

En el presente documento se encuentran paginas ilegibles por mal estado del documento original.

*Monografías de la Secretaría de Estado
para las Políticas del Agua
y el Medio Ambiente*

*Depuración por lagunaje
de aguas residuales.
Manual de operadores*

MOP
Ministerio de Obras Públicas y Transportes

Presentación

Uno de los objetivos prioritarios de la política y gestión ambiental tanto en el contexto comunitario como en el ámbito interno español, es la total depuración de las aguas residuales urbanas.

En el Consejo de Ministros de Medio Ambiente de la CEE, celebrado en Bruselas el 18 de marzo del presente año 1991, quedó aprobada la directiva sobre el tratamiento de este tipo de aguas, para cuyo cumplimiento será necesario un especial esfuerzo de todas las administraciones, ya que todos los municipios de más de 15.000 habitantes antes del año 2000 y todos los mayores de 2.000 habitantes antes del 2005 deberán contar con depuración de sus aguas residuales, al menos con nivel secundario.

No es casual, pues, que en la última Conferencia Sectorial de Medio Ambiente, los responsables a nivel ministerial de las Comunidades Autónomas y de la Administración Central del Estado establezcan como objetivo común e inmediato de la política ambiental en España, la depuración de aguas a través de los correspondientes Planes de Saneamiento Integral y Depuración promovidos desde los organismos autónomos.

El manual que ahora presentamos, constituirá un instrumento útil de trabajo para la gestión de sistemas de depuración de bajo coste, que son los de mayor aplicación en nuestros pequeños municipios con vistas a afrontar el reto planteado.

Madrid, junio 1991
Domingo Fereiro Picado
Secretario General de Medio Ambiente

Índice

	Páginas
1. CONSIDERACIONES BASICAS	11
Introducción y objetivos	11
Necesidad de depurar las aguas residuales	11
Organización de este manual	12
PARTE I. Características de las aguas residuales. Fundamentos de la depuración por lagunaje y distintos tipos de lagunas	
2. AGUAS RESIDUALES	15
Introducción	15
¿Qué es el agua residual urbana?	16
Características de las aguas residuales urbanas	16
Caudal	16
Características físicas	18
* <i>Temperatura</i>	18
* <i>Olor</i>	19

* <i>Coliformos</i>	19
* <i>Streptococos</i>	19
* <i>Conductividad</i>	20
Características químicas	21
* <i>Materia orgánica</i>	21
* <i>Materia inorgánica</i>	22
Características biológicas	24
<i>Bacterias</i>	24
* <i>Protozoos</i>	25
* <i>Viruses</i>	25
Composición del agua residual urbana	25
Aguas residuales industriales	26
3. LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	29
Introducción	29
Desarrollo histórico del lagunaje	29
Extensión actual del lagunaje	30
Ventajas e inconvenientes del tratamiento del agua residual por lagunaje	31
Tipos de lagunas de estabilización	35
4. PRETRATAMIENTO	39
Introducción	39
Medidores de caudal	39
Caudal Parshall	40
Vertederos	42
* <i>Vertedero rectangular</i>	43
* <i>Vertedero triangular</i>	43
* <i>Vertedero trapecoidal o Cipolatti</i>	45
Medidores de caudal en líneas a presión	45
Aplicaciones	46
Desbaste, rejas y tamices	46
Desarenadores	49

Camaras de grasa	51
5. LAGUNAS ANAEROBIAS	55
Introducción	55
Fundamentos de la depuración en lagunas anaerobias	55
Condiciones operativas de las lagunas anaerobias	57
Morfología de las lagunas anaerobias	59
Profundidad y tamaño	59
Tiempo de retención	62
Recirculación	62
Formación de espumas en superficie	62
Carga orgánica	62
Otras consideraciones	63
6. LAGUNAS FACULTATIVAS	65
Introducción	65
Fundamentos de la depuración en lagunas facultativas	65
Factores que afectan a la depuración en lagunas facultativas	68
Factores climáticos	68
<i>Temperatura</i>	68
<i>Radiación solar</i>	69
<i>Viento</i>	69
<i>Evaporación</i>	70
<i>Precipitación</i>	71
Factores físicos	71
<i>Estratificación</i>	71
<i>Flujo a través de las lagunas</i>	72
<i>Profundidad</i>	73
Factores químicos y bioquímicos	74
<i>pH</i>	74
<i>Oxígeno disuelto</i>	74
<i>Nutrientes</i>	74
<i>Sedimentos</i>	79
Seres vivos en las lagunas facultativas	80

Bacterias	80
Algas	82
Hongos (molho) y levaduras	84
Protozoos	85
Insectos, copépodos, rotíferos y cladoceros	88
7. LAGUNAS DE MADURACION	89
Introducción	89
Tratamiento en lagunas de maduración	89
Eliminación de patógenos	90
Nitrificación	92
Reducción de nutrientes	93
8. DISEÑO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACION	95
Introducción	95
Diseño de lagunas anaerobias	96
Diseño de lagunas facultativas	98
Métodos empíricos	99
Métodos racionales	101
Diseño de lagunas de maduración	104
 PARTE II. Puesta en marcha, mantenimiento y control de las lagunas de estabilización	
9. MANTENIMIENTO DE LAS PLANTAS	109
Introducción	109
Puesta en marcha de las lagunas de estabilización	110
Lagunas anaerobias	110
Lagunas facultativas	111
Lagunas de maduración	111
Cuidado de la obra civil	112
Limpieza del área de pretratamiento	112

Limpieza de los medidores de caudal	114
Limpieza de coraductores - argueros de repartes	115
Mantenimiento de taludes	116
Mantenimiento de caminos, verjas y otros elementos de la planta depuradora	117
Retirada de los hongos de las lagunas anaerobias	117
Limpieza de los hongos acumulados en lagunas facultativas	118
Medidas higiénicas	119
10. CONTROL ANALÍTICO; MUESTREOS Y DETERMINACIONES	121
Introducción	121
Descripción física de las lagunas de estabilización	122
Muestreos; metodología	124
Tipos de muestras	124
Frecuencia de los muestreos	126
Medidas de caudal	126
Control operativo de las lagunas: inspección diaria	127
Determinaciones analíticas en lagunas	129
Análisis y presentación de resultados	135
Media aritmética	135
Intervalo de variación	137
Varianza y desviación típica	137
Mediana y modo	139
Cálculo del rendimiento	139
Gráficos	140
<i>Gráficos de barras</i>	140
<i>Gráfico de líneas</i>	141
PARTE III. Problemas operativos de las lagunas de estabilización	
11. PROBLEMAS DE FUNCIONAMIENTO Y SOLUCIONES	151

Introducción	151
Indicadores de buen funcionamiento en lagunas anaerobias	151
Problemas de funcionamiento en lagunas anaerobias	152
Aparición de malos olores	154
Aparición de coloraciones rosa o rojo en las lagunas	154
Desarrollo de mosquitos y otros insectos	154
Crecimiento de malas hierbas y plantas acuáticas	154
Signos visibles de buen funcionamiento de las lagunas facultativas y de maduración	155
Problemas de funcionamiento en lagunas facultativas y de maduración	155
Acumulación de materias flotantes	155
Olores desagradables	156
Cortocircuitos o caminos preferenciales	159
Crecimiento de malas hierbas y plantas acuáticas	159
Desarrollo de mosquitos y otros insectos	161
BIBLIOGRAFIA	165

1. Consideraciones básicas

INTRODUCCION Y OBJETIVOS

Durante los últimos años se viene ejerciendo por la población española una demanda creciente de mejora de nuestro medio ambiente. Para dar respuesta a esta exigencia es necesario adoptar una serie de medidas anticontaminantes en todas las áreas.

