en las lagunas <u>facultativas</u>, o totalmente anaerobios. Básicamente, la oxigenación es generada por procesos fotosintéticos de algas microscópicas bajo la acción solar; este proceso es sensible a la temperatura, la relación precipitación- evaporación, la insolación y la velocidad del viento. En su diseño debe cuidarse que el tiempo de retención, de unos 30 días, no se vea perjudicado por la ocurrencia de circuitos cortos del flujo. Normalmente tiene tirantes de 1 a 1.5 metros.</p>
LODOS ACTIVADOS	<p>Se basa en la formación de un sistema biológico, en el cual los sólidos orgánicos contenidos en las aguas residuales sirven de alimento a una masa microbiana en un medio suspendido y provisto de oxigenación adecuada; se complementa con sedimentación secundaria, para la remoción de los sólidos biológicos y la recirculación de una parte de los mismos. Tiene distintas variaciones, como las siguientes:</p> <p><u>Flujo Pistón</u>. El suministro de aire a lo largo del reactor es variable.</p> <p><u>Mezcla Completa</u>. Las concentraciones de alimento, microorganismos y aire son uniformes en el reactor de aeración.</p> <p><u>Aeración por Pasos</u>. El influente y el aire son introducidos al reactor en distintos puntos del proceso.</p> <p><u>Oxigenación con Oxígeno Puro</u>. Permite el ingreso de mayores cargas o la disminución del tiempo de retención.</p> <p><u>Aeración Extendida</u>. Se diseña con mayores tiempos de retención hidráulicos, y opera con altas concentraciones de sólidos en una mezcla completa, produciendo un efluente nitrificado y lodos más estables.</p> <p><u>Zanjas de Oxidación</u>. Representan una variación del sistema de aeración extendida, con agitación mecánica y oxigenación por difusión.</p> <p>Los sistemas de aeración extendida resisten mayores fluctuaciones en la carga orgánica o hidráulica, son de fácil operación y producen lodos mineralizados, aunque pueden tener alto consumo de energía. En todos los procesos de lodos activados, la sedimentación eficiente es esencial para un desempeño adecuado del sistema.</p>

CUADRO 2.3 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (continuación).

PROCESO DE TRATAMIENTO	DESCRIPCION
NITRIFICACION	Consiste en oxidar el nitrógeno amoniacal a nitrógeno de nitratos, mediante el empleo de procesos de tratamiento biológico en reactores mezclados, con tiempos de retención y manejo de concentraciones de sólidos adecuados, o mediante procesos de dos pasos, para remoción de materia carbonácea y de nitrógeno, respectivamente. Requieren, además, de mayor control de la calidad del agua influente.
DENITRIFICACION	Es un proceso en el que el nitrógeno de nitratos es reducido a gas nitrógeno, evitando la oxigenación de la mezcla o, incluso, inyectándole metanol como fuente complementaria de carbón.
FILTROS PERCOLADORES O ROCIADORES	Es un sistema biológico de medio fijo, en el cual el agua residual se hace percolar a través de un lecho de piedras o elementos plásticos, en la superficie de los cuales se forma una película bacteriana que aprovecha la materia orgánica del influente; se acompaña de un sedimentador secundario, del que puede hacerse recircular parte del gasto al filtro. El sistema es fácil de operar; es posible atenuar, mediante la recirculación, los choques de carga orgánica influente.
DISCOS BIOLOGICOS	Es el segundo sistema usual de medio fijo; en éste, un sistema rotatorio de discos, construidos en material plástico, se encuentra sumergido parcialmente en las aguas residuales, formando una película biológica en su superficie. En este sistema no hay recirculación.
TRATAMIENTO TERCARIO	
COAGULACION-SEDIMENTACION	Consiste en: <ul style="list-style-type: none">- adición de coagulantes químicos a las aguas residuales para remoción de contaminantes mediante precipitación,- mezclado rápido de los productos químicos con el agua,- mezclado lento para permitir la formación de flocúlos,- y sedimentación sin ninguna mezcla para separar los flocúlos formados. Se emplean como coagulantes cal, sales de aluminio, sales de fierro y polímeros. Es un proceso complicado en su operación y mantenimiento, y depende más del control adecuado del proceso químico que de la calidad del influente.
FILTRACION	El efluente de otro proceso se hace percolar a través de un medio filtrante granular, por gravedad o por bombeo, hasta que éste se obstruye y es necesario efectuar un retrolavado. Los medios filtrantes se componen de dos o más lechos distintos; se utilizan para el efecto arena, antracita, carbón activado y resina. Se requiere de un monitoreo cuidadoso de la calidad del efluente.
RECARBONATA-CION	Consiste en añadir CO_2 al agua tratada previamente con cal, con objeto de reducir su pH y evitar posterior sedimentación de depósitos de calcio. Puede llevarse a cabo también añadiendo un ácido débil, aunque así no se logra la remoción del calcio del efluente. Su operación no es complicada.

CUADRO 2.3 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (conclusión).

PROCESO DE TRATAMIENTO	DESCRIPCION
ADSORCION CON CARBON ACTIVADO	El agua percola en un medio de carbón activado, en el que la materia orgánica soluble es adsorbida en los poros de las partículas de carbón hasta que éste pierde su capacidad de adsorción; requiere de regeneración o sustitución periódica, no de retrolavado.
SEPARACION DE AMONIACO	Permite la remoción de nitrógeno, en forma de amoniaco gaseoso mediante la agitación de la mezcla en presencia de aire y con valores altos del pH (mayores a 10.5); puede presentar eficiencias bajas a temperaturas bajas, y depósitos de carbonato de calcio.
INTERCAMBIO IONICO SELECTIVO	Es un proceso a través del cual iones de una clase dada son desplazados de un material de intercambio insoluble por iones en solución, de una clase diferente a los primeros. Requiere de la regeneración periódica de la capacidad de intercambio selectivo del material, por ejemplo, resina.
CLORACION A PUNTO DE QUIEBRE	Consiste en la dosificación de cloro para oxidar la materia orgánica nitrogenada hasta lograr mantener cloro residual libre. Se aplica como complemento a otros sistemas de remoción de contaminantes orgánicos y nutrientes.
OSMOSIS INVERSA	Consiste en la inversión del proceso de ósmosis mediante la aplicación de presión en el lado de mayor concentración de sales; puede presentarse taponamiento de la membrana, por lo que se utiliza para efluentes con alto grado de tratamiento previo.
DESINFECCION	
CLORACION	Se utiliza cloro como oxidante para desinfectar las aguas residuales tratadas, monitoreando el cloro residual para controlar la dosificación. Su eficiencia depende de diversos factores. En ocasiones es necesario dechlorar los efluentes, mezclándolos con dióxido de azufre.
OSONACION	Se utiliza ozono como oxidante para remover virus, bacterias y otros organismos patógenos, así como olor, color y sabor del agua tratada; presenta eficiencia y confiabilidad altas, aunque no tiene capacidad residual para protección de los efluentes.

FUENTE: REF. [7]

La ubicación de una planta de tratamiento es definitiva y su capacidad, medida en módulos fijos, crece a partir de un valor inicial o de primera etapa hasta un valor máximo, que corresponde a la generación de aguas residuales en el área servida saturada.

2.4.1 Criterios para el Proyecto de Plantas de Tratamiento para Saneamiento.

Los principales son los siguientes:

- a) **Ubicación.** Se ajusta al proyecto de la red de drenaje; las plantas se ubican en las partes más bajas del área drenada, en puntos cercanos a los cuerpos receptores y que cuenten al mismo tiempo con las mejores condiciones de comunicación y acceso para transporte del personal, el equipo, los materiales para proceso y los residuos del tratamiento, con suministro de energía eléctrica o cercana a líneas de transmisión existentes. Se prefiere que queden aisladas de zonas habitacionales.

La ubicación del predio definitivo se hace una vez que se conocen la capacidad y el sistema de tratamiento a utilizar, ya que dependiendo de ello varían las necesidades de superficie, geometría o topografía. Se evalúan también el tipo de suelo, el régimen de propiedad, el costo y las adecuaciones necesarias para dejar listo el terreno para la construcción de las instalaciones.

- b) **Capacidad.** Está definida por los caudales que aporte el área drenada correspondiente. Cuando no se cuenta con aforos, es común calcularla como un porcentaje de la dotación de agua potable multiplicado por la densidad de población y por el área, a pesar de que los dos primeros datos pueden ser aproximados o supuestos. Los principales errores ocurren cuando se usan dotaciones recomendables de acuerdo al clima, las que pueden ser superiores a las reales.

Es importante reiterar que la capacidad se define en forma modular, por ejemplo, cinco módulos de 100 l/s para una primera etapa de 500 l/s de capacidad total como gasto medio. Un diseño excedido cuesta tener ocioso el equipo; asimismo, un diseño escaso obliga a la sobrecarga de los módulos, con disminución en la eficiencia de los procesos o franca inoperabilidad y a la gestión de financiamiento fuera de programa, además de causar el incumplimiento de las normas de descarga y el pago de las cuotas o multas correspondientes.

De ahí la importancia de contar, cuando sea posible, con la mayor cantidad de aforos de los colectores, además de datos reales de suministro de agua potable y consumos industriales y comerciales.

- c) **Sistema de Tratamiento.** Se selecciona para cumplir con los requisitos de descarga en cuerpos naturales de agua, o cuerpos receptores, según el nivel de remoción necesario para los principales parámetros de calidad.

CUADRO 2.4 EFICIENCIA DE REMOCION DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES (Inicia).

SISTEMA DE TRATAMIENTO	PARAMETROS O CONTAMINANTES									
	DBO ₅	DQO	COLIF	SAAM	NO ₂ NO ₃	N (NH ₃)	PO ₄ TOT.	CON- DUC.	ALC.	GR/ AC
CRIBADO Y DESARENACION	0-5									
REMOCION DE GRASAS	0-5									15-50
ESPUMACION				60-90						
LODOS ACTIVADOS (CONVENCIONAL)	75-90	50-75	75-90	50-75		50-75	25-50	80-90	25-50	50-75
AERACION EXTENDIDA	90-95	50-75	75-90	50-75	+	75-99	25-50	90-95	25-50	50-75
NITRIFICACION	50-75	50-75	75-90		+	75-99	50-60	50-65		
DENITRIFICACION	0-25	0-25			75-95	25-50	50-60	35-45		
FILTROS PERCOLADORES O ROCIADORES	50-75	50-75						60-70		
DISCOS BIOLOGICOS	90-95	N.D.						80-95		
COAGULACION-SEDIMENTACION	50-75	50-95	75-90	25-50			70-95	65-90	VAR.	25-50
FILTRACION DESPUES DE LODOS ACTIVADOS	25-50	25-50			50-75	25-50	50-60	70-80	80-85	
RECARBONACION										
ADSORCION CON CARBON ACTIVADO	50-75	25-50	0-25	50-75	0-25	25-50	80-90	60-70	+	25-50
SEPARACION DE AMONIACO						50-99				
INTERCAMBIO IONICO	25-50	25-50				75-90		60-70		
CLORACION A PUNTO DE QUEBRE			50-80	50-75		75-99				
OSMOSIS INVERSA	75-90	75-90	75-90	50-75			99			
DESINFECCION CON CLORO			95-99							
OZONACION			95-99	0-25						25-50

ABREVIATURAS: DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días-20°C); DQO: Demanda Química de Oxígeno; COLIF: Coliformes Totales; SAAM: Sustancias Activas al Azul de Metileno; NO₂-NO₃: Nitrógeno de nitritos y nitratos; N (NH₃): Amónico; PO₄ tot: Fosfatos Totales; COND: Conductividad; ALC: Alcalinidad Total; GR/AC: Grasas y Aceites.

NOTAS: (+) Se produce un incremento;

N.D.: No se ha definido de manera concluyente.

(Los espacios en blanco indican que no hay remoción considerable)

FUENTES: [7],[11]

**CUADRO 2.4 EFICIENCIA DE REMOCION DE LOS
PRINCIPALES CONTAMINANTES (conclusión).**

SISTEMA DE TRATAMIENTO	DZA. TOT.	pH	CO-LOR	SOL. SED.	SDF	SDV	SSF	SSV	TURB	CLS
CRIBADO Y DESARENACION				0-20						
REMOCION DE GRASAS										
SEDIMENTACION PRIMARIA	10-20	50-60					80	40	30-40	
ESPUMACION										
LODOS ACTIVADOS (CONVENCIONAL)			50-60			0-5	90	90	80-90	
AERACION EXTENDIDA			50-60				90	90	80-90	
NITRIFICACION									80-90	
DENITRIFICACION										
FILTROS PERCOLADORES O ROCIADORES										
DISCOS BIOLOGICOS										
COAGULACION-SEDIMENTACION	20 ¹				20	20	60	70	70-90	10
FILTRACION							60	80	70-80	
RECARBONATACION	30 ²	VAR.								
ADSORCION CON CARBON ACTIVADO					10		95	95	70-75	10
SEPARACION DE AMONIACO		VAR.								
INTERCAMBIO IONICO					95 ³					90-95
CLORACION A PUNTO DE QUIEBRE										
OSMOSIS INVERSA	70 ³				90	90				80
DESINFECCION CON CLORO										
OZONACION					10					

ABREVIATURAS: DZA.TOT.: Dureza total; pH: potencial hidrógeno; S.SED.: Sólidos Sedimentables; SDF: Sólidos Disueltos Fijos; SDV: Sólidos Disueltos Volátiles; SSF: Suspendedos Fijos; SSV: Suspendedos Volátiles; TURB: Turbiedad; CLS.: Cloruros.

NOTAS:

1 - Considerando sales de Magnesio y Calcio.

2 - Considerando Magnesio, Calcio y Hierro.

3 - Incluyendo sólidos disueltos fijos y volátiles (totales).

(Los espacios en blanco indican que no hay remoción considerable)

FUENTES: [7],[11].

Sin embargo, en algunos casos no se pueden satisfacer los requisitos de descarga para todos los parámetros mediante sistemas de tratamiento accesibles a la capacidad financiera de los organismos operadores de los sistemas de drenaje o de los municipios. Por ello, se ha tomado como un nivel mínimo convencional el tratamiento secundario con desinfección de efluentes y tratamiento de lodos, aunado a la normalización del saneamiento en las fuentes particulares de las aguas residuales.

También influyen en la selección del sistema la disponibilidad de sitios para ubicación de las instalaciones, las características del suelo en la zona, las posibilidades de reúso del efluente, la facilidad en la operación, su adecuación al clima, el consumo de energía, la disponibilidad de reactivos y otros materiales para procesos, la confiabilidad requerida de la calidad del efluente y el impacto ambiental de las instalaciones.

2.4.2 Tratamiento de Aguas Residuales para Reúso.

Enseguida se mencionan algunas de las particularidades del diseño de plantas de tratamiento para reúso.

En general, los proyectos de tratamiento de aguas residuales siguen los mismos criterios indicados en el punto anterior, aunque existen algunas diferencias importantes:

- a) **Ubicación.** Las plantas de tratamiento para reúso se ubican en los sitios más adecuados en relación con las zonas de generación de aguas residuales y las zonas en que se encuentran los usuarios potenciales; sobre este punto se abundará en el capítulo 4. Por otra parte, tomando en cuenta que estas plantas se encuentran en la mayoría de los casos dentro de áreas urbanas, es importante considerar el impacto ambiental que pueden provocar, dependiendo del sistema que apliquen.
- b) **Sistema de Tratamiento.** El sistema seleccionado en una planta para reúso depende primordialmente del costo mínimo para lograr la calidad más conveniente, de manera que se satisfaga la que requiera el mayor número de usuarios a costo competitivo contra el agua potable. En los demás aspectos, los criterios aplicados son semejantes a los de las plantas para saneamiento.
- c) **Capacidad, modulación y crecimiento.** La capacidad de una planta para reúso se define a partir de la generación aprovechable de agua residual y de la demanda de agua renovada. En su modulación influye también la necesidad de contar con la mayor confiabilidad posible en la calidad y el gasto del efluente.

2.5 Costos de Conducción de Aguas Residuales

En los costos de los sistemas de conducción de aguas residuales y renovadas participan distintos elementos, principalmente: construcción, no constructivos asociados a la obra, de operación y mantenimiento y de financiamiento.

Cuando las tuberías de drenaje no trabajan bajo presión, sino como canales, el costo principal es el de construcción, con excepción de los trabajos de mantenimiento. Los costos de construcción incluyen:

- excavación de zanjas, colado de plantilla, encamado, colocación de tubería, relleno de zanja con compactación, costo de la tubería, corte, rotura y reposición de pavimento, señalización y protección, así como los fletes;
- pozos de visita (excavación, plantilla, muros, escalera marina, brocal y tapa),
- obras especiales, como pozos con caída, cajas deflectoras, disipadores de energía u otras,
- bombeo de achique, ademe de excavaciones y fumigación.

Para el caso de conducciones por bombeo, inciden en el costo:

- cajas de válvulas, piezas especiales, cárcamos y estaciones de bombeo;
- construcción de instalaciones y caseta;
- equipamiento e instrumentación en la planta de bombeo;
- tubería, piezas especiales y válvulas en la planta;
- longitud de la línea de conducción, con los costos correspondientes: excavación, plantilla, rellenos y compactación; corte, rotura y reposición de pavimentos; costo de la tubería y las piezas especiales en su recorrido, instalación de las mismas.

Los costos de operación y mantenimiento en una red de drenaje incluyen: desazolve de los conductos, energía eléctrica empleada para bombeo, lubricantes, combustibles, refacciones y replazos. Para el bombeo el costo anual corresponde al equipamiento: bombas de operación y de reserva, mecanismos de elevación y operación, sistemas de control y señalización eléctrica. Se toman en cuenta también la depreciación de los equipos, los costos de financiamiento, si los hay, y los de operación y administración.

2.6 Costos de Tratamiento de Aguas Residuales

2.6.1 Elementos que Integran los Costos de Tratamiento.

El costo del tratamiento de aguas residuales se expresa como costo por unidad de capacidad instalada o de operación, o bien como costo por unidad de volumen de agua tratada. Es usual definirlo en costo por metro cúbico de agua renovada.

Dicho costo se compone de la siguiente manera:

a) **Costos de Capital.**

- **Constructivos** (construcción nueva o rehabilitación de instalaciones existentes): excavaciones y rellenos, concreto, acero estructural, tuberías para procesos y fontanería, instalaciones eléctricas, incluyendo plantas y subestaciones, cancelería y acabados.
- **No constructivos** asociados a la obra: legales y administrativos, estudios preliminares, adquisición de terrenos, pago de indemnizaciones, pago de derechos de vía, honorarios de la ingeniería y la arquitectura de proyecto, honorarios de ingeniería en supervisión, reubicación de antiguos propietarios, demolición y acarreo de estructuras existentes, interés que se paga durante la construcción, contingencias y seguros durante la construcción, indirectos y utilidades del constructor.
- **Equipamiento**, incluyendo suministro, montaje y prueba de todas las unidades de proceso e instrumentación. Los siguientes son equipos típicos de una planta de tratamiento, aunque en cada caso sólo se encontrarán los correspondientes al sistema de tratamiento en cuestión (no se incluye equipo para tratamiento avanzado):
 - bombeo de influente: bombas centrífugas o de desplazamiento positivo tipo tornillo, éstas en canal tubular o canal abierto, e instalaciones correspondientes;
 - tratamiento preliminar: cribas con mecanismos de limpieza manuales o automáticos, desmenuzadores y bomba de retorno de materia desmenuzada, desarenadores con mecanismos recolectores o sistemas de clasificación de arenas y bomba de retorno de finos, desgrasadores con compresores para inyección de aire y mecanismos de recolección de grasas, bandas transportadoras o cangilones, tolvas;
 - sedimentación: pozo de influente, canaletas, estructuras de soporte y rastras con

mecanismo motor, ocasionalmente hoja desnataadora y bomba para succión de las natas;

- aeración: compresores, tuberías para aire y difusores de burbuja gruesa o fina, equipos para inyección de oxígeno puro, equipos para agitación mecánica, ya sean agitadores flotantes, cepillos o mezcladores sumergibles tipo hélice;
- sistemas de medio fijo: discos biológicos (cubierta, discos y unidad motriz), brazo para filtro rociador;
- desinfección: equipos para dosificación, polipastos para movimiento de cilindros, bombas de ayuda y de dosificación;
- digestión de lodos: aeradores o agitadores mecánicos, difusores;
- acondicionamiento y desaguado de lodos: equipos para dosificación de productos químicos, como bombas de émbolo, de diafragma o dosificadores de sólidos, mezcladores mecánicos y medidores de flujo;
- equipos de bombeo en general: centrífugos, de tornillo, de cavidad progresiva, de émbolo, de diafragma, de combustión interna;
- equipos de control e instrumentos: compuertas con mecanismos de elevación, polipastos, malacates, válvulas con actuadores, medidores de flujo, medidores de calidad del agua, electroneveles, detectores y alarmas de sobrecarga en unidades móviles;
- otros equipos: bombas de achique, muestreadores automáticos, equipos de análisis en laboratorios y equipos para limpieza y mantenimiento.

b) Costos Anuales, que incluyen:

- operación y mantenimiento: mano de obra, partes de remplazos previstos, productos químicos, combustibles y energía eléctrica,
- reparaciones mayores y contingencias,
- depreciación de equipos e instalaciones,
- seguros,
- amortización, e
- intereses sobre préstamos.

2.6.2 Principales Elementos del Costo del Tratamiento Terciario.

Para la estimación de costos por tratamiento avanzado debe tomarse en cuenta que algunos procesos implican la aplicación de procesos previos, como es el caso de la ósmosis inversa, que frecuentemente va precedida por la corrección del pH, la filtración y la adición de hexametrafosatos.

En general es difícil dar índices para la inversión en tratamiento terciario. En cuanto a costos anuales, pueden darse las siguientes reglas ⁽⁵⁾:

- Cada tipo de tratamiento terciario tiene requerimientos de personal diferentes en calidad y cantidad.
- El mantenimiento y remplazo de piezas consumibles se estima en 5 por ciento anual del costo del equipo.
- Los periodos de amortización pueden ser considerados de 10 años para el equipo y de 25 a 40 años para la obra civil.
- Los gastos de energía y reactivos dependen también del tipo de tratamiento. Cuando existe bombeo, es importante el costo de la energía; para la filtración en carbón activado, la energía se emplea también para la regeneración de éste. En la ósmosis inversa cuenta mucho el remplazo de las membranas. En cada caso debe considerarse el costo del reactivo utilizado: cal, cloruro férrico, polímeros, ácido sulfúrico, cloro gaseoso, hexametrafosato, etc.

El costo del tratamiento terciario está integrado principalmente por el costo del equipo, y depende por eso de las condiciones de los fabricantes más que del diseño de la obra civil y mecánica.

2.6.3 Métodos para la Estimación Preliminar de Costos de Tratamiento.

Los costos de tratamiento pueden ser estimados, en la fase de planeación, mediante el uso de gráficas, como las de Arceivala, las publicadas por la Environmental Protection Agency (EPA) o las de la publicación "Engineering News Record" (ENR), o bien mediante ecuaciones, como las desarrolladas por Klei, con la salvedad de que los últimos tres casos corresponden a costos de los Estados Unidos de Norteamérica. Son útiles para efectuar análisis comparativos. Es conveniente adecuarlos a las condiciones de nuestro país.

En estos métodos, la determinación de los costos de construcción se ajusta al siguiente modelo:

$$c = ax^b + d$$

en donde:

- c: costo de construcción,
- a: costo unitario (por unidad de capacidad o por habitante servido),
- x: capacidad promedio (gasto medio) de la planta, o bien, número de habitantes en la zona de aportación a la planta,
- b: exponente por economías de escala y
- d: costos fijos, independientes de la capacidad de la planta.

Otro medio para el desarrollo del anteproyecto y el presupuesto preliminar de plantas de tratamiento consiste en la aplicación de programas de computación. La EPA y el U.S. Army Corps of Engineers desarrollaron el programa "Computer Assisted Procedure for the Design of Wastewater Treatment Facilities", llamado CAPDET, que permite predecir el desempeño y obtener costos de distintos trenes de tratamiento.

El CAPDET emplea cuatro índices para la actualización de los costos:

- costos de construcción de la EPA,
- índice Marshall and Swift (MAS),
- índices del Engineering News Record e
- índices de costo de tuberías.

El costo obtenido depende del gasto de diseño, la calidad esperada en el influente y el tren de tratamiento seleccionado.

En este caso también es necesario tomar en cuenta las diferencias de costos entre nuestro país y los Estados Unidos, para efectuar las correcciones pertinentes. De los conceptos utilizados por CAPDET puede indicarse lo siguiente⁽⁷⁾:

- pueden tener un costo similar en nuestro país: concreto en muros y losas, renta de grúas, electricidad, productos químicos;
- pueden costar cerca del 50 por ciento o menos en México: edificaciones, techumbres de bodegas, tubería y piezas especiales, mano de obra;
- el movimiento de tierras es, generalmente, más caro en nuestro país.

En caso de aplicar el CAPDET, es necesario también recordar que sus índices no incluyen los costos no constructivos asociados a la obra ni los fletes, montaje o pruebas de equipamiento. Es recomendable cotejar los costos que se obtengan con los que se presenten en plantas cercanas a la ciudad del proyecto o ubicadas en la misma, ya que los resultados pueden no ser enteramente confiables. Por desgracia, en nuestro país no existe aún la información estadística suficiente para desarrollar una metodología semejante, aun cuando ya está a la venta un paquete para prediseño y estimación de costos de plantas de tratamiento, desarrollado por una empresa nacional.

2.6.4 Estimación de Costos a Nivel de Anteproyecto.

Una vez que se cuenta con el anteproyecto de la planta de tratamiento, los costos pueden ser estimados con mayor exactitud a partir de la siguiente información:

- arreglo general de la planta sobre plano topográfico, marcando niveles de terreno terminado y de vialidades;
- perfil hidráulico, indicando los niveles de las distintas estructuras;
- cortes para cuantificación de excavaciones y rellenos;
- dimensionamiento y anteproyecto estructural, indicando espesores y cantidades de acero.

Los conceptos que pueden ser determinados a este nivel son:

a) **Obra civil:**

- limpieza y desyerbe del terreno,
- trazo y nivelación para desplante de estructuras,
- excavación a mano o con maquinaria,
- plantilla de concreto simple,
- tabique, tabicón, concreto y acero estructural y de refuerzo,
- mortero para junteo y aplanado, y
- rejillas de piso, compuertas, vertedores, brocales, pasamanos, andaderas y escaleras metálicas.

b) Equipos de bombeo:

- bombas de influente
- bombas para proceso:
 - recirculación
 - natas
 - lodos
 - purga
 - lixiviados

según potencia, gasto y carga total estimados.

c) Fontanería (Tubería):

- según unidad de proceso, material, diámetro, clase o cédula e instalación,
- piezas especiales y válvulas.

d) Equipos para proceso:

- unidades motrices,
- rastras,
- agitadores mecánicos y mezcladores,
- brazos distribuidores (filtros percoladores),
- compresores y sopladores,
- grúas, polipastos y transportadores de bandas o cangilones, y
- bombas para riego o reúso interno.

e) Conceptos arquitectónicos:

- edificios, costo por metro cuadrado estimado,
- carpeta asfáltica, por metro cuadrado, y
- banquetas con guarniciones, por metro cuadrado.

El propósito de este presupuesto es obtener costos preliminares antes de seleccionar el equipo definitivo e incluso considerando varias opciones en algunos casos. Por lo anterior, deben aceptarse valores aproximados para muchos de los conceptos, ya que no se cuenta en esta fase con proyecto estructural, datos precisos de fabricantes de equipo ni otros detalles que sólo se tendrán una vez concluido el proyecto ejecutivo. Puede considerarse, sin embargo, que los costos obtenidos serán mucho más cercanos a los reales. Para ello deben considerarse la utilidad del constructor y del proveedor de los equipos.

Para estimar los costos anuales es posible definir la plantilla de personal (ver tabla 5.2, en el Capítulo 5), estimar los consumos de energía eléctrica y combustibles, así como los de productos químicos para los procesos, calcular la depreciación de los equipos con base en costos promedio y suponer porcentajes para remplazos, reparaciones y contingencias.

Por último, para el análisis financiero se recomiendan los siguientes periodos de vida útil para los elementos de la planta ^[12]:

CUADRO 2.5 VIDA UTIL DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

CONCEPTO	VIDA UTIL	DEPRECIACION ANUAL
Estructuras menores	20-30	5.0-3.3
Estructuras mayores	30-50	10.0-6.7
Equipos de bombeo	10-15	10.0-6.7
Equipos de proceso	15-30	6.7-3.3
Tuberías	10-20	10.0-5.0
Edificios, mampostería y estructura metálica	20-25	5.0-4.0

Fuente: [12]

3

aspectos técnicos, sanitarios, legales y aceptación social del reúso del agua

3.1 Regulación y Distribución del Agua Renovada

3.1.1 Características de la Producción y la Demanda de Agua Renovada:

El diseño hidráulico de los sistemas de reúso queda definido por el balance entre gastos de captación, regulación en la planta, regulación adicional y operación de la red de distribución.

La variación horaria de la generación de aguas residuales sigue una tendencia aproximadamente proporcional al patrón horario de consumo de agua, con un desfase temporal que depende del recorrido del agua desde la descarga domiciliar hasta la sección de la obra de toma de la planta.

Dentro de la planta el flujo es regulado en distintas estructuras durante determinado tiempo, llamado tiempo de retención hidráulico, el cual depende del diseño de los elementos de los sistemas. Asimismo, en algunos procesos como la desalinización pueden existir pérdidas o purgas de agua. Tomando en cuenta ambas situaciones es posible calcular la regulación y las pérdidas totales que ocurren en la planta.

La capacidad de regulación se calcula en función de la variación de la demanda, efectuando un balance entre el gasto efluente de la planta y los gastos demandados previstos.

La demanda de agua renovada depende del tipo de usuarios a quienes está destinada. Si se trata de industrias establecidas, es posible elaborar cuadros de demandas horarias por cada día de la semana para los casos máximos y mínimos, lo que también es básico para el diseño de la red de distribución. También se pueden establecer horarios para riego de áreas verdes, alimentación de embalses recreativos o recarga de acuíferos; incluso pueden existir demandas continuas y más o menos invariables.

Si se trata de zonas industriales en desarrollo, es difícil predecir la demanda puntual, aun cuando existan planes de desarrollo detallados, ya que la variación en los procesos industriales es muy amplia. La planeación del crecimiento de la planta y de las obras de regulación y distribución se hace con base en demandas estimadas según tipos de industria y superficie.

En muchos casos una capacidad de tratamiento mínima podrá ser adecuada para satisfacer demandas considerables si se cuenta con una regulación óptima. De cualquier manera, será inevitable derivar parte del agua renovada si no existe un usuario continuo.

El tanque de regulación se ubica preferentemente en el mismo predio de la planta, ya que la distribución se hace generalmente por bombeo, a menos que se cuente con características topográficas muy favorables. Ello facilita la supervisión y el suministro de energía al sistema de bombeo como parte propia de la operación de la planta. En algunos casos permite también un mayor control de la calidad del agua renovada, incluso con la posibilidad de darle tratamiento adicional si es necesario.

Es conveniente que el sistema sea automático, controlado en función de la demanda instantánea generada en la red de distribución. Su construcción y operación siguen las recomendaciones propias de instalaciones de bombeo de agua de primer uso (ver 2.5).

En muchos casos, la regulación requerirá un área no disponible en el terreno de la planta. Parte del caudal tendrá entonces que ser derivado, desperdiciando capacidad de tratamiento durante algunas horas, o bien deberá diseñarse para una menor demanda, buscando un equilibrio entre capacidad y demanda. A veces será posible tener regulación en los sitios de consumo.

3.1.2 Bases de Diseño de las Redes de Distribución de Agua Renovada.

La red de distribución se configura de acuerdo con la ubicación de los consumidores. Para dotar al sistema de mayor flexibilidad es conveniente que ésta se efectúe mediante una red o malla cerrada, con ramales de conexión preestablecidos y medición volumétrica en los puntos de consumo y cajas de válvulas en puntos estratégicos.

En el caso de que exista un consumidor dominante, con demanda aproximadamente uniforme, es más lógico construir una línea de diámetro mayor con descarga en el sitio de ubicación de aquél, aunque con instalaciones para la eventual conexión de consumidores menores. Es el caso de embalses recreativos, recarga de cuerpos de agua o riego.

Una red de agua tratada no difiere sustancialmente de una de agua potable, con excepción de los siguientes criterios:

- se requiere establecer distancias mínimas de separación entre las redes de agua tratada y las de agua potable, según el tipo de suelo y las estructuras predominantes en las zonas que la línea recorra;
- en lugares donde las tomas o descargas de agua tratada sean visibles deben colocarse señalamientos que adviertan de su uso restringido;
- la tubería de agua tratada debe distinguirse con un color especial o señalizaciones a lo largo de su recorrido;
- debe llevarse a cabo de manera continua la medición de los flujos en puntos prestablecidos, de ser posible mediante la colocación de instrumentos de medición;
- los trabajadores que lleven a cabo la instalación, la reparación y la operación en las líneas de agua tratada deben seguir normas especiales de seguridad e higiene.

3.2 Aspectos Cualitativos. Requisitos de Calidad para Reúso Según Categorías.

Como se mencionó en el Capítulo 1, los usuarios del agua renovada se dividen en cinco categorías: irrigación, embalse, industrial, recarga de acuíferos y consumo directo (uso potable).