En el campo del tratamiento de aguas residuales se han desarrollado nuevas tecnologías de depuración que permiten aunar una buena calidad de los efluentes tratados y unos costes razonables de tratamiento.

Entre las técnicas de bajo coste utilizadas, la que ha conseguido mayor implantación es el lagunaje. Las lagunas de estabilización han pasado en pocos años a convertirse en la elección prioritaria, de modo que en la actualidad existen alrededor de cien plantas depuradoras por lagunaje en operación o construcción en España y se prevé un considerable aumento en el futuro. Por consiguiente, es de suma importancia contar con operadores que entiendan los procesos responsables de la depuración en las lagunas y sepan tomar a tiempo las medidas necesarias para garantizar el buen funcionamiento de la planta.

El mantenimiento de las lagunas de estabilización es muy sencillo, pero indispensable para evitar algunos problemas que se han ido detectando en los seguimientos realizados hasta la fecha. Este manual pretende servir de guía al operador de lagunas de estabilización, y familiarizarle con los principios de la depuración por lagunaje, el diseño de lagunas, su mantenimiento, y el diagnóstico y corrección de problemas de funcionamiento.

NECESIDAD DE DEPURAR LAS AGUAS RESIDUALES

La depuración de aguas residuales tiene dos finalidades básicas:



Fig. 1.1. — Lagunas de estabilización de El Moral de Calatrava (Ciudad Real), antes de su puesta en marcha.

- a) — Prevenir la transmisión de enfermedades por vía hídrica.
- b) — Evitar la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

Además de estas dos finalidades fundamentales, el tratamiento de aguas residuales puede enfocarse desde el punto de vista de la recuperación de un recurso renovable y escaso como es el agua. La reutilización en riegos del agua residual tratada es una práctica común en muchas regiones. En estos casos es especialmente importante llevar a cabo un tratamiento de depuración que garantice la inexistencia de riesgos higiénicos para la población expuesta a estas aguas, bien directamente o a través de los productos agrícolas generados.

ORGANIZACIÓN DE ESTE MANUAL

Este manual para operadores de plantas de tratamiento de aguas residuales por lagunas consta de tres partes:

- I. — Memoria en la que se explican las características de las aguas residuales, los fundamentos de la depuración por lagunas, los distintos tipos de lagunas y los procedimientos más utilizados para su diseño. Esta parte está compuesta por los capítulos 2-8.
- II. — Descripción de las actividades necesarias para la puesta en marcha, mantenimiento y control de las lagunas de estabilización. Esta sección consta de dos capítulos: 9 y 10.
- III. — Exposición de los problemas operativos más frecuentes, sus síntomas, causas y soluciones, que se describen en el capítulo 11.

**Original en
mal estado**

PARTE I
CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS
RESIDUALES. FUNDAMENTOS
DE LA DEPURACION POR LAGUNAJE
Y DISTINTOS TIPOS DE LAGUNAS

2. Aguas residuales

INTRODUCCION

Las aguas residuales son el resultado de la utilización del agua para distintos fines. Como consecuencia de este uso, el agua recoge materias en suspensión y disueltas que alteran sus propiedades. Dependiendo del tipo de utilización, las aguas residuales presentan características muy diferentes. En especial, existe una gran diferencia entre las aguas residuales urbanas o domésticas, originadas en el uso del agua en las casas, y las aguas residuales industriales, provenientes de instalaciones fabriles. Entre estas últimas la diversidad es muy acusada, ya que la alteración de propiedades del agua resultante del uso industrial puede variar entre contaminación puramente física (como ocurre en la contaminación térmica que presentan las aguas de refrigeración) hasta contaminación bioquímica de gran complejidad (aguas que reciben efluentes de industrias farmacéuticas o químicas).

Cualquiera que sea su procedencia, las aguas residuales plantean una amenaza para el medio ambiente, ya que modifican las características iniciales del medio natural donde se produce su descarga. La importancia de esta amenaza depende de sus propiedades, es decir, su composición y cantidad. Por tanto, antes de escoger un método de tratamiento, el primer paso consiste en averiguar lo más exactamente posible todas las características del agua residual a tratar.

En el caso de las lagunas de estabilización, las aguas residuales son en su práctica totalidad de tipo urbano. Esto se debe a que, como veremos más adelante, el lagunaje es un método biológico de tratamiento sensible a la presencia de tóxicos originados en algunas actividades industriales. Por tanto, en este capítulo nos centraremos en la descripción de las propiedades y características del agua residual urbana, que va a constituir nuestra materia prima en las instalaciones de depuración por lagu-

naje. Al final del capítulo estudiaremos algunos vertidos industriales muy comunes, que provienen de instalaciones situadas en el casco urbano y, por tanto, suelen alcanzar a las lagunas de estabilización.

¿QUE ES EL AGUA RESIDUAL URBANA?

El agua potable suministrada por las redes municipales no es agua químicamente pura, sino que contiene sustancias en disolución en pequeñas cantidades. Entre estas sustancias, las más importantes son algunos gases, como el oxígeno y nitrógeno, y compuestos inorgánicos que el agua ha disuelto, tanto durante su período de estancia en el medio natural del que proviene (embalse, río o acuífero) como una vez producida su captación por parte del hombre para incorporarla a la red de agua potable.

Esto se debe a que el agua es una sustancia con gran poder de disolución, por lo que en su tránsito por distintos puntos va incorporando nuevas materias disueltas. Antes que el agua sea utilizada como agua potable es necesario realizar análisis que demuestren que los niveles de impurezas no resultan perjudiciales para la salud de los usuarios. Con esta finalidad, también se lleva a cabo la cloración de las aguas, operación que asegura que éstas no van a contener microorganismos que puedan ocasionar enfermedades.

Como consecuencia del uso del agua potable en las casas, se incorporan a ésta una serie de sustancias y se genera lo que llamamos aguas residuales urbanas o domésticas. Los focos principales de la contaminación del agua resultante son los procesos de lavado (baños, lavabos, lavadoras, fregaplatos, etc.), y el agua proveniente de los inodoros. Estas actividades provocan una contaminación de tipo físico, químico y biológico.

Para determinar el poder contaminante del agua residual urbana hay que medir una serie de características de ésta que permitan establecer cuantitativamente su impacto en el medio ambiente y la necesidad de tratamiento.

CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS

Caudal

Uno de los datos fundamentales a la hora de proyectar una planta de tratamiento es la cantidad de vertido por unidad de tiempo que va a llegar a la instalación. Esta cantidad o caudal depende de la población servida por la planta de tratamiento y de las costumbres en relación al uso de agua. Por ejemplo, para la misma población se observa que la cantidad de agua utilizada por día es mayor en pueblos que no tienen instalado un sistema de contadores individualizado.

El caudal del agua residual suele estimarse en función del caudal de agua potable suministrado a la red por los servicios municipales. Para hacer esta estimación se tiene en cuenta que existen una serie de pérdidas que provocan que el caudal de aguas residuales generado sea inferior al de agua potable suministrada. Estas pérdidas se deben, fundamentalmente, al estado de la red. Cuando ésta se encuentra en mal estado se producen infiltraciones importantes en el subsuelo. Otras posibles

pérdidas se deben a usos del agua en los que no se produce su reincorporación al alcantarillado, como ocurre en los riegos. Por tanto, la fracción de agua facturada por el municipio que llega a la planta de tratamiento varía de pueblo a pueblo en función del estado de la red y del uso del agua por la población. En general, se considera que un 60-80 % del agua potable se transformará en agua residual (Metcalf-Eddy, 1979).

Por otra parte, la red de alcantarillado puede disponer o no de sistemas que permitan separar las aguas de lluvia de las aguas residuales. En el primer caso, la red se llama separativa, ya que las aguas pluviales se incorporan a distintas conducciones y, en consecuencia, nunca llegan a la planta de tratamiento de residuales. En el segundo caso, la red se llama unitaria. Esta diferencia es muy importante cuando se proyecta la planta depuradora, puesto que para las redes unitarias durante los períodos lluviosos hay un aumento de caudal a tratar acompañado por una reducción en la carga orgánica por unidad de volumen, es decir, una dilución del agua residual ocasionada por la incorporación a ésta del agua de lluvia. En consecuencia, la instalación debe tener la capacidad para encajar tanto la punta de caudal como el efecto de dilución del agua residual.

TABLA 2.1
Tipos de redes de alcantarillado

Unitaria.	El agua de lluvia se mezcla con el agua residual.
Separativa.	El agua de lluvia va a conducciones separadas y no se mezcla con el agua residual.

Otro aspecto muy importante en el proyecto de una planta depuradora es la estacionalidad del caudal, es decir, si la cantidad de agua residual que llega a la planta por día es la misma durante todo el año o varía de una época a otra. Estas variaciones son especialmente acusadas en zonas turísticas, donde la población pasa de unos pocos miles en el invierno hasta cientos de miles en el verano. En estos casos hay que tomar medidas especiales en el mantenimiento de la planta, como veremos en el capítulo 9.

Además de estas variaciones estacionales, que pueden o no presentarse dependiendo de la zona, el caudal presenta siempre variaciones diarias, ya que el uso es mucho menor durante la noche y es máximo en la parte central del día. Si medimos el caudal que llega a la planta durante un día completo y representamos los datos obtenidos en función de la hora del día, nos encontraremos con un diagrama similar al de la figura 2.1. La forma de la curva varía ligeramente de una población a otra, y cuanto mayor es la población es más uniforme, ya que las variaciones se amortiguan a medida que aumenta la diversidad de actividades en la zona. También se pueden hacer representaciones parecidas que nos informen sobre las variaciones de caudal diario durante un año (figura 2.2). Ambos diagramas tienen una gran utilidad para el operario de las plantas, porque permiten conocer mejor la cantidad de agua residual a tratar en cualquier momento y planificar el mantenimiento de acuerdo con esta información. Como veremos en el capítulo 10, dedicado a la toma de muestras, la curva de variación diaria tiene gran interés para seleccionar las horas a las que se debe muestrear el agua residual.

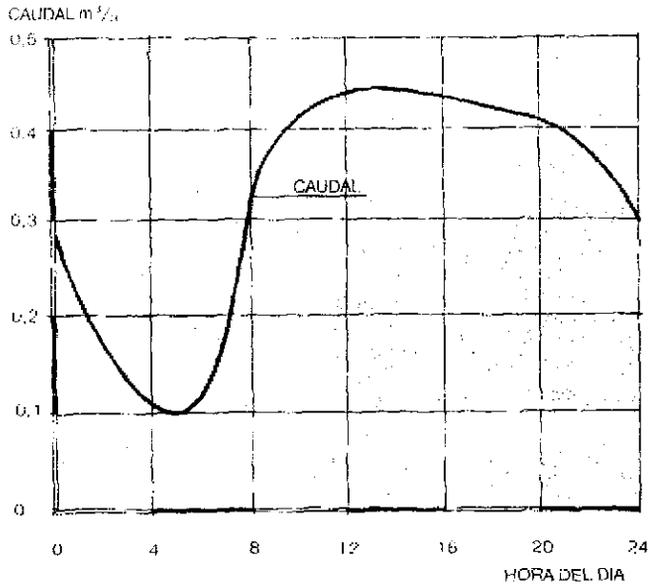


FIGURA 2.1
Variación del caudal a lo largo del día

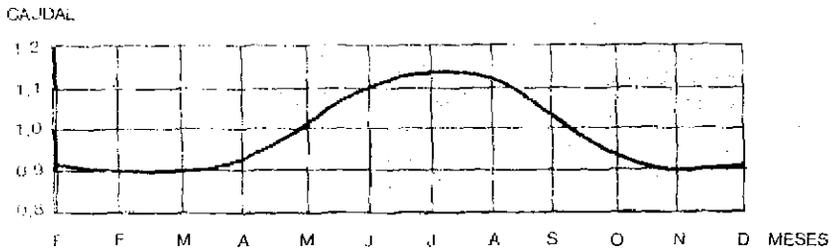


FIGURA 2.2
Variación del caudal medio diario durante el año

Características físicas

- *Temperatura*

El agua residual urbana presenta una temperatura bastante uniforme a lo largo del año. Aunque hay pequeñas diferencias entre poblaciones, la temperatura suele ser de unos 15° C durante el invierno y 20° C durante el verano. Por supuesto, cuanto mayor sea la distancia que el agua residual debe recorrer entre la población y la planta de tratamiento, más se parecerá la temperatura de entrada a la temperatura ambiente. El agua residual urbana está normalmente algo más caliente

que el agua de suministro, debido al efecto de los calentadores domésticos de agua.