En este capítulo se indican los criterios de calidad del agua renovada para su utilización en cada uno de dichos casos. Debido a que puede existir la posibilidad de reusar el efluente de una planta para saneamiento, se mencionan primero los criterios que rigen la calidad de los efluentes de las mismas.

3.2.1 Calidad de Efluentes de Plantas para Saneamiento.

Por lo general las plantas para saneamiento del agua residual descargan a ríos, arroyos o lagos, denominados **cuerpos receptores** del agua tratada.

La calidad del agua renovada para descarga a un cuerpo receptor se fija con base en tres criterios principales:

- Clasificación que le corresponde según los usos que se dan a sus aguas; específicamente, se considera el uso para el que existan mayores probabilidades de causar un daño, ya sea al mismo usuario o a terceros.
- Protección de la flora y la fauna acuáticas presentes en el cuerpo receptor.
- Protección de la calidad del agua en la cuenca, considerando otros usos del agua del cuerpo receptor aguas abajo del sitio de descarga.

Los límites para los parámetros de descarga, llamados **condiciones particulares**, se establecen según el análisis de cada caso.

En el Cuadro 3.1 se presentan, como ejemplo, las condiciones particulares de descarga fijadas por la extinta Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) para las plantas de tratamiento en proyecto, para la ciudad de Monterrey, Nuevo León, en 1990.

3.2.2 Criterios de Calidad del Agua Renovada para Riego de Áreas Verdes.

Al ser aplicada al suelo, el agua residual afecta principalmente el pH, la salinidad, la conductividad eléctrica, la concentración de sales minerales y de nutrientes. El efecto en las plantas es variable, dependiendo del caso. Cuando se utilizan las aguas negras crudas, se generan efectos negativos por la salinidad, contaminación por sustancias tóxicas y por organismos patógenos.

Por su naturaleza, el uso de agua para riego de jardines se agrupa con el lavado de calles, el lavado de vehículos y otros usos urbanos.

En cuanto a su calidad, aunque el césped y la vegetación de ornato son más resistentes que otras plantas, para riego de áreas verdes urbanas se utiliza agua tratada a nivel secundario con desinfección, ya que existe posibilidad de contacto directo con el ser humano y, por consiguiente, riesgos sanitarios; también se consideran criterios estéticos, así como la necesidad de evitar el bloqueo de los sistemas de riego. Por tanto, se debe controlar la presencia de organismos patógenos, sólidos suspendidos, salinidad, grasa y aceite. El efluente de una planta para saneamiento satisface en general estos requisitos.

CUADRO 3.1 CRITERIOS DE CALIDAD PARA PLANTAS PARA SANEAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL (CONDICIONES PARTICULARES DE DESCARGA) (1)

PARAMETRO	PROMEDIO MENSUAL DE OCHO MUESTRAS	MAXIMO PARA MUESTRAS INDIVIDUALES	CARGA MAXIMA DIARIA (kg/día)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO _{5-20°})	30	60	10,855
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	60	120	21,710
Sólidos Suspendidos Totales	30	60	10,855
Grasas y Aceites	10	20	
Temperatura (°C)		35	
Potencial Hidrógeno (pH) (unidades)		6 > pH > 9	
Sólidos Sedimentables (ml/l)		1.0	
Materia Flotante		< 3 mm (2)	
Nitrógeno Amoniacal	0.01	0.02	
Nitrógeno Orgánico	5	10	
Fosfatos Totales	4	8	
Aluminio	0.05	0.1	
Arsénico	0.2	0.4	
Antimonio	0.09	0.18	
Berilio	0.001	0.002	
Bario	0.01	0.02	
Cadmio	0.001	0.002	
Cianuro	0.005	0.01	
Cobre	0.01	0.02	
Cobalto	0.05	0.1	
Cromo Hexavalente	0.05	0.1	
Fierro	1.0	2.0	
Fluor	1.0	2.0	
Mercurio	0.00005	0.001	
Níquel	0.001	0.002	
Plomo	0.002	0.004	
Selenio	0.02	0.04	
Zinc	0.6	1.2	
Sodio	100	150	
Calcio	150	200	
Magnesio	100	150	
Potasio	150	20	
Relación de Adsorción de Sodio (RAS)	6.0	8.0	
Sólidos Disueltos Totales		1880	
Coliformes Fecales	1000	10000	

Fuente: [13].

NOTAS:

Datos en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

Cuando no se indica un valor, no existe especificación.

(1) De las condiciones fijadas por la hoy extinta SEDUE al organismo SERVICIOS DE AGUA Y DRENAJE DE MONTERREY para las descargas de aguas residuales de esa ciudad en cuerpos receptores, mayo 1990.

(2) Ninguna que pueda ser retenida por malla de 3 mm. de claro libre cuadrado.

En el Cuadro 3.2 se presentan los criterios de calidad para riego de áreas verdes urbanas propuestos en la referencia [7].

CUADRO 3.2 CALIDAD DEL AGUA RENOVADA PARA RIEGO DE AREAS VERDES

PARAMETRO	CONCENTRACION
Aluminio	5.00
Arsénico	0.10
Coliformes Fecales (en NMP/100 ml)	220
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO _{5,20°})	20.00
Sólidos Suspendidos Totales	15.00
Berilio	0.10
Boro ¹	1.00
Cadmio	0.01
Cloruros	100.00
Cromo	0.10
Cobalto	0.05
Cobre	0.20
Fluoruros	2.00
Hierro	5.00
Plomo	5.00
Litio ²	2.50
Manganeso	0.20
Molibdeno	0.01
Níquel	0.20
pH (unidades)	6.0 a 9.0
Fenoles	50.00
Grasas y Aceites	Libre
Selenio	0.02
Relación de Adsorción de Sodio (RAS)	<18
Sólidos Disueltos	<1200
Sulfatos	200 a 400
Vanadio	0.10
Zinc	2.00

Fuente: Ref. [7]

NOTAS:

- (Datos en mg/l, a menos que se indique otra unidad)

1. Aceptable como se reciba.
2. Controlado por el tratamiento de otros parámetros.

3.2.3 Criterios de Calidad del Agua Renovada para Uso Recreativo.

Los cuerpos de agua que son utilizados para actividades recreativas usualmente requieren grandes cantidades de agua. Este uso se clasifica como con **contacto primario** cuando el ser humano se sumerge o permanece en contacto con el agua por tiempo prolongado y **sin contacto primario** o directo, cuando el mismo es ocasional y por periodos de tiempo limitados. En el primer caso se encuentran la natación y el esquí acuático; en el segundo, el remo y el veleo.

El agua renovada para uso recreativo con contacto directo debe ser estéticamente agradable, suficientemente transparente para permitir localizar objetos sumergidos, y estar virtualmente libre de aceites, grasas, materia flotante y crecimiento acuático desagradable; asimismo, debe encontrarse libre de organismos patógenos y sustancias tóxicas o irritantes de la piel o los ojos, de manera que la ingestión de cantidades limitadas de esa agua no cause enfermedad alguna.

Si no existe contacto prolongado ni directo se aplican las mismas restricciones, con menores exigencias, para efectos estéticos y de salud.

En el Cuadro 3.3 se presentan los valores propuestos en la referencia [7] como criterios de calidad del agua para uso recreativo con contacto directo y sin él¹.

3.2.4 Criterios de Calidad del Agua Renovada para Uso Industrial

a) Enfriamiento y Generación de Vapor

El uso industrial que mayores cantidades de agua demanda en nuestro país es el enfriamiento, que en promedio representa más del 75 % del agua utilizada por la industria química, el 50 % en la alimenticia (incluyendo azucarera), 85 % en la de hierro y acero, 34 % en la de celulosa y papel y 40 % en la del petróleo^[14].

Hay dos tipos de agua para enfriamiento: el de un solo paso y el que se combina con recirculación. En el primer caso se utilizan mayores cantidades con menor calidad. En el segundo, se requiere de mayor calidad debido a la acumulación de contaminantes en el proceso de evaporación.

¹ Ver también el Anexo A.

CUADRO 3.3 CRITERIOS DE CALIDAD DEL AGUA RENOVADA PARA USO RECREATIVO

PARAMETRO	CON CONTACTO PRIMARIO	SIN CONTACTO PRIMARIO
Crecimiento Acuático	Virtualmente libre	Virtualmente libre
Coliformes Totales		5000
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	200	
Transparencia Disco Secchi (m)	1.25	
Demanda Química de Oxígeno	30	60
Color	Virtualmente libre	
Materia Flotante	Virtualmente libre	Virtualmente libre
Olor	Virtualmente libre	Virtualmente libre
Grasas y Aceites	Virtualmente libre	Virtualmente libre
Nitrógeno Total	10	
pH (unidades)	6.5 a 8.3	6.5 a 8.3
Fosfatos	0.20	
Sólidos Sedimentables (ml/l)	Libre	Libre
Sólidos Suspendedos	5	
Temperatura Máxima (°C)	35	
Temperatura Mínima (°C)	15	

Fuente: Ref. [7] - Datos en mg/l, a menos que se indique otra unidad.

El agua para enfriamiento en un solo paso debe cumplir con lo siguiente:

- no bloquear el equipo con sólidos,
- no formar película bacteriana en el sistema y
- minimizar la corrosión de la instalación.

En el caso del enfriamiento con recirculación, los criterios de calidad son:

- evitar la formación de depósitos en las superficies intercambiadoras de calor,
- evitar la corrosión,
- no estimular el crecimiento bacteriano en el sistema, por presencia de nutrientes,
- minimizar la formación de espumas y
- no deteriorar los elementos de madera de la instalación.

En el Cuadro 3.4 se indican los valores de los parámetros de calidad para reúso del agua en enfriamiento de un solo paso y con recirculación^[7].

CUADRO 3.4 CRITERIOS DE CALIDAD DEL AGUA RENOVADA PARA ENFRIAMIENTO

PARAMETRO	DE UN SOLO PASO	CON RECIRCULACION
Alcalinidad	500	350
Aluminio	1.00	0.10
Bicarbonatos	600	24
Calcio	200	50
DQO	75	75
Cloruros	600	500
Cobre	(1)	
Dureza (CaCO ₃)	850	650
Hierro	0.50	0.50
Manganeso	0.50	0.50
Hierro más Manganeso	0.50	0.50
Magnesio		(1)
Nitrógeno NH ₃ -N	(1)	(1)
Grasas y Aceites	no flotante	no flotante
Oxígeno Disuelto	aeróbico	aeróbico
pH (unidades)	5.0 a 8.3	5.0 a 8.3
SAAM		1
Sílice	50	50
Sólidos Suspendidos	5000	100
Sólidos Disueltos	1000	800
Sulfatos	680	200
Temperatura	(1)	(1)
Zinc	(1)	(1)

Fuente: Ref. [7]. Datos en mg/l, a menos que se indique otra unidad.

NOTAS:

1. Aceptable como se reciba

- Cuando no se indica el dato, no hay especificación.

Para la generación de vapor el agua alimenta a las calderas para sustituir la que se pierde en fugas, purgas o usos del vapor. Mientras más grande sea la presión a la que trabaje la caldera, los requisitos de calidad serán más altos. Básicamente debe vigilarse que el agua esté libre de material suspendido y tenga un bajo contenido de oxígeno disuelto y concentraciones adecuadas de sólidos disueltos, dureza, hierro, cobre, sílice y aceites. Los valores recomendables se indican en el Cuadro 3.5, según la presión de operación de la caldera.

CUADRO 3.5 CRITERIOS DE CALIDAD DEL AGUA RENOVADA PARA USO EN GENERACION DE VAPOR

PARAMETRO	PRESION DE OPERACION DE LA CALDERA (psig)			
	0-150	150-700	700-1500	1500-5000
Alcalinidad	350	100	40	1
Aluminio (óxido)	5	0.10	0.01	0.01
Bicarbonatos	170	120	48	0.50
Calcio	(1)	0.40	0.01	0.01
Demanda Química de Oxígeno	5	5	1	1
Cloruros	(1)	(1)	(1)	(1)
Cobre	.050	0.05	0.05	0.01
Dureza (CaCO ₃)	350	1	0.07	0.07
Hierro	1	0.30	0.05	0.01
Manganeso	0.30	0.10	0.01	0.01
Magnesio	(1)	0.25	0.01	0.01
Nitrógeno NH ₃ -N	0.10	0.10	0.10	0.07
Oxígeno Disuelto	2.50	0.007	0.007	0.007
pH (unidades)	7.0 a 10.0	8.2 a 10.0	8.2 a 9.0	8.8 a 9.4
SAAM	1	1	0.50	0.10
Sílice	30	10	0.70	0.01
Sólidos Suspendidos	10	5	0.50	0.05
Sólidos Disueltos	700	500	200	0.50
Sulfatos	(1)	(1)	(1)	(2)
Temperatura (°C)	(1)	(1)	(1)	(1)
Zinc	(1)	0.01	0.01	0.01

FUENTE: Refs. [7,14]

Datos en mg/l, a menos que se indique otra unidad.

NOTAS:

1. Aceptable como se reciba
2. Controlado por el tratamiento de otros parámetros

b) Procesos

La industria alimenticia demanda grandes volúmenes de agua para lavado, blanqueado, pasteurización, limpieza de equipo, enfriamiento del producto final y transporte del mismo dentro de la planta. Es el caso de la industria del azúcar, frutas y legumbres, enlatados y congelados, productos lácteos, empacadoras de carne y procesamiento de aves. Por lo general, cuando el agua entra en contacto con el producto, aun cuando no llegue a formar parte del mismo, se requerirá

de calidad potable o mayor, con restricciones microbiológicas severas, cuidando no afectar el sabor, olor, propiedades vitamínicas o nutricionales, aspecto o coloración del resultado.

La industria de celulosa y papel requiere del agua para el cocimiento y la molienda de la madera para la producción de la pulpa, así como para el lavado y transporte entre procesos de la misma. Los parámetros de calidad más importantes dependen del tipo o la parte del proceso de que se trata. Los sólidos suspendidos y la turbiedad afectan el brillo, el color, la textura y la uniformidad del producto; la dureza provoca problemas en el lavado, en los procesos de digestión y por la formación de resinas y de precipitados de carbonato de calcio; el color del agua no debe interferir con el del papel; el pH y los gases disueltos tendrán efecto en la corrosión de los equipos.

En la industria química sólo entre 30 y 40 por ciento del agua empleada interviene en procesos productivos, en la separación de productos, como medio para reacciones químicas, para transporte, lavado y enjuague o como parte del producto final. El uso de agua de alta calidad es común, aunque no siempre es necesario. Los criterios de calidad son muy variables, dependiendo del proceso de que se trate, mas existen pautas generales de calidad, relacionadas con parámetros como la turbiedad, los sólidos disueltos, dureza, alcalinidad, fierro y manganeso. En este caso, para la programación del reúso será particularmente importante asegurar alta confiabilidad y poca variación en la calidad del agua renovada, aunque se considere tratamiento adicional en la planta química.

En la industria metal-mecánica, la mayor demanda ocurre en el proceso de metales ferrosos, especialmente hierro y acero, aunque también es importante en el de metales no ferrosos como el aluminio, el cobre, el zinc y el plomo. Los parámetros más importantes en este caso son sólidos sedimentables, suspendidos y disueltos, dureza, pH, cloruros, oxígeno disuelto, temperatura, grasas, aceites y materia flotante. En este caso, como en el de la industria química, existen criterios diferentes según el proceso o el metal, como en el caso del cobre, que exige restricciones mayores en cuanto a sólidos disueltos totales, calcio y cloruros.

Otro proceso industrial que consume grandes cantidades de agua es la refinación del petróleo.

En el Cuadro 3.6 se presentan criterios de calidad del agua renovada para la industria alimenticia, la de celulosa y papel, la química (como criterio general), la metal-mecánica de metales ferrosos y la de refinación de petróleo.

Cuando una instalación industrial cuenta con abastecimiento de agua renovada, puede sustituir con ésta la que utiliza en diversos servicios, tomando en cuenta que la calidad que se requerirá para los mismos será inferior a la que presente el agua para procesos.

CUADRO 3.6 CRITERIOS DE CALIDAD DEL AGUA RENOVADA PARA USO INDUSTRIAL

PARAMETRO	ALIMENTICIA	PAPEL	QUÍMICA	METAL-MECÁNICA	REFINACION PETROLERA
Alcalinidad	200	75	500	(2)	300
Arsénico	0.05				
Bario	1		1		
Cadmio	0.01				
Coliformes Totales (NMP/100ml)	2.2			200	
Calcio	100		250		
Demanda Bioquímica de Oxígeno			(1)	50	
Demanda Química de Oxígeno	(1)		(1)		1000
Cloruros	200	75	500	100	300
Cloro Residual		2			
Cromo	0.05				
Cobre	1				
Color (unidades)	5		500		
Cianuro	0.01				
Calcio					100
Dureza de Calcio		50			
Dureza de Magnesio		5			
Dureza Total	200	100	1000	100	900
Fluor	1				
Sodio				75	
Hierro	0.2	0.1	10		0.3
Manganeso	0.1	0.05	2		
Hierro + Manganeso					0.3
Magnesio	50		100		80
N-NO3	10				8
N-NH3			1		10
Olor	0		1		
pH	7.0-8.5		5.9-9.0	6.0-9.0	6.0-9.0
Fenoles	0.001				
Sílica	50	20	(1)		20
Plata	0.05				
Sólidos Sedimentables (ml/l)				5	
Sólidos Suspendedos	10		10000	30	30
Sólidos Disueltos	500	250	2500	(1)	1000
Sulfatos	250		850		300
Fosfatos				15	
Sabor	0				
Turbiedad	5	25			
Zinc	5				
Oxígeno Disuelto			1	aeróbico	0.007
CO2 libre		10			
Bicarbonatos			600		480
Temperatura (°C)			(1)	25	
Grasas y Aceites				1	
Metales Pesados				trazas	
Compuestos Orgánicos				(3)	
H ₂ S					0.3

Fuente: Ref. [7,14]

Datos en mg/l excepto donde se indica otra unidad.

NOTAS:

1- Aceptable como se recibe

2- Controlado por el tratamiento a otros parámetros

3- Tan bajo como sea posible

La utilización del agua renovada como insumo en la producción de alimentos, bebidas y otros bienes destinados al consumo directo del ser humano es una opción difícilmente factible, ya que las restricciones son más severas y la necesidad de confiabilidad es crítica. En el Cuadro 3.7 se indican los criterios de calidad del agua renovada para la producción de algunos alimentos o bebidas. Además, sería necesario asegurar una calidad análoga a la del agua potable, especialmente en lo relativo a metales pesados y compuestos orgánicos (ver 3.2.6).

CUADRO 3.7 CRITERIOS DE CALIDAD DEL AGUA RENOVADA PARA SU USO EN LA INDUSTRIA ALIMENTICIA

PARAMETRO	USO INDUSTRIAL			
	Enlatado alimentos	Enlatado frutas y verduras	Bebidas refrescantes	Cerveza
pH (unidades)	8.5	6.5 a 8.5		6.5 a 7.0
Sólidos Disueltos Totales	50	500	850	500 a 1500
Sólidos Suspendedidos Totales	12	10.0		
Color (unidades)	5.0	5.0	5.0	0.0 a 10.0
Turbiedad (UT)	1 a 10		1.0 a 2.0	0.0 a 10.0
Dureza	50 a 85	250	200 a 250	
Alcalinidad	30 a 250	250	50 a 128	75 a 150
Carbonatos				50 a 68
Calcio	120	100		100 a 500
Magnesio				30
Cloruros	300	250	250	50 a 100
Sulfatos	250	250	250	
Flúor	1	1.0	0.2 a 1.0	1.0
Hierro	0.4	0.2	0.1 a 0.2	0.1 a 1.0
Manganeso	0.2	0.2	0.05	0.1
Nitritos	no detectable	no detectable		0.0
Nitratos	45	10.0		10.0
Fenoles	1	3 a 4		
Sílice	50.0	50		50.0
Coliformes totales (NMP/100 ml)	2000		4	

Fuente: Ref [7].

- Datos en mg/l, a menos que se indique otra unidad.
- Cuando no se indica un valor, no existe restricción definida.

3.2.5 Criterios de Calidad del Agua Renovada para Recarga de Acuíferos.

El agua renovada puede ser utilizada para restablecer la capacidad de los mantos acuíferos, ya sea como un medio de almacenar volúmenes para su uso futuro o para evitar efectos negativos de la explotación de los mantos freáticos.

El criterio de calidad depende del método de recarga, sea por inyección directa o por infiltración.

Se asume que los acuíferos se explotan o pueden llegar a ser explotados para uso potable. Por lo anterior, cuando la recarga se hace por inyección directa puede considerarse que la calidad del agua renovada debe ser la misma del agua potable o, por lo menos, la misma del acuífero. En este último caso debe tomarse en cuenta que existen parámetros importantes que usualmente no se monitorean en las aguas freáticas, pero deben ser tomados en cuenta. Los criterios coinciden, por tanto, con los indicados en 3.2.6.

Para la recarga por infiltración puede suponerse que, si el agua renovada tiene la misma calidad de las aguas superficiales como fuentes de agua (sin procesos de potabilización), la contaminación o depuración que ocurran al infiltrarse el líquido no serán diferentes de las que experimenta el agua natural. En el Cuadro 3.8 se presentan valores recomendados en la referencia [7].

En caso de considerar esta opción, es indispensable contar con análisis completos de los acuíferos en cuestión y evaluar los efectos de la infiltración o inyección del agua renovada en el comportamiento del agua subterránea, además de la modificación en su calidad.

Los aspectos principales a ser tomados en cuenta son ^{DJ} :

- naturaleza del acuífero,
- tiempo medio de residencia entre recarga y extracción,
- tasa de extracción y
- grado de dilución en el agua freática existente.

En términos generales, un acuífero compuesto por un suelo arenoso bien graduado y un tiempo de residencia largo tendrán efecto en la remoción microbiana y viral; asimismo, en un acuífero se puede llevar a cabo cierto grado de adsorción o intercambio iónico.

CUADRO 3.8 CRITERIOS DE CALIDAD DEL AGUA PARA RECARGA DE ACUIFEROS POR INFILTRACION

PARAMETRO	CONCENTRACION MAXIMA (PORCIENTO DEL TIEMPO)		
	50 %	75 %	100%
Turbiedad (UT)			1
Coliformes totales (NMP/100 ml)	2		23
NH ₃ -N	2	3	5
NO ₃ -N	5	20	30
Fosfatos	2	3	5
DQO	10	12	15
SAAM	0.30	0.40	0.50
Cloruros	140		175
SDT	600	700	800
Dureza Total (CaCO ₃)	200	300	400
Arsénico			0.05
Bario		1	2
Cadmio		0.01	0.02
Cromo			0.05
Cianuro		0.20	0.40
Flúor			1.50
Plomo		0.05	0.10
Selenio		0.01	0.05
Plata		0.05	
Mercurio		0.005	0.01
Cobre		1	2
Zinc		5	10

Fuente: Ref. [7]

- Datos en mg/l, excepto cuando se indica otra unidad.

- Cuando no se indica concentración, no existe restricción definida.

3.2.6 Criterios de Calidad del Agua para Consumo Humano.

El uso potable de agua renovada presenta, en relación con las otras categorías de reúso, restricciones máximas para la mayoría de los parámetros de calidad. En síntesis, se pretendería que el agua renovada tuviera la calidad especificada para el agua potable. Sin embargo, los criterios

para definir la calidad del agua potable no fueron definidos tomando en cuenta la posibilidad de reusar aguas residuales tratadas, por lo que resulta esencial evaluar su aplicabilidad en dicho caso.

Existen dos problemas fundamentales que dificultan el uso de agua renovada para su consumo directo:

- la presencia de compuestos orgánicos tóxicos, presentes en concentraciones mínimas (a nivel de traza), el efecto de cuya ingestión prolongada no está suficientemente estudiado;
- la dificultad para el monitoreo continuo y el control eficaz de virus y microorganismos patógenos.

En el Cuadro 3.9 se indican las concentraciones de los principales parámetros para el agua potable².

En esta Tesis no se analiza la opción de consumo directo, debido a que queda fuera de la metodología común a las categorías propuestas y requeriría un sistema de tratamiento y distribución independiente para su implantación.

3.3 Control de los Riesgos Sanitarios del Uso del Agua Renovada

Los factores que originan riesgos sanitarios en el uso de aguas renovadas son los siguientes ^[7]:

- manipulación directa,
- exposición frecuente o prolongada a aerosoles de agua tratada,
- ingestión directa accidental,
- contaminación del agua potable,
- ingestión de alimentos crudos sin lavar, regados con agua residual tratada, e
- ingestión de alimentos de origen vegetal o animal, contaminados con elementos tóxicos por riego o acumulación en la cadena alimenticia.

En un sistema urbano-industrial se presentan los primeros cuatro de los seis factores de riesgo mencionados arriba.

² Ver también el Anexo A.

CUADRO 3.9 CRITERIOS DE CALIDAD PARA EL AGUA POTABLE

PARAMETRO	CONCENTRACION
Arsénico	0.05
Bario	1.00
Cadmio	0.01
Cromo Hexavalente	0.05
Fluoruros	1.4 a 2.4 ⁽¹⁾
Plomo	0.05
Mercurio	0.002
Nitratos (como N)	10.00
Selenio	0.01
Plata	0.05
Endrin	0.002
Lindano	0.004
Metoxicloro	0.10
Toxafeno	0.005
Turbiedad (UT)	1 ⁽²⁾
Coliformes (colonias/100 ml)	1 ⁽²⁾
Cobre	1.00
Fierro	0.30
Manganeso	0.05
Sulfatos	250.00
Zinc	5.00
Color (unidades)	15.00
SAAM	0.50
Olor	3.00
Trihalometano	0.10

Fuente: Ref. [7]

- Datos en mg/l, a menos que se indique otra unidad.

NOTAS:

1. Varía con la temperatura máxima promedio anual
2. Promedio mensual
3. Promedio mensual (filtros de membrana)

- Los valores corresponden a normas de los Estados Unidos de América; existen otras convenciones relativas a la concentración de compuestos orgánicos volátiles, parámetros microbiológicos, compuestos inorgánicos y orgánicos a nivel de traza.

Dependiendo del uso del agua renovada, las acciones para disminuir los riesgos sanitarios deben ser enfocadas a reducir el riesgo de exposición a los contaminantes nocivos para la salud, tanto en los aspectos operativos como en la calidad del agua. En el aspecto cualitativo, los siguientes contaminantes microbianos y químicos representan el problema principal ⁽³⁾:

- BACTERIAS
 - Salmonella typhi
 - Salmonella sp.
 - Shigella sp.
 - Escherichia coli enterotoxigénica
 - Campylobacter coli
 - Vibrio cholera

- VIRUS
 - Poliovirus
 - Coxsackie
 - Adenovirus
 - Hepatitis infecciosa
 - Rotovirus
 - Agente Norwalk
 - Reovirus

- PARASITOS
 - Entamoeba histolytica
 - Giardia lamblia
 - Ascaris lumbricoides

- AGENTES QUIMICOS INORGANICOS
 - Arsénico
 - Bario
 - Cadmio
 - Cromo
 - Cianuro
 - Plomo
 - Mercurio
 - Nitratos
 - Selenio

En cuanto a los contaminantes microbianos, los dos factores que inciden principalmente en el riesgo sanitario del reúso son el grado de remoción que se pueda lograr con los procesos de tratamiento y la determinación de las mínimas dosis infecciosas para cada parámetro. El Cuadro 3.10

muestra el grado de remoción promedio esperado en los procesos de tratamiento primario, secundario y de desinfección.

CUADRO 3.10 INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA CONCENTRACION DE MICROORGANISMOS PATOGENOS

PROCESO DE TRATAMIENTO	GRADO DE REMOCION	
	BACTERIAS	VIRUS
Primario	10 a 50 %	10 a 50 %
Secundario (Lodos activados convencional)	90 a 99 %	90 a 99 %
Desinfección ⁽¹⁾ :		
Cloro	99.999 %	≤ 90 %
Dióxido de cloro	99.999 %	> 99 %
Ozono		99 % ⁽²⁾

Fuentes: [3,12]

NOTAS:

1. Considerando aplicar 10 mg/l de Cl_2 o ClO_2 en 30 minutos.
2. Remoción de poliovirus aplicando 0.1 mg/l de O_3 en 10 segundos; la misma concentración de Cl_2 requeriría 10 minutos

La dosis mínima que puede causar infección al ser humano depende del tipo de microorganismo de que se trate, de las condiciones ambientales y de las características socioeconómicas de la comunidad expuesta. Aunque existe discusión sobre el tema, se tienen pruebas de que, en algunos casos, la exposición a dosis mínimas causa infección. Como medida para minimizar estos riesgos se ha optado por exigir niveles mínimos de tratamiento correspondientes a cada categoría de riesgo.

El parámetro de control, las bacterias coliformes, está correlacionado con la presencia de organismos patógenos, lo mismo que con la tasa de morbilidad del lugar en estudio. En casos en que exista riesgo de ingestión o contacto directo con el agua renovada, se justifica un análisis completo de los principales microorganismos.

Los siguientes factores ambientales influyen en la remoción de agentes patógenos⁽¹²⁾ :

- tiempo de decaimiento, 2.19 horas en promedio para aguas de mar y 57.56 en ríos, para bacterias coliformes; para virus, se estima en aproximadamente 4.65 días;
- sedimentación,
- adsorción y coagulación,

- radiación solar,
- deficiencia de nutrientes,
- depredación y
- dilución.

En lo que respecta a los contaminantes químicos, es crítico el riesgo de efectos cancerígenos de los compuestos agrupados en los siguientes grupos:

- derivados del petróleo,
- alquitrán mineral,
- compuestos aromáticos,
- pesticidas, herbicidas y fertilizantes de suelos, e
- hidrocarburos halogenados generados en la cloración de aguas residuales.

Estos compuestos pueden tener efectos en la salud aun cuando estén presentes en concentraciones muy bajas. Por lo mismo, su detección y remoción se complican, sobre todo tomando en cuenta que actualmente son numerosos los compuestos utilizados en la industria, la agricultura e incluso las labores domésticas.

Para su detección se utilizan como parámetros de control la remoción de carbón orgánico total (COT) y carbón extractable en cloroformo, que sirven como un análisis previo a la detección de contaminantes específicos y como medida de comparación entre distintas muestras de agua renovada. En el Cuadro 3.11 se presenta el tratamiento recomendado por la Organización Mundial de la Salud para alcanzar la calidad requerida por los distintos usuarios de agua renovada.

Los efectos en la salud de la irrigación agrícola con aguas residuales tratadas no son tema de este trabajo. El riego de áreas verdes, por su parte, presenta riesgos sanitarios por contacto directo de los trabajadores que lo llevan a cabo y por la dispersión de aerosoles en el riego por aspersión. Aunque los efectos varían de acuerdo con los hábitos de higiene de los individuos expuestos y con las características del riego, se recomienda dar a estas aguas tratadas una desinfección a alto nivel.

En cuanto al reúso industrial, existen riesgos potenciales, como la interconexión accidental de líneas de agua tratada con líneas de agua potable, la generación de aerosoles en torres de enfriamiento o la contaminación de productos comestibles. Es indispensable prever desde la fase de planeación los posibles medios de propagación de sustancias tóxicas y organismos patógenos, con el fin de evaluar la opción de reúso contra la recirculación en cada planta, o bien de proponer medidas de mitigación adecuadas.

CUADRO 3.11 PROCESOS DE TRATAMIENTO SUGERIDOS PARA SATISFACER CRITERIOS SANITARIOS EN EL REUSO DEL AGUA

	IRRIGACION AGRICOLA			RECREATIVOS		INDUSTRIAL	MUNICIPAL	
	no destinados a consumo humano directo	cultivos que se comen hervidos; piscicultura	cultivos que se comen crudos	sin contacto primario	con contacto primario		uso no potable	uso potable
CRITERIOS SANITARIOS ^{1, 2}	(A+F)	(B+F o D+F)	(D+F)	(B)	(D+G)	(C o D)	(C)	(E)
Primario	■■■	■■■	■■■	■■■	■■■	■■■	■■■	■■■
Secundario		■■■	■■■	■■■	■■■	■■■	■■■	■■■
Filtración en arena o métodos equivalentes		■	■		■■■	■	■■■	■■
Nitrificación						■		■■■
Denitrificación						■		■■
Clarificación Química						■		■■
Adsorción en carbón activado						■		■■
Intercambio iónico u otro medio de remover iones						■		■■
Desinfección		■	■■■	■	■■■	■	■■■	■■■ (D)

Fuente: Ref. [3]

NOTAS:

1. Criterios Sanitarios:
 - A. Libre de sólidos grandes; remoción significativa de huevos de parásitos.
 - B. Como A, más remoción significativa de bacterias.
 - C. Como A, más remoción más efectiva de bacterias y remoción de virus.
 - D. No más de 100 organismos coliformes por 100 ml en 80% de las muestras.
 - E. Ausencia de coliformes en 100 ml, más ausencia de partículas virales en 1000 ml, más carencia de efectos tóxicos en el ser humano y cumplimiento de los principales criterios para agua potable.
 - F. Ausencia de sustancias químicas que generan residuos indeseables en cultivos o peces.
 - G. Ausencia de sustancias químicas que provoquen irritación de las membranas mucosas y la piel.
2. Los procesos marcados ■■■ son esenciales; uno o varios de los procesos marcados ■■ pueden ser esenciales en adición a los anteriores; los procesos indicados ■ pueden ser requeridos en ocasiones.
3. Cloro libre después de una hora.