Durante el invierno, la temperatura del agua residual a la entrada de la planta de tratamiento suele ser superior a la temperatura en las lagunas de estabilización. Estas diferencias de temperatura representan en invierno una ayuda para las primeras lagunas de tratamiento, normalmente las lagunas anaerobias, ya que a mayores temperaturas son más activos los microorganismos.

• *Olor*

El agua residual urbana no debe presentar olores desagradables. Para ello es necesario que llegue a la planta de tratamiento en condiciones no sépticas, es decir, que no se hayan iniciado procesos de putrefacción durante el recorrido entre la población y la depuradora. Esto se consigue evitando en lo posible grandes distancias y tiempos de transporte del agua residual.

• *Color*

El color del agua residual fresca es gris, con sólidos en suspensión o flotantes fácilmente reconocibles. Si se deja pasar un tiempo excesivo entre la generación del agua residual y su tratamiento, el color pasa a ser negro y los sólidos se hacen menos distinguibles. En estas condiciones se dice que el agua residual está séptica, y surgen también problemas de olores.

• *Sólidos*

Uno de los objetivos fundamentales de las depuradoras es la eliminación de los sólidos contenidos por el agua residual. Estos sólidos son de varios tipos:

- Sólidos totales: Si tomamos una muestra del agua residual, evaporamos toda el agua y pesamos el residuo seco resultante, obtendremos los sólidos totales contenidos en el agua de partida. Por tanto, esta medida nos da la cantidad total de sólidos presentes, independientemente de su naturaleza y de la forma en la que se encuentren en el agua. Para hacer estas distinciones necesitamos introducir otras definiciones.
- Sólidos disueltos: Son aquellos que atraviesan los filtros cuando se toma una muestra de agua residual y se hace pasar a través de un filtro muy fino.
- Sólidos en suspensión o filtrables: Son los sólidos que quedan retenidos por el filtro.
- Sólidos sedimentables: Es la fracción de sólidos en suspensión capaz de separarse del agua residual por sedimentación. Esta medida tiene interés en el cálculo de sedimentadores y en las lagunas anaerobias.
- Sólidos no sedimentables: Es el resto de los sólidos en suspensión, que no se separan por sedimentación. La diferencia entre el comportamiento de los sólidos

sedimentables y no sedimentables se debe al tamaño, forma y peso de las partículas sólidas

Por tanto, la suma de sólidos sedimentables y no sedimentables nos da el total de sólidos en suspensión. La suma de sólidos en suspensión y sólidos disueltos nos da los sólidos totales presentes en el agua residual. Estas relaciones se explican en la figura 2.3.

Además de esta clasificación, es importante la distinción entre sólidos inorgánicos y orgánicos. Los sólidos orgánicos pueden ser utilizados como alimento por las bacterias, que de esta forma los estabilizan durante el proceso de depuración. Por consiguiente, la medida de los sólidos orgánicos da una idea de la tratabilidad biológica del agua. Por otra parte, los sólidos inorgánicos son sustancias minerales, y algunas de ellas son utilizadas también por los microorganismos. La suma de sólidos orgánicos e inorgánicos nos da los sólidos totales presentes en el agua. Por tanto, esta clasificación es completamente independiente de la anterior, y cualquiera de las categorías definidas en aquella puede estar integrada por sólidos orgánicos y/o inorgánicos

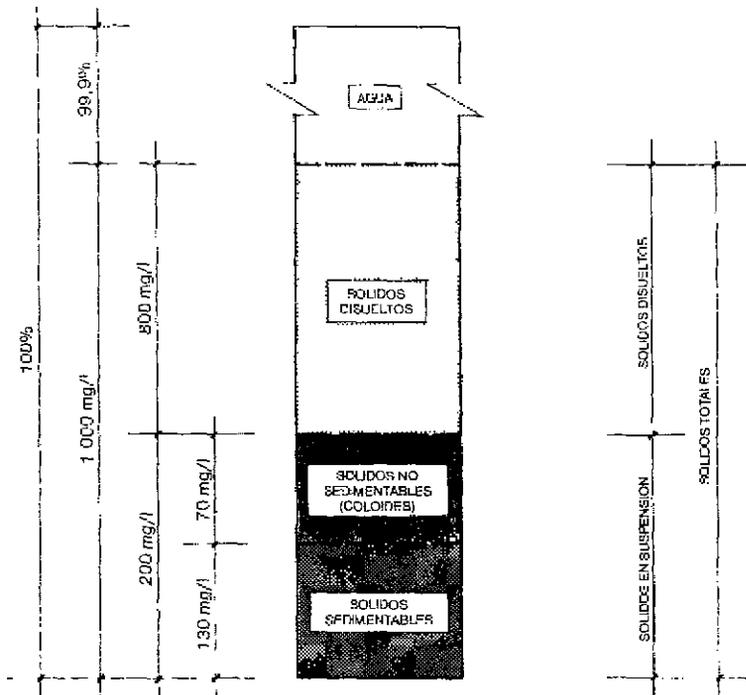


FIGURA 2.3
Tipos de sólidos en el agua residual

• Conductividad

Esta medida indica la facilidad con la que la corriente eléctrica pasa a través del agua residual. Puesto que el agua pura es muy mala conductora de la corriente eléctrica,

las conductividades elevadas indican la presencia de impurezas, y más concretamente de sales disueltas. Como resultado del uso doméstico del agua la conductividad aumenta, y se sitúa normalmente en el intervalo 1 000-2 000 μ Siemens/cm. La medida de la conductividad resulta muy útil para detectar descargas procedentes de algunas industrias alimentarias y químicas, o infiltraciones de agua del mar en zonas costeras. Además, la conductividad informa sobre la posibilidad de usar el agua residual tratada para riegos, ya que muchas plantas son sensibles al contenido en sales disueltas, y la exposición del terreno a riegos prolongados con aguas muy conductoras puede dar lugar a su inutilización como terreno de cultivo.

Características químicas

• *Materia orgánica*

El objetivo más importante del tratamiento de aguas residuales urbanas es la eliminación de la materia orgánica. Cuando se vierte directamente al medio ambiente el agua residual sin depurar la materia orgánica que ésta contiene es responsable de la degradación que se aprecia en las corrientes de agua receptoras. Puesto que la mayor parte de la materia orgánica que contiene el agua residual urbana es biodegradable, los microorganismos la utilizan como alimento para lo cual necesitan consumir oxígeno. Este gas es moderadamente soluble en agua, y cuando se consume rápidamente en esta degradación de la materia orgánica su concentración disminuye hasta alcanzar niveles de anaerobiosis, es decir, ausencia de oxígeno disuelto.

En estas condiciones aparecen olores desagradables, las aguas toman una coloración gris o negra y no hay posibilidad de supervivencia para organismos superiores como los peces. De hecho, con el vertido incontrolado de aguas residuales sin tratar se produce la muerte del medio acuático afectado, y en la mayoría de los casos este efecto se debe a la gran cantidad de materia orgánica aportada, que dicho medio no tiene capacidad para encajar.

Por tanto, la característica más importante del agua residual urbana es su contenido en materia orgánica. Esta materia puede tener origen vegetal o animal, y normalmente se aporta al agua como productos de desecho de la actividad humana.

Dentro de la materia orgánica se puede distinguir entre distintos tipos de compuestos, más o menos complejos, y cuya degradación biológica requiere un tiempo más o menos largo. Sin embargo, desde el punto de vista de la depuración se suele evitar el estudio pormenorizado de los componentes de la materia orgánica, y se utiliza en lugar de éste unas medidas que dan una idea acerca del oxígeno necesario para su estabilización. Las medidas más extendidas de materia orgánica son la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno, que vamos a definir a continuación.

- Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO₅). Esta medida representa la cantidad de oxígeno necesaria para estabilizar biológicamente la materia orgánica contenida en una muestra de agua, incubada durante cinco días a 20° C. Con esta medida se pretende reproducir el consumo de oxígeno en un medio natural, como podría ser un río, ocasionado por el vertido de agua residual. La

temperatura del ensayo es de 20° C, y su duración corresponde a una estabilización del 60-70 por 100 de la materia orgánica.

Los métodos más utilizados para la medida de la DBO₅ son: 1) el método de dilución, y 2) los biómetros. Aunque la DBO₅ es, sin duda, la medida más extendida para la estimación de la contaminación por materia orgánica, tiene una serie de problemas que conviene tener en cuenta a la hora de interpretar los resultados obtenidos en los análisis de aguas residuales. Los problemas más importantes son los siguientes:

1. Puesto que el consumo de oxígeno se lleva a cabo por bacterias, si el agua residual contiene cualquier tipo de tóxico que inhiba su actividad o provoque su muerte, los resultados del ensayo de la DBO no serán correctos.

2. En ocasiones, es necesario un tiempo de aclimatación de las bacterias al agua residual antes de que comience la estabilización de la materia orgánica y, por tanto, el consumo de oxígeno. Si esto ocurre, el consumo medido al cabo de cinco días dará valores inferiores a los reales para la necesidad de oxígeno disuelto en la estabilización de la muestra.

3. El tiempo de incubación de cinco días se justifica en base a la estabilización de la materia orgánica soluble en este tiempo. Sin embargo, ésta varía profundamente entre distintos tipos de vertidos. De hecho, el período de incubación de cinco días se fijó inicialmente por el organismo que introdujo el ensayo de la DBO₅ (British Royal Commission of Sewage Disposal) debido a que el tiempo de recorrido del agua en los ríos británicos es menor de cinco días (Metcalf-Eddy, 1979).

Por tanto, conviene interpretar cuidadosamente los resultados de la DBO₅ y, sobre todo, complementarlos con otra medida más fiable y reproducible como puede ser la demanda química de oxígeno.

Demanda química de oxígeno. Con esta medida se estima el oxígeno necesario para oxidar químicamente la materia orgánica contenida en el agua. Puesto que por medios químicos la oxidación de la materia orgánica es más completa, el valor de la DQO es mayor que el de la DBO₅. Es posible establecer relaciones entre DBO₅ y DQO para distintos tipos de aguas residuales, por lo que a veces se sustituye una medida por la otra. Para aguas residuales urbanas no tratadas, la relación aproximada entre DBO₅ y DQO es la siguiente:

$$DBO_5/DQO = 0,5$$

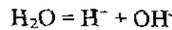
es decir, la DQO es aproximadamente el doble de la DBO₅. Las mayores ventajas de la DQO en relación con la DBO₅ son la rapidez del ensayo (dos horas en lugar de cinco días) y la mayor fiabilidad y reproducibilidad de la técnica de medida.

● *Materia inorgánica*

Además de la materia orgánica, el agua residual urbana contiene especies inorgánicas que también tienen gran repercusión en su tratabilidad por métodos biológicos. Muchas de las medidas de estas especies se manejan frecuentemente en las plantas depuradoras porque dan una buena idea sobre la marcha del proceso, o

porque conviene eliminarlas durante el tratamiento para evitar problemas de contaminación en los cursos de agua receptores. A continuación veremos algunas de las más importantes.

- Oxígeno disuelto. El oxígeno disuelto es crucial para la buena marcha de una planta de tratamiento. Los microorganismos responsables de la depuración son diferentes según el medio contenga o no oxígeno disuelto, y su presencia es decisiva en las lagunas facultativas y de maduración. La estabilización de la materia orgánica requiere un aporte de oxígeno disuelto. Cuando el consumo excede al aporte de oxígeno, el agua está en condiciones anaerobias y se pueden producir problemas de olores, el proceso de depuración transcurre más lentamente y, en definitiva, la depuradora deja de funcionar correctamente.
- pH. Como veíamos antes, el agua pura es la asociación química de hidrógeno y oxígeno, que se unen en una proporción de dos a uno para formar la molécula de agua, H_2O . Una de las características de esta molécula es su capacidad para disociarse, es decir, separarse en dos partes con cargas eléctricas de distinto signo:



Estas dos partes que tienen cargas eléctricas se llaman iones, concretamente ión hidrógeno e ión hidroxilo, respectivamente. El pH es una medida de la concentración de iones hidrógeno en el agua. Para agua pura, el pH vale siete. Los valores de pH inferiores a siete indican que el agua tiene carácter ácido, y los superiores que el agua tiene carácter básico. La escala completa de pH va de 0 a 14, como puede verse en la figura 2.4.

La medida del pH por sí misma no indica si el agua posee impurezas, ya que un agua residual puede estar muy cargada y tener un pH neutro (que es como se llama al $pH = 7$). Sin embargo, el pH es muy importante para determinar la tratabilidad biológica del agua, ya que los microorganismos presentan una tolerancia muy pequeña para los cambios de pH. Normalmente, el margen de pH adecuado para el tratamiento biológico es de 6-9. Por encima y por debajo de estos límites hay dificultades para la adaptación de los microorganismos. Como veremos más adelante, el pH suministra también una información muy valiosa sobre la marcha de las plantas de depuración por lagunaje.

- Nutrientes. Se llaman así las especies químicas utilizadas como alimento en el desarrollo de los microorganismos. Aunque los nutrientes abarcan un gran número de especies que los microorganismos necesitan en poca cantidad, el nombre

ESCALA PH

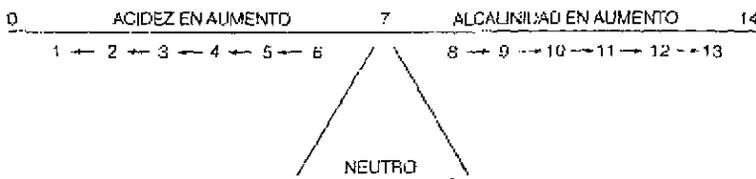


FIGURA 2.4

se utiliza casi siempre para indicar a las distintas formas de nitrógeno y fósforo, que son los que se necesitan en mayores cantidades. El agua residual urbana contiene concentraciones bastante altas, tanto de nitrógeno como de fósforo. Este hecho permite su tratamiento biológico sin necesidad de ajustar la composición de la alimentación a la entrada en la depuradora, pero al mismo tiempo da lugar a problemas a la salida de la planta, ya que los nutrientes estimulan el crecimiento de microorganismos en los cursos de agua receptores.