En los embalses recreativos el mayor riesgo es representado por el consumo directo accidental o inevitable, dependiendo de la actividad que se desarrolle en el agua. Tomando en cuenta que aun con la ingestión de cantidades pequeñas de agua existe un alto riesgo de contraer enfermedades infecciosas, se recomienda también dar una desinfección amplia al agua renovada.

El uso municipal, por su parte, si está restringido a las redes de hidrantes contra incendios, riego de parques o jardines, fuentes de ornato, limpieza de calles o vehículos, y otros usos sin riesgo de ingestión, no presenta restricciones severas en cuanto a su calidad. No se considera que sea factible desarrollar usos no potables a nivel doméstico en zonas urbanas existentes; la opción más factible sería instalar redes duales en zonas de nueva creación, ubicadas en sitios con escasez aguda, a reserva de evaluar esta opción contra la red de abastecimiento convencional.

3.4 Marco Legal del Reúso del Agua

El sistema de reúso está incluido en el marco jurídico de los sistemas de abastecimiento de agua potable y drenaje. En este punto se presenta una descripción general del marco jurídico de los sistemas de alcantarillado y agua potable, haciendo énfasis en los aspectos relativos a la calidad y al tratamiento de las aguas residuales y tratadas. En segundo lugar se destacan, dentro de las normas vigentes, los aspectos ligados directamente a la programación u operación de sistemas de reúso. Se analiza también el contenido de un proyecto de reglamento de reúso.

3.4.1 Marco Legal de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado.

La base legal de la operación de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado se encuentra en el artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en el cual se establece la propiedad de la nación sobre el recurso y la facultad de emitir leyes para su aprovechamiento.

En segundo nivel se encuentran la Ley de Aguas Nacionales, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley Federal de Derechos y la Ley General de Salud⁽¹²⁾. La primera trata sobre la distribución equitativa y la conservación del recurso, atendiendo al interés general y al orden público. Mediante esta ley se fundamentan la creación y las funciones de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) y de la Comisión Nacional del Agua (CNA).

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente se refiere al aprovechamiento racional del recurso, a la prevención y control de su contaminación y a la emisión de normas técnicas de descarga, uso, tratamiento y disposición de las aguas residuales, entre otros aspectos.

La Ley Federal de Derechos define al Estado y los Organismos Públicos descentralizados como usuarios, señalando las tarifas correspondientes al aprovechamiento del agua.

En la Ley General de Salud se encuentran artículos que abordan los criterios sanitarios para el uso, tratamiento y la disposición del agua residual, el cuidado de mantos acuíferos aprovechados para consumo humano, además de que se establece el marco normativo de apoyo al control de calidad en las distintas fases del aprovechamiento del agua para uso potable.

A partir de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) expide Normas Técnicas Ecológicas (NTE) y Criterios Ecológicos (CE). A su vez, la Ley General de Salud se complementa con el Reglamento de la Secretaría de Salud (SS).

En este contexto, mediante la participación de la SEDESOL, la CNA, la SS, la Secretaría de Marina, la Secretaría de Pesca (SEPECSA), la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal (SEMIP), la Comisión Federal de Electricidad (CFE), Petróleos Mexicanos (PEMEX) y los Organismos Descentralizados, se pretende cumplir con las siguientes acciones:

- fijar criterios de calidad del agua,
- establecer un sistema de monitoreo y análisis a nivel nacional,
- clasificar los cuerpos receptores,
- fijar condiciones particulares de descarga,
- en su caso, otorgar permisos de descarga de instalaciones en tierra a cuerpos superficiales (SEDESOL-CNA), de tierra al mar (SEDESOL), o de fuentes móviles o fijas en el mar al mismo (SEDESOL - Marina).

Como apoyo a lo anterior, se pretende formar un sistema único de información relativa a la calidad del agua en México. Actualmente se desarrolla un Programa Nacional de Normalización, que conjuntará las normas ecológicas como Normas Oficiales Mexicanas.

3.4.2 Marco Legal del Reúso del Agua.

La planeación y programación del reúso del agua deben tomar en cuenta principalmente los aspectos relativos a la propiedad y los derechos sobre el agua, su calidad y las restricciones para su manejo y descarga, la normatividad relativa a su conducción y operación y los criterios sanitarios.

La derogada Ley Federal de Aguas mencionaba, en el artículo 17, las atribuciones de la SARH: regular y controlar la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas; otorgar asignaciones, concesiones o permisos; construir, administrar, operar, desarrollar, conservar y rehabilitar las obras hidráulicas; suspender las obras que dañen los recursos hidráulicos o el equilibrio ecológico. Como atribución de SEDESOL quedaba regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas residuales y las condiciones de descarga en redes, cuencas y cuerpos receptores, así como su infiltración.

La Ley de Aguas Nacionales sustituyó a la anterior. El Cuadro 3.12 presenta los principales conceptos incluidos en dicha Ley.

El Cuadro 3.13 presenta las principales disposiciones de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, relacionadas con el reúso.

Es de particular importancia para tener claro el marco jurídico del sistema de reúso el contenido del artículo 119 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, que define la competencia de las dependencias y entidades relacionadas con la cuestión ambiental. Según dicho artículo, las atribuciones de la extinta Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), que pasaron a la SEDESOL, a través del Instituto Nacional de Ecología y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, son:

- "...expedir, en coordinación con la SARH y las demás autoridades competentes las normas técnicas para el vertimiento de aguas residuales en redes colectoras, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, así como para infiltrarlos en terrenos;
- ...emitir los criterios, lineamientos, requisitos y demás condiciones que deban satisfacerse para regular el alejamiento, la explotación, uso o aprovechamiento de aguas residuales, a fin de evitar contaminación que afecte el equilibrio de los sistemas o a sus componentes y, en su caso, en coordinación con la Secretaría de Salud, cuando se ponga en peligro la salud pública;
- ...expedir las normas técnicas ecológicas a las que se sujetará el almacenamiento de aguas residuales, con la intervención que en su caso compete a otras dependencias...
- ...dictaminar las solicitudes de permisos para infiltrar o descargar aguas residuales en

terrenos o cuerpos distintos de los alcantarillados;

- ...promover el reúso de aguas residuales tratadas en actividades agrícolas e industriales;
- ...determinar los procesos de tratamiento de las aguas residuales, considerando los criterios sanitarios que en materia de salud pública emita la Secretaría de Salud, en función del destino de esas aguas y las condiciones del cuerpo receptor...
- ...promover la incorporación de sistemas de separación de las aguas residuales de origen doméstico de aquéllas de origen industrial en los drenajes de los centros de población, así como la instalación de plantas de tratamiento para evitar la contaminación de aguas..."

En coordinación con la SARH y la SS:

- "...expedir las normas técnicas ecológicas para el uso o aprovechamiento de aguas residuales;
- emitir opinión a la que deberá sujetarse la programación y construcción de... las obras e instalaciones conducentes a purificar las aguas residuales de procedencia industrial en los casos de jurisdicción federal, y
- expedir las normas técnicas ecológicas que deberán observarse para el tratamiento de aguas residuales de origen urbano que se destinen a la industria y a la agricultura..."

Corresponde a la SARH:

- "...resolver sobre las solicitudes de concesión, permiso o autorización que se formulen para la explotación, uso o aprovechamiento de aguas residuales, considerando los criterios y lineamientos para la preservación del equilibrio ecológico..."

Y a los estados y municipios:

- "...el control de las descargas de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado;
- requerir a quienes generen descargas a dichos sistemas y no satisfagan las normas técnicas ecológicas que se expidan, la instalación de sistemas de tratamiento;
- determinar el monto de los derechos correspondientes para que el municipio o autoridad estatal respectiva pueda llevar a cabo el tratamiento necesario y, en su caso, proceder a la imposición de las sanciones a que haya lugar, y
- llevar y actualizar el registro de las descargas a las redes de drenaje y alcantarillado que administren, el que será integrado al registro nacional de descargas a cargo de la SEDESOL."

CUADRO 3.12 CONCEPTOS BASICOS DE LA LEY DE AGUAS NACIONALES

TEMA	ARTICULOS	CONCEPTOS PRINCIPALES
Aspectos institucionales	3, 4, 6, 8, 9 a 14	Administración integral en una autoridad única del agua con enfoque de cuenca hidrológica.
Sistema de programación hidráulica	15	Resume la actividad de programación del sector de acuerdo con la Ley de Planeación.
Aguas subterráneas	18, 19, 42 y 43	Adecuación con el texto constitucional y precisión de normas de veda y libre alumbramiento.
Títulos de aprovechamiento	20 a 29, 102, 118	Simplifica trámites, fortalece confianza del usuario para el desarrollo de proyectos hidráulicos privados.
Registro público de Derechos de Agua	9,25,30 a 32, 33, 67, 119	Se brinda protección jurídica adicional, se facilitan actos de transmisión y modificación de derechos de aprovechamiento de agua y bienes asociados.
Transmisión de derechos	33 a 37, 90	Se regula la transmisión de derechos de agua, bienes asociados y permisos de descarga.
Uso público urbano	44 a 47	Definición de acciones federales y locales en este aspecto
Uso agrícola	48 a 77	Mayor participación de usuarios en el financiamiento y operación de sistemas públicos de riego.
Otras regulaciones	78 a 84	Coordinación con la CFE, apoyo a la autogeneración eléctrica, acuacultura y clasificación de zonas inundables.
Prevención y control de la contaminación de las aguas	85 a 96	Se afianzan las funciones integrales de la Federación en la CNA. Simplificación de trámites de permisos de descarga.
Obras de infraestructura hidráulica	97 a 112	Nuevos esquemas de financiamiento, contratos y concesiones.
Disposiciones finales	119 a 124	Ajuste del sistema de infracciones y sanciones.

Fuente: Ref. [15]

CUADRO 3.13 DISPOSICIONES LEGALES VIGENTES RELACIONADAS CON EL REUSO DEL AGUA EN LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE (continúa).

DESCRIPCION	
Art. 1	Indica que la ley es reglamentaria de las disposiciones constitucionales y tiene como objeto, entre otros, establecer las bases para "el aprovechamiento racional de los elementos naturales de manera que sea compatible la obtención de beneficios económicos con el equilibrio de los ecosistemas..."
Art. 3	Entre otras da las definiciones de: <ul style="list-style-type: none"> • aprovechamiento racional: utilización de los elementos naturales en forma que resulte eficiente, socialmente útil y procure su preservación y la del ambiente... • ordenamiento ecológico: el proceso de planeación dirigido a evaluar y programar el uso del suelo y el manejo de los recursos naturales en el territorio nacional... para preservar y restaurar el equilibrio ecológico y proteger el ambiente... • residuo: cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento, cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó... • residuos peligrosos: todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológicas infecciosas o irritantes, representan un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente...
Art. 6	Define la competencia de las entidades federativas y los municipios, entre otras: <p>"...la regulación del aprovechamiento racional y la prevención y control de la contaminación de las aguas de jurisdicción de los estados;</p> <p>...la prevención y control de la contaminación de aguas federales que tengan asignadas o concesionadas para la prestación de servicios públicos y de las que se descarguen en las redes de alcantarillado de los centros de población, sin perjuicio de las facultades de la Federación, en materia de tratamiento, descarga, infiltración y reúso de aguas residuales, conforme a esta Ley y las demás aplicables;</p> <p>...la regulación del manejo y disposición final de los residuos sólidos que no sean peligrosos, conforme a esta Ley y sus disposiciones reglamentarias..."</p>
Art. 20	Define las bases para la consideración del ordenamiento ecológico en la regulación del aprovechamiento de los recursos naturales, de la localización de la actividad productiva secundaria y de los asentamientos humanos; entre otras: "... será considerado en:... el otorgamiento de asignaciones, concesiones, autorizaciones o permisos para el uso, explotación y aprovechamiento de aguas de propiedad nacional... las autorizaciones para la construcción y operación de plantas o establecimientos industriales, comerciales o de servicios..."
(Secc. V)	Trata de la evaluación del impacto ambiental.
Art. 36	Define como norma técnica ecológica "...el conjunto de reglas científicas o tecnológicas emitidas por la Secretaría, que establezcan los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en el desarrollo de actividades o uso y destino de bienes que causen o puedan causar desequilibrio ecológico o daño al ambiente, y, además que uniformen principios, criterios, políticas y estrategias en la materia..."

CUADRO 3.13 DISPOSICIONES LEGALES VIGENTES RELACIONADAS CON EL REUSO DEL AGUA EN LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE (continuación).

DESCRIPCION	
Art. 89	Establece que los criterios anteriores serán considerados en "...la operación y administración de los sistemas de agua potable y alcantarillado..." y en "...las previsiones contenidas en el programa director de desarrollo urbano del Distrito Federal respecto de la política de reúso de aguas..."
Art. 92	Establece que "...las autoridades competentes promoverán el tratamiento de aguas residuales y su reúso"
Art. 118	Establece que los criterios anteriores serán considerados en: <ul style="list-style-type: none"> • "...el establecimiento de criterios sanitarios para el uso, tratamiento y disposición de aguas residuales, para evitar riesgos y daños a la salud pública... • ...los convenios que celebre el Ejecutivo Federal para entrega de agua en bloque a los sistemas o a los usuarios, especialmente en lo que se refiere a la determinación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales que deban instalarse..."
Art. 119	Define las atribuciones de la Secretaría, las que tiene en coordinación con la SARH y la SS, las de la SARH y a los estados y municipios.
Art. 126	Establece que los equipos de tratamiento de aguas residuales de origen urbano "deberán cumplir con las normas técnicas ecológicas que al efecto se expidan".
Art. 128	"Las aguas residuales provenientes del alcantarillado urbano podrán utilizarse en la industria y en la agricultura, si se someten en los casos que se requiera al tratamiento que cumpla con las normas técnicas emitidas por la Secretaría, en coordinación con la SARH y la SS."
Art. 129	"El otorgamiento de asignaciones, autorizaciones, concesiones o permisos para la explotación, uso o aprovechamiento de aguas en actividades económicas susceptibles de contaminar dicho recurso, estará condicionado al tratamiento previo necesario de las aguas residuales que se produzcan."

Fuente: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (Ref. [35]).

- Sustituye a la Ley Federal de Protección al Ambiente, conservando las disposiciones reglamentarias que sean aplicables a la presente, en tanto se expiden las que le correspondan. Entró en vigor el primero de marzo de 1988.

3.4.3. Reglamentos y Criterios Ecológicos Relacionados al Reúso.

Existen diversos reglamentos, normas técnicas ecológicas y criterios de calidad que se relacionan con la planeación y operación de sistemas para reúso del agua.

El 2 de diciembre de 1989 se publicó el acuerdo para establecer los Criterios de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89), en donde se califica la aptitud de los cuerpos de agua para ser utilizados como fuentes de abastecimiento de agua potable, en actividades recreativas con contacto primario, para riego agrícola, para uso pecuario, en la acuicultura o para protección

de la vida acuática. Contiene dos tablas, una con los criterios para una serie de parámetros básicos y otra con datos específicos para el uso en acuicultura (ver Anexo A).

Otra norma que puede ser de interés en algún caso es la NTE-CCA-032/91, que establece los límites máximos permisibles de los parámetros en aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola.

Está pendiente la publicación de la Norma Técnica Ecológica destinada específicamente al reúso del agua. La norma vigente relacionada más directamente con el caso que nos ocupa es la NTE-CCA-031/91, que fija los límites máximos permisibles para las descargas de las plantas de tratamiento de aguas residuales, entre otros giros. Entre sus principales puntos, prohíbe expresamente la descarga de lodos biológicos al drenaje (Art. 4o.), fija parámetros y límites de descarga, así como el número de muestras simples y los intervalos entre su obtención; deja abierta la posibilidad de aumentar la exigencia en los límites fijados, o bien de considerar parámetros adicionales según el caso.

Por otra parte, es necesario considerar las disposiciones del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental, que menciona como sujetos a la obligación de presentar un estudio de impacto ambiental a las "instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos" (Art. 5, VII). El agua residual no se considera como un "residuo peligroso", debido a que se sujeta a una normatividad particular. En cualquier caso, debe revisarse el posible impacto de las instalaciones de tratamiento y los sistemas de distribución en el ambiente de la zona en que se ubiquen.

Es conveniente aclarar la definición de un residuo peligroso. Según el acuerdo del 6 de junio de 1988, por el cual se expidió la NTE-CRP-001/88, un residuo peligroso es aquél que presente al menos una de las siguientes características: "corrosivas, tóxicas, reactivas, explosivas o inflamables". Para restringir más esta clasificación, se publica la lista de los residuos peligrosos, entre los cuales se encuentran (art. 5): "...aguas de biodegradación de lodos, conteniendo carga orgánica o metales pesados contaminantes...", lodos de "oxidación de tratamiento de aguas residuales", residuos clorados del proceso de cloración y "todo material que contenga metales pesados". Esto tiene particular importancia en el caso de que la empresa se encargue de la disposición de los lodos de desecho, caso en el cual deben consultarse las normas relacionadas con los sitios de confinamiento (NTE-CRP-008/88, NTE-CRP-009/89, NTE-CRP-010/88 y NTE-CRP-011/89), que tratan sobre los requisitos de construcción y operación de celdas de confinamiento y sus obras complementarias.

Es recomendable seguir también los lineamientos relativos a las actividades "altamente riesgosas", que en el caso de una planta de tratamiento pueden corresponder al manejo de cloro y otras sustancias químicas.

Por último, en algunos casos la operación de plantas de tratamiento puede generar la emisión de aerosoles por procesos de agitación mecánica. En estos casos debe cuidarse de no producir efectos adversos al ambiente.

Varios reglamentos relacionados con la protección ambiental son elaborados actualmente; además, tanto éstos como los ya existentes están siendo integrados al Sistema Nacional de Normalización, asignándoles un número como Normas Oficiales Mexicanas (NOM).

3.4.4 Elementos de un Reglamento de Reúso del Agua.

Uno de los pasos en la programación del reúso es la elaboración del reglamento correspondiente, de acuerdo con los esquemas de operación que definan la empresa prestadora del servicio de reúso y el organismo de agua potable y alcantarillado. El Cuadro 3.14 resume los elementos que conforman el proyecto de reglamento de reúso del agua que presenta la referencia [7]. Además de los puntos resumidos en el cuadro, el proyecto incluye las definiciones de términos, detalla criterios de calidad para riego de cultivos alimenticios, riego de forrajes y pasturas, riego de áreas verdes y llenado de lagos, recarga de acuíferos, usos industriales y uso ganadero; estipula las condiciones para aplicar métodos de tratamiento no considerados por el reglamento; fija lineamientos de seguridad, operación e higiene y detalla mecanismos de inspección por parte del organismo operador a la empresa concesionaria, con las sanciones correspondientes.

Un reglamento de reúso del agua debe complementarse por una serie de criterios o lineamientos de orden técnico y operativo, incluyendo los siguientes aspectos:

- separación mínima entre tuberías de agua potable y tratada,
- señalización de las instalaciones de toma y conducción de agua tratada,
- diferenciación de las líneas de agua tratada mediante colores o uso de materiales especiales,
- mecanismos de operación dispuestos de manera que su accionamiento pueda ser llevado a cabo únicamente por personal autorizado,
- señalización en los lugares de descarga de aguas tratadas,
- requisitos técnicos para evitar proliferación de insectos, generación de malos olores o natas,
- tiempo mínimo de espera entre el riego y el contacto con personas o animales,
- minimización del almacenamiento del agua residual,
- manejo adecuado de los escurrimientos en caso de riego,
- horarios de riego para evitar contacto directo con usuarios de jardines recreativos,

CUADRO 3.14 PRINCIPALES ARTICULOS DE UN PROYECTO DE REGLAMENTO PARA EL REUSO DEL AGUA EN EL DISTRITO FEDERAL.

ARTICULO.	DESCRIPCION
11	Prohíbe el uso de aguas renovadas para limpieza, transporte y procesamiento de productos alimenticios.
15	Indica que el usuario que suministre tratamiento adicional se convierte en concesionario y adquiere las obligaciones respectivas.
16	Establece la necesidad de que la autoridad responsable apruebe las normas de calidad para tratamiento adicional en el caso de que éste sea proporcionado por el concesionario.
20	Fija la periodicidad de los muestreos y análisis de calidad del agua, según los parámetros y los usos a que se destine el agua tratada.
21	Estipula la necesidad de elaborar un informe de ingeniería para reúso del agua, sus características y condiciones, por parte de un especialista registrado ante la autoridad responsable.
22	Fija los requisitos para registro de especialistas para los fines del Artículo anterior.
23	Establece las condiciones para el registro y la aceptación por parte de la autoridad responsable de la plantilla de personal de la planta, en los aspectos cuantitativo y cualitativo.
24	Fija las condiciones para la presentación del programa de mantenimiento preventivo.
25	Especifica la necesidad de mantener registros de operación de análisis de parámetros, problemas de operación, reportes de fallas y de situaciones que hayan obligado a derivar agua no tratada al nivel normal.
26	Prohíbe la derivación de aguas residuales no tratadas o parcialmente tratadas desde la planta en cualquiera de sus procesos al sitio de reúso.
27	Indica que el diseño de tuberías, arreglos de equipos y procesos debe garantizar los niveles estadísticos de confiabilidad de calidad del efluente fijados para cada parámetro.
28	Especifica los casos que deben ser indicados por alarmas, las características de suministro de energía e instalación, así como los procedimientos operativos posteriores a la activación de la alarma.
29	Estipula las medidas de seguridad requeridas para el suministro de energía eléctrica, en función de mantener en operación los equipos básicos para el tratamiento y permitir el almacenamiento temporal del agua residual en caso de interrupción del suministro normal.
34	Para efecto de otorgar concesiones, incluye en el reglamento a todas las aguas residuales que hayan ingresado al sistema de alcantarillado del Distrito Federal.
35	Faculta al DDF, por conducto de la DGCOH, para concesionar el uso de dichas aguas ⁽¹⁾ .
36	Establece la figura de concesionario de las aguas residuales a que se refiere el Art. 34.
38	Define exenciones parciales al pago de derechos por liberación de volúmenes de agua utilizados antes de la operación del sistema.
41	Obliga a los concesionarios a permitir la inspección y vigilancia de sus instalaciones y obras por parte de la autoridad responsable.
42	Faculta a la Autoridad para decidir la periodicidad de las inspecciones.
48	Faculta a la autoridad responsable para establecer sanciones en forma de multas o clausura parcial o total del establecimiento o giro.

Fuente: Ref. [7]

NOTA: 1- El proyecto de reglamento consultado es anterior a la expedición de la Ley de Aguas Nacionales.

- separación mínima entre áreas irrigadas y zonas de explotación de mantos subterráneos para uso potable,
- pruebas de estanqueidad y presión para las instalaciones de conducción de agua residual cruda y tratada, y
- medidas de seguridad para los trabajadores que tengan contacto con aguas tratadas, considerando señalización, manejo del fluido, medidas de higiene y otras.

Estos lineamientos deben contemplar posibilidades alternas en caso de no poderse cumplir con la separación básica entre líneas paralelas o perpendiculares, considerando tipos de tuberías y accesorios especiales.

3.5 Aceptación Social del Reúso

Si bien mediante la reglamentación y la aplicación de criterios de diseño se cuida de no generar efectos nocivos a la salud, la aceptación pública es una parte esencial del éxito de un programa de reúso. En ella influyen distintos aspectos socioeconómicos de la zona en estudio, como son^[16]:

- nivel educativo general de la población y específicamente grado de conocimiento de cuestiones ambientales, tratamiento y reúso del agua,
- conciencia pública del nivel de escasez de agua en la zona,
- tarifas del agua potable,
- experiencias previas de reúso en la localidad,
- edad promedio de la población,
- distribución del ingreso.

La referencia [16] presenta resultados de encuestas sobre usos del agua renovada, aplicadas en el estado norteamericano de California. En síntesis se concluye lo siguiente:

- La oposición más grande se presentó en los casos en que la población tendrá contacto con el agua tratada, como el consumo, los usos recreativos con contacto directo o el uso en la industria alimenticia (alrededor del 50 por ciento).
- El reúso en actividades sin contacto personal presentó una oposición moderada (menor al 40 por ciento).
- La irrigación de vegetales que no se consumen crudos, pastos para ganado o áreas verdes, tuvo poca oposición.

- El uso del agua tratada en aplicaciones que no afectan directamente al usuario genera una imagen de ahorro y aplicación correcta de los recursos.

Las preocupaciones esenciales de la población se expresaron en tres direcciones:

- la protección de la salud pública,
- las consecuencias positivas en el ambiente natural y
- la contribución a la conservación de los recursos hidráulicos.

Si se toman en cuenta las diferencias socioeconómicas de las sociedades norteamericana y mexicana, aún pueden obtenerse lineamientos útiles de los resultados anteriores.

En nuestro país tiene una influencia fundamental la confianza de la gente en que su opinión tendrá alguna influencia en las decisiones políticas; aunque se sabe que ésta generalmente es muy baja, el caso del agua es diferente, ya que se trata de un bien imprescindible y su calidad afecta directamente a numerosos consumidores obligados. Muchas veces las decisiones impopulares en materia de abastecimiento de agua han tenido respuesta inmediata de la población.

Una encuesta sobre reúso tiene resultados más conservadores cuando se aplica por primera vez en una comunidad, especialmente si las opciones de uso de aguas tratadas parecen lejanas a la experiencia de la gente; no ocurre lo mismo cuando se han podido constatar los beneficios y los perjuicios reales. Con esto no se pretende avalar la costumbre política de implantar gradualmente las decisiones técnicas, de manera que se hagan de conocimiento público una vez que su aplicación sea irreversible. En el caso del reúso, las consecuencias sanitarias de su aplicación incorrecta significan un costo que se manifiesta en los rubros de seguridad social y productividad en el trabajo. Aunque los aspectos técnicos hayan sido resueltos correctamente, es común que la gente asuma como perjuicio para la salud lo que únicamente representa un riesgo.

La opinión pública en materias relacionadas con aspectos ambientales ha sido asumida últimamente por las agrupaciones "ecologistas", que rara vez son dirigidas por gente con conocimientos técnicos sólidos, incluso con el patrocinio de empresas con intenciones diversas; ello ha originado la adopción de actitudes irracionales, basadas en reducciones y simplismos, que dificultan la aplicación de soluciones que tienen aspectos complejos o poco evidentes. De cualquier manera influyen en el grado de participación pública y restringen el margen de acción política en materia de reúso del agua.

Cuando un programa de reúso incluye opciones susceptibles de enfrentar un rechazo público, es indispensable elaborar un análisis profesional de la aceptación social esperada, preparar varias alternativas e incluir en su implantación a los representantes de grupos ciudadanos establecidos en el área en estudio.

4

análisis de factibilidad del reúso del agua

En este capítulo se propone la metodología para estudiar la factibilidad de un programa de reúso y sus proyectos específicos. Como se mencionó en la Introducción de la Tesis, la planeación se aborda con dos enfoques: el macroeconómico y el microeconómico.

El enfoque macroeconómico se desarrolla en el denominado estudio de prefactibilidad, que considera de manera global todas las opciones de reúso aplicadas en un sistema hidráulico de manera complementaria al abastecimiento tradicional y a las medidas de uso eficiente. El microeconómico busca evaluar la factibilidad de proyectos más definidos, considerados como proyectos de inversión cuando tienen que ver con usos privados.

En ambos enfoques se parte de la ubicación y cuantificación de la oferta y la demanda potenciales dentro de un periodo de proyecto. En el primero, se pretende sustituir la mayor cantidad posible de agua de primer uso, identificando los segmentos de la demanda en que las otras opciones de abastecimiento generen mayores costos directos o de oportunidad. En el segundo se desarrollan estudios más completos de la oferta y la demanda potenciales, se analizan con mayor detalle los costos y se buscan precios competitivos del agua renovada para los usuarios privados, así como convenios adecuados con las autoridades para los usos municipales.

En el estudio de prefactibilidad se analiza el efecto del reúso en los balances hidráulicos para distintos horizontes de planeación, se identifican los usuarios potenciales, se ubican los puntos y se cuantifica la oferta; la asignación de las aguas renovadas considera costos comparativos contra otras fuentes de abastecimiento y resulta en la identificación de la demanda que resulta más económico cubrir con agua renovada (Figuras 4.1 y 4.2).

El estudio de factibilidad parte de estudios directos del mercado y de la generación de aguas residuales, por lo que el agua renovada se puede asignar a consumidores definidos y los costos pueden ser calculados con mayor precisión. En el caso de los usos privados, se pretende calcular las tarifas que hacen redituable la inversión en el tratamiento y la distribución del agua renovada. Para los usos públicos se reservan los excedentes de las plantas privadas y municipales, cuyos costos deben ser también cubiertos. La asignación de recursos a usos públicos del agua tratada se evalúa, por último, con criterios económicos y por objetivos múltiples (Figura 4.3).

4.1 Formulación del Proyecto

Esta actividad es de naturaleza reiterativa. Se refiere a la definición general de los resultados o metas que se esperan del proyecto propuesto, a partir de la identificación de sus elementos básicos. Esta primera formulación apoya la definición de antecedentes, objetivos y marco general del proyecto, con base en los cuales se debe obtener una formulación final precisa y completa, que defina los siguientes aspectos relativos al proyecto:

- finalidad: objetivos y metas.
- limitaciones: del interesado, legales, técnicas, sociales, etc.
- incentivos técnicos, fiscales, económicos, financieros, etc.

Paralelamente a la formulación del proyecto debe lograrse una apreciación general de sus perspectivas desde los puntos de vista del mercado, la tecnología, la ubicación, el desarrollo del sistema y otros criterios que se establezcan según el caso.

Para el programa de reúso, la formulación del proyecto puede partir de las siguientes orientaciones:

- a) **Situación del abastecimiento de agua.** Formular de manera aproximada el balance hidráulico del sistema en estudio, considerando todas las fuentes y las categorías de consumo, así como destacando los posibles déficits.
- b) **Identificación preliminar de consumidores potenciales.** Clasificar los posibles usuarios de agua renovada por categorías generales (industria del acero, papeleras, parques recreativos, etc.), indicando consumo promedio, ubicación y requisitos especiales de calidad o cantidad del líquido.
- c) **Objetivo general del programa.** Puede expresarse como "lograr la sustitución de volúmenes de agua potable en el abastecimiento a consumidores urbano-industriales mediante un organismo rentable, que genere beneficio público a la comunidad"; en esta formulación se deben incluir otras condiciones que resulten particularmente importantes para el caso en estudio (por ejemplo, si se espera amortizar instalaciones existentes, si se busca reforestar o crear zonas arboladas en un área urbana, u otras condiciones).

- d) **Elementos del sistema de reúso.** De acuerdo con lo expuesto en los Capítulos anteriores, se clasifican en dos tipos:

Físicos:

- obras de toma en la red de drenaje,
- obras de regulación de influentes en plantas de tratamiento para reúso directo,
- dispositivos para tratamiento primario, secundario, avanzado y desinfección,
- dispositivos para tratamiento y disposición de los desechos sólidos de los sistemas de tratamiento,
- dispositivos para medición y control de la calidad del agua residual cruda y renovada,
- obras de regulación de agua renovada,
- redes de distribución de agua renovada,
- vehículos de transporte de agua renovada, y
- dispositivos para medición, control y monitoreo de flujos.

Administrativos:

- recursos humanos en administración, planificación y operación,
- procedimientos para control de la calidad y el suministro del agua renovada,
- procedimientos para la coordinación con las autoridades correspondientes,
- procedimientos para fijación y cobro de tarifas por uso de agua renovada,
- sistemas de información para evaluación, operación y control.

Tanto los elementos físicos como los administrativos presentarán características acordes a cada caso. En el Capítulo siguiente se proponen criterios para la conformación de la empresa u organismo operador del sistema de reúso.

- e) **Apreciación de la situación competitiva.** Características y pronósticos de los precios y la confiabilidad del abastecimiento de agua; posibilidad de conseguir incentivos financieros y fiscales para el programa.

La formulación debe basarse en valores aproximados, muy generales pero realistas, que permitan acotar el proyecto o incluso desecharlo en caso de que no existan condiciones claras de competitividad.

4.2 Antecedentes, Marco General y Formulación Definitiva del Proyecto

La formulación definitiva del proyecto será la base del estudio de factibilidad. Para asegurar que sea lo suficientemente completa, se deben incluir en la misma los siguientes conceptos:

- a) **Antecedentes generales.** Experiencia en reúso del agua en el sistema en estudio; características de la red de abastecimiento y de drenaje (tipo, cobertura, materiales, estado de conservación); zonificación de usos del suelo (en categorías muy generales: doméstico, industrial, áreas verdes, comercial y mixto).
- b) **Marco legal y administrativo.** Según lo expuesto en el Capítulo 3, con atención especial a la normatividad local, establecida por el organismo operador o por las Dependencias estatales encargadas de la planeación urbana, del abastecimiento de agua y del saneamiento. Es importante saber si existen ya tarifas para el uso de aguas residuales y qué Dependencia las aplica y cobra.
- c) **Aspectos tecnológicos generales.** Según lo expuesto en los Capítulos 2 y 3; de ser posible, deben señalarse aquí las tecnologías cuya aplicación sea más favorable, ya sea por disponibilidad de terreno, condiciones climatológicas, cercanía a los centros de producción o distribución de dicha tecnología, limitaciones presupuestales, legales o de aceptación pública y otras condiciones características del sistema.
- d) **Puntos críticos para la investigación.**
 - características del abastecimiento actual de agua potable: cantidad, calidad, costos y precios,
 - características de la generación y recolección de las aguas residuales: cantidad, calidad, distribución y cobertura de la red, planificación del crecimiento e instalaciones para saneamiento,
 - localización e identificación (por tipo de actividad) de los puntos de posible demanda, así como datos o índices existentes que permitan conocer o calcular sus consumos,
 - identificación del mercado; posibilidades de desarrollar un estudio de mercado con la colaboración de Cámaras industriales o comerciales locales,
 - disponibilidad de terreno para instalaciones de tratamiento, almacenamiento y bombeo,
 - disponibilidad de información sobre la ubicación de otros servicios cuya ubicación o recorrido pudiera interferir con la red o con las líneas de reúso,
 - aceptación esperada del reúso por los consumidores directos y el público,
 - posibilidad de identificar claramente las restricciones legales, administrativas o de otro orden que pudieran existir en el sitio en estudio.

Únicamente se pretende identificar la posibilidad o imposibilidad de resolver estos puntos críticos, sin que la información que implican deba ser recopilada en esta etapa de manera exhaustiva. Si se requiere, en cambio, formarse una idea general que permita hacer una reformulación precisa del proyecto.

Otra manera de plantear esta identificación de puntos críticos es evaluar las perspectivas del programa respondiendo a las siguientes cuestiones:

- ¿Existe o se preve un déficit en el abastecimiento, el cual genera o generaría costos económicos y financieros elevados al sistema en estudio?
- ¿Existen usuarios de agua en cantidades importantes y aproximadamente uniformes, con requisitos de calidad presumiblemente inferior a la del agua actualmente servida?
- ¿Se usan cantidades considerables de agua en servicios urbanos, como riego de jardines, lavado de vialidades, lavado de autobuses y otros vehículos, embalses recreativos, hidrantes, etc.?
- ¿Existen instalaciones para tratamiento de aguas residuales dentro o cerca del área en estudio?
- ¿Es el precio del agua inferior a su costo real?
- ¿Existen en la estructura tarifaria usuarios que paguen el costo real del agua?
- ¿Se tiene una cobertura aceptable de facturación y cobro?
- ¿El organismo operador del sistema hidráulico opera con subsidios?
- ¿Se cuenta con estudios o proyectos para la ampliación del abastecimiento y el drenaje?
- ¿Existe disposición política favorable hacia la planeación de los recursos hidráulicos enfocada a su aprovechamiento racional y conservación?
- ¿Se cuenta en la localidad con recursos humanos capacitados para la operación de los sistemas de tratamiento y reúso?
- ¿Existe conciencia en la población de los costos económicos y los efectos ambientales del consumo de agua?

Las respuestas negativas no siempre representan condiciones determinantes de la no factibilidad del proyecto. Por ejemplo, si el precio del agua presenta un subsidio elevado (lo que menguaría la competitividad del agua renovada) deberá considerarse, en consulta con la autoridad responsable, la posibilidad de que dicho subsidio disminuya en lo futuro, o bien puedan obtenerse incentivos para la operación de un sistema de reúso. En el peor de los casos, pueden surgir en esta fase condiciones desventajosas que determinen la inconveniencia de continuar hacia las siguientes.

La formulación final debe incluir, por último, una evaluación preliminar de las posibilidades de éxito que se prevén para el proyecto. Ello permitirá orientar con más precisión los estudios de factibilidad, que constituyen el siguiente paso en la planeación. Puede ser conveniente llevar a cabo un análisis de prefactibilidad basado en información secundaria, índices y coeficientes, que permita ponderar las implicaciones financieras, económicas y técnicas del sistema de reúso.

4.3 Análisis de Prefactibilidad del Sistema de Reúso

El análisis de prefactibilidad parte de una identificación general del mercado, así como de la oferta potencial, con objeto de establecer la factibilidad y la competitividad del programa de reúso.

Para lo anterior:

- se obtiene una proyección de la demanda y la oferta potenciales de agua renovada, consideradas dentro del balance hidráulico global de manera adicional a las fuentes primarias en explotación y a las posibilidades de uso eficiente,
- se proyectan los costos y se efectúa un análisis de asignación para identificar la parte de la demanda que puede ser cubierta con agua renovada.

Los beneficios económicos del reúso surgen de la disminución de la explotación de fuentes primarias (con lo que se difieren las inversiones correspondientes), de la disminución del volumen de aguas residuales generadas en el sistema y de la recuperación de costos de saneamiento (Figuras 4.1 y 4.2). Otros beneficios económicos que no afectan el análisis de la asignación son los que resultan del uso de aguas tratadas en riego de jardines y llenado de lagos recreativos.

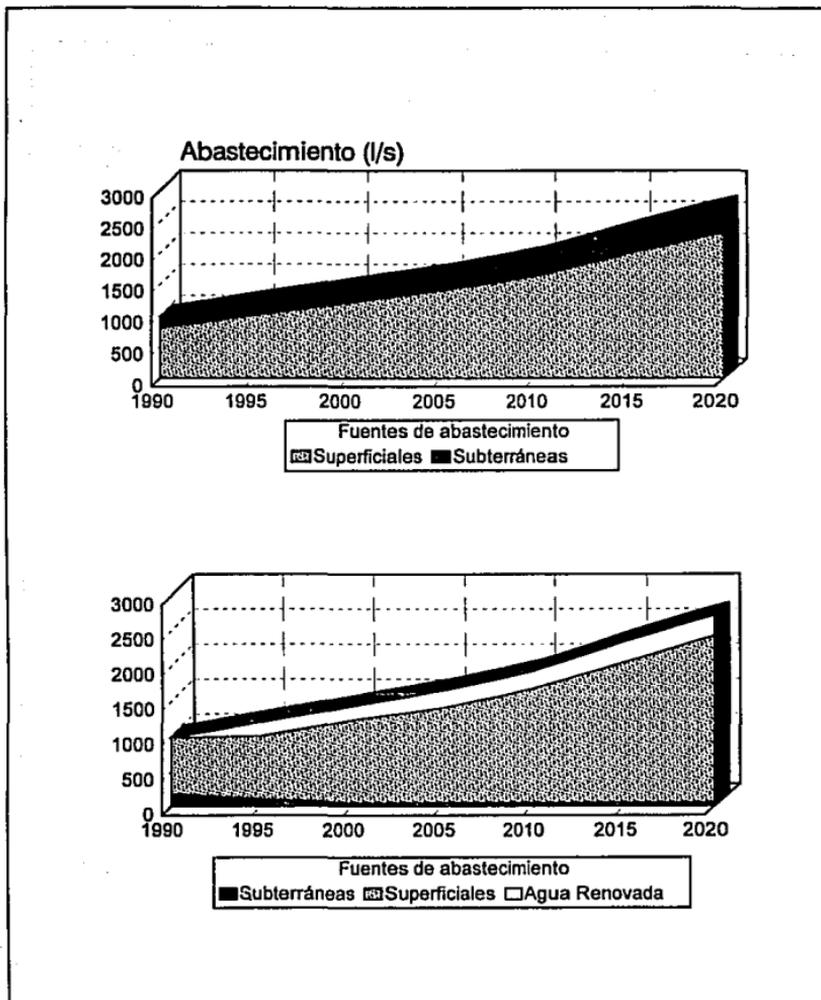


Figura 4.1 Graficas de abastecimiento de agua sin reúso y con él.

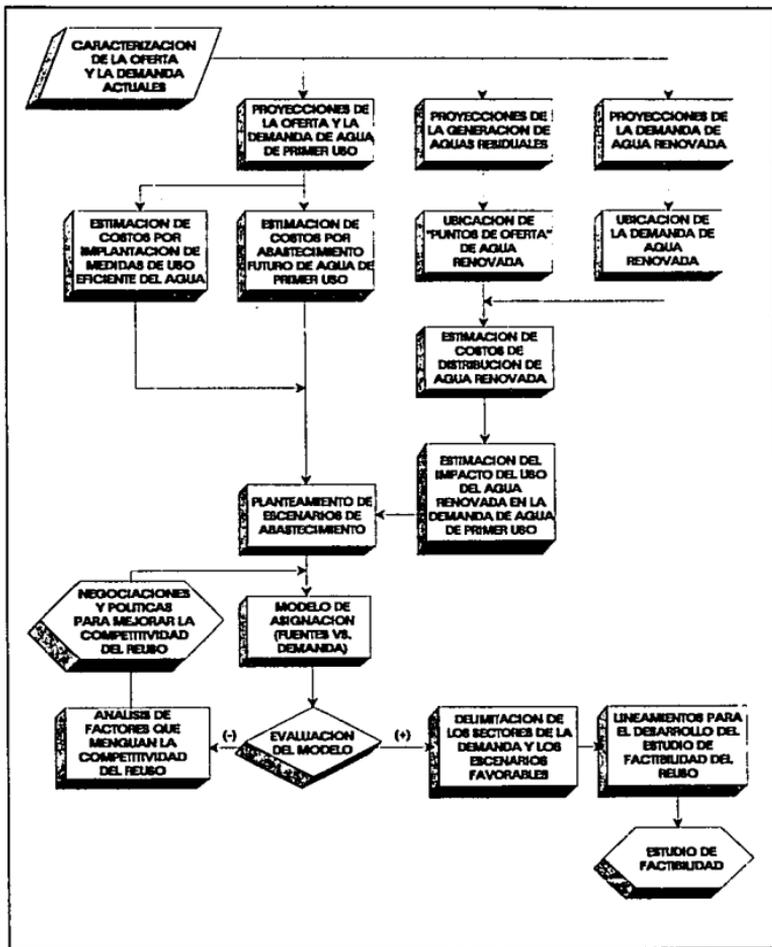


Figura 4.2 Enfoque macroeconómico de la planeación del reúso (estudio de prefactibilidad)

4.3.1 Balance Hidráulico del Sistema.

El balance hidráulico es la diferencia del abastecimiento global actual y los distintos consumos; en el caso que nos ocupa se requiere para estimar la generación de agua residual actual y futura, por zonas, en el área en estudio. Se calcula de manera simultánea a la estimación de la demanda y la oferta potenciales, que son parte de los datos de cálculo.

Los parámetros para el análisis del balance hidráulico son la dotación (por habitante o por unidad de área) y la población o el área correspondientes a cada uso del suelo. La dotación actual se obtiene dividiendo el abastecimiento para zonas domésticas entre la población total; para el caso de industrias y comercios se calcula un valor de dotación por unidad de área.

Los escenarios futuros para el abastecimiento industrial y comercial se obtienen con base en los planes de desarrollo urbano y, para el abastecimiento doméstico, con las proyecciones de población. El organismo operador del sistema seguramente contará, para la planificación del mismo, con escenarios de demanda y oferta, de los que puede partirse para calcular los balances.

La demanda industrial de agua renovada se debe estimar como una fracción de la demanda total, en función de los principales tipos de industrias. La máxima oferta potencial será la generación de agua residual del sistema en su conjunto, idealmente sólo la correspondiente a usos domésticos; debe considerarse al calcularla que también el agua renovada generará un retorno de agua residual a la red, aunque muchas veces no ingresará a las plantas de tratamiento para reúso.

Los datos para el cálculo del balance son:

- demanda total por tipo de usuario,
- generación total de aguas residuales,
- demanda potencial de agua renovada, por categorías de usuarios, utilizando índices de demanda por unidad de área,
- procedencia, en volúmenes y porcentajes, del agua de primer uso, de acuerdo con la planificación del organismo operador,
- oferta potencial de agua renovada, considerando la capacidad de tratamiento instalada,
- remanente de agua residual del sistema (descarga final al medio natural).

Debe tenerse en cuenta la influencia de las siguientes circunstancias:

- el cálculo de las proyecciones de población puede considerar tasas de crecimiento planificadas, menores a las tasas históricas, que generan una estimación conservadora de la demanda doméstica;
- la proyección del crecimiento de la actividad industrial depende de factores que difícilmente pueden ser tomados en cuenta en este nivel de análisis; para hacer estimaciones del consumo industrial, cuando no se cuente con planes de desarrollo elaborados, puede buscarse una correlación con índices como el consumo doméstico o el producto bruto industrial;
- en el cálculo del futuro consumo doméstico de agua potable se acostumbra utilizar valores de la dotación "recomendados" para las características del área en estudio; en nuestro país dichos valores usualmente son superiores a los reales y generan por lo mismo resultados optimistas de generación de agua residual.

El escenario con mayores expectativas de demanda tiene también la mayor generación de agua residual. Tomar en cuenta las distintas posibilidades ayuda a tener una mejor idea de la evolución previsible para la capacidad instalada de tratamiento.

Las conclusiones de este análisis deben reflejar:

- si se requeriría ampliar la capacidad de tratamiento instalada para satisfacer la demanda potencial de agua renovada,
- si la ubicación de las plantas de tratamiento para saneamiento puede favorecer el reúso de parte del agua tratada en zonas cercanas, o si se requeriría de la construcción de plantas ex-profeso,
- si la distribución en el área en estudio de los consumidores potenciales y los puntos de oferta (en los que se concentren las aguas residuales de zonas domésticas) favorece o complica el trazo de la red para reúso,
- en qué puntos sería deseable la instalación de plantas de tratamiento y de bombeo, con objeto de identificar predios disponibles,
- en qué zonas sería factible inducir demanda de aguas renovadas, por ejemplo en reforestación, riego de áreas verdes, embalses recreativos, hidrantes contra incendios o estaciones de lavado de vehículos de servicio público,

- cuál sería el caudal de agua residual remanente del sistema, especialmente si existen usuarios de las mismas aguas abajo de las descargas, y
- cuáles son los déficits probables en la extracción de aguas subterráneas, mismos que pudieran ser aminorados mediante la recarga de los mantos freáticos.

4.3.2 Investigación Preliminar de Mercado.

La investigación de mercado a nivel de prefactibilidad se desarrolla paralelamente al cálculo del balance hidráulico, y debe permitir tener bien definidos los tipos de consumidores y los posibles usuarios, enfocándose especialmente a los "grandes usuarios", es decir aquellos que requieran de mayores gastos.

Se sugiere definir cuáles de las categorías de reúso son factibles en la zona en estudio. Ello debe hacerse con base en el sentido común y en el conocimiento de la zona que debe tener el equipo de trabajo. La opción de irrigación de áreas verdes, por ejemplo, puede ser descartada si se trata de una zona lluviosa o húmeda. Si existen embalses recreativos naturales, seguramente no deberá tomarse en cuenta la posibilidad de crear embalses artificiales.

La industria es el usuario idóneo, aunque en ocasiones son también importantes la recarga de acuíferos y los usos públicos que requieran agua no potable.

Para cada categoría se elabora una lista clasificada de los mayores usuarios, anotando las principales características índice que permitan definir sus requisitos cualitativos y cuantitativos de agua tratada.

Los giros industriales se clasifican por niveles de consumo de agua, calidad de la misma y ubicación en el área. A este nivel no es posible obtener información muy detallada, sino solamente la necesaria para generar índices de consumo probable. Los datos básicos son: dirección, número de empleados, principales productos, volúmenes de producción de los mismos y consumo global de agua. El organismo operador del sistema hidráulico puede proporcionar los registros de consumo de agua, la ubicación de los sistemas de abastecimiento y el colector en el cual descargan sus aguas residuales las industrias encuestadas. Esta información debe registrarse en tablas-resumen, así como en planos de la ciudad, destacando en los últimos las zonas en que se aglomeren los principales usuarios e indicando aquéllas consideradas en los planes de desarrollo como zonas de desarrollo futuro o parques industriales.

El consumo de agua de las industrias y la parte del mismo que puede ser sustituida por agua

renovada deben definirse con base en los índices como los que presenta la referencia [17]; éstos tienen la desventaja de corresponder a datos obtenidos en otros países, aplicables a tecnologías que pueden ser diferentes a las presentes en el nuestro e incluso obsoletas. Con base en los datos de abastecimiento y producción reales pueden estimarse valores más confiables; sin embargo, debe calificarse la confiabilidad de dichos datos, ya que muchas industrias reportan o reconocen un consumo de agua inferior al real, o ni siquiera miden la cantidad de agua que extraen de sus pozos privados.

Los usuarios de irrigación pueden ser identificados en los planos de uso del suelo actual y planificado, midiendo las áreas directamente en los mismos cuando no se cuente con los datos precisos. Se deben indicar la ubicación y la extensión de las áreas verdes de dimensiones considerables (parques públicos, camellones, campos deportivos, etc.), así como las zonas del área en estudio que se considere requieran de ser reforestadas o dotadas con áreas verdes.

Para definir zonas de posible recarga de acuíferos se requiere de información sobre las características del subsuelo, cartas hidrológicas y geohidrológicas que comprendan la zona en estudio, así como ubicar áreas disponibles para la formación de lagunas de infiltración (denominada enlagueamiento) o la inyección directa de agua tratada. El principal punto para estimar la necesidad de la recarga es el balance hidráulico del sistema, a partir de cuyo análisis se estiman los déficits actuales y esperados. La recarga de acuíferos funciona como un almacenamiento de reserva, por lo que el beneficio que genera es de carácter estratégico; por ello, en un análisis de tipo financiero este uso quedará subordinado al volumen de agua renovada disponible. Su factibilidad técnica debe estudiarse con detalle en las siguientes fases de planeación; en ésta bastará con establecer la posibilidad de incluirlo o de descartarlo.

Es recomendable dejar al final la ubicación de embalses recreativos, los usos para arquitectura de paisaje o para piscicultura, supeditado ello al volumen excedente de agua tratada.

En resumen, los resultados de la identificación de usuarios serán:

- un listado de usuarios industriales, indicando razón social, giro de producción, volumen de producción anual, consumo anual de agua y número de empleados;
- un listado de otros usuarios, indicando la unidad de referencia (por ejemplo hectáreas de riego), la dotación (litros diarios por hectárea) y la demanda estimada de agua renovada;
- un plano de la zona en estudio, ubicando los puntos de demanda diferenciados con claves o colores según niveles de consumo y categorías.

Una vez ubicados los puntos de demanda, se agrupan los que se encuentren en un radio definido. La suma de las demandas en cada grupo formará la demanda por subzona o **nodo** de demanda.

4.3.3 Ubicación de Puntos de Oferta.

Los puntos de oferta se ubican en el trazo de la red de drenaje, cumpliendo tres requisitos:

- que el gasto sea suficiente para cubrir la demanda de la subzona durante un periodo de proyecto predefinido,
- que la composición del agua residual aguas arriba de la sección elegida para la captación sea predominantemente doméstica y
- que exista terreno disponible para la construcción de las plantas de tratamiento y de bombeo que se estimen necesarias, tanto para la captación como para la distribución.

Es deseable que la zona de captación de las aguas residuales se encuentre en un nivel superior al de su tratamiento y aprovechamiento, para evitar los gastos por bombeo.

Estas zonas de captación se ubican también en un plano de la ciudad, de manera que se aprecien las posibles líneas para la distribución del agua renovada.

En este nivel de análisis los gastos de agua residual se definen según la dotación y el porcentaje de retorno considerados en el balance hidráulico, si es posible con apoyo en cifras disponibles de aforos anteriores de la red en estudio. Por lo mismo, se sugiere emplear gastos totalizados, mensuales por ejemplo, para evitar errores en los balances individuales debidos a las variaciones diarias del flujo y a la falta de regulación (en ocasiones podría parecer que se utilizan más *litros por segundo* de agua renovada que los generados de agua residual).

4.3.4 Aspectos Económicos de las Categorías de Reúso.

Además de los costos de tratamiento común a los usuarios del sistema de reúso, cada categoría implica costos adicionales, que se describen a continuación ^[9].

Para el enlagueamiento los principales elementos del costo son las terracerías, la adquisición de terrenos y, en la operación, el equipo de aeración y reciclaje.

El reúso en enfriamiento industrial comprende como costos de inversión la conducción y el equipo de bombeo, los equipos de tratamiento terciario (incluso en el sitio de reúso) y los sistemas de limpieza; los costos de operación más importantes son el del agua consumida (en circuitos semicerrados), el monitoreo del agua renovada, el tratamiento terciario y las pérdidas de rendimiento en los intercambiadores de calor debida a la acumulación de residuos y pérdidas de calor por las purgas.

En el lavado y el transporte industrial de materiales la mayor inversión se hace en instalaciones para conducción y bombeo, así como equipos de tratamiento terciario, si se requiere. Los principales costos operativos serán el costo del agua (tomando en cuenta que las purgas y, por tanto, el consumo son mayores que en otros casos), el bombeo y la operación de la distribución y el tratamiento terciario.

Para usos municipales y recreativos, la utilización de aguas renovadas implica gastos de canalización, pretratamiento adicional, redes de distribución, etc., sin que existan beneficios financieros. Evidentemente el uso recreativo no sigue las reglas del mercado y responde siempre a directrices marcadas por el sector público.

Algo semejante ocurre en el caso de la inyección o infiltración de agua tratada para recarga del acuífero. Los principales costos de inversión son la adquisición del terreno, la construcción de las lagunas y las conducciones y los equipos de bombeo; en la inyección son importantes los costos de tratamiento terciario con severos controles virales y bacteriológicos, la perforación y el bombeo con técnicas especializadas. Operativamente tendrán importancia los costos de bombeo y el monitoreo. El análisis de su conveniencia económica puede hacerse calculando el valor futuro del agua almacenada como sustituta de la proveniente de otras fuentes.

Cuando no se dispone de agua tratada proveniente de plantas para saneamiento, el principal inconveniente es la inversión necesaria para tratar las aguas residuales; aunque económicamente es benéfico sustituir el uso de aguas claras cuando éstas se transportan de lugares lejanos, no siempre se tendrá la capacidad financiera para construir y operar estas plantas. Queda en estos casos a las autoridades establecer incentivos mediante normas, tarifas o exención de impuestos para fomentar el riego de áreas verdes con agua tratada en el caso de instalaciones particulares, y subsidios en el caso de entidades públicas.

4.3.5 Asignación del Agua Renovada.

La primera parte del análisis de la asignación busca definir la parte de la demanda total que puede ser cubierta con agua renovada de manera económicamente conveniente. Para ello se parte

de la definición de costos de tratamiento y transporte promedio, por unidad de gasto, para diferentes grados de cobertura del servicio de agua renovada, teniendo como tope máximo la suma de las demandas potenciales estimadas¹.

Lo anterior puede llevarse a cabo mediante un modelo de programación lineal, en el que se consideren como orígenes las diferentes fuentes de agua de primer uso y agua renovada, y como destinos las categorías de usuarios; en éstas se pueden desglosar por subcategorías y por zonas, de manera que los costos de tratamiento y transporte que correspondan a cada combinación origen-destino sean menos imprecisos⁽¹⁸⁾.

En el plano de la zona urbano-industrial en estudio se ubican los nodos de demanda, así como las plantas de tratamiento cerca de los puntos de captación.

Para cada opción de sistema de reúso se calculan los costos de tratamiento y transporte con base en los métodos planteados en el Capítulo 2. Los costos de administración y operación pueden ser despreciados si se considera que serán semejantes para todas las alternativas.

El resultado del modelo de asignación será una estimación de los volúmenes de agua residual que pueden ser abastecidos a cada nodo y desde cada planta. En una situación de escasez aguda es lógico que el agua renovada sustituya al máximo posible el abastecimiento de agua potable; los porcentajes y costos de la disminución de la demanda mediante medidas de uso eficiente deberán ser estimados para cada categoría de usuario y considerados como escenarios alternativos de la demanda total, fuera del modelo de asignación.

Las soluciones extremas son contar con una sola planta, con distribución a todos los puntos de demanda, o asignar una planta a cada nodo de demanda. En la primera se generarían economías de escala en el tratamiento, pero la distribución sería muy costosa y se dificultarían la operación del sistema y la regulación de los gastos; el segundo caso tendría los mayores costos de tratamiento, aunque se minimizaran los de distribución. Entre ambos extremos se debe buscar una solución conveniente.

No está dentro del alcance de esta Tesis hacer una exposición detallada del problema del transporte aplicado al flujo en la red de agua tratada. Sin embargo, si se aplica el modelo es recomendable que la demanda considere gastos totalizados por periodos mensuales, para evitar inexactitudes debidas a las variaciones en la "producción" y a la regulación del agua renovada. Si es posible definirlos en este punto, se añadirán nodos ficticios para simular la regulación,

¹ El tratamiento primario tiene los costos más bajos, pero sus efluentes pueden utilizarse en muy pocas aplicaciones; un tratamiento avanzado tendría costos muy elevados, aunque sustituiría mayores volúmenes de agua de primer uso. Entre estos extremos pueden definirse varias opciones.

mismos que serán simultáneamente puntos de demanda y oferta. El modelo puede ser complicado al nivel que los analistas consideren suficiente, en función de la complejidad propia del problema real; por lo mismo, es esencial elaborar análisis de sensibilidad que permitan tener en cuenta la incertidumbre que genera el uso de índices y el del propio modelo.

No debe perderse de vista que, si se considera la regulación de caudales, se genera la necesidad de contar con áreas de terreno suficientes para las dimensiones de las estructuras de almacenamiento requeridas.

4.4 Estudio de Factibilidad del Sistema de Reúso

Si los resultados del estudio de prefactibilidad son positivos, se deben hacer estudios más detallados que permitan elaborar el anteproyecto de los subsistemas y hacer una evaluación más precisa de sus beneficios financieros y económicos.

En los siguientes puntos se propone la metodología para llevar a cabo el estudio de factibilidad del sistema de reúso.

4.4.1 Estudio de Mercado.

En esta fase, el estudio de mercado se divide en tres etapas:

- recopilación de información,
- análisis de la información y proyección de la demanda, y
- estudio de la oferta potencial.

a) Recopilación de información.

Con objeto de contar con un marco de referencia más amplio, se debe reunir la siguiente información:

- Series estadísticas: valores del consumo y abastecimiento de agua en la zona en estudio, estructura de precios, disponibilidad de fuentes particulares y costos, distribución del ingreso de la población, volumen y valor de la producción local.

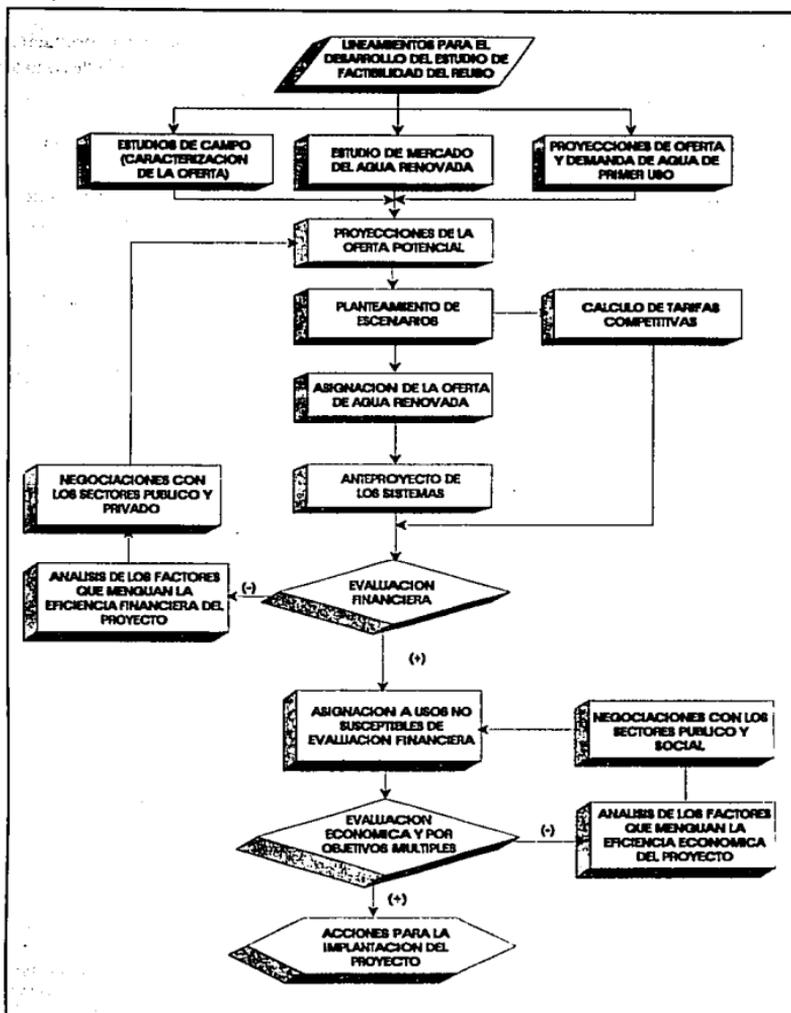


Figura 4.3 Enfoque microeconómico de la planeación del reúso (estudio de factibilidad)

- **Características del mercado:** tipo de comercialización², normas relativas a la prestación y cobro del servicio, tipo de mercado, valores de la dotación por zonas, existencia de controles de precios y existencia de políticas de racionamiento de la distribución.
- **Usos del agua y especificaciones del servicio** (calidad, presión, variación de gastos).
- **Costo del agua potable**, integrando extracción, conducción, potabilización, almacenamiento, distribución, administración, operación y mantenimiento. Costos por tratamiento adicional por parte de usuarios del servicio.
- **Precios de reactivos y otros insumos;** precios de refacciones convencionales (sin considerar las de los equipos de tratamiento o refacciones especiales).
- **Características de las fuentes de abastecimiento:** calidad, gastos de extracción, ocurrencia de sobreexplotación, integración de costos.
- **Bienes o servicios competitivos:** no se refiere solamente a otras fuentes de agua, sino a costos por sustitución de tecnología que generen una disminución en el consumo de agua o abaraten el tratamiento adicional.
- **Ubicación de distribuidores de reactivos, suministros diversos, refacciones, etc.**
- **Ubicación de sitios para la disposición de los lodos biológicos y otros residuos sólidos previstos.**
- **Disponibilidad y características de la mano de obra:** costo de salarios y prestaciones obligatorias, ubicación de mano de obra especializada, efecto porcentual de la mano de obra en el costo total esperado.
- **Disponibilidad, características y costos del transporte de reactivos, equipos y residuos de la planta.**

² Aunque la distribución de agua potable está generalmente a cargo de una sola empresa, con precios parcialmente subsidiados, en algunos casos pueden existir empresas que distribuyan agua renovada, las cuales pueden funcionar como sociedades anónimas, civiles, de usuarios, etc. En este caso se requiere la información más detallada posible sobre las características de comercialización, planes de ampliación, sustitución de tecnologías, etc. La existencia de efluentes tratados, en plantas de tratamiento para saneamiento, constituye también una oferta potencial.

Una vez conjuntada toda esta información, se procesa y ordena de manera que permita prever de manera consistente la demanda del agua renovada, así como identificar los factores de incertidumbre, los que influirán en el costo y los efectos económicos del programa.

A diferencia de la identificación de la demanda llevada a cabo en el estudio de prefactibilidad, en este nivel se requiere tener contacto directo con los usuarios potenciales, de manera que se cuente con datos más confiables y, al mismo tiempo, pueda evaluarse el interés de aquéllos en el agua renovada.

En el Cuadro 4.1 se presenta un ejemplo de la información que, en el mejor de los casos, sería deseable conocer sobre los usuarios industriales.

Esta investigación debe ser aplicada tomando como base el conjunto de usuarios mayores del agua potable, según los registros del organismo operador, descartando aquéllos que requieran de agua de alta calidad. Muchas industrias podrían utilizar agua renovada únicamente en operaciones no ligadas a la producción, como lavado de patios, equipos o vehículos; estos usos pueden ser tomados en cuenta como porcentajes del abastecimiento global de agua renovada.

Una vez que se cuente con los resultados de la encuesta, será necesario traducirlos a valores de demanda. Para evaluar la necesidad y factibilidad de llevar a cabo regulación de flujos de agua renovada se requiere expresar la demanda en gasto continuo (litros por segundo) según el uso real y las posibilidades de regulación *in situ*, así como en volumen diario (metros cúbicos por día).

Dichos valores se establecerán para diferentes condiciones de calidad del agua renovada. Como mínimo se debe considerar la demanda de agua tratada a nivel secundario con remoción de nutrientes y desinfección, y se debe fijar un nivel de tratamiento máximo que satisfaga las necesidades de la mayoría de los usuarios potenciales. El porcentaje que debe representar esta "mayoría", así como la calidad de agua que demande, dependerán de la composición de los encuestados; en general, es difícil que los usuarios industriales presenten requisitos uniformes de calidad, e incluso es frecuente que aún en el caso del abastecimiento público muchas industrias cuenten con procesos de tratamiento adicionales.

Ubicar a los principales usuarios potenciales en planos es útil para tomar en cuenta a usuarios menores que pudieran quedar cercanos o "en la ruta" de la distribución y, en conjunto, representarían una demanda de mayor consideración.

CUADRO 4.1 DATOS BASICOS PARA EVALUAR EL USO EFICIENTE Y LA FACTIBILIDAD DE REUSO DEL AGUA EN LA INDUSTRIA

NOMBRE O RAZON SOCIAL:		CLAVES
DOMICILIO:		
MUNICIPIO:		
VIALIDAD PRIMARIA MAS PROXIMA:		
DISTANCIA APROXIMADA:		
GIRO:		
CALIDAD REQUERIDA (PARAMETROS ESPECIALES EN RELACION CON LA CALIDAD PROMEDIO)		
PARAMETRO (unidad)	CONCENTRACION	CONFIABILIDAD (%)
PERSONAL OCUPADO	TURNO MATUTINO:	
	TURNO VESPERTINO:	
	TURNO NOCTURNO:	
	EVENTUAL PROMEDIO:	
PRODUCTOS ELABORADOS	VOLUMEN PROMEDIO MENSUAL	CARACTERISTICAS ESPECIALES
USOS, EQUIPOS Y PROCESOS QUE GENERAN CONSUMO DE AGUA:		
	USOS	
	PROCESOS	
	TRATAMIENTOS	
	GENERALES	
	OBSERVACIONES:	

b) Análisis de la información y proyección de la demanda.