Los dos nutrientes principales, nitrógeno y fósforo, pueden encontrarse en el agua residual en las formas siguientes:

Nitrógeno: El nitrógeno se encuentra presente en el agua residual en forma orgánica, y en forma inorgánica como amoníaco, nitratos y nitratos. Estas distintas formas están relacionadas entre sí en lo que se conoce como ciclo del nitrógeno, que estudiaremos con detalle en el capítulo 6.

Fósforo: También se encuentra en el agua residual en forma orgánica e inorgánica. Entre las formas inorgánicas la más importante es el fósforo soluble (ortofosfatos), que resulta directamente utilizable por los microorganismos. Como ocurre con el nitrógeno, las distintas formas del fósforo son interconvertibles, dando así lugar al ciclo del fósforo, que también estudiaremos en otro capítulo.

Otro elemento químico necesario para el desarrollo de microorganismos, aunque en menor concentración, es el azufre. Este está presente en el agua residual en forma orgánica, y en forma inorgánica como sulfatos, sulfatos y sulfuros. Los compuestos de azufre son responsables de muchos de los olores desagradables que se producen cuando el agua residual está en condiciones anaerobias (en ausencia de oxígeno disuelto). Por ejemplo, el olor a huevos podridos se debe a la generación de sulfuro de hidrógeno, y otros compuestos de azufre como los mercaptanos también provocan olores incluso peores que el del sulfuro de hidrógeno.

Características biológicas

El agua residual urbana contiene microorganismos de muchas clases, algunos de ellos muy perjudiciales para la salud por ser causantes de enfermedades. Los tipos de microorganismos más abundantes en el agua residual son bacterias, protozoos y virus.

• Bacterias

Las bacterias son microorganismos unicelulares que se multiplican por escisión celular, es decir, dividiéndose en dos partes. Cuando se miran al microscopio se observa que tienen distintas formas, entre las cuales la de palito es la más frecuente (bacilos).

Según cuál sea su fuente de alimentación, las bacterias pueden ser autótrofas (pueden crecer en medios completamente inorgánicos) o heterótrofas (dependen de compuestos orgánicos para alimentarse). Aunque cuando hablemos del lagunaje veremos algunos ejemplos de bacterias autótrofas, en el agua residual y en el tratamiento biológico de ésta las bacterias más importantes son heterótrofas.

Otra importante distinción entre bacterias viene dada por su necesidad de oxígeno disuelto. Se llaman bacterias anaerobias aquellas que no pueden vivir en presencia de oxígeno, y bacterias aerobias a las que no pueden vivir en ausencia de oxígeno. Por último, las bacterias facultativas son las que se adaptan a la presencia o ausencia del oxígeno, y viven tanto en medio aerobio como anaerobio.

Entre las bacterias presentes en el agua residual urbana, aquellas a las que hay que prestar mayor atención son las bacterias patógenas o causantes de enfermedades. Las enfermedades más frecuentes ocasionadas por estas bacterias son el cólera, la disentería y el tífus, entre otras. Cada una de estas enfermedades está causada por un tipo distinto de bacterias. Dado que el tiempo y esfuerzo necesario para identificar cada una de las especies bacterianas presentes en el agua residual es muy elevado, normalmente se determinan otras especies no patógenas, fáciles de identificar, y que dan una idea de la importancia de la contaminación fecal del agua residual. Las bacterias que suelen utilizarse con este fin son los coliformes totales y fecales, y los estreptococos fecales.

Los coliformes son bacterias presentes en gran número en las heces. Una persona adulta viene a excretar unos 2.000.000.000 de bacterias coliformes al día. Hay dos tipos de coliformes, fecales y no fecales. La presencia en el agua residual de coliformes fecales indica, sin ninguna duda, que el agua presenta contaminación fecal y, por tanto, puede contener también bacterias patógenas. Por otra parte, el número de coliformes y su reducción a lo largo del tratamiento por lagunaje indica la calidad general del agua desde el punto de vista bacteriológico.

Los estreptococos fecales se determinan para averiguar si el origen de la contaminación fecal es humano o animal. Esto se debe a que la proporción de coliformes fecales/estreptococos fecales es distinta para el hombre y otros animales. Por lo demás, la información suministrada por la medida de estreptococos fecales y coliformes fecales es muy similar.

● *Protozoos*

Los protozoos son microorganismos unicelulares, que se consideran la base del reino animal. Algunos de los protozoos presentes en el agua residual son patógenos, como la ameba que provoca la disentería. Los protozoos pueden resultar útiles en el tratamiento del agua residual, ya que se alimentan de bacterias y contribuyen así a la purificación del efluente.

● *Virus*

Los virus son la forma de vida más simple que se conoce. Son parásitos obligados, lo que quiere decir que dependen de otros seres vivos, a los que infectan y utilizan para su reproducción. Muchos de ellos provocan enfermedades en el hombre, entre ellas la poliomielitis y hepatitis. Estas enfermedades pueden transmitirse por medio del agua.

COMPOSICIÓN DEL AGUA RESIDUAL URBANA

La composición del agua residual indica su contenido en los distintos constituyentes que hemos visto en los apartados anteriores. Cuanto más completos son los análisis

efectuados sobre una muestra de agua residual, más fácil resulta proyectar la planta de tratamiento y anticipar posibles problemas derivados de la composición del agua residual a tratar. Sin embargo, cuando se sabe que un agua residual es de naturaleza exclusivamente urbana, a menudo se efectúan análisis únicamente de los componentes más importantes desde el punto de vista del tratamiento. Por esta razón, los resultados que se manejan normalmente contienen información sobre materia en suspensión, materia orgánica, contaminación bacteriológica, oxígeno disuelto y pH.

En la tabla 2.2 aparecen los resultados que se pueden considerar típicos para el contenido en materia orgánica del agua residual urbana. Según cuál sea la carga contaminante, se puede hablar de concentración muy fuerte, fuerte, media o débil. La carga contaminante depende fundamentalmente de la cantidad de agua utilizada por la población. En general, cuanto mayor es el consumo de agua por habitante menor es la carga del agua residual.

TABLA 2.2
Carga contaminante en función de la materia orgánica en aguas residuales urbanas

Carga contaminante	Débil	Media	Fuerte	Muy fuerte
DBO ₅ (mg/l)	< 200	350	500	> 750
DQO (mg/l)	< 400	700	1.000	> 1.500

En la tabla 2.3 aparecen los intervalos típicos de concentración de los principales constituyentes de las aguas residuales urbanas

Las técnicas analíticas utilizadas para la determinación de la concentración de cada una de estas variables se describen con detalle en algunos tratados excelentes sobre análisis de aguas naturales y residuales (APHA, 1985, Rodier, 1979).

AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

Aunque el agua residual de origen industrial debe separarse de la de origen urbano y tratarse en otras instalaciones, en ocasiones se produce su mezcla en el alcantarillado y acaba incorporándose a la alimentación de la planta de tratamiento por lagunaje. Esto ocurre especialmente con industrias de pequeño tamaño, situadas en el casco urbano y que normalmente se instalaron hace bastante tiempo y no cuentan con sistemas propios de depuración. En España, las industrias que con más frecuencia se encuentran en esta categoría son empresas de galvanotecnia, conserveras, tenerías, bodegas yalmazatas.

Los vertidos generados por estas industrias son, en general, muy perjudiciales para la buena marcha de las plantas depuradoras por lagunaje. En el caso de las empresas de galvanotecnia y tenerías, las aguas residuales contienen compuestos tóxicos que impiden el crecimiento de los organismos responsables de la depuración. Entre los constituyentes de estas aguas residuales que resultan más peligrosos para las lagunas

de estabilización, y en general para la salud pública en la zona, destacan los metales pesados (cobre, níquel, plomo, cromo, cadmio y otros) y cianuros procedentes de los baños electrolíticos de las empresas de galvanotecnia (Nemerow, 1974).

TABLA 2.3
Composición típica de las aguas residuales urbanas

Componente (mg/l)	Intervalo típico
Sólidos totales:	350-1 200
Disueltos totales	250-850
Inorgánicos	145-525
Orgánicos	105-325
Sólidos en suspensión	100-350
Inorgánicos	20-75
Orgánicos	80-275
Nitrógeno total	20-85
Orgánico	8-35
Amoniacal	12-50
Nitratos	0-10
Fósforo total	4-15
Orgánico	1-5
Ortofosfatos	3-10
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1.000-2.000
Oxígeno disuelto	1,0-3,0
pH	6,0-9,0
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	10-20
Coliformes (colonias/100 ml)	
Totales	10^6 - 10^9
Fecales	10^5 - 10^8
Esstreptococos fecales (colonias/100 ml)	10^2 - 10^7

TABLA 2.4
Industrias cuyos vertidos afectan más o menos a las lagunas de estabilización

Industria	Contaminantes principales
Galvanotecnia	Metales pesados Disoluciones ácidas
Tenerías	Metales pesados
Conserveras	Carga orgánica Sólidos en suspensión Disoluciones alcalinas
Bodegas	Carga orgánica
Almazaras	Carga orgánica de degradación muy lenta

Por tanto, estos vertidos nunca deben incorporarse a la red de alcantarillado sin un tratamiento previo. Cuando no existe este tratamiento, hay que evitar su llegada a la planta depuradora, bien mediante una red separativa que recoja los vertidos industriales sin mezclarlos con los urbanos, bien mediante la instalación de un by-pass a la entrada de la planta depuradora (dispositivo que permite desviar el agua residual a la entrada de la depuradora, de forma que mientras se produzca el vertido que ocasiona problemas, éste no acceda a las lagunas de estabilización).

Los efluentes de empresas conserveras son los menos peligrosos para el lagunaje, ya que son fácilmente biodegradables. Los problemas surgen debido a que a menudo no se han tenido en cuenta en el proyecto de la planta, y en este caso hay problemas de sobrecarga cuando se vierten a la red de alcantarillado. Muchas empresas conserveras operan estacionalmente, dependiendo de las distintas campañas de hortalizas o frutas. Cuando la carga contaminante causada por los vertidos generados en estas campañas no se ha incluido en el proyecto inicial de la depuradora, y las empresas conserveras no disponen de ningún sistema de tratamiento de sus vertidos, la mejor solución es disponer de un by-pass a la entrada y evitar que estos vertidos pasen a las lagunas y provoquen problemas por sobrecarga.

Los vertidos procedentes de almazaras y bodegas provocan grandes problemas en las lagunas de estabilización, porque poseen una elevadísima carga orgánica. Además, los alpechines dan lugar a la formación de una capa de grasa en superficie que impide la oxigenación del agua residual.

La afluencia incontrolada de estos vertidos es una de las causas más frecuentes del mal funcionamiento de las lagunas de estabilización en España. Para evitar estos problemas hay que contar con redes separativas, que impidan el acceso de los vertidos procedentes de estas empresas al alcantarillado. Si esto no es posible, al menos hay que contar con la colaboración de estas empresas, de forma que cuando se produzcan estos vertidos avisen con tiempo suficiente para efectuar el by-pass a la entrada de la planta.

3. *Lagunas de estabilización*

INTRODUCCION

El tratamiento por lagunaje de aguas residuales consiste en el almacenamiento de éstas durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y las condiciones climáticas, de forma que la materia orgánica resulte degradada mediante la actividad de bacterias heterótrofas presentes en el medio. Puesto que en la depuración por lagunaje no interviene para nada la acción del hombre, quien se limita a proporcionar un emplazamiento adecuado para las balsas, el lagunaje es un método biológico natural de tratamiento, basado en los mismos principios por los que tiene lugar la autodepuración en ríos y lagos.

Dado que la presencia de oxígeno disuelto en las lagunas de estabilización determina qué tipo de mecanismos van a ser responsables de la depuración, los estanques de estabilización suelen clasificarse en aerobios, anaerobios y facultativos. Además de esta clasificación básica también se utilizan otras relacionadas con sus características físicas, tales como la profundidad. Ambas clasificaciones están relacionadas, ya que las fuentes de oxígeno disuelto en lagunas son fenómenos de superficie. Estas fuentes de oxígeno son la actividad de las algas microscópicas y la reaeración a través de la interfase aire-agua. En los capítulos siguientes estudiaremos en detalle las características de cada uno de los tipos de lagunas de estabilización.

DESARROLLO HISTORICO DEL LAGUNAJE

Las primeras lagunas de estabilización fueron en realidad embalses construidos como sistemas reguladores de agua para riegos. En estos embalses se almacenaban los excedentes de agua residual utilizada en riegos directos, sin tratamiento previo.

En el curso de este abnacenamiento se observó que la calidad del agua mejoraba sustancialmente, por lo que empezó a estudiarse la posibilidad de utilizar las lagunas como método de tratamiento de aguas residuales. El primer embalse es el que se realizaron estudios de este tipo fue el llamado Lago Mitchell, situado en la ciudad de San Antonio (Texas, Estados Unidos), a principios de este siglo.

Posteriormente se realizaron estudios sistemáticos de los procesos responsables de la depuración por lagunaje, para lo que se efectuaron seguimientos de las características físicas, químicas y microbiológicas de lagunas de estabilización situadas en California, Nevada, Texas y Arizona (Estados Unidos) y Lund (Suecia). Estos primeros estudios permitieron establecer las características básicas del funcionamiento de las lagunas de estabilización, y la influencia de varios factores (temperatura, luz, configuración, orientación, forma y tamaño de los estanques, composición del agua residual) sobre el comportamiento de estas plantas depuradoras (Dinges, 1982).

EXTENSION ACTUAL DEL LAGUNAJE

Desde entonces, el empleo de lagunas de estabilización como sistemas de depuración de aguas residuales se ha generalizado en todo el mundo. Actualmente existen plantas de tratamiento por lagunaje en todas las condiciones climáticas, desde los trópicos hasta Alaska. Sólo en Estados Unidos hay más de 5.000 instalaciones operadas por organismos públicos, y un tercio de las plantas de tratamiento municipales son depuradoras por lagunaje (Middlebrooks y col., 1982). Otros países en los que se utilizan ampliamente las lagunas de estabilización son Alemania, Francia, Canadá, Bélgica, Holanda, Australia, Nueva Zelanda, Israel, India y Brasil (F. U. L., 1981).

Como resultado de la experiencia adquirida en la utilización de lagunas de estabilización se han ido incorporando mejoras de diseño que han permitido obtener calidades crecientes en el efluente de las plantas. Entre las mejoras introducidas destacan el uso de plantas superiores (normalmente helofitas, es decir, plantas que poseen una parte aérea y otra sumergida como las cañas de río), o peces (carpa china u otras especies fácilmente adaptables a las fluctuaciones en oxígeno del agua), con la finalidad de obtener efluentes clarificados y subproductos potencialmente valiosos desde el punto de vista económico. Otras mejoras han consistido en el tratamiento final del efluente en filtros de turba o arena, o la irrigación controlada en filtros verdes, de forma que se obtenga un efluente de gran calidad que no plantee ningún problema en el medio ambiente (Dinges, 1982; Middlebrooks y col., 1982).

En España, las lagunas de estabilización se han introducido recientemente, aunque se han ido popularizando con gran rapidez, y en la actualidad hay más de 100 depuradoras de este tipo en operación o construcción.

En cuanto al tamaño de estas plantas de tratamiento, existen en la actualidad una gran variedad de lagunas de estabilización operando correctamente. Aunque a menudo se utilizan para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas o medianas poblaciones (500-20.000 habitantes), los siguientes ejemplos demuestran la aplicabilidad de esta técnica a poblaciones de gran tamaño:

TABLA 3.1
Ejemplos de poblaciones que cuentan con lagunas de estabilización de aguas residuales

Localidad	Habitantes	Área	Caudal tratado
Auckland, Nueva Zelanda	900.000	530 ha	210.000 m ³ /día
Melbourne, Australia	2.900.000	310 ha	350.000 m ³ /día
Stockton, California	150.000	250 ha	250.000 m ³ /día

Resulta interesante destacar que todos estos ejemplos corresponden a países industrializados (Mara, 1976).

VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL POR LAGUNAJE

Cuando se decide qué método de tratamiento resulta indicado para una comunidad, el proyectista debe tener en cuenta una serie de criterios que le permitan analizar sistemáticamente los pros y contras de las alternativas que se le presentan. Los siguientes criterios son fundamentales a la hora de la toma de decisión en la gestión de aguas residuales.

TABLA 3.2
Criterios seguidos en la elección de métodos de depuración de aguas residuales

Salud Pública
-- Valores admisibles de vertidos recogidos en la legislación
Reutilización
-- Irrigación
-- Acuicultura.
-- Recarga de acuíferos.
Consideraciones medioambientales
-- Eutrofización en aguas receptoras
-- Contaminación de playas
-- Impactos en flora y fauna
Molestias a la población
-- Ruidos.
-- Olores.
-- Paisajes
-- Insectos
Facilidad de operación
-- Necesidad de personal cualificado.
-- Mantenimiento de equipos
-- Probabilidad de fallos y roturas.
-- Flexibilidad de tratamiento
Costes
-- Instalación de la planta.
-- Mantenimiento.
-- Costes energéticos.

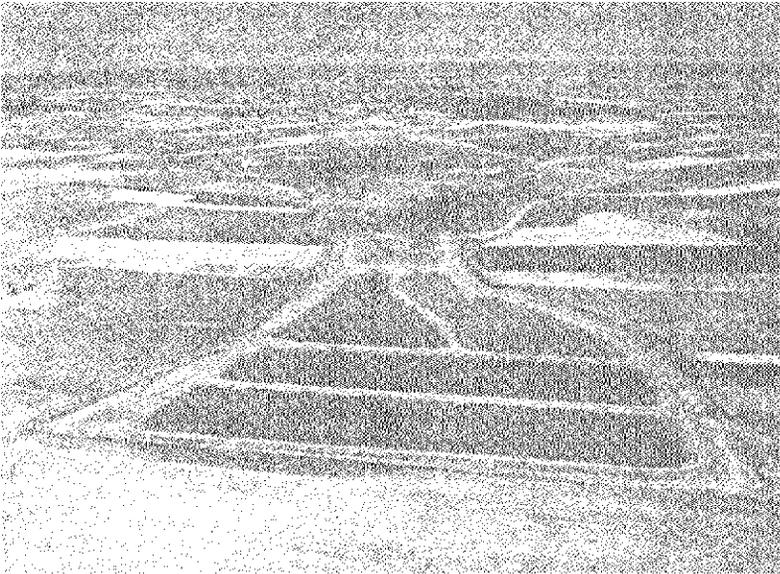


Foto 3.1 Lagunas de estabilización de La Solana (Ciudad Real)

1. Salud pública. El método de tratamiento debe asegurar un nivel adecuado de microorganismos patógenos en el efluente.
2. Reutilización. El agua residual tratada debe ser potencialmente utilizable en actividades como irrigación o acuicultura.
3. Medio ambiente. En aquellos casos en los que el vertido final deba hacerse a un cauce público, el tratamiento elegido debe garantizar que el medio natural afectado no va a degradarse como respuesta a este vertido. Es decir, la carga final en el medio debe ser igual o inferior a la capacidad de autodepuración de los ecosistemas receptores.
4. Molestias a la población. El método de tratamiento debe estar libre de olores, ruidos, desarrollo de insectos, etc., que puedan provocar molestias en la población próxima a la planta.
5. Facilidad operativa. Las necesidades de operación y mantenimiento de la planta depuradora deben satisfacerse por personal disponible a nivel local, evitando en lo posible instalaciones complejas que requieran periodos prolongados de entrenamiento de los operarios.
6. Costes. Tanto los costes de instalación como de mantenimiento han de considerarse en la elección del sistema de depuración. Especialmente en lo tocante al

mantenimiento, es esencial que los costes derivados de la depuración no excedan la capacidad de los ayuntamientos u organismos responsables de la gestión de las instalaciones. La