En el cálculo de proyecciones de demanda de agua renovada existe más incertidumbre que en la generación, ya que intervienen factores menos previsible, como la expansión de la actividad industrial. Lo más importante es contar con estimaciones lo más confiables posible de la demanda potencial actual.

Para proyectar la demanda es necesario:

- determinar el periodo de análisis; tomando en cuenta la vida útil de los equipos de tratamiento, se acostumbra analizar plazos de 15 a 20 años para plantas municipales; para el estudio de mercado un periodo mayor a 10 años sumaría demasiados factores de incertidumbre,
- seleccionar los datos útiles y clasificar la información, ordenada en forma de tablas, cuadros sinópticos y figuras que destaquen los principales factores que pueden influir en los costos del agua tratada y en el comportamiento de la demanda,
- evaluar si la información es suficiente y en qué grado es confiable,
- definir las principales variables e identificar tendencias; para nuestro caso pueden ser el consumo histórico de agua por tipos de usuarios, el volumen y el valor de la producción de los giros industriales que tengan los mayores consumos, la evolución en la urbanización, la expansión de áreas industriales, el equipamiento urbano y otras tendencias relativas a consumidores potenciales,
- proponer variables independientes e identificar correlaciones aparentes.

Para proyectar la demanda existen varias opciones:

- proyectar la tendencia de aquellas variables que muestren un comportamiento regular durante un periodo suficiente de tiempo, utilizando técnicas estadísticas y de regresión,
- aplicar técnicas de econometría, especificando el nivel de confiabilidad estimado para la proyección de la variable independiente y para los criterios de interrelación,

- aplicar coeficientes técnicos, como gasto consumido por unidad de área industrial, factores recomendables para equipamiento urbano en función del área o la población, etc.,
- comparación con las tendencias en ciudades de otros países, similares al sistema en estudio según factores predefinidos (ingreso, desarrollo industrial, estructura sociopolítica, etc.),
- considerar las intenciones expresadas por los consumidores en encuestas, o
- pronóstico *heurística* por parte de especialistas familiarizados con el área en estudio.

A cada uno de los métodos anteriores puede asociarse un grado de confiabilidad.

La primera opción para calcular el crecimiento de esta demanda puede ser suponerlo proporcional al crecimiento poblacional, corrigiendo los cálculos de acuerdo con la tendencia que muestre la composición sectorial de la actividad económica en la zona en estudio.

Si existen zonas industriales, dependiendo de su nivel de desarrollo puede estimarse si su ritmo de crecimiento es creciente o decreciente. Una zona de desarrollo reciente, que cuente con la presencia de grandes industrias, puede inducir el establecimiento de industrias complementarias, mientras que en una zona consolidada los consumos de agua estarán prácticamente establecidos, e incluso podrían disminuir con la adopción de tecnologías más eficientes.

El equipo de planeación podrá aplicar los criterios que considere idóneos para apoyar las predicciones de la demanda que finalmente proponga. Para la aplicación de técnicas de econometría, el agua renovada puede ser considerada como un bien de consumo intermedio o de demanda dependiente; esto significa que, para proyectar su demanda, se requiere definir a qué bien o bienes de consumo está ligada, proponiendo un factor de correlación, proyectar la demanda de dichos bienes y aplicar el factor para obtener la demanda proyectada. Sin embargo, al evaluar el resultado no se debe pasar por alto el tipo de mercado que corresponde a la distribución del agua.

Puede aplicarse también la técnica basada en el concepto de elasticidad de la demanda, aunque debe elegirse adecuadamente el índice respecto del cual se determinará dicho factor. La elasticidad con respecto al precio no es determinante en el caso del agua, ya que el mercado está en manos del organismo operador, con precios controlados. De acuerdo con los datos estadísticos disponibles, se evaluará si se aplica con relación a algún índice relacionado con la producción industrial. Se aplica la fórmula que se indica a continuación.

$$E_{dy} = \frac{\Delta_{dd}}{\Delta_{yy}}$$

en donde:

E_{dy} : elasticidad de la demanda,
 Δ_{yy} : incremento del producto,
 Δ_{dd} : incremento de la demanda.

Para calcular el valor futuro de la demanda se determina el valor de la elasticidad relacionando incrementos del producto y la demanda en un periodo conocido; la demanda futura será:

$$d_n = d_1(1 + E_{dn})^n$$

en donde:

d_n : demanda en el n-ésimo año,
 d_1 : demanda actual.

La demanda de agua renovada se correlacionaría con la calculada para el índice seleccionado de acuerdo con un factor prefijado.

c) Análisis de la oferta potencial.

El análisis de la oferta comprende su proyección y la previsión preliminar de los precios. En un estudio de mercado convencional, la estimación de la oferta potencial consiste en identificar una "demanda insatisfecha". Para este caso supone fijar como política el sustituir la mayor proporción posible de agua potable por agua tratada.

Si existen plantas de tratamiento para reúso, a partir de su capacidad instalada se determinarán sus posibilidades de ampliación, considerando sus limitaciones tecnológicas, de disponibilidad de suministros y de terreno; en algunos casos será posible conocer los planes de expansión de las plantas. Con ello se proyectará la oferta. Asimismo, se considerará la posibilidad de desplazar parte de la oferta existente, ofreciendo mejores condiciones de suministro a los usuarios de agua renovada.

Los factores que influyen en la estimación del precio preliminar son:

- el precio del agua potable y del agua renovada,
- el tipo de consumidores no abastecidos actualmente (es posible que los consumidores principales ya cuenten con reciclaje o abastecimiento de agua renovada, y queden sin servir solamente consumidores menores),
- la reacción esperada de otros prestadores del servicio, y la
- estrategia económica oficial en la zona en estudio.

Para definir una cifra es mejor contar con los resultados del estudio financiero; el de mercado proporciona, de cualquier manera, una orientación al proyecto en función de los factores que afectan la competitividad del agua renovada, como pueden ser características generales de calidad, precio máximo, características de la distribución, requisitos de promoción ante la opinión pública, periodo de proyecto, etc.

4.4.2 Estudios de Campo.

El estudio de mercado tiene por objeto definir más precisamente la demanda potencial de agua renovada. Para estimar la oferta real de la misma se requiere llevar a cabo estudios de campo para determinar la cantidad y la calidad del agua residual disponible en la zona en estudio. Para ello se parte de la definición de puntos de captación a la que se llegó en el análisis de prefactibilidad.

Se efectúan tres actividades: aforo de los caudales de aguas residuales, muestreo de las mismas y análisis de laboratorio. En casos especiales, cuando se sospeche la presencia de factores que podrían impedir el tratamiento biológico, puede ser necesario llevar a cabo pruebas de tratabilidad mediante plantas de tratamiento a escala de laboratorio. A continuación se dan lineamientos para la realización de estas actividades.

a) **Aforo de los caudales de aguas residuales.**

Los sitios de aforo se ubican con base en la identificación de los probables puntos de captación, aunque no necesariamente deben coincidir con éstos. En ocasiones será necesario llevar a cabo dos o más aforos por cada punto de captación, así como puede ocurrir que ni siquiera uno sea técnicamente factible.

El aforo de aguas residuales se puede llevar a cabo en las formas acostumbradas, mediante los métodos "sección-velocidad" o "sección-pendiente".

El primero consiste en medir los tirantes en campo, en una sección que no presente remansos ni turbulencias y, con un micromolineté o con testigos flotantes, las velocidades del flujo; los gastos se obtienen aplicando la ecuación de continuidad.

En el segundo caso se miden los tirantes y la pendiente de la plantilla del tubo o canal, dentro de un tramo sensiblemente recto y libre de remansos (para buscar un flujo uniforme); el gasto se obtiene con alguna de las ecuaciones para flujo uniforme en canales, como Manning-Strickler o Hazen-Williams. Deben tomarse precauciones especiales en relación con las mediciones en cauces abiertos o colectores muy profundos. Cuando se mide con molinete, debe también prestarse atención al efecto de los sólidos transportados en el agua residual, que pueden dañar o atascar las hélices. Otros detalles de la realización de aforos pueden buscarse en la bibliografía correspondiente^(19,20).

Debido a que la generación de aguas residuales presenta variaciones horarias y estacionales, y depende de los cambios en el abastecimiento, es deseable contar con datos más completos. Como mínimo se deben obtener aforos horarios, de 24 horas diarias y durante 28 días, 14 en período de estiaje y 14 en lluvias. Cuando ello no sea posible por restricciones de tiempo o presupuesto, es indispensable considerar el grado de incertidumbre que genera esta falta de información y su costo esperado, para orientar la definición de datos de diseño. Lo mismo ocurre en los casos en que, por imposibilidad de llevar a cabo los aforos, deban hacerse estimaciones mediante dotación y factores de retorno.

Como la demanda de agua renovada no presenta generalmente variaciones estacionales, en el caso de sistemas combinados deben tomarse en cuenta los resultados de aforos en época de estiaje.

Básicamente puede decirse que el gasto medio influye en los balances de materiales y el diseño de los procesos, mientras que las variaciones de gastos definen la necesidad de regulación antes o después del tratamiento, así como el dimensionamiento de las unidades y el diseño hidráulico. Los aforos en épocas de gastos máximos, por ejemplo en la temporada de lluvias, influyen también en el diseño de la obra de toma; se requieren, además, para ponderar las variaciones consiguientes en la calidad del agua.

b) Muestreo de aguas residuales.

El muestreo de las aguas residuales se hace generalmente de manera simultánea al aforo, para aprovechar el hecho de contar con brigadas de trabajo en campo. Además, generalmente se obtienen muestras simples, a partir de las cuales se pueden componer otras en función del gasto

en el momento del muestreo. Dependiendo de las condiciones del transporte en el área en estudio, de la disponibilidad y los horarios de los laboratorios, se organiza logísticamente la campaña, de manera que se asegure que las muestras lleguen rápidamente al laboratorio y en óptimo estado de conservación, minimizando su almacenamiento.

También en este caso, especialmente para sistemas de drenaje combinados, existen variaciones horarias, diarias y estacionales en la calidad del agua. Los métodos de muestreo se ajustan a las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes o bien a las normas norteamericanas equivalentes (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*) en su edición más reciente.

La determinación de algunos de los parámetros (pH, conductividad, temperaturas ambiente y del agua residual, sólidos flotantes) debe hacerse en campo. Para conocer en detalle los procedimientos de muestreo y almacenamiento de muestras puede consultarse también la bibliografía especializada (vgr. Refs. [19,20]).

c) Análisis de laboratorio.

La selección de los parámetros a ser medidos en las muestras dependerá de las condiciones del sitio, especialmente de la influencia industrial o comercial en el área de captación. En principio se propone llevar a cabo la determinación de los parámetros mencionados en el Cuadro 2.1 de esta Tesis, con la excepción de los metales pesados y los compuestos orgánicos, que solamente en algunos casos valdrá la pena. Para definir esto se requiere del conocimiento de los tipos de industria que descargan en el colector muestreado, asociados a posibles contaminantes del agua residual (por ejemplo, fábricas de acumuladores, curtidurías, etc.).

d) Pruebas de tratabilidad.

Las pruebas de tratabilidad son ensayos experimentales en laboratorio de modelos de tratamiento. Su finalidad principal es verificar que los procesos propuestos sean aplicables para el caso de las aguas residuales en estudio; las mediciones llevadas a cabo en los modelos permiten fijar criterios y obtener valores para el diseño de la planta de tratamiento.

Estas pruebas comprenden modelos de tratamiento biológico por lodos activados, de filtración en diversos medios, oxidación anaerobia, etc. Además se hacen pruebas de sedimentabilidad de los lodos, coagulación, desinfección y análisis microbiológicos.

Es imposible reproducir en la experimentación de laboratorio las variaciones cualitativas y cuantitativas de los caudales reales; la mayor aproximación se procura alimentando los reactores con muestras compuestas según el gasto a la hora de los muestreos simples y, de ser posible, en flujo continuo de 24 horas. Es importante tomar en cuenta lo anterior para dar a los resultados

de las pruebas el valor pertinente; los coeficientes de diseño deben ser evaluados con criterio por ingenieros proyectistas con experiencia, no tomados literalmente para los cálculos.

4.4.3 Interpretación de los Estudios de Campo.

a) **Proyecciones de la generación de aguas residuales.**

Los valores futuros de la generación de aguas residuales se pueden estimar a partir de las proyecciones de población, del abastecimiento de agua potable y la ampliación de la cobertura de los sistemas de distribución y de drenaje.

El análisis lleva el orden siguiente:

- Proyecciones de población, mediante los métodos usuales, eligiendo dos opciones: la que mejor se ajuste a las proyecciones de los programas de desarrollo locales y la que siga la tendencia histórica (usualmente difieren).
- Cálculo de la distribución promedio en las subcuencas o zonas de drenaje aportadoras a las plantas de tratamiento definidas en el estudio de prefactibilidad; ello puede hacerse con base en las densidades de población y las dotaciones previstas por el organismo operador.
- Cálculo de la generación de agua residual, como porcentaje de retorno del abastecimiento de agua potable (dependiendo del clima, entre 65 y 70 por ciento del mismo), considerando pérdidas en la red y porcentajes de cobertura.

Los valores obtenidos se modifican de acuerdo con la demanda de agua renovada y la capacidad de tratamiento para reúso, ya que, por una parte, se restan al agua residual generada los caudales tratados y, por otra, retorna agua residual proveniente del reúso. Aunque los caudales de agua renovada sustituyen porcentajes del abastecimiento de agua potable, su retorno global es menor al 60 por ciento, ya que los usos principales del agua renovada (como el enfriamiento o el riego) son consuntivos en mayor medida que los usos domésticos o comerciales.

b) **Interpretación de los resultados de laboratorio.**

Para el diseño de sistemas biológicos de tratamiento son determinantes los valores de la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno, los sólidos suspendidos totales y volátiles y los nutrientes, como nitrógeno y fósforo.

Son válidas las consideraciones hechas en el caso de los aforos, en cuanto a la representatividad de los datos en relación con el número y la distribución temporal de los muestreos. La interpretación estadística correcta de los resultados es básica para evaluar la operación de la planta en términos de confiabilidad; esto quiere decir que para el usuario tendrá un costo superior recibir agua con variaciones de calidad mayores y más frecuentes, mientras que para la empresa que preste el servicio será más caro asegurar una confiabilidad alta (diseñando para concentraciones presentes en mayor número de muestras, más lejos de la media).

Siempre será valioso contar con datos sobre el tipo de descargas a la red aguas arriba del punto de muestreo, para evaluar resultados no siempre lógicos o para incluir análisis especiales si existen industrias que puedan estar descargando contaminantes particularmente nocivos; aun cuando el objetivo del programa no sea el control de la calidad del agua en la red, pasar por alto este factor puede ser muy costoso si el sistema que se diseñe no resulta funcional a final de cuentas.

4.4.4 Asignación del Agua Renovada.

El primer paso para asignar caudales de agua renovada es definir el esquema de consumidores con base en la información de los estudios de mercado y en las proyecciones de la demanda. En planos de la zona en estudio se ubica a los consumidores principales, indicando sus demandas expresadas en caudales continuos y en consumos diarios, así como las horas que reciben abastecimiento.

La oferta debe estar definida en términos de calidad (con base en el estudio de mercado) y los sitios de posible ubicación de las plantas de tratamiento deben haber sido identificados, siguiendo los criterios expuestos en 2.4. Con la ubicación precisa de los consumidores, se propone en planos de la ciudad el trazo de las líneas de distribución, buscando minimizar su recorrido y maximizar el número de usuarios que puedan ser servidos por aquéllas. Para ello pueden tomarse como base los resultados del modelo de transporte, como se indicó en 4.3.5. Si la demanda de agua renovada es mayor que la generación en una zona, puede complementarse el abastecimiento con efluentes de una segunda planta, si es conveniente en términos de costo³.

La configuración de la red estará determinada por elementos como la urbanización de la zona, la ubicación relativa de los consumidores y la de las vialidades primarias.

³ En la planeación del sistema de reúso debe tomarse en cuenta la posibilidad de que las plantas de tratamiento pertenezcan a distintas empresas.

Así, los elementos físicos del sistema de reúso quedan definidos por el conjunto de plantas de tratamiento, plantas de bombeo, tanques de regulación y líneas de distribución. Del análisis del flujo en la red resultarán dos opciones, por lo menos: un sistema con regulación y otro sin ella. En el primero se reduciría la capacidad necesaria de tratamiento, así como los caudales captados, aunque se requeriría de terrenos disponibles para las estructuras de regulación. En el segundo caso, la capacidad de tratamiento sería mayor y la operación menos flexible. Cada opción se desarrollará a nivel anteproyecto (definiendo únicamente los elementos físicos más importantes) con objeto de poder integrar los costos respectivos.

4.4.5 Anteproyecto de los Sistemas e Integración de Costos.

El anteproyecto de los sistemas alternativos de reúso debe incluir:

- a) **Instalaciones para captación.** Capacidad y potencia de las bombas; dimensiones y geometría de la obra de toma; longitud, diámetro y material de las tuberías; profundidades aproximadas de excavación.
- b) **Plantas de tratamiento.** Ingeniería básica de las plantas, de donde se obtengan las necesidades de terreno, las dimensiones de los tanques o unidades principales, el diseño preliminar de los edificios, la potencia estimada para las unidades motrices y la longitud de tuberías. También debe poder estimarse los principales consumos de reactivos y otros materiales como medios filtrantes, polímeros, etc.
- c) **Sistema de distribución.** Capacidad y potencia de las bombas; longitud, diámetro y material de las tuberías; dimensiones de las estructuras de regulación; cantidad mínima de válvulas y dispositivos especiales.

El objetivo de la elaboración de los anteproyectos es contar con elementos para integrar costos con mayor precisión, aunque algunos de los componentes del costo todavía deberán ser determinados con base en índices.

Los costos de inversión fija incluyen:

- costo del terreno,
- costos "tangibles", que se deprecian, como vehículos, maquinaria y equipo, edificios y mobiliario, y
- costos "intangibles", que se amortizan, como gastos de organización, ingeniería, estudios, fletes, supervisión, intereses e imprevistos.

Las estimaciones de la inversión tienen una confiabilidad variable. La referencia [21] propone:

- para estimaciones en función de la capacidad, $\pm 25\%$,
- por medio de factores desglosados, en función del costo de los equipos de proceso, $\pm 20\%$,
- por cotizaciones y presupuestos preliminares, $\pm 15\%$,
- según anteproyecto (ingeniería básica), $\pm 10\%$, y
- según especificaciones y planos de detalle, $\pm 5\%$.

Los costos deben desglosarse como se propuso en los incisos 2.6.1 a 2.6.3 de esta Tesis, aclarando cuáles se obtienen con base en índices y su posible variación del valor supuesto. Debe tenerse especial cuidado si se utilizan costos proporcionados por proveedores de equipo, ya que muchas veces modifican los términos de la ingeniería básica, dependen de condiciones especiales de pago o incluyen costos indirectos o imprevistos que no necesariamente serán contemplados en las especificaciones del proyecto ejecutivo.

4.4.6 Evaluación Financiera.

El objetivo de la evaluación financiera preliminar es estimar si el sistema puede ofrecer al usuario un precio menor al del agua de primer uso y ser autofinanciable o, incluso, si genera un rendimiento atractivo para la opción de financiamiento vía privatización. El índice de rentabilidad (IR) permite evaluar lo anterior; se efectúa actualizando los ingresos y los costos anuales o periódicos, como se indica en la siguiente fórmula.

$$IR = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(1+a)^{-i}}{\sum_{i=1}^n I_i(1+a)^{-i}} \geq 1$$

en donde:

- IR: índice de rentabilidad,
- μ_i : utilidades en el año i -ésimo,
- a : tasa de actualización, e
- I_i : inversiones o costos al año i -ésimo.

El índice de rentabilidad debe ser mayor a uno para que la evaluación sea positiva. El mínimo valor de los ingresos actualizados puede ser determinado mediante el cálculo de la tasa interna de retorno (TIR), que corresponde precisamente a la situación en que los ingresos y los costos se igualan ($IR=1$).

El cálculo anterior solamente permite saber si el proyecto resulta autofinanciable, o bien genera un margen de utilidad conveniente, esto en el caso de sistemas concesionados. En realidad, es necesario que las utilidades paguen también los intereses y la amortización de la inversión. Esto puede calcularse incluyendo en el flujo de capitales las partidas correspondientes a la utilidad, el pago de los intereses anuales y la amortización, conceptos que se deben saldar del excedente de operación en el plazo fijado por la institución que otorgue el financiamiento.

El punto de partida para un análisis financiero detallado es la integración de los costos en un formato que incluya todos los grupos de conceptos, distinguiendo los de inversión, los anuales y, dentro de éstos, los que son afectados por la inflación. Este registro debe abarcar, por lo menos, cinco años y de preferencia el periodo completo del proyecto.

Para cada caso puede haber distintas opciones de financiamiento. Se requiere definir cuáles van a utilizarse. Pueden ser créditos bancarios, bonos, acciones o préstamos de otras instituciones públicas o privadas, en un periodo y con tasas anuales predefinidos.

También deben identificarse condiciones que afecten el flujo financiero, como exenciones o incentivos fiscales, cargos al organismo operador (por la concesión o por incumplimiento en las condiciones del servicio), pagos de seguros (aproximados), etc.

Una vez que se cuente con los datos anteriores, puede elaborarse una tabla de flujo financiero. Si se consideran la inflación, factores de depreciación más severos, requisitos más estrictos de tratamiento por cambios probables en las normas y otras condiciones "pesimistas", aun con base en estimaciones, puede generarse también una segunda tabla que nos permita evaluar las consecuencias financieras de dicho estado.

A partir de este momento puede haber dos enfoques para evaluar financieramente la factibilidad del proyecto. Lo primero podría ser fijar una tasa de rendimiento mínimo aceptable, definida según el interés de los inversionistas potenciales. Con ella puede calcularse el ingreso anual necesario, considerando todos los costos, los intereses de la deuda y su amortización^[22].

El ingreso anual calculado se distribuye entre los consumidores potenciales. En este punto es posible calcular un costo unitario, ya sea por volumen o por caudal, y compararlo con el promedio de la tarifa vigente del agua potable para los consumidores potenciales, con objeto de evaluar si el precio del agua tratada es competitivo.

Cuando los usuarios son heterogéneos, se puede distribuir el costo de manera diferencial, ya que no todos los consumidores requerirán el mismo tipo de servicio. Por ejemplo, si se lleva a cabo la distribución por medio de pipas, los usuarios de este servicio no deberán pagar los costos relacionados con la construcción de las redes o la operación de las bombas pero, en cambio, cubrirán la parte correspondiente a la adquisición y depreciación de los vehículos y los costos operativos relacionados. Para hacer el cálculo de la distribución de los costos pueden tomarse como base factores como caudal, presión de entrega, horario de servicio, número de tomas y distancia al inicio de la red^[23,24].

Como en nuestro país las tarifas por el servicio de agua potable casi siempre están subsidiadas, puede esperarse que el costo del agua tratada sea similar o aún más alto que el de aquella. Si es así, el análisis nos debe ayudar a identificar hasta qué punto puede ser necesario un apoyo gubernamental en forma de incentivos fiscales, disposiciones reglamentarias y eliminación o disminución del subsidio.

La segunda forma de efectuar el análisis, una vez que se cuenta con las tablas de costos de inversión y anuales, consiste en definir una tarifa máxima aceptable para cada tipo de consumidor potencial, a partir de la cual se genera un flujo financiero y se obtiene alguno de los índices de rentabilidad acostumbrados. En este análisis podríamos evaluar qué elementos de nuestros costos pueden ser modificados para mejorar el resultado.

De cualquier manera, si el análisis de prefactibilidad se elabora cuidadosamente, no debemos esperar un resultado negativo en esta fase del estudio, al grado de hacer el proyecto descartable.

El uso en embalses recreativos y la recarga de acuíferos son financieramente inconvenientes. Estos casos pueden evaluarse como proyectos alternos a la opción estrictamente autofinanciable y justificarse en la evaluación económica. El organismo operador o el municipio deberán cubrir los costos correspondientes a la empresa.

4.4.7 Evaluación Económica.

La evaluación económica se aplica a los sistemas de reúso que comprenden usos públicos, y tiene por objeto determinar cuál de las alternativas consideradas corresponde a una mejor asignación de los recursos económicos.

De los beneficios del reúso del agua mencionados en el primer capítulo, aquéllos que tienen efectos directos en la economía de la región y el país son:

- ahorro en explotación de caudales de fuentes naturales, con la consiguiente dilación de inversiones,
- almacenamiento de agua infiltrada al subsuelo para su uso en condiciones futuras, previsiblemente menos favorables que las presentes,
- inducción de actividad industrial, al hacer disponible un recurso escaso, de lo cual se generan nuevos empleos e incrementos en la producción,
- inducción de otras actividades económicas, por ejemplo en el caso de los embalses recreativos que favorecen el comercio y la oferta de servicios,
- ahorro en el consumo de agua para servicios públicos,
- mejoramiento del ambiente mediante la expansión de áreas verdes y, como consecuencia presumible, mejor disposición de la sociedad hacia el pago de contribuciones y el ahorro del recurso hidráulico.

Se debe también tomar en cuenta el costo real de los recursos (*precios de cuenta o precios sombra*), no los que pudieran estar subsidiados o los de recursos subutilizados. Esto incluye principalmente el combustible, la mano de obra, los servicios y la energía eléctrica.

Cualesquiera que sean los criterios que se establezcan para cuantificar los beneficios y los costos económicos de las alternativas, el uso del valor presente neto o la tasa interna de retorno como índices de evaluación debe tomarse con reservas. Un resultado pobre no significará necesariamente que el proyecto deba ser rechazado; en cambio, nos ayudará a identificar los efectos positivos que sean incuantificables en términos económicos.

Para llevar a cabo el análisis económico existen algunos inconvenientes, como⁽²³⁾:

- incertidumbre en los datos relacionados con la medición de beneficios y costos,
- falta de índices confiables para la utilización de precios de cuenta, que obliga a introducir al análisis costos no estrictamente económicos,
- dificultad para medir beneficios relacionados con parámetros no financieros,
- dificultad para definir costos y beneficios "externos" al sistema en estudio, producto de la dispersión de los mismos entre muchos actores,

- ausencia de un control gubernamental amplio sobre la empresa distribuidora de agua renovada una vez que ésta inicia operaciones.

Elevar las tarifas actuales o hacer más estrictas las normas para hacer obligatorio el reúso del agua, puede desalentar la ubicación de nuevas industrias en la localidad, con los costos económicos correspondientes.

4.4.8 Evaluación por Objetivos Múltiples.

Los objetivos por los cuales un organismo operador o una autoridad municipal o estatal propician el reúso del agua definen al mismo tiempo criterios de evaluación para opciones alternativas.

Hay dos razones para evaluar de manera global el reúso en el sistema hidráulico una vez que se cuenta con el análisis de factibilidad financiera de los usos privados:

- la necesidad de justificar medidas de apoyo (incentivos fiscales, subsidios, etc.) para la operación rentable de las empresas abastecedoras de agua renovada, y
- la posibilidad de maximizar el uso de aguas tratadas, aun para el abastecimiento de consumidores que no reporten beneficio financiero o económico, pero que permitan un aprovechamiento racional del agua como recurso y generen beneficios extraeconómicos.

Para evaluar este tipo de proyectos se acostumbra definir criterios económicos, sociales o ambientales, asignarles orden de prioridad y calificar subjetivamente su nivel de eficiencia en cada criterio, para obtener promedios pesados que indiquen la preferencia. Este procedimiento, aun cuando establece una base de comparación entre opciones, hace perder de vista el hecho de que algunos valores de los criterios pueden cambiar en el desarrollo del proyecto y exigir una reordenación de las prioridades, además de que sesga desde un principio la evaluación.

En la referencia [4] se propone un método de evaluación mediante un enfoque de *efectividad vs. costo*, en el cual se forma una matriz de costo para cada opción con criterios de *efectividad* prestablecidos.

Los pasos para el análisis son:

a) **Definir objetivos específicos del caso.** Para el reúso del agua pueden ser:

- sustituir la mayor proporción posible de la demanda de agua potable,
- prevenir la contaminación potencial del agua subterránea,
- evitar el abatimiento de los mantos freáticos y sus consecuencias negativas,
- inducir el establecimiento de usuarios industriales de agua renovada,
- mejorar los índices de equipamiento urbano, en rubros potencialmente generadores de consumo de agua renovada (riego de áreas verdes, hidrantes, lavado de vialidades y vehículos de servicio público, etc.),
- aminorar la explotación de una fuente de abastecimiento considerada estratégica por motivos económicos, ecológicos, políticos, sociales u otros, o
- aprovechar al máximo los efluentes de agua tratada disponibles en las plantas para saneamiento en proyecto o existentes, en vez de descargarlos a los cuerpos naturales.

b) **Asociar metas a los objetivos;** en nuestro caso podemos fijar niveles, categorías o valores para:

- gasto de agua renovada que sustituye al agua potable,
- volumen de agua renovada recargado al acuífero, o porcentaje del almacenamiento total,
- oferta en gasto continuo o volumen mensual de agua renovada para la industria,
- gasto aplicado a equipamiento urbano,
- gasto de agua que deja de ser extraído de una fuente de abastecimiento determinada, o bien
- ingresos por venta de agua tratada efluente de plantas para saneamiento.

c) Definir medidas de efectividad para la comparación de opciones. Las más comunes son:

- beneficio económico diferencial, como se expuso en el punto anterior, por ahorro en explotación de fuentes, impacto en el ingreso regional, obtención de ingresos adicionales, inducción de actividades económicas, etc.,
- costo financiero diferencial (respecto a la situación actual), incluyendo costos constructivos, operativos, de mantenimiento y por tratamiento y almacenamiento adicionales, así como ahorros en explotación,
- factores de impacto ambiental y social, describiendo cualitativamente la calidad de vida de la comunidad, o fijando índices de calidad para el suelo (si se aplican aguas tratadas al mismo) o al agua en la zona en estudio,
- valor estratégico del almacenamiento para abastecimiento futuro, como en el caso de la recarga de acuíferos o la disminución en la explotación de una fuente, el cual puede ser estimado en función del futuro ahorro en costo contra la explotación de fuentes más lejanas,
- criterios sanitarios, describiendo cualitativamente el grado estimado del riesgo para la salud que implica cada opción de sistema de reúso⁴,
- penalizaciones económicas por incumplimiento de los límites de confiabilidad establecidos para uno o varios parámetros, ya sea por parte de la autoridad supervisora o por el cliente,
- porcentaje del caudal total de agua residual generada en la zona que aprovecha cada opción de sistema de reúso, y
- factores de interés humano, como aceptación pública, reacción de los medios informativos, secuelas legales, etc.

Si se fijan criterios de efectividad, cada opción tendrá asociado un costo diferente para lograrlos; si se fijan costos o presupuestos, las opciones alcanzarán diferentes niveles de efectividad. Una

⁴ Aun cuando se establezcan especificaciones similares para evitar riesgos sanitarios en todas las opciones, a cada categoría de reúso le es inherente un grado de riesgo diferente. Por otra parte, es de esperarse que las medidas aplicadas para cumplir requisitos sanitarios se reflejen más claramente en los costos de los diferentes sistemas.

vez que ello se defina, será posible evaluar las opciones de sistemas de reúso para cada medida de efectividad.

La opción de no implantar el sistema no se considera por separado, sino en cualquier caso para calcular beneficios incrementales. En un momento dado puede incluirse también una opción que considere dar un nivel mayor de tratamiento a parte de las aguas.

Con los sistemas definidos se genera la matriz de opciones contra criterios de efectividad. Las suposiciones hechas para cuantificar o proponer valores a las medidas de efectividad deben quedar claramente expresadas. Con base en la matriz obtenida se jerarquizan, *no se "pesan"*, las opciones.

Por último, se toma en cuenta el efecto de los factores de incertidumbre y se lleva a cabo un análisis de sensibilidad; dichos factores pueden ser los siguientes:

- precio del efluente,
- tasa de descuento,
- efecto del horizonte de planeación,
- beneficios por irrigación agrícola,
- efecto de adecuaciones mayores a los sistemas de distribución en los plazos mediano y largo,
- efecto de la elevación de la plusvalía de los predios beneficiados,
- efecto de variaciones en las políticas tarifarias y hacendarias,
- predicciones de población, generación de aguas residuales y usos del agua,
- efecto del mejoramiento de la tecnología,
- cambios en los estándares de calidad o en la normatividad,
- inexactitud en la definición de metas o criterios y en la estimación de costos, o
- cambio en la prioridad de los criterios de efectividad.

En algunos aspectos esta forma de evaluación requeriría de información estadística a un nivel que no siempre está disponible en nuestro país. Sin embargo, permite visualizar los efectos no técnicos o económicos de la decisión, que aquí pueden ser muy importantes. Por ejemplo, si el sistema pertenece a una sociedad de usuarios industriales, el mayor interés se centrará en la calidad y la confiabilidad del efluente, así como en los costos del tratamiento adicional en cada industria.

Un resultado jerarquizado por órdenes de preferencia, que además abarca la mayor cantidad de criterios, da un cuadro más completo a quien sea responsable de tomar la decisión.

5

proyecto e implantación de programas de reúso

En este capítulo se abordan los aspectos de implantación del reúso, comenzando por los elementos que deben estar comprendidos en las ingenierías básica y de detalle. Se dan lineamientos para el desarrollo de aspectos organizacionales, la procuración de los equipos, la construcción, la puesta en marcha y la operación de las instalaciones.

5.1 Ingeniería Básica

La ingeniería básica se divide en cuatro partes:

- Ingeniería de proceso (Sanitaria),
- Ingeniería Civil y Arquitectura,
- Ingeniería Eléctrica, e
- Ingeniería Mecánica.

El sistema de reúso del agua comprende tres subsistemas:

- captación y conducción de aguas residuales,
- tratamiento y
- regulación y distribución de aguas tratadas.

El punto de partida de la ingeniería básica es la selección de la tecnología. Los elementos técnicos básicos y los criterios para elegir un sistema de tratamiento fueron expuestos en el Capítulo 2. Independientemente de la fase de planeación en que sea desarrollada la ingeniería básica, en los siguientes puntos se indican las características que deben tener y el alcance que deben cubrir los proyectos de ingeniería básica relacionados con el sistema de reúso. Para lo anterior, se tomó como base la referencia [21], haciendo las adecuaciones necesarias para su aplicación a proyectos de tratamiento y reúso del agua. La Figura 5.1 presenta el diagrama de actividades que comprende la Ingeniería Básica del sistema de reúso.

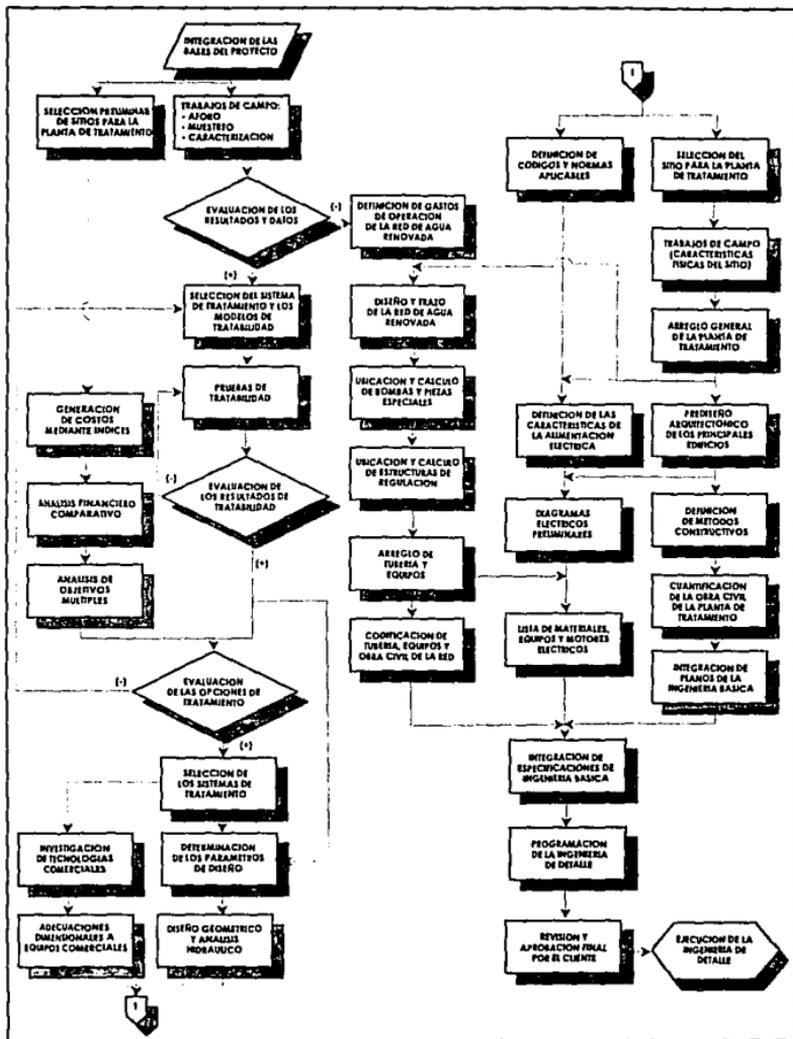


Figura 5.1 Diagrama de flujo de la ingeniería básica

5.1.1 Selección de la Tecnología.

Los principales criterios para la selección de la tecnología se aplican tanto a la evaluación de los procesos como a la elección de materiales de otros componentes menores de los sistemas de captación y conducción. Son los siguientes:

- costos de inversión y operación,
- calidad de fabricación y desempeño comprobables (lo más altos posible),
- estabilidad en el mercado, tanto del producto o equipo como de sus refacciones y suministros,
- riesgos que implica su operación,
- requisitos para adaptarlo a las condiciones físicas del proyecto,
- disponibilidad de información técnica para elaborar los proyectos o disposición del fabricante para proporcionarla,
- pago de regalías,
- capacitación requerida para la aplicación de cada tecnología, y
- costos por "unidad de eficiencia" (por ejemplo, remoción de contaminantes a un mismo nivel, consumo de energía, necesidades de movimiento de tierras u obra civil, u otras).

El mayor cuidado debe tenerse cuando se considera la opción de introducir una tecnología extranjera, sin experiencia previa en el país, o una propuesta nueva que, aunque suponga ventajas notables, no pueda ser evaluada con base en la práctica.

La evaluación puede dividirse en dos etapas:

a) **Evaluación preliminar.**

Los principales parámetros serán la inversión total y el costo de producción, desglosados por componentes. Para calcular dichos costos se toman en cuenta los factores listados en el Capítulo 2. Además deben considerarse:

- nivel de comercialización de la tecnología,
- reputación de los fabricantes y distribuidores,
- obsolescencia previsible,
- disponibilidad de guías o programas de desarrollo de las ingenierías básica y de detalle, así como de la construcción y el equipamiento, elaboradas por el fabricante,
- requisitos de adaptación de la tecnología al caso del proyecto,
- localización de las fábricas,

- efectos de escala en el precio y en la dificultad de operación (tamaños mínimo y máximo recomendables para una planta con la tecnología en estudio),
- plazos de entrega y condiciones de pago, en general.

b) Evaluación detallada.

Una vez que se ha seleccionado un subconjunto de las tecnologías aplicables, es posible que deba establecerse un convenio de confidencialidad para obtener mayores detalles. Algunas actividades que ayudan a conocer más directamente las tecnologías son:

- solicitar (y pagar) una estimación o presupuesto definitivo,
- visitar las plantas de los vendedores de la tecnología,
- entrevistarse con operadores de plantas que apliquen los equipos de interés, con base en un cuestionario preparado de antemano,
- obtener datos y, si es necesario, analizar y evaluar la calidad obtenida con la tecnología en plantas que se encuentren operando,
- plantear la posibilidad de establecer fondos de garantía y evaluar la disposición del fabricante a ello, y
- evaluar las posibilidades de obsolescencia debida a precio, materiales, relación con tecnología atrasada, etc.

Aunque el fabricante ofrezca la realización del proyecto completo, si es posible, siempre será recomendable que sea una compañía independiente de aquél la que desarrolle la ingeniería básica y de detalle.

5.1.2 Ingeniería de Proceso.

Esta es la fase fundamental de la ingeniería básica, que afecta al resto del proyecto. La ingeniería de proceso comprende:

a) Descripción de la tecnología seleccionada.

- especificaciones del influente y el efluente,
- especificaciones de materiales, suministros y servicios,
- costos de inversión y operación,
- gastos por fletes, importación, seguros, comisión de agentes aduanales, almacenamiento,
- riesgos de operación,
- factores de obsolescencia,

- flexibilidad de operación,
- grado de automatización y características de la instrumentación,
- condiciones de compra,
- dimensiones y requisitos de manejo e instalación,
- porcentaje de integración nacional en los equipos,
- garantías y servicios ofrecidos por el distribuidor,
- implicaciones técnicas y financieras de la ampliación de la capacidad.

b) Formulación y solución del "cuestionario de diseño".

Para guiar el desarrollo del proyecto se debe contar con un marco de referencia en el que se reflejen los intereses de las partes participantes. Ello permite definir desde un principio "reglas de juego" generales, que eviten posteriores dilaciones en discusiones relacionadas con los criterios de diseño, la forma de presentar la información y el alcance mismo de los principales conceptos.

Para ello se puede partir de la elaboración de un "cuestionario de diseño", en el que se definirían los principales parámetros de diseño, la normatividad aplicable y la manera en que se desarrollarán los puntos claves del diseño, o bien, el procedimiento que se seguirá para la revisión, modificación y aprobación de dichos puntos.

Este cuestionario no pretende llegar al detalle de los criterios de diseño, sino conformar un marco de orientación para el desarrollo del proyecto; se basa, por lo tanto, en la información previa, los datos de fabricantes de los equipos y dispositivos, las preferencias de las partes participantes y el marco normativo; debe conservarse cierta flexibilidad, ya que algunos criterios requerirán ser afinados o modificados en el curso del proyecto.

La siguiente lista incluye los conceptos que se sugiere revisar, con objeto de definir los lineamientos para su ejecución, como son formatos de presentación de cálculos y planos, criterios y normas de diseño, el alcance de cada concepto relacionado con el diseño y, si se tiene predefinida, la orientación de algunas decisiones o selecciones importantes (por ejemplo, grado de integración nacional en la fabricación de los equipos a utilizar, materiales específicos para equipos o tubería, preferencias arquitectónicas, etc.).

- valores mínimos, promedio y máximos de parámetros de diseño y esperados de operación,
- criterios prestables para la selección del terreno, el diseño de la planta y la red, y la selección de equipos,
- listados de características de materiales a emplear (reactivos, combustibles y otras sustancias), incluyendo grados de pureza, características físico-químicas, restricciones

debidas a los equipos, características del suministro, condiciones de entrega y requisitos de almacenamiento (en volumen y condiciones físicas),

- especificaciones del efluente, fluctuaciones y confiabilidad esperadas,
- características de alimentación y distribución eléctrica, así como fuentes de abastecimiento factibles para satisfacer la demanda prevista de energía eléctrica,
- restricciones en el uso de servicios adicionales al proceso, como agua, vapor y aire a presión, indicando consumo total, características físico-químicas, partes del proceso en que se utilizan y variación en las características del servicio en las mismas,

c) Conceptos de la ingeniería de proceso.

La ingeniería de proceso en el nivel básico genera la siguiente información:

- descripción detallada del proceso,
- diagramas de bloques,
- balances de materiales y energía,
- diagramas preliminares de distribución de los equipos de proceso y auxiliar,
- diagramas preliminares de flujo,
- especificaciones detalladas del equipo auxiliar y de proceso, con base en la solución de hojas de datos preparadas *ex-profeso*,
- especificaciones de tuberías,
- listado preliminar de materiales y equipo,
- relación de planos por realizar en la ingeniería de proceso, a nivel ejecutivo,
- programación de la ejecución de la ingeniería de proceso, en el proyecto ejecutivo,
- estimación del costo de la ingeniería de proceso a nivel de detalle,
- códigos y normatividad a la que deberá ajustarse la elaboración del proyecto ,
- memorias de cálculo,
- conclusiones y recomendaciones.

La secuencia de elaboración de la ingeniería básica es:

- definición y evaluación de los datos de proyecto,
- cálculo de las variables del proceso y dimensionamiento preliminar de las unidades,
- adecuación de las dimensiones calculadas a los equipos disponibles y revisión de las variables de proceso,
- cálculo de las variables de operación de equipos auxiliares o de servicios (aire, reactivos, coagulantes, etc.),
- dimensionamiento de las unidades y selección de los equipos auxiliares,
- arreglo preliminar de las unidades y equipos,
- elaboración de especificaciones preliminares,

- definición preliminar de las características del suministro de energía eléctrica,
- identificación de los puntos en que se requiera de la revisión de detalles de ingeniería,
- definición de los alcances y programación de la ejecución de la ingeniería de detalle, ligando la ingeniería de proceso con la Civil, la Mecánica y la Eléctrica,
- estimación del costo y especificaciones para el proyecto de detalle.

5.1.3 Ingeniería Civil y Arquitectura.

Los principales puntos que debe incluir la ingeniería básica en los aspectos de Ingeniería Civil y Arquitectura son:

- arreglo general preliminar,
- perspectiva de conjunto,
- dimensiones mínimas de las áreas que integran la planta,
- especificaciones constructivas preliminares,
- relación de planos que deberán ser realizados en la etapa ejecutiva o de detalle (civiles y arquitectónicos),
- estimación del costo de desarrollo de la ingeniería de detalle civil y arquitectónica,
- programa preliminar de ejecución de la obra civil, listando todas las actividades y proponiendo recursos,
- códigos y normas a los que se deberán apegar el diseño de detalle y la construcción,
- memorias de cálculo,
- conclusiones y recomendaciones.

5.1.4 Ingeniería Eléctrica.

El alcance de la ingeniería eléctrica debe comprender:

- diagramas unifilares preliminares,
- especificaciones preliminares de equipos y materiales,
- lista preliminar de materiales y equipo,
- lista preliminar de motores,
- relación de planos para la realización de la Ingeniería de Detalle Eléctrica,
- estimación del costo de la obra eléctrica,
- programa preliminar de ejecución de la obra eléctrica,
- códigos y normas que deberán seguir el diseño detallado y la construcción e instalación eléctricas,

- memorias de cálculo,
- conclusiones y recomendaciones.

5.1.5 Ingeniería Mecánica.

Incluye:

- arreglos preliminares de equipo y tuberías,
- especificaciones preliminares,
- lista preliminar de materiales y equipo,
- relación de planos para la realización de la Ingeniería de Detalle Mecánica,
- programa preliminar de ejecución de la Ingeniería de Detalle Mecánica,
- estimación del costo de la Ingeniería de Detalle Mecánica,
- estimación del costo de la obra mecánica,
- programa preliminar de ejecución de la obra mecánica,
- códigos y normas a los que deberán apegarse el diseño y la ejecución de la obra mecánica,
- memorias de cálculo,
- conclusiones y recomendaciones.

5.1.6 Instrumentación.

La instrumentación de la planta y los sistemas de captación y distribución debe incluir lo siguiente:

- diagramas preliminares de instrumentación,
- especificaciones preliminares,
- lista preliminar de materiales e instrumentos,
- relación de planos que serán desarrollados en la ingeniería de detalle para la instrumentación,
- programación preliminar de las actividades de la ingeniería de detalle para la instrumentación,
- estimación del costo de la ingeniería de detalle para la instrumentación,
- estimación del costo de la ejecución de la instrumentación,
- programa preliminar de ejecución de la obra de instrumentación,
- códigos y normas aplicables al diseño y ejecución de la instrumentación,

- memorias de cálculo,
- conclusiones y recomendaciones.

5.1.7 Tiempo y Costo de la Ingeniería Básica.

El tiempo de ejecución de la Ingeniería Básica está en función de la complejidad del proyecto, de la experiencia de la empresa que la desarrolle y de la forma de contratación, que debe definir las políticas para la revisión y toma de decisiones sobre los detalles de proyecto, así como las formas de negociación. La tecnología seleccionada puede conllevar distintos grados de apoyo por parte de la empresa fabricante o distribuidora que, en algunos casos, simplificará el desarrollo de los aspectos electromecánicos y de instrumentación.

El costo de la Ingeniería Básica puede ser cercano al 2% del total de una planta industrial^[21]; en el caso del tratamiento de aguas residuales, sin embargo, por características del medio profesional de nuestro país que se comentan en el último capítulo de esta Tesis, es generalmente mucho más bajo, dependiendo de la tecnología.

En tratamiento de aguas residuales no es usual la aplicación de concesiones o licencias de la tecnología al usuario de la misma, sino en todo caso al distribuidor. En el contrato debe especificarse también la confidencialidad en el manejo de información técnica, identificar las patentes y establecer garantías de funcionamiento.

5.2 Ingeniería de Detalle

La Ingeniería de Detalle tiene por objeto desarrollar el diseño de las partes del proyecto al nivel en que sea perfectamente factible su ejecución (construcción, puesta en marcha y operación).

Como punto de partida se definen los elementos básicos para uniformar los criterios del proyecto, que son:

- normatividad y políticas de proyecto, incluyendo convenciones para presentación de planos, elaboración de memorias de cálculo, simbología y detalles,
- lista clasificada preliminar de equipo,
- lista clasificada preliminar de motores,
- hojas de datos de la Ingeniería Básica,
- especificaciones preliminares,

- manuales de procedimientos para el diseño, la elaboración de documentos para requisición de equipos, la solicitud de cotizaciones y la elaboración de tablas comparativas.

Evidentemente, dichos elementos surgen de la Ingeniería Básica y se van revisando, complementando o corrigiendo en el curso del diseño detallado.

En los puntos siguientes se describe el alcance propuesto para las partes de la Ingeniería de Detalle, con base en la referencia [21]. En la Figura 5.2 se propone la secuencia para las actividades del proyecto ejecutivo.

5.2.1 Programación y Control.

Las actividades de programación son las siguientes:

- revisar o elaborar los programas de trabajo para la Ingeniería de Detalle de Proceso, Civil, Arquitectura, Mecánica, Eléctrica y de Instrumentación, así como para la procuración de los equipos,
- programación de los reportes de avance y control,
- programación de las reuniones ordinarias para revisión,
- programación de las reuniones de evaluación del cliente con el despacho de diseño.

El área de programación deberá fungir como la unidad de administración del proyecto. Para el desarrollo de proyectos de ingeniería no resulta tan importante cumplir con tiempos previstos, sino contar con elementos que, en cualquier momento del proceso de diseño, permitan evaluar el avance y la utilización de los recursos, y reprogramar con base en ello. Debemos considerar que para hacer una estimación confiable de tiempos y recursos que requiere un proyecto se requiere de una buena base estadística; de cualquier manera, existen muchos factores que pueden modificar las previsiones.

5.2.2 Ingeniería de Proceso.

La Ingeniería de Proceso en la fase de detalle abarca:

- diagramas detallados de tuberías e instrumentación (en conjunto con el grupo de ingeniería mecánica),
- planos,

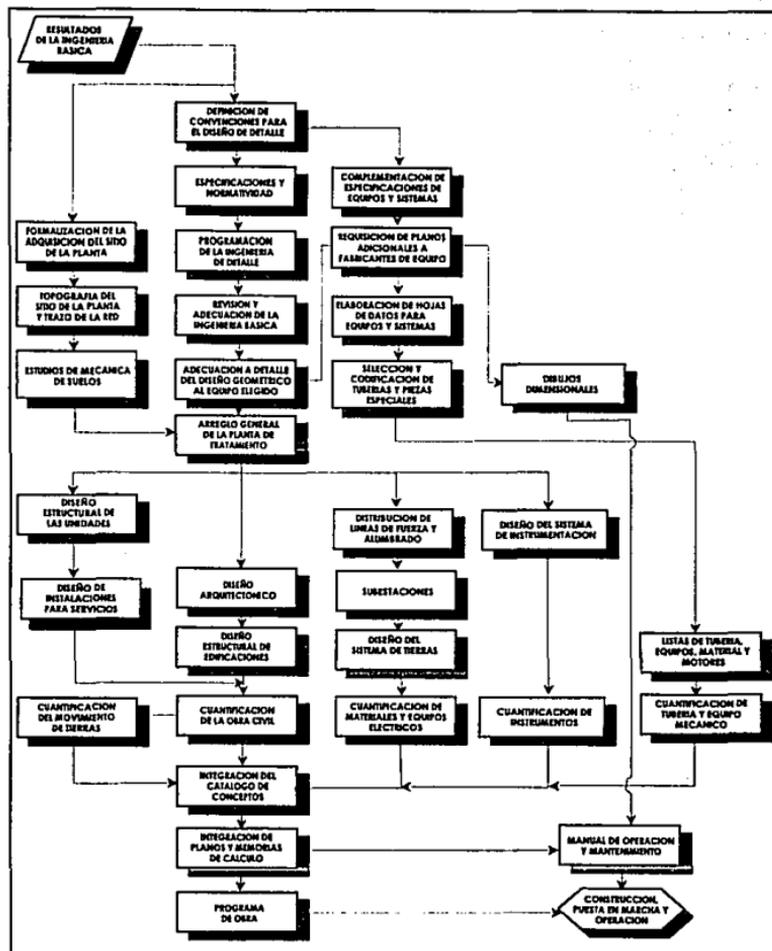


Figura 5.2 Diagrama de flujo de la ejecución de un proyecto de tratamiento de aguas residuales

- revisión y complementación de especificaciones de equipo,
- revisión y complementación de listas de equipo,
- revisión y complementación de listas de motores,
- revisión y complementación de memorias de cálculo,
- revisión de hojas de datos de equipo,
- elaboración del índice de materiales,
- dimensionamiento de tuberías,
- complementación de requisiciones,
- revisión de información proporcionada por proveedores,
- elaboración de tablas de pesos de equipo,
- elaboración de tablas comparativas,
- asesoría técnica a otras especialidades:
 - diagramas de tuberías e instrumentación con el ingeniero mecánico y el instrumentista,
 - detallado de arreglos del equipo con el ingeniero mecánico y el civil,
 - suministrar al ingeniero civil las tablas con pesos del equipo y otras características que puedan requerir cimentación especial,
 - definir las necesidades de manejo de flujos y drenajes.

El desarrollo de la Ingeniería de Proceso es fundamental, ya que define las variables de diseño para todas las demás áreas. De ahí que, mientras no se tenga esta ingeniería completamente revisada y aprobada, es preferible no desarrollar a detalle el resto de las partes del proyecto, ya que las correcciones por cambios en el proceso pueden ser muy costosas en tiempo y otros recursos.

En esta fase deben quedar bien definidos los servicios que requiere cada parte del proceso, el comportamiento de sus variables y los intervalos de operación, para lo cual cada uno de los equipos debe ser sujeto a un análisis detallado.

En el peor de los casos, únicamente los equipos menores pueden sufrir cambios en el desarrollo del diseño ejecutivo en las demás áreas. Cualquier cambio se comunicará a las áreas eléctrica y mecánica.

5.2.3 Ingeniería Civil y Arquitectura.

Debe incluir:

- desarrollo y evaluación de estudios de campo:
 - topografía,
 - mecánica de suelos,
 - geohidrología,
 - otros estudios especiales,
- planos:
 - de cimentación,
 - estructurales,
 - arquitectónicos,
 - hidráulicos y sanitarios,
 - de sistemas de seguridad y contra incendios,
 - de drenaje pluvial,
 - detalles de anclaje e instalación de equipos (en conjunto con el grupo de ingeniería mecánica y con base en lo indicado en planos mecánicos),
 - isométricos y detalles de instalación de tuberías, en colaboración con el ingeniero mecánico,
 - otros detalles de diseño y de procedimientos constructivos,
 - de movimiento de tierras,
 - de sistemas de aire acondicionado, calefacción u otros,
- especificaciones constructivas:
 - civiles,
 - arquitectónicas,
 - de tuberías,
- listas de volúmenes de obra,
- revisión y complementación de memorias de cálculo de la Ingeniería Básica,
- complementación de requisiciones,
- revisión de información de proveedores,
- elaboración de tablas comparativas,
- elaboración de dictámenes para fincar pedidos (en coordinación con el grupo de procuración) y
- asistencia técnica a otras especialidades que participan en el proyecto.

5.2.4 Ingeniería Eléctrica.

Incluye:

- planos:
 - distribución de líneas de fuerza,
 - planos de alumbrado,
 - diagramas esquemáticos de alumbrado para motores,
 - sistema de tierras y protección,
 - planos dimensionales y de arreglo de subestaciones,
- complementación de especificaciones de equipo eléctrico mayor y menor, incluyendo motores (con base en las hojas de equipo),
- revisión de listas de motores,
- elaboración de listas de equipos y materiales,
- revisión y complementación de memorias de cálculo,
- complementación de requisiciones,
- revisión de información de proveedores (planos de los fabricantes del equipo eléctrico),
- elaboración de tablas comparativas,
- elaboración de dictámenes para fincar pedidos (en coordinación con el grupo de procuración) y
- asistencia técnica a otras especialidades.

5.2.5 Ingeniería Mecánica.

Abarca los siguientes aspectos:

- planos:
 - dibujos mecánicos dimensionales,
 - arreglos de equipos,
 - diagramas de tuberías e instrumentación,
 - detalles de montaje e instalación de equipo,
 - detalles de mantenimiento,
- revisión y complementación de especificaciones,
- en colaboración con el ingeniero civil, arreglo y especificaciones de tuberías,
- elaboración de listas de material,
- codificación de líneas,
- revisión de información de proveedores,

- complementación de requisiciones,
- elaboración de dictámenes para fincar pedidos (en coordinación con el grupo de procuración) y
- asistencia técnica a otras especialidades.

5.2.6 Instrumentación.

El proyecto ejecutivo de instrumentación incluye:

- planos:
 - en diagramas de tuberías,
 - en instalaciones abiertas (tuberías con flujo a superficie libre, canales, tanques de proceso, etc.),
 - de detalles de instalación,
- revisión y complementación de las especificaciones para instrumentos,
- elaboración y complementación de las listas de instrumentos,
- revisión y complementación de las memorias de cálculo,
- revisión y complementación de las hojas de datos de instrumentos,
- complementación de requisiciones,
- revisión de información de proveedores,
- elaboración de tablas comparativas,
- selección de instrumentos,
- elaboración de dictámenes para fincar pedidos (en coordinación con el grupo de procuración) y
- asistencia técnica a otras especialidades.

5.2.7 Tiempo y Costo de la Ingeniería de Detalle.

La duración y el costo de la Ingeniería de Detalle depende en general de los mismos factores mencionados en el caso de la Ingeniería Básica; el control que se tenga sobre aquéllos puede depender mucho de la forma de contratación, por lo que es muy importante considerar todas las políticas de negociación posibles en el contrato. Los tipos de contrato más recomendables son por administración o por un máximo garantizado, fijando porcentajes a compartir entre el proyectista y el cliente en el caso de que los costos reales sean inferiores o superiores.

La estimación de costo puede hacerse como un porcentaje del costo total de la planta, del costo del equipo mayor o asignando un número de horas-hombre a cada equipo, según índices y tablas; debido a que estos métodos han sido desarrollados para proyectos industriales, no resultan confiables en el caso de plantas de tratamiento. Puede ser más claro un desglose de los costos por horas-hombre para cada especialidad, sobre todo si se tiene una idea general del número de planos que serán elaborados, como indica el cuadro 5.1 ^[21]. En la elaboración de planos desarrollan actividades los distintos especialistas, como la Gerencia del proyecto, los ingenieros y los dibujantes; el tiempo de elaboración incluye también los plazos para acuerdos, revisión, correcciones y aprobación.

CUADRO 5.1 ESTIMACION DEL CONSUMO DE HORAS-HOMBRE PROMEDIO POR PLANO Y POR ESPECIALIDAD PARA PLANTAS DE PROCESOS

PLANOS	HORAS - HOMBRE
Mecánicos	468 ¹
Civiles y Arquitectónicos	214
Ingeniería Eléctrica	298
Instrumentación	304
Isométricos	10 ²

Fuente: Ref. [21]

NOTAS:

1. En proyectos de tratamiento de aguas residuales este valor puede ser considerablemente menor, debido a la uniformización de sistemas y la utilización de planos-tipo proporcionados por el fabricante.
2. Puede ser mayor cuando incluya equipo complejo.

5.3 Desarrollo de Aspectos Organizativos y Administrativos

La organización administrativa de la empresa distribuidora de agua renovada tiene similitudes con la de un organismo prestador de los servicios de agua potable ^[22]. Vista de manera sistémica, comprende los subsistemas propios del último, con las variaciones específicas que le corresponden:

- a) **Subsistema operacional:** desarrollo y supervisión de proyectos y obras, operación de los sistemas de tratamiento y distribución, mantenimiento e instalación de equipo.

- b) **Subsistema comercial:** catastro de consumidores, comercialización, medición de consumos, facturación y cobranza.
- c) **Subsistema financiero:** administración de recursos financieros y contabilidad.
- d) **Subsistema de administración y desarrollo de recursos humanos:** define las técnicas y desarrolla las actividades para el control del personal y las relaciones humanas.
- e) **Subsistemas administrativos de apoyo:** administración de suministros, del patrimonio y de los transportes, comunicación social.
- f) **Subsistema de planificación:** física, económico-financiera y organizacional, de programación y de control.

La forma en que se organice la estructura administrativa de la empresa dependerá principalmente del volumen de agua renovada que distribuya. Las funciones correspondientes a cada subsistema pueden ser aglutinadas en una sola área administrativa.

En una empresa grande la parte administrativa podría ser significativa; en la mayoría, sin embargo, la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales constituye el punto central de la organización y el área con mayor cantidad de personal. El director de operación de la planta puede coordinar también las operaciones de distribución mediante red o vehículos, el mantenimiento y el control de calidad; el área administrativa se restringe a las labores de contabilidad, cobranza y facturación, y el control de recursos humanos. Las decisiones financieras de mayor importancia, así como la dirección general, la programación y la planificación de las actividades, pueden recaer en un consejo de administración.

El Cuadro 5.2 presenta la plantilla de personal indicados en la referencia [23] como guía general para plantas de tratamiento de diferentes capacidades para una planta con procesos específicos, indicados en el mismo cuadro.

Ya que se trata de un índice preparado para plantas de tratamiento para saneamiento, es importante resaltar que no considera personal para operación de un sistema de reúso.

Para la formación de la empresa, una vez que se definen la estructura orgánica y el personal, se deben establecer las relaciones entre los distintos puestos y las entidades funcionales; junto con el manual de organización, es necesario definir los niveles de sueldos de acuerdo con una descripción de los puestos. Lo anterior queda enmarcado en la forma jurídica que corresponda a la empresa.

5.4 Procuración de los Equipos

La **procuración** de los equipos abarca las actividades de compra, inspección y expedición de los equipos y los materiales, y se lleva a cabo, generalmente, de forma paralela a las primeras fases de la construcción.

CUADRO 5.2 PLANTILLA DE PERSONAL PARA PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

CARGO	CAPACIDAD PROMEDIO (l/s)				
	50	200	900	2200	4500
Director o superintendente		0.5	1	1	1
Asistente del director				1	1
Secretaría			1	2	4
Supervisor de operación				1	1
Jefe de grupo de operación				2	5
Operador especializado	2	3	5	10	16
Operador	3	5	9	12	20
Operador de equipo automático	1	1	3	4	6
Supervisor de mantenimiento					1
Jefe de grupo de mantenimiento mecánico				1	3
Mecánico especializado			1	2	3
Mecánico			1	2	2
Electricista especializado			1	1	2
Electricista				1	2
Ayudante de mantenimiento		1	2	4	6
Obrero		1	3	5	8
Pintor					1
Almacenista					1
Vigilante				1	1
Químico					1
Técnico laboratorista	1	1	2	3	3
TOTAL	7	12.5	29	53	88

Fuente: Ref. [23]

NOTA: Para un tren de tratamiento que incluye bombeo de aguas crudas, tratamiento preliminar, sedimentación primaria, aeración, sedimentación final, bombeo de recirculación y cloración; se considera también bombeo del lodo, digestión aerobia, tanques de regulación y filtración por vacío, así como laboratorio, almacenes y áreas generales y para administración.

La base para los trabajos de procuración son las especificaciones y las requisiciones elaboradas por la compañía projectista.

El grupo de proyecto solicita, por medio de la requisición, al grupo de procuración la obtención de cotizaciones de equipo, con la autorización de la gerencia del proyecto y el visto bueno del cliente; va acompañada de la especificación detallada del equipo de que se trata.

El grupo de procuración aplica los procedimientos establecidos para efectuar las licitaciones, concursos, evaluaciones, órdenes de compra (con las correspondientes cláusulas de multa, garantías e información), gestión de embarques, aseguramientos, pagos y elaboración de controles contables y administrativos.

Después de colocar la orden de compra, el grupo de procuración lleva a cabo la **expeditación** de los equipos, que consiste en vigilar que los proveedores cumplan con las condiciones de entrega, apoyándolos en caso de que surjan circunstancias no previstas que perjudiquen la entrega oportuna de los equipos, así como para que la ingeniería adicional que desarrollen aquéllos cumpla con la calidad requerida por el proyecto, considerando los cambios que pudieran surgir. Esta actividad incluye también la supervisión de la entrega pertinente de las órdenes de compra del proveedor a sus propios proveedores (llamadas órdenes secundarias), para prevenir cualquier retraso, facilitar modificaciones menores a especificaciones si ello acelera las entregas y permitir la programación de la construcción.

Conforme se reciben los equipos y materiales, el mismo grupo lleva a cabo una inspección técnica del cumplimiento de las especificaciones, la cual puede iniciar desde la manufactura misma de aquéllos. El transporte a la obra requiere también ser vigilado. Finalmente, los inspectores deberán certificar que los equipos lleguen a la obra completos y sin daños. Cuando se cuenta con la información y los manuales, termina la fase de procuración.

5.5 Construcción y equipamiento

En lo que concierne a la construcción y al equipamiento, las instalaciones para tratamiento de las aguas residuales son también la parte principal de los subsistemas que componen el sistema de reúso. Además de ser la parte de mayor costo, generalmente implica la instalación de equipos complejos. La calidad de la obra y su ejecución están en función directa de la calidad del proyecto y de la programación adecuada de las actividades.

Los procedimientos constructivos varían según el proceso y la capacidad de tratamiento, los materiales elegidos para las tuberías, las características del terreno, las restricciones de tiempo para terminar la obra, etc. En el Cuadro 5.3 se presentan los aspectos particulares a considerar en la construcción de las instalaciones de tratamiento y reúso.

CUADRO 5.3 OBSERVACIONES SOBRE LA CONSTRUCCION DE INSTALACIONES DE TRATAMIENTO Y REUSO (inicia).

FACTORES	OBSERVACIONES
TOPOGRAFIA DEL TERRENO	<ul style="list-style-type: none"> • Deben considerarse conjuntamente la operación hidráulica de la planta (aprovechando pendientes naturales para evitar el bombeo) y la solución de la cimentación.
CONDICIONES GEOTECNICAS	<ul style="list-style-type: none"> • Al ubicarse en la confluencia de drenajes naturales, las estructuras se desplantan sobre llanuras de inundación, con niveles freáticos superficiales en materiales deformables y con materia orgánica o sales. • Si el desplante se hace sobre antiguos cauces, se tendrá una estratigrafía muy heterogénea que genera incertidumbre respecto al comportamiento del suelo. • En rellenos recientes se recomienda conocer las características del suelo a una profundidad igual al ancho de la estructura, y desechar el sitio si hay espesores importantes de turba. Muchas veces requieren mejoramiento (preconsolidación, compactación dinámica o vibroflotación).
CIMENTACION	<ul style="list-style-type: none"> • Para los tanques de una planta de tratamiento la capacidad de carga rara vez representa problema, a diferencia de la deformabilidad. Cuando existe riesgo importante de interacción entre estructuras cimentadas a poca profundidad, se recomienda separarlas. • Cuando se opta por cimentaciones profundas debe evaluarse la posibilidad de tener asentamientos diferenciales respecto a estructuras menores. • Si se usa cimentación compensada existe riesgo de sobrecompensación, ya que los niveles definidos por el cálculo hidráulico prevalecen en el diseño; las estructuras más enterradas deben ser calculadas como totalmente compensadas, y se debe revisar los otros casos. • Hay que considerar la condición de carga en las diferentes fases de operación, a efecto de evitar excentricidades eventuales en estructuras sobre suelos deformables.

CUADRO 5.3 OBSERVACIONES SOBRE LA CONSTRUCCION DE INSTALACIONES DE TRATAMIENTO Y REUSO (continuación).

FACTORES	OBSERVACIONES
	<ul style="list-style-type: none"> • Para sistemas con lagunas, la combinación excavación-bordo puede generar expansiones y agrietamientos en suelos blandos, así como deformaciones en bordos mal compactados o en zonas que soportan estructuras rígidas. • Para impermeabilizar lagunas se utilizan membranas plásticas sobre materiales térreos compactados, con drenaje inferior y una cubierta protectora; en este caso son críticos el sellado de las juntas y la calidad de la membrana en sí. • Las fugas por discontinuidades en el concreto son más frecuentes como consecuencia de su fabricación o colado defectuosos que de asentamientos diferenciales. • Para las juntas estructurales es más recomendable una construcción cuidadosa, utilizando aditivos epóxicos en lugar de selladores de juntas, los cuales dificultan el proceso y favorecen las fugas. • Para sellar agrietamientos se utiliza mortero epóxico, no aditivos expansivos, ya que éstos pueden provocar nuevos agrietamientos.
FLOTACION	<ul style="list-style-type: none"> • Cuando los tanques se vacían, existe el riesgo de daños por flotación, provocada por subpresión natural o filtraciones; ello se puede prevenir mediante subdrenajes.
DURABILIDAD	<ul style="list-style-type: none"> • Las aguas residuales pueden atacar los materiales de las estructuras mecánicamente (erosión), químicamente y por la acción microbiológica. La protección se elige según la caracterización de las aguas en cuestión.
CORROSION	<ul style="list-style-type: none"> • El acero de las tuberías y de las varillas de refuerzo puede ser atacado por ácidos orgánicos o por sales; se debe dar recubrimientos mayores a los normales al acero de refuerzo, así como protección a las tuberías, considerando la mejor solución preventiva en lugar de actividades de mantenimiento. Lo anterior es más claro si se trata de estructuras que irán alojadas a cierta profundidad, cuya reparación en caso de fugas sería muy costosa. • Las líneas de conducción de gas cloro, gases producto de la digestión de los lodos, suministros de laboratorio y drenajes del mismo requieren instalación y protección especial.

CUADRO 5.3 OBSERVACIONES SOBRE LA CONSTRUCCION DE INSTALACIONES DE TRATAMIENTO Y REUSO (continuación).

FACTORES	OBSERVACIONES
PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS	<ul style="list-style-type: none"> • Debe procurarse que las excavaciones se distribuyan de manera uniforme, para no provocar expansiones diferentes bajo estructuras que deben quedar a un mismo nivel. • Para el estudio de la estabilidad de los taludes deben considerarse los efectos de las posibles filtraciones o fugas. • Los análisis de expansiones y asentamientos deben ser programados, y las medidas correctivas ajustadas a los tiempos que se establezcan. • La previsión de asentamientos en estructuras mayores permite programar su construcción en las primeras fases, o bien la aplicación de precargas para uniformarlos. • Para los rellenos perimetrales es conveniente utilizar materiales poco permeables, bien compactados. • En el diseño de las conducciones deben considerarse el material suprayacente, sus condiciones en la operación, la presión interna de la tubería, las deformaciones del terreno y los fenómenos transitorios (golpe de ariete).
INTERCONEXIONES	<ul style="list-style-type: none"> • Las deformaciones térmicas en el concreto afectan la posición de las conducciones y los vertedores, por lo que deben considerarse dispositivos para que puedan ser ajustados al final de la construcción. • Es conveniente disponer válvulas de seccionamiento en distintas partes del proceso, así como juntas flexibles en las tuberías largas cercanas a estructuras de concreto. Debe tenerse presente también la posibilidad de expansiones o contracciones en tuberías metálicas, sobre todo las que conduzcan líquidos a temperaturas extremas. • El recubrimiento interno y externo de las tuberías de concreto y acero se evalúa en función de las características del suelo y del agua residual y tratada. La tubería de polietileno de alta densidad es económica, flexible, resistente al ataque químico y se junta por termofusión, por lo que resulta muy ventajosa para estos usos. Deben consultarse las normas técnicas nacionales o, en su defecto, las de la <i>American Standard Association</i> y la <i>American Society for Testing and Materials</i>. • La posibilidad de corrosión y abrasión por la presencia de sólidos influye también en la selección de los materiales para empaques, vástagos y otras partes de las juntas, válvulas y equipo mecánico.

CUADRO 5.3 OBSERVACIONES SOBRE LA CONSTRUCCION DE INSTALACIONES DE TRATAMIENTO Y REUSO (conclusión).

FACTORES	OBSERVACIONES
<p>OPERACION Y CONSERVACION DE LA OBRA CIVIL</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Por operación se entiende aquí la programación de actividades preventivas y correctivas para: renivelar estructuras, operación del subdrenaje, supervisión y reposición de recubrimientos, reparación de fugas, reparación de membranas, control de cimentaciones compensadas, renivelación de vertedores, etc. • En las conducciones de lodos deben ubicarse dispositivos para drenar el contenido en puntos bajos o estratégicos, así como ventilación en aquéllos que puedan llegar a acumular gases; las juntas flexibles y los extremos con bridas ciegas o tapas en Tees (en lugar de codos normales) permiten la limpieza y facilitan el desmontaje de las líneas. • Es importante instalar las líneas que conducen gas con el ángulo adecuado para permitir el drenaje de los condensados, así como la disposición de juntas flexibles (por ejemplo, tuercas unión) para facilitar su mantenimiento.
<p>VALVULAS</p>	<ul style="list-style-type: none"> • En líneas con alto contenido de sólidos el proyectista debe evitar el uso de válvulas de retención (check). En general son preferibles las válvulas de compuerta y, para los sólidos, las de cono. Para las líneas de aire se pueden usar válvulas de mariposa. En el diseño de las compuertas en canales también debe considerarse el azolvamiento del fondo. Para el control de niveles puede resultar más práctico el uso de válvulas telescópicas en tubos abiertos verticales que el de vertedores de placa.
<p>INSTALACIONES ELECTRICAS E INSTRUMENTOS DE MEDICION</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Las especificaciones de las instalaciones eléctricas debe considerar las condiciones más desfavorables. Los requisitos constructivos para su colocación deben quedar definidos muy claramente. • La instalación de instrumentos de medición requiere de una supervisión cuidadosa de la obra civil (por ejemplo en el caso de medidores Parshall, vertedores o venturis).

Fuentes: Refs. [26,27]

5.6 Puesta en Marcha y Operación

A continuación se resumen los principales conceptos de la puesta en marcha y la operación de una planta de tratamiento, con base en la referencia [28].

5.6.1 Puesta en Marcha de la Planta de Tratamiento.

La puesta en marcha de una planta de tratamiento biológico comprende la estabilización del sistema biológico, mediante la inoculación de los microorganismos provenientes de lodos de una planta de tratamiento cercana a la zona del proyecto o con aguas residuales de características similares. La alimentación con aguas negras locales se efectúa de manera gradual, manteniendo la oxigenación de la mezcla y controlando los principales parámetros operativos, como la concentración de sólidos suspendidos, el potencial hidrógeno, la concentración de oxígeno disuelto, así como pruebas a los lodos. En otras instalaciones de la planta o en otros tipos de plantas, el arranque consiste en comprobar la operación correcta de los dispositivos, motores e instrumentos, efectuar pruebas piloto y mediciones.

Previamente es importante leer todas las instrucciones del fabricante del equipo, revisar el funcionamiento correcto de los motores (especialmente la rotación correcta de las flechas), retirar la basura y la suciedad de tanques, líneas, pozos, cárcamos, etc.

Con base en una revisión de toda la información disponible sobre cada una de las unidades de la planta, se preparan cuadros diarios de operación, que comprenden actividades como:

- revisar la operación correcta del equipo mecánico,
- desnatar la superficie de desgrasadores y clarificadores,
- operar con la periodicidad necesaria los equipos para remoción de materia cribada y arenas,
- lavar las superficies de las estructuras y los equipos, así como los cables, etc.

5.6.2 Parámetros por Monitorear.

El Cuadro 5.4 presenta criterios propuestos para la medición de parámetros en la operación de una planta de tratamiento secundario.

CUADRO 5.4 MONITOREO DE PARAMETROS DE CALIDAD EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO

PARAMETRO	CRITERIOS
Sedimentación	<ul style="list-style-type: none">• Dos medidas diarias de sólidos sedimentables de muestras del licor mezclado.• Una medida diaria de sólidos sedimentables de una muestra compuesta del influente y el efluente.
pH	<ul style="list-style-type: none">• Debe ser riguroso si hay nitrificación-denitrificación o remoción química del fósforo.
Sólidos suspendidos	<ul style="list-style-type: none">• Una medida diaria en muestras del agua cruda, efluente primario, efluente secundario, licor mezclado y retorno de lodos (para medición del índice volumétrico).
Oxígeno disuelto	<ul style="list-style-type: none">• Medición en el licor mezclado y el efluente, a intervalos regulares; es más crítico si hay nitrificación-denitrificación o remoción de fósforo; también para eficientar el uso de equipos de aeración.
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	<ul style="list-style-type: none">• Una vez diaria en muestras compuestas del agua cruda, del efluente primario y del efluente secundario; en flujos de retorno, una o dos veces a la semana.
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	<ul style="list-style-type: none">• Monitoreo rutinario correlacionado con la DBO.
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none">• Diariamente en aguas residuales crudas, efluente primario y secundario; semanalmente en flujos de retorno (si hay nitrificación-denitrificación).
Fósforo	<ul style="list-style-type: none">• Si hay remoción de fósforo, diariamente en el agua cruda, efluente primario y secundario; semanalmente en flujos de retorno.
Lodo residual (volumen)	<ul style="list-style-type: none">• Para calcular la producción y la edad del lodo, especialmente si hay nitrificación-denitrificación y remoción de fósforo.

Fuente: Ref. [28]

NOTA: No considera monitoreo en pretratamiento ni en desinfección.

5.6.3 Inspección y Operación de los Equipos de Tratamiento.

La inspección de la operación de los equipos de una planta de tratamiento tiene por objeto revisar los siguientes aspectos:

- limpieza de los equipos, manual o mediante la operación de elementos o dispositivos,
- operación normal de los mecanismos y de los motores,
- verificación de la interpretación de los análisis de laboratorio,
- operación de válvulas y otros mecanismos de control,
- eficientización de la operación de mecanismos y
- previsión de problemas operativos.

En una planta de tratamiento secundario se llevan a cabo las siguientes actividades ^[24]:

- Rejillas o cribas: inspección para verificar la limpieza, vaciado de contenedores posterior al drenado, almacenamiento temporal de desechos.
- Desarenador-desgrasador: inspección general, especialmente durante horas de mayor producción de arenas y en época de lluvias; análisis de grasas y aceites ocasional, para registro de eficiencia; análisis ocasional de la granulometría de las arenas.
- Reactores de aeración: patrón de las burbujas de aire, apertura de válvulas; análisis de sedimentabilidad del licor mezclado, concentración de sólidos suspendidos en el mismo, relación alimento-microorganismos y edad del lodo; operación del retorno y la purga de lodos.
- Clarificadores secundarios: inspección de los desnatadores, de la acumulación de lodos en el fondo; en época de lluvias, prevenir la pérdida de sólidos.
- Purga de lodos: debe hacerse gradualmente y de manera uniforme, preferiblemente diario.

También es común establecer guías de operación, como las siguientes:

- En el arranque del sistema, establecer características operativas que permitan alcanzar la calidad del efluente de la manera más confiable.
- Revisar que el lodo tenga color café oscuro a gris, con olor a tierra.

- Rastrear el origen de la espuma, si persiste después del arranque.
- Detectar el arrastre de flóculos finos en el efluente secundario.
- Detectar la flotación de los lodos en los sedimentadores.

Para la operación correcta debe contarse, para cada parte del proceso, con una lista de actividades de mantenimiento, calendarios de mantenimiento y servicio, consejos básicos de operación, calendario de lubricación y capacidades, refacciones recomendadas, literatura del vendedor de las partes, listas de partes y dibujos de equipo, tablas dimensionales, curvas de eficiencia, manuales de reparación, partes de repuesto, partes consumibles, instrumentos de medición y control, directorio de proveedores de equipo y materiales y directorio de técnicos especializados en la reparación del equipo.

Si se incluyen procesos de tratamiento terciario (por lo menos desinfección), deben considerarse también las actividades de inspección marcadas por los fabricantes de los equipos, por ejemplo:

- purgas y recargas,
- cambio de cartuchos y otros materiales consumibles,
- eficiencias de remoción específicas para los parámetros que se pretende remover,
- desgaste de partes móviles,
- instrumentación,
- acumulación de sales u otros depósitos,
- corrosión, fugas, cavitación y vibraciones anormales.

5.6.4 Operación de la Red de Distribución de Agua Renovada.

La operación de las redes de agua renovada es similar a la de las redes de agua potable, aunque con diferentes patrones de consumo y en ocasiones mayor maniobra de válvulas y equipos de bombeo.

Los usuarios de la red son fijos y establecen consumos característicos. Se requiere llevar registros de operación de válvulas y equipos de bombeo, mediciones por instrumentos y directas, así como registros de mantenimiento preventivo y correctivo. Las actividades de inspección de equipos de tratamiento valen también para el caso de instalaciones de bombeo.

El cumplimiento de las medidas de seguridad e higiene es un aspecto esencial de la inspección de las redes de agua tratada. La limpieza de las líneas de conducción y los tanques es más frecuente que en el caso del abastecimiento de agua potable.

Se requiere también un programa de detección de fugas y monitoreo del gasto en la red, para controlar cualquier pérdida.

6

conclusiones

perspectivas del reúso del agua en México

Wang Anshi, Primer Ministro bajo la dinastía Song, sentía un gran interés por el desarrollo del país.

Un día, un hombre que deseaba congraciarse con él le propuso el siguiente proyecto:

-Desecando el lago Llangshanbo, de ochocientos li de contorno, tendría usted ahí buenos y fértiles campos-. Esta idea fue del agrado de Wang.

-Pero, ¿dónde desagüemos el lago? - preguntó.

Liu Gongfu, que estaba presente, intervino:

-¡Bien!, el problema queda resuelto si usted hace cavar, al lado, otro lago de ochocientos li de contorno.

Wang Anshi se echó a reír y el proyecto quedó en nada.

Anécdotas de Shao Bo Wen, s. XI.

En este capítulo se hace una revisión somera del estado actual de la distribución, la demanda y la contaminación del agua en México, el nivel y la calidad del tratamiento y el reúso existentes, la demanda potencial del agua renovada y las perspectivas de su explotación. Finalmente, se plantea la necesidad de explorar, planificar e implantar proyectos de reúso.

6.1 El Agua en México

El reúso es una opción obligada si se toman en cuenta los problemas de escasez del agua en nuestro país, los altos costos de su transporte, las consecuencias ecológicas de su desperdicio y su importancia estratégica en el desarrollo urbano e industrial. Sin ir muy lejos en el análisis, se puede llegar a la conclusión de que el principal obstáculo a la viabilidad financiera del reúso es el subsidio que recibe el precio del agua potable, sin pasar por alto otros problemas como la indefinición o el vacío legal que afectan todavía a muchos aspectos relacionados con la contaminación y el aprovechamiento racional del recurso. La búsqueda de soluciones está inserta en el complejo esquema del manejo del agua en nuestro país.

La escasez y la contaminación del agua en México están ligadas al patrón espacial que definen su distribución y su demanda. Aunque los índices tomados aisladamente pueden resultar engañosos, los siguientes datos pueden ayudarnos a formarnos una idea del problema ^[29,30]:

- en nuestro país hay un escurrimiento promedio superior a los 400,000 millones de metros cúbicos anuales;
- la mitad del agua disponible se concentra en la quinta parte del territorio, principalmente al sureste, que es la zona con menores aglomeraciones urbanas;
- la zona norte, que suma el 30 por ciento del territorio, sólo cuenta con 3 por ciento del agua disponible;
- el 70 por ciento de la población y el 80 por ciento de la actividad industrial se encuentran en las zonas más altas del territorio, en las que se dispone del 15 por ciento del agua;
- en más de la mitad de la superficie apta para uso agrícola se tiene menos del 10 por ciento del agua, mientras que la décima parte de aquélla concentra el 60 por ciento del recurso.

Naturalmente, el problema del agua está ligado al modelo de desarrollo económico que ha seguido México. Durante las tres décadas de "desarrollo estabilizador" se generó una polarización regional de la actividad económica, con el consiguiente crecimiento de la extracción de agua; sin embargo, la planeación de las obras hidráulicas, cuando la hubo, no consideró la protección de las fuentes y el desarrollo de infraestructura quedó rezagado en el rubro del saneamiento y en las zonas rurales. A partir de los setentas, como consecuencia de la crisis económica, las inversiones y el mantenimiento de la obra hidráulica sufrieron un virtual abandono de dos décadas, en las cuales la cobertura de los servicios llegó incluso a descender. Además, nunca se inculcó en los usuarios una "cultura del agua", ya que los altos subsidios a los precios del recurso y la falta de rigor para cuidar su aprovechamiento racional y su saneamiento generaron una ausencia total de conciencia sobre los costos económicos y extraeconómicos de la explotación hidráulica ^[30].

Apenas en la presente década se ha comenzado a retomar el control del recurso, dentro de los márgenes de acción que permite la malla de situaciones que conforma el problema del agua en México. El diagnóstico elaborado en 1990 para el Programa Nacional de Aprovechamiento del Agua señalaba lo siguiente:

- uno de cada dos litros de los sistemas de riego no se aprovechaba, ya que se perdía o se aplicaba en exceso,

- las ciudades de México, Monterrey y Guadalajara demandaban más de la mitad del agua disponible en el país,
- el 69 por ciento del total del agua suministrada para usos doméstico y comercial provenía del subsuelo,
- entre 1981 y 1987 bajó la cobertura promedio del servicio de agua potable y alcantarillado en el país,
- sólo 10 por ciento de los 2,902 sistemas de agua en el país contaba con algún tipo de potabilización, porcentaje similar al que contaba con plantas de tratamiento,
- en el país se generaban 110,000 l/s de aguas negras; había 187 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales con capacidad total mayor a 15,300 l/s y 177 industriales, con capacidad conjunta de 12,200 l/s, pero más de la cuarta parte no funcionaba, por lo que ni siquiera el 20 por ciento de las aguas residuales recibía tratamiento,
- se estimó que el 40 por ciento del agua distribuida en las grandes ciudades se perdía en fugas por falta de mantenimiento a las redes,
- el volumen de agua utilizado para la industria y la minería era mayor que el extraído para uso urbano; a pesar del estancamiento del sector industrial entre 1980 y 1988, la extracción de agua para dicho uso creció en 46.5 por ciento,
- se estimó que en la industria se consumía el 35 por ciento del volumen total extraído para tal efecto,
- el nivel de reúso en la industria se calculaba en alrededor del 10 por ciento del abastecimiento total al sector, cuando es probable que *un 60 por ciento podría provenir del reúso*¹,
- en la minería tendía a aumentar el índice de consumo, sin que se hubieran aplicado medidas para uso eficiente del agua,
- el sector industrial vertía 82,000 l/s de aguas residuales, o sea el 31 por ciento del volumen global,

¹ Sólo como porcentaje potencial, sin tener en cuenta la disponibilidad regional o local ni la competitividad en precio.

- seis grandes grupos industriales generaban 46 por ciento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno,
- ocho ramas industriales concentraban 83.5 por ciento del consumo industrial; entre éstas, la del azúcar y la de productos químicos eran, además, dos de los grupos más contaminantes,
- sólo se aprovechaba el 22 por ciento del potencial hidroeléctrico, sin considerar el de los proyectos para cargas y gastos pequeños, que últimamente se ha hecho más factible,
- en las plantas termoeléctricas, el 75 por ciento del agua se perdía por evaporación,
- aunque 613 presas y 95 lagos eran propicios para la acuicultura, menos del 4 por ciento se aprovechaban para piscicultura, y el 1 por ciento para el cultivo de camarón,
- 127 establecimientos privados y 294 plantas paraestatales producían, en 1988, el 60 por ciento de la contaminación industrial,
- en las tres mayores urbes del país se generaba el 40 por ciento de la contaminación industrial,
- se estimó que 15 por ciento de las 364 plantas de tratamiento (incluyendo las industriales) operaba bajo su capacidad nominal y el 27 por ciento no operaba,
- en la región de la cuenca del Lerma-Balsas menos del 3 por ciento de las industrias trataba sus descargas; sólo 14 por ciento del total de aguas residuales recibía tratamiento,
- en el Valle de México, 1000 Ha de áreas verdes se regaban con aguas de primer uso,
- se estimó que, en el Distrito Federal, 13 por ciento del agua potable se usaba en actividades industriales que no requerían de esa calidad; en el Estado de México el porcentaje llegaba a 10 por ciento.
- se estimó que la cuota necesaria para recuperar la inversión en distritos de riego sería menor a 5 por ciento de los costos de producción promedio,
- aunque el costo promedio nacional del agua potable se estimó en \$240 (N\$0.24) por metro cúbico, se pagaba alrededor de \$40 (N\$0.04).

Además de lo anterior, la operación de los sistemas se encontraba atrapada en esquemas de financiamiento que la hacen ineficiente, debido a tres razones principales:

- excesiva dependencia del presupuesto público, en menoscabo de su propia eficiencia financiera,
- escaso desarrollo de fuentes de financiamiento alternas, e
- ineficiencia en la cobranza.

El Cuadro 6.1 resume el diagnóstico del sector hidráulico en 1990. El mismo programa analiza la situación del sector de manera regional, con base en seis grandes regiones, según se resume en el cuadro 6.2.

La actual administración pública fijó políticas y ha ejercido acciones para lograr un manejo integral del recurso, mediante la creación de la Comisión Nacional del Agua, consolidar el sistema financiero del agua y diversificar su el financiamiento de la obra hidráulica, preservar y aumentar la cantidad y la calidad del agua aprovechable, inducir el cambio tecnológico, fomentar una nueva cultura del agua y disminuir los desequilibrios hidráulicos regionales.

Asimismo, se ha trabajado en la renovación y complementación del marco legal del aprovechamiento del agua, mediante la promulgación de la Ley de Aguas Nacionales, el reglamento respectivo, la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua y la normalización de los criterios de calidad, como se comentó en el Capítulo 3 de este trabajo.

Estos cambios, básicamente de índole administrativa, se han dado como la base para una transformación integral del manejo del recurso. Sin embargo, la escasez de recursos ha mantenido la inversión en niveles bajos, y las nuevas opciones de financiamiento se han encontrado con problemas de instrumentación (desde el momento mismo de los concursos para la asignación de concesiones) casi tan grandes como las perspectivas prometidas.

Como en otros rubros en los que la necesidad de recursos para la inversión es grande, la opción de financiamiento mediante concesión o privatización puede resultar más limitada de lo que se espera, entre otras cosas porque el proceso de adecuación al nuevo marco legal y la depresión del nivel adquisitivo de la población no dan la seguridad ni los niveles de recuperación que se encuentran en otros géneros de inversión.

Por otra parte, los años de atraso tecnológico y estancamiento económico han tenido necesariamente un efecto en la disponibilidad de profesionales y técnicos capaces, en el desarrollo técnico estable de empresas de ingeniería y en la administración eficiente del recurso a nivel regional y nacional.

CUADRO 6.1 PROBLEMÁTICA DEL SECTOR HIDRAULICO AL INICIO DE LA DÉCADA DE LOS NOVENTA.

CRITERIO	PROBLEMÁTICA
1. SECTORIAL	
USO AGRICOLA	<ul style="list-style-type: none"> • Expansión insuficiente y deterioro de la infraestructura hidrográfica y bajo aprovechamiento de la infraestructura.
USOS DOMESTICO Y COMERCIAL	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura insuficiente, • falta de control de la calidad del agua e irregularidad en el suministro y • bajo aprovechamiento y debilidad financiera de los organismos operadores.
USOS INDUSTRIAL Y MINERO	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado consumo y bajo nivel de reúso, • contaminación excesiva y • concentración sectorial de la demanda.
USO EN LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo aprovechamiento del potencial hidroeléctrico y • uso insuficiente del recurso en plantas termoeléctricas.
USO EN ACUACULTURA	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo aprovechamiento de cuerpos de agua con potencial acuícola.
2. ADMINISTRACION	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de adecuación del marco jurídico, que presenta complejidad excesiva, imprecisiones o rezago en diversos aspectos, • dispersión de funciones y atribuciones, • limitado control de asignaciones, concesiones y permisos, y • insuficiente protección contra inundaciones y otros desastres naturales, por atraso del Servicio Meteorológico Nacional.
3. CALIDAD DEL AGUA	<ul style="list-style-type: none"> • Concentración de las descargas, tanto geográfica como por giros productivos, • reducido nivel de tratamiento y reúso de las aguas residuales, • limitado control de las descargas y • atraso tecnológico, que ha conducido entre otras cosas a una simplificación de la política de control, reducida a la medición de parámetros contra estándares.

Fuente: Ref. [30]

CUADRO 6.2 PROBLEMÁTICA REGIONAL DEL AGUA (en 1990)

PROBLEMAS TÍPICOS	NW	N	NE	L-B	SE	VM
Insuficiente aprovechamiento del recurso y la tecnología hidrogrfcola	■	■	■	■	■	■
Abasto insuficiente	■	■	■	■	■	■
Marcada sobreexplotación de acuíferos	■	■	■	■	■	■
Considerable contaminación del recurso	■	■	■	■	■	■
Reducido o nulo aprovechamiento del potencial acuícola	■	■	■	■	■	■
Insuficiente aprovechamiento de la hidrogenación	■	■	■	■	■	■
Falta de reglamentación del aprovechamiento de los ríos federales	■	■	■	■	■	■
Fuerte concentración de la demanda urbano-industrial	■	■	■	■	■	■
Presencia regular de fenómenos meteorológicos extremos	■	■	■	■	■	■
Ineficiencia operativa en los sistemas de distribución de agua	■	■	■	■	■	■
Muy escasa infraestructura para tratamiento	■	■	■	■	■	■
Alta insatisfacción de la demanda doméstica y comercial	■	■	■	■	■	■

Fuente: Adaptado de [30]

Nota: Se señalan las regiones en las que el problema es especialmente importante; no significa que en las demás no exista dicho problema.

Abreviaturas: NW: Noroeste; N: Norte; NE: noreste; L-B: Lerma-Balsas; SE: Sureste; VM: Valle de México.

Quizás sería pertinente evaluar si el concentrar la responsabilidad sobre el manejo del recurso no significó al mismo tiempo aumentar el riesgo de generalizar errores de planificación y de implantación de políticas cuya aplicación se ensayó y de cuyos resultados no seremos testigos en un plazo breve.

De cualquier manera, aún no hay suficiente información ni perspectiva para valorar los logros y los rezagos en política hidráulica del presente gobierno, ni es el propósito de este trabajo hacerlo. Únicamente se pretende, dentro del marco de referencia que se ha expuesto hasta este punto, y de acuerdo con lo desarrollado en los capítulos anteriores, insistir en señalar las formas en que el reúso del agua puede contribuir significativamente a solucionar la problemática situación del aprovechamiento del agua en México. Las seis formas principales en que se manifiesta esta posibilidad son, como se ha expuesto, las siguientes:

- en muchos casos, el agua tratada puede cubrir un porcentaje de la demanda de agua con la calidad suficiente a un costo financiera y económicamente conveniente,

- como consecuencia de lo anterior, permite eliminar o posponer parte de los efectos negativos de la explotación de fuentes subterráneas o superficiales, como son el abatimiento de acuíferos, o los desequilibrios ecológicos e hidrológicos regionales,
- disminuye el volumen de aguas negras que se descargan al medio natural en un sistema hidráulico, con lo que disminuyen también el costo del saneamiento, la contaminación de los cuerpos receptores y el pago de las cuotas por descarga,
- permite mejorar la eficiencia financiera de los organismos operadores, ya sea por la venta directa del agua tratada de las plantas municipales, por la concesión de la misma o por la recuperación de productos aprovechables,
- estimula la inversión privada en tecnología para tratamiento, así como la capacitación, la investigación y el desarrollo del ramo, y
- genera competencia por la explotación de las aguas residuales como fuente alterna de abastecimiento, induce la complementación de la normatividad y contribuye a elevar el nivel de conciencia de la sociedad sobre los efectos en la salud del uso actual del agua residual cruda; por lo mismo, coadyuva con el control de esta utilización indebida.

Sin embargo, como se ha expuesto a lo largo de la Tesis, para que el reúso sea factible en casos concretos se requieren condiciones específicas a nivel local. En el siguiente punto se presenta una exploración general de la factibilidad del reúso en el ámbito nacional.

6.2 Estado Actual y Demanda Potencial del Reúso en México.

6.2.1 Industria.

La demanda industrial puede ser cubierta de manera parcial o total con agua renovada en cuatro categorías principales:

- enfriamiento,
- generación de vapor,
- procesos y
- usos generales.

Los porcentajes respectivos del consumo de las mayores industrias en México se presentan en el Cuadro 6.3 ^[14].

CUADRO 6.3 PORCENTAJES DE CONSUMO INDUSTRIAL DE AGUA

GRUPO INDUSTRIAL	ENFRIAMIENTO	PROCESOS	GENERA- CION DE VAPOR	OTROS
ALIMENTOS Y AZUCAR	51.5	40.4	4.0	4.1
QUIMICA	76.5	17.5	2.3	3.7
HIERRO Y ACERO	85.2	7.1	1.0	6.7
CELULOSA Y PAPEL	34.3	62.9	1.8	1.0
PETROLEO	40.2	53.7	4.8	1.3
PROMEDIO TOTAL *	55.0	35.0	5.0	5.0

Fuente: Refs. [14], * [30].

Los usos con mayor factibilidad son^[21]:

- el enfriamiento en el caso de la industria del hierro y el acero,
- algunos casos en la industria química,
- el uso en procesos en la industria de celulosa y papel, dependiendo del proceso, en la química y petroquímica y en la metálica,
- la generación de vapor, cuando puedan evitarse los problemas por incrustaciones minerales en las líneas de conducción.

Según la estimación del Plan Nacional de Aprovechamiento del Agua, presentada en el punto anterior, el 60 por ciento del volumen extraído para uso industrial podría ser de reúso. Esto significaría 5,100 millones de metros cúbicos anuales, o bien alrededor de 160 m³/s en promedio. Recordemos que actualmente la capacidad conjunta instalada de las plantas de tratamiento en todo el país no rebasa los 28 m³/s, y la de operación es menor a 20 m³/s.

El caso más importante de reúso industrial se ha dado en la ciudad de Monterrey, en donde existen ocho plantas de tratamiento secundario. En otros estados sólo son importantes la planta

de una papelería en Chihuahua y la de Altos Hornos de México, en Monclova, Coahuila, según se muestra en el Cuadro 6.4.

En el Distrito Federal existen once plantas principales, para diversos usos: El Rosario, Coyoacán, Ciudad Universitaria, Tlaltelolco, Acueducto de Guadalupe, San Juan de Aragón, Ciudad Deportiva, Cerro de la Estrella, San Luis Tlaxiátemalco, Chapultepec y Bosque de las Lomas, con una producción media total de 1.89 m³/s. De éstas, sólo tres funcionan de manera regular, aunque al 40 por ciento de su capacidad instalada ^(32,33).

En el Estado de México, por último, hay siete plantas importantes: Jorge Ayanegui en Cd. Nezahualcóyotl, Lechería (Termoeléctrica), Naucalli, Papelería, Termoeléctrica del Valle de México, San Juan Ixhuatepec y Texcoco; se utilizan en riego de áreas verdes, usos industriales y llenado de los lagos de Texcoco, con un gasto de operación conjunto de casi 1300 l/s en tiempo de secas. Existen otras plantas menores, como la de Ford, la de Pintores, la del Club de Golf Hacienda y la de Chapingo.

CUADRO 6.4 PRINCIPALES PLANTAS DE TRATAMIENTO PARA REUSO INDUSTRIAL EN LA REPUBLICA MEXICANA

UBICACION	CAPACIDAD INSTALADA	SISTEMA DE TRATAMIENTO
Monclova, Coah. (AHMSA)	120	Lodos Activados
Chihuahua (Papelería)	11.5	Coagulación-floculación
Monterrey, N. L. (AIMSU)	340	Lodos activados
Monterrey, N. L. (CFE Huinalá)	120	Lodos activados
Monterrey, N. L. (CFE Mezquital)	450	Lodos activados
Monterrey, N. L. (Club Campestre)	25	Lodos activados
Monterrey, N. L. (CYDSA)	56	Lodos activados
Monterrey, N. L. (P. Maldonado)	16	Lodos activados
Monterrey, N. L. (PEMEX)	600	Lodos activados
Monterrey, N. L. (Poniente)	150	Lodos activados

NOTA: Datos en l/s, actualizados a abril de 1993.

Fuente: [34]

El manejo del agua tratada en la zona metropolitana de la Ciudad de México es más complejo y se encuentra en un proceso de expansión y cambios. En 1991, un estudio ^[21] estimó una demanda potencial de 2,400 l/s a corto plazo y 8,100 l/s a largo plazo, en promedio, para diversos usos.

Un estudio del Instituto de Ingeniería de la UNAM marcó como zonas prioritarias para implantar proyectos de reúso a la zona metropolitana de la Ciudad de México, el área metropolitana de Monterrey y el corredor industrial Celaya-Salamanca-León ^[21].

Como ciudades de interés, el mismo estudio menciona a Monterrey, Distrito Federal, Ecatepec, Naucalpan, Tlalnepantla, San Luis Potosí, Guadalajara, Querétaro, Puebla, Saltillo, Salamanca, Celaya, Chihuahua, Altamira y León.

Hay dos casos especialmente interesantes del reúso industrial del agua: la planta de *Agua Industrial de Monterrey* y la planta de San Juan Ixhuatepec, que funcionan como sociedades de usuarios. Aquí han sido éstos quienes han tenido la iniciativa de "producir" su agua renovada, con éxito notorio y niveles de calidad y precio adecuados a su propio interés.

6.2.2 Agricultura.

El uso de las aguas negras en el riego agrícola se da en México de manera incontrolada y natural, lo cual acarrea problemas sanitarios y de degradación del suelo. Aunque en esta Tesis se optó por excluir el reúso agrícola, es evidente que la demanda agrícola de aguas negras puede ser importante en un contexto metropolitano, lo que ocurre en los casos de las ciudades de México, Monterrey y Guadalajara, por ejemplo. Aunque esta categoría de reúso implica complicaciones adicionales respecto al saneamiento regional, a la solución técnica de la distribución estacional y a la operación, se puede anotar que el control del uso de aguas negras en riego agrícola se dará simultáneamente al progreso en la normalización de la calidad del agua y la implantación de programas de saneamiento.

6.2.3 Recarga de Acuíferos.

No existen zonas en que se aplique actualmente la inyección o el enlagnamiento para recarga de acuíferos con agua tratada. En la ciudad de México, la planta de San Luis Tlaxialtemalco destina parte de sus aguas a una instalación experimental para inyección directa de aguas tratadas

y medición de parámetros de calidad, aunque los problemas por asentamientos en las estructuras han impedido su operación normal. Se tienen identificadas siete zonas con problemas de sobreexplotación en diversos grados ¹¹⁴⁾:

- Valle de México,
- Valle de Mexicali, B.C.,
- Mesa de San Luis Río Colorado, Son.,
- Región lagunera (Coah., Dgo.),
- Valle de León, Gto.,
- Cd. Juárez, Chih., y
- Valle de Querétaro, Gro.

En algunos casos la sobreexplotación va aparejada a un proceso de degradación de la calidad de los mantos freáticos, lo que resulta en que, paradójicamente, la calidad del agua subterránea mezclada con la tratada sería inferior a la de ésta, aunque mejor que la actual.

Se han hecho estudios sobre el caso del Valle de México, aunque los problemas técnicos (tratamiento del agua, disponibilidad de terrenos, costos de operación), de aceptación pública y financieros distan de ser resueltos en el corto plazo. Se tiene programado ampliar la planta de Cerro de la Estrella con un módulo de filtración, semejante al de la de San Luis Tlaxiátemalco, y destinar parte de su efluente a la recarga directa del acuífero al oriente de la ciudad. Será necesario medir la evolución en la calidad del agua del mismo, ya que incluso actualmente no cumple con todos los parámetros fijados.

6.2.4 Otros Usos Potenciales.

Después del industrial, el uso de aguas tratadas en riego de áreas verdes es el más extendido en nuestro país, y el que mejores condiciones presenta para su aplicación por usuarios particulares, ya que conjunta la necesidad de cumplir con los reglamentos de descarga con la posibilidad de obtener beneficios directos del aprovechamiento de las aguas tratadas por los propios usuarios; se ha extendido su aceptación entre clubes privados, universidades y hoteles. A nivel urbano, se aplica en el Distrito Federal y Monterrey, pero representa aún una aplicación potencial muy importante, que se hará más conveniente en la medida que el rezago en el saneamiento del agua a nivel municipal se vaya abatiendo.

Los lagos de Chapultepec y algunos otros embalses menores en instalaciones privadas ya utilizan aguas tratadas. Esta categoría de reúso no es tan favorecida, debido a que la recuperación de las inversiones no es directa, sino ocurre por los efectos económicos y de bienestar que produce. El

caso del llenado de los canales de Xochimilco y los lagos de Texcoco, en la Ciudad de México, revela un valor especial del uso de aguas renovadas, ya que forma parte de amplios programas de rescate cultural y ecológico.

En cuanto al uso potable, aunque se han hecho estudios experimentales avanzados no se considera que existan los recursos financieros ni técnicos para operar de manera confiable plantas de capacidad importante, sin tomar en cuenta el aspecto del rechazo público. No es ninguna ventaja que en varios casos este tipo de reúso ya ocurra en nuestro país de manera incidental, ya que no existen estudios que midan las consecuencias sanitarias del hecho. Más aún, a nivel mundial existen dudas sobre los efectos acumulativos de contaminantes cuya eliminación no se logra con los sistemas de tratamiento técnica y económicamente accesibles.

Tal vez cuando se disponga de plantas de tratamiento para saneamiento, que "produzcan gratuitamente" un bien hasta ahora costoso, en las zonas áridas de nuestro país sea viable la instalación de redes de agua tratada que induzcan su propio mercado, al tiempo que se eleva la educación de la población en lo que concierne al aprovechamiento racional del recurso.

6.3 Conclusiones.

A lo largo de esta Tesis se han repasado los aspectos relacionados con el reúso del agua. Aunque no fue posible abordarlos todos con detalle, la idea general que nos hemos formado al respecto nos permite afirmar dos cosas: en nuestro país hay posibilidades claras para un desarrollo extenso del reúso del agua y contamos con los elementos para promover y llevar a cabo proyectos de reúso.

Un proyecto de reúso puede surgir, por otra parte, de una necesidad específica, perfectamente localizada, para la cual aparentemente no sería necesario desarrollar una fase de planeación. Sin embargo, en este capítulo se ha mostrado que el problema del agua tiene ramificaciones complejas y un proyecto de inversión puede estar ignorando factores que, a la larga, resulten perjudiciales a los inversionistas o a la comunidad.

En principio, el costo que el agua potable tiene para el consumidor en México desalienta la inversión en proyectos de reúso. Lo anterior está en vías de corregirse: de acuerdo con las políticas actuales, la prestación de servicios de abastecimiento y saneamiento del agua tiende a derivarse hacia la inversión privada, buscando su operación eficiente. En este contexto, para un organismo operador resulta imprescindible evaluar de manera global los beneficios que pueden obtenerse de la implantación del uso de agua renovada. Además, la evaluación económica y social de los proyectos relacionados con los servicios de agua y drenaje no puede ser relegada por las autoridades en nombre de la eficiencia financiera.

Hay otros factores que pueden ser limitantes al desarrollo del reúso. La ingeniería del tratamiento de aguas residuales dependía, hasta hace poco, de la ejecución de proyectos municipales; la demanda de estos servicios no fue lo suficientemente continua como para que se estabilizaran despachos de diseño con personal experimentado en tecnología compleja, por lo que los especialistas en el área son relativamente pocos y la mayor parte de las empresas del ramo trabaja de manera irregular, sin una organización adecuada. Ello se ha agravado con el *boom* de las modas ambientalistas, ya que la demanda reciente ha rebasado con mucho a la capacidad técnica real existente en el medio.

Lo anterior, aunado a la baja en el nivel de salarios profesionales, genera una limitación aún más grave: en las Dependencias encargadas de tomar las decisiones de planeación no siempre existe la capacidad técnica para planificar y promover el aprovechamiento correcto del recurso. El sector público, que alguna vez contaba con cuerpos técnicos del más alto nivel, ha perdido personal valioso que derivó hacia el sector privado o dejó el ejercicio activo.

Como en otros rubros, se espera que el emergente mercado para los servicios de profesionales técnicos en cuestiones ambientales ayude a generar una oferta con nivel adecuado. De cualquier modo, sería deseable corregir el círculo vicioso que crea el abaratamiento de los servicios de diseño, que resulta poco atractivo para las generaciones recientes de ingenieros y se ha convertido en un negocio de relaciones públicas.

Todo ello va aparejado a la falta de procedimientos para la revisión y aprobación de proyectos, que resulta en incertidumbre para las empresas de diseño y concesionarias de los servicios, así como en errores en la programación y en la asignación de los recursos públicos. Hacen falta normas y manuales de diseño, dentro de un marco legal más claro y específico. Baste saber que el despacho que diseña una instalación de tratamiento, a diferencia de lo que ocurre en otros países, pierde toda responsabilidad sobre el funcionamiento eficiente de la misma una vez que el proyecto ha sido aprobado; la responsabilidad de los encargados de aprobarlo, a su vez, se desvanece cada fin de sexenio.

Los resultados de la nueva política de concesionar la operación de sistemas de saneamiento y reúso no se verán en el corto plazo, aunque ya se están manifestando problemas evidentes en la orientación, la instrumentación y el control de este tipo de proyectos. Por una parte, con ello se reflejan en el campo de la ingeniería las tendencias nacionales de concentración del ingreso, desaparición de empresas pequeñas o medianas, profundización de la dependencia tecnológica hacia el exterior, así como la restricción de la actividad de los profesionistas nacionales a labores de aplicación, y no de desarrollo tecnológico. Por la otra, la adaptación de las dependencias, organismos gubernamentales y las propias empresas al nuevo marco de referencia está siendo lenta y difícil, contenida además por la desaceleración económica que ha padecido el país los últimos años.

La intervención de actores nuevos en problemas tradicionalmente asignados al Estado es un hecho que innegablemente complica y da una nueva dinámica a la planificación de los recursos hidráulicos. Para quien escribe estas líneas, el que la planeación tenga resultados confiables, sobre todo en lo que respecta al aprovechamiento socialmente justo de los recursos naturales, está ligado íntimamente con el desarrollo de un convenio social propicio, que incluya mecanismos de gestión democráticos y reglas del juego claras y realmente aplicables. En nuestro país la planeación se ha visto limitada por los escasos medios de que dispone la sociedad, en los hechos, para la vigilancia y el control de la aplicación correcta de sus propuestas.

En el caso del aprovechamiento del agua, en la medida que las políticas no consideren realmente un interés común y mantengan el virtual acaparamiento del control del recurso, ahora en manos de unas cuantas empresas, sin asegurarse de que se respeten derechos de todos los usuarios del agua, estaremos entrando en una nueva simulación, tratando de ajustarle un traje importado a un cuerpo que se niega a cambiar. El que un usuario tenga mecanismos para defender sus intereses no tiene que ser un freno para la iniciativa de los inversionistas privados, ni una fuente de presión y negociación política para el sector público. Corresponderá a los nuevos prestadores de los servicios desarrollar un trabajo eficiente, a la administración pública proporcionar el marco adecuado para que ello ocurra con criterios de beneficio público, mediante la utilización correcta de técnicas de planificación y programación, y a los usuarios estar atentos a que sus intereses sean tomados en cuenta en los nuevos convenios.

La necesidad de generar políticas realistas y basadas en un trabajo profesional de planificación es más urgente si consideramos, además de lo anteriormente expuesto, la dimensión ambiental del uso del agua. Según estudios recientes, en México podría ocurrir una crisis hidráulica más severa y próxima de lo que quisiéramos aceptar.

La planeación nos debe ayudar a identificar los caminos en que es posible generar beneficios para todos. No le corresponde programar la maduración cívica de la sociedad, ni el mejoramiento de los mecanismos de participación política, que sin embargo condicionan en gran medida su utilidad. Tampoco puede ser un ejercicio de especulación que se conforme con fijar rumbos imaginarios a un proyecto que sigue siendo arrastrado por fuerzas que nadie nombra y todos aceptamos. Dar un lugar justo a la planeación nos dará mejores armas para enfrentar la nueva circunstancia. No podemos seguir desperdiciando nuestros recursos, cavando, como en la anécdota que comienza este capítulo, *otros lagos*, para ocultar errores siempre obvios y siempre repetidos.

ANEXO A
CRITERIOS ECOLOGICOS DE CALIDAD DEL AGUA
(Extracto)¹

ARTICULO 1o. - El presente Acuerdo tiene como propósito establecer los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89, con base en los cuales la autoridad competente podrá calificar a los cuerpos de agua como aptos para ser utilizados como fuente de abastecimiento de agua potable, en actividades recreativas con contacto primario, para riego agrícola, para uso pecuario, en la acuacultura o para la protección de la vida acuática.

ARTICULO 2o. - Para los efectos de este Acuerdo se considerarán las definiciones contenidas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, y las siguientes:

(...)

Calidad para riego agrícola: Grado de calidad del agua, requerido para llevar a cabo prácticas de riego sin restricción de tipos de cultivo, tipos de suelo y métodos de riego.

Calidad para uso como fuente de abastecimiento de agua potable: Grado de calidad del agua, requerido para ser utilizada como abastecimiento de agua para consumo humano, debiendo ser sometida a tratamiento, cuando no se ajuste a las disposiciones sanitarias sobre agua potable.

(...)

Calidad para uso recreativo con contacto primario: Grado de calidad del agua, requerido para ser utilizada en actividades de esparcimiento, que garantiza la protección de la salud humana por contacto directo.

Cuerpo de agua: Los lagos; lagunas; acuíferos; ríos y sus afluentes directos o indirectos, permanentes o intermitentes; presas; embalses; cenotes; manantiales; litorales; estuarios; esteros; marismas, y en general las zonas marinas mexicanas.

Fuente de abastecimiento de agua potable: Todo cuerpo de agua que es o puede ser utilizado para proveer agua para consumo humano.

ARTICULO 3o.- Los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua a los que se refiere el artículo 1o. de este Acuerdo, son los que se establecen en las tablas siguientes²:

¹ Copiado textualmente de CE-CCA-001/89

² Se omitió la Tabla 2, relativa a calidad para acuacultura, así como los artículos y párrafos correspondientes a este uso.

TABLA 1 CRITERIOS ECOLOGICOS DE CALIDAD DEL AGUA (inicia)

Sustancia o parámetro	Fuente de abastecimiento de agua potable	Recreativo con contacto primario	Riego agrícola
ACENAFTENO	0.02		
ACIDO 2,4 DICLOROFENOXIACETICO	0.1		
ACRILONITRILLO (II)	0.0006 (III)		
ACROLEINA	0.3		0.1
ALCALINIDAD (como CaCO ₃)	400.0		
ALDRIN (II)	0.00003 (III)	0.00005	0.02
ALUMINIO	0.02		5.0
ANTIMONIO	0.1		0.1
ARSENICO (II)	0.05 (III)		0.1
ASBESTOS (II) (fibras/l)	3000 (III)		
ASPECTOS ESTETICOS	(V)	(V)	(V)
BARIO	1.0		
BENCENO (II)	0.01 (III)		
BENCIDINA	0.000001 (III)		
BERILIO (II)	0.00007 (III)		(VI)
BIFENILOS POLICLORADOS (II)	0.0000008 (III)		
BHC (LINDANO)	0.003 (II)		
BIS (2 CLOROETIL) ETER	0.0003 (III)		
BIS (2-CLOROISOPROPIL) ETER	0.03 (III)		
BIS (2 ETILHEXIL) ETALATO	32.0		
BORO (II)	1.0		0.7 (XI)
BROMURO DE METILO	0.002		
CADMIO (II)	0.01		0.01
CARBONO ORGANICO:			
- EXTRACTABLE EN ALCOHOL:	1.5		
- EXTRACTABLE EN CLOROFORMO	3.0		
CIANURO (como CN-)	0.2	0.02	0.02
CLORDANO (II) (MEZCLA TECNICA DE METABOLITOS)	0.003 (III)	0.00002	0.003
CLORO BENCENO	0.02		
2 CLORO ETIL VINIL ETER			
2 CLOROFENOL	0.03		
CLOROFORMO (II)	0.03 (III)		

TABLA 1 CRITERIOS ECOLOGICOS DE CALIDAD DEL AGUA (continuación)

Sustancia o parámetro	Fuente de abastecimiento de agua potable	Recreativo con contacto primario	Riego agrícola
CLORURO DE METILENO	0.002 (III)		
CLORURO DE METILO	0.002 (III)		
CLORURO DE VINILO	0.02 (III)		
COBRE	1.0		0.20
COLIFORMES FECALES (NMP/100 ml)	1000.0	(XVIII)	1000.0
COLOR (unidades de escala Pt-Co)	75.0		
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (μ mhos/cm)			1.0 (XX)
CROMO HEXAVALENTE	0.05		1.0
DDD (II)	0.0000002 (III)		
DDT (II)	0.001 (III)	0.000005	
DICLOROBENCENOS	0.4		
1,2 DICLOROETANO (II)	0.005		
1,1 DICLOROETILENO (II)	0.0003		
1,2 DICLOROETILENO (II)	0.0003		
2,4 - DICLOROFENOL	0.03		
1,2 DICLOROPROPILENO	0.09		
DIELDRIN (II)	0.0000007 (III)	0.000003	0.02
1,2 DIFENILHIDRACINA (II)	0.0004 (III)		
2,4 - DIMETIL FENOL	0.4		
DIMETIL FTALATO	313.0		
2,4 DINITROFENOL	0.07		
DINITRO-O-CRESOL	0.01 (III)		
2,4 DINITROTOLUENO (II)	0.001 (III)		
ENDOSULFANO (α y β) (II)	0.07		
ENDRIN	0.001	0.000002	
ETILBENCENO	1.4		
FENOL	0.3	0.001	
PIERRO	0.3		5.0
FLORANTENO	0.04		
FLUORUROS (como F-)	1.5		1.0
GRASAS Y ACETES	AUSENTE		
HALOMETANOS (II)	0.002 (III)		
HEPTACLORO (II)	0.0001 (III)	0.000002	0.02
HEXACLOROBENCENO	0.00001 (III)		

TABLA 1 CRITERIOS ECOLOGICOS DE CALIDAD DEL AGUA (continuación)

Sustancia o parámetro	Fuente de abastecimiento de agua potable	Recreativo con contacto primario	Riego agrícola
HEXACLOROCICLOPENTADIENO	0.001		
HEXACLOROETANO (II)	0.02 (III)		
HIDROCARBUROS AROMATICOS POLINUCLEARES (II)	0.00003 (II)		
ISOFORONA	5.2		
MANGANESO	0.1		
MATERIA FLOTANTE	V.2	V.2	V.2
MERCURIO (Hg) (II)	0.001		
METOXICLORO	0.03		
NIQUEL	0.01		0.2
NITRATOS (NO ₃) (como N)	5.0		
NITRITOS (NO ₂) (como N)	0.05		
NITROBENCENO	20.0		
2 NITROFENOL Y 4 NITROFENOL	0.07		
N-NITROSODIMETILAMINA (II)	0.00001 (III)		
OXIGENO DISUELTO (XXX)	4.0		
PARATION	0.00003		
PENTAFLUOROFENOL	0.03		
POTENCIAL HIDROGENO (pH) (XXXI)	5-9		4.5-9.0
PLATA	0.05		
PLOMO	0.05		5.0
SABOR	CARACTERISTICO		
SELENIO (como selenato)	0.01		0.02
SOLIDOS DISUELTOS	500.0		500.0 (XXXV)
SOLIDOS SUSPENDIDOS	500.0		50.0
SOLIDOS TOTALES	1000.0		
SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO	0.5		
SULFATOS (SO ₄)	500.0		130.0
SULFUROS (como H ₂ S)	0.2		
TALIO	0.01		
TEMPERATURA (°C)	CONDICIONES NATURALES + 2.5		
2,3,7,8-TETRAFLUORODIBENZO-P-DIOXINA (II)	0.000000001 (II)		

TABLA 1 CRITERIOS ECOLOGICOS DE CALIDAD DEL AGUA (conclusión)

Sustancia o parámetro	Fuente de abastecimiento de agua potable	Recreativo con contacto primario	Riego agrícola
TETRACLOROETILENO (II)	0.008 (III)		
TETRACLORURO DE CARBONO (II)	0.004 (III)		
TOLUENO	14.3		
1,1,1 TRICLOROETANO (II)	18.4 (III)		
TRICLOROETILENO (II)	0.03 (III)		
2,4,6 TRICLOROFENOL (II)	0.01 (III)		
TURBIEDAD (Unidades escala de sílice)	CONDICIONES NATURALES		
ZINC	5.0		2.0
RADIATIVIDAD:			
ALFA TOTAL (Bq/l)	0.1	0.1	0.1
BETA TOTAL (Bq/l)	1.0	1.0	1.0

Niveles máximos en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

NOTA: Del original, se omitieron las columnas correspondientes a uso pecuario y protección de la vida acuática (en agua dulce y áreas costeras). También se omitieron los parámetros para los que no se establece restricción en los rubros mencionados: BHC, cloro residual, cloronaftaleno, 1,2 dicloropropano, 2,6 dinitrotolueno, fósforo elemental, gases disueltos, naftaleno, nitrógeno amoniacal y n-nitrosodi-n propilamina.

ANEXO DE LA TABLA I ³

II.- La sustancia presente persistencial, bioacumulación o riesgos de cáncer, por lo que debe reducirse a un mínimo la exposición humana;

III.- El nivel ha sido extrapolado mediante el empleo de un modelo matemático, por lo que en revisiones posteriores podrá ser modificado a valores menos estrictos.

(...)

V.- El cuerpo de agua debe estar libre de sustancias atribuibles a aguas residuales u otras descargas que:

- 1.- Formen depósitos que cambien adversamente las características físicas del agua;
- 2.- Contengan materia flotante como partículas, aceites y otros residuos que den apariencia desagradable;
- 3.- Produzcan color, olor, sabor o turbiedad, o
- 4.- Propicien vida acuática indeseable o desagradable.

VI.- Para riego continuo de los suelos, el agua contendrá como máximo 0.1 mg/l de berilio, excepto donde se pueden aplicar concentraciones de hasta 0.5 mg/l;

(...)

VII.- Los datos indicados para BHC involucran la mezcla de isómeros α , β y δ .

(...)

XI.- Para riego de cultivos sensibles al boro, el agua contendrá como máximo 0.75 mg/l de esta sustancia, excepto para otros cultivos donde se pueden aplicar concentraciones de hasta 3 mg/l;

(...)

XVIII.- Los organismos no deben exceder de 200 como número más probable en 100 mililitros (NMP/100 ml) en agua dulce o marina, y no más del 10 % de las muestras mensuales deberá exceder de 400 NMP/100 ml;

(...)

³ Sólo se incluyen las notas relacionadas con las columnas extraídas de la tabla original.

XX.- Este nivel considera el uso del agua bajo condiciones medias de textura del suelo, velocidad de infiltración, drenaje, lámina de riego empleada, clima y tolerancia de los cultivos a las sales. Desviaciones considerables del valor medio de estas variables pueden hacer inseguro el uso de esta agua;

(...)

XXX.- Para oxígeno disuelto, los niveles establecidos deben considerarse como mínimos;

XXXI.- Para el potencial de Hidrógeno (pH), los niveles establecidos deben considerarse como mínimos y máximos;

(...)

XXXV.- La concentración de sólidos disueltos que no tienen efectos nocivos en ningún cultivo es de 500 mg/l, en cultivos sensibles es de entre 500 y 1000 mg/l en muchas cosechas que requieren de manejo especial es de entre 1000 y 2000 mg/l y para cultivos de plantas tolerantes en suelos permeables es de entre 2000 y 5000 mg/l requiriendo de un manejo especial.

Por otra parte, para la cosecha de frutas sensibles, la Razón de Absorción de Sodio (RAS) debe ser menor o igual que 4 y para forrajes la RAS podrá estar entre 8 y 18.

(...)

ARTICULO 4o. - En la aplicación de los presentes criterios ecológicos de calidad del agua, los métodos de análisis que deben observarse para determinar los niveles de los parámetros y de las sustancias presentes en los cuerpos de agua, son los contenidos en las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes o, en su caso, en las que expida la autoridad competente.

(...)

referencias

- [1] James, L. D., Lee, R. R., 1971, WATER RESOURCES ENGINEERING, Mc.Graw Hill, New York:
- cap. 21, "Planning for Water Resources Development",
- cap. 13, Grant, E. L., "Engineering Economy in Water Resources Planning"
- [2] Gloyna, E., 1980, WASTEWATER REUSE: A PERSPECTIVE, en Memorias del Simposio Sobre Redso del Agua, México, D.F.: 11 p.
- [3] Asano, T., 1980, DEVELOPMENT AND EVALUATION OF WASTEWATER RECLAMATION AND REUSE PROJECTS, en Memorias del Simposio sobre reuso del agua, México, D.F.: 16 p.
- [4] Shuval, H., 1977, WATER RENOVATION AND REUSE, Academic Press, Nueva York: 463 p.
- [5] Valiron, F., 1983, LA REUTILISATION DES EAUX USEES, Editions du BRGM - Technique et Documentation, Paris: 208 p.
- [6] División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica UNAM, 1987, NORMAS DE PROYECTO DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO, México, D.F.: 64 p.
- [7] Departamento del Distrito Federal - Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica - Diseños Hidráulicos y Tecnología Ambiental, S.A. de C.V., 1987, ANALISIS DE FACTIBILIDAD TECNICA, ECONOMICA Y OPERACIONAL DE APLICACION DE NORMAS PARA EL REUSO DEL AGUA RESIDUAL TRATADA EN EL DISTRITO FEDERAL, México, D.F.
- [8] Murguía V., E., 1987, EVALUACION, EFECTOS Y SOLUCION DE LA CONTAMINACION DEL AGUA, Ed. del autor, México D.F.: 147 p.
- [9] Tebbutt, T.H.Y., 1990, FUNDAMENTOS DE CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA, Limusa-Noriega, México, D.F.: 641 p.

- [10] Organización Panamericana de la Salud, 1987, GUIAS PARA LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE, Vol. 2, "Criterios Relativos a la Salud y Otra Información de Base", Publicación No. 506, Washington, D.C.: 350 p.
- [11] López P., I., 1989, MODELO EXPERIMENTAL DE CALIDAD PARA TRATAMIENTO AVANZADO DE AGUAS RESIDUALES, Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería UNAM, México, D.F.: 106 p.
- [12] División de Educación Continua - Facultad de Ingeniería - UNAM, 1990, APUNTES DEL CURSO "TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES Y REUSOS", México, D.F.
- [13] Comisión Nacional del Agua - Diseño, Ingeniería y Planeación, S.A. de C.V., 1991, PROYECTO EJECUTIVO DE LOS SISTEMAS DE CAPTACION, CONDUCCION, TRATAMIENTO Y DISPOSICION DE LAS AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN EL AREA METROPOLITANA DE MONTERREY, N.L., México, D.F.
- [14] Contreras M., R., 1985, ASPECTOS RELEVANTES DEL REUSO DEL AGUA EN MEXICO, en apuntes del curso "Tratamiento de Aguas Residuales Municipales, Industriales y Reúso", División de Educación Continua - Facultad de Ingeniería - UNAM, México, D.F.
- [15] Ortiz R., G., CONCEPTOS ORIGINALES RELEVANTES DE LA LEY DE AGUAS NACIONALES, revista INGENIERIA HIDRAULICA EN MEXICO, Vol. VIII, Núm. 1., Epoca 2, Comisión Nacional del Agua, ene.-abr. 1993, México, D.F.: pp. 7-13.
- [16] Bruvold, W.H., 1979, PUBLIC ATTITUDES TOWARD COMMUNITY WASTEWATER RECLAMATION AND REUSE OPTIONS, California Water Resources Center, University of California, Davis, Cal.: 52 p.
- [17] Nordell, E., 1981, TRATAMIENTO DE AGUA PARA LA INDUSTRIA Y OTROS USOS, 2a. Edición, C.E.C.S.A., México, D.F.: 641 p.
- [18] Herrera T., C., 1989, Apuntes de la clase de "Sistemas Hidráulicos", Facultad de Ingeniería - UNAM.
- [19] United States Environmental Protection Agency - Associated Water & Air Resources Engineers, Inc., 1973, HANDBOOK FOR MONITORING INDUSTRIAL WASTEWATER, Washington, D.C.: 176 p.
- [20] Secretaría de Recursos Hidráulicos, INSTRUCTIVO PARA AFORO DE CORRIENTES, México, D.F.: 223 p.

- [21] Figueroa G., R., 1981, INTRODUCCION A LA INGENIERIA DE PROYECTOS, Sistemas de Impresión y Publicidad, México, D.F.: 174 p.
- [22] Coss B., R., 1986, ANALISIS Y EVALUACION DE PROYECTOS DE INVERSION, 2a. Edición, Limusa, México, D.F.: 375 p.
- [23] Palange, R.C., Zavala, A., 1987, WATER POLLUTION CONTROL - GUIDELINES FOR PROJECT PLANNING AND FINANCING, The World Bank Technical Paper No. 73, Washington, D.C.: 211 p.
- [24] Raftelis, G.A., 1989, WATER AND WASTEWATER FINANCE AND PRICING, Lewis Publishers Inc., Chelsea, Mich.: 219 p.
- [25] Organización Panamericana de la Salud, 1986, MODELO DE GERENCIA DE OPERACION Y MANTENIMIENTO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO, Serie Ambiental No. 4, Washington, D.C.: 91 p.
- [26] Murillo F., R., OBRA CIVIL DE PLANTAS DE TRATAMIENTO: FACTORES QUE AFECTAN EL FUNCIONAMIENTO, en revista INGENIERIA AMBIENTAL, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C., Año 4, No. 9, enero 1991, México, D.F.: pp. 6-19.
- [27] Federation of Sewage and Industrial Wastes Associations, 1959, SEWAGE TREATMENT PLANT DESIGN, American Society of Civil Engineers, Manual of Practice No. 8, Washington, D.C.: 375 p.
- [28] Schreiber Corporation - Tecnología y Control de Desperdicios, S.A. de C.V., 1991, MANUAL DE OPERACION Y MANTENIMIENTO PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO MEDIANTE AERACION EXTENDIDA A CONTRACORRIENTE, México, D.F.
- [29] Altamirano P., R., CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AGUA EN MEXICO, en Memorias de la 3a. Mesa Redonda sobre Ingeniería y Medio Ambiente, mayo 1991, Cuadernos Técnicos del Colegio de Ingenieros Civiles de México No. 3, México, D.F.: pp. 35-60.
- [30] Diario Oficial de la Federación, jueves 5 de diciembre de 1991, Secretaría de Recursos Hidráulicos, PROGRAMA NACIONAL DE APROVECHAMIENTO DEL AGUA 1991-1994.

- [31] Navarro, I., Rosales, F., Becerril, E. y Jiménez, B., **FACTIBILIDAD DE EMPLEO DE AGUA RESIDUAL DOMESTICA EN LA INDUSTRIA MEXICANA**, en Memorias del Seminario Internacional sobre Uso Eficiente del Agua, 1992, Comisión Nacional del Agua - Instituto Mexicano de Tecnología del Agua - Asociación Internacional de Recursos Hidráulicos, México, D.F.: pp. 874-881.
- [32] Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología- Comisión Nacional del Agua- Departamento del Distrito Federal- Comisión Estatal de Agua y Saneamiento- Societé Anónyme Française d'Etudes et de Gestion- Societé Générale de Techniques et d'Etudes- Ingénieurs Conseils - Diseño, Ingeniería y Planeación, S.A de C.V., 1991, **ESTUDIOS ESPECIFICOS PARA EL TRATAMIENTO Y REUSO DE LAS AGUAS NEGRAS DEL AREA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO**, Informe de la Cuarta Etapa, México, D.F.
- [33] Flores, A., **EL AGUA EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO**, en World Media, suplemento especial del periódico La Jornada, 8 de agosto de 1992, México, D.F.: pp. 5-6.
- [34] Comisión Nacional del Agua - Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial - Gerencia de Tratamiento de Aguas, 1993, **INVENTARIO NACIONAL DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES** (consulta directa, por atención del Ing. Agustín Luna Duhart).
- [35] Diario Oficial de la Federación, 1o. de marzo de 1988, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, **LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE**.
- [36] Diario Oficial de la Federación, 12 de enero de 1994, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, **REGLAMENTO DE LA LEY DE AGUAS NACIONALES**.
- [37] Comisión Nacional del Agua, 1992. **LEY FEDERAL DE DERECHOS EN MATERIA DE AGUA**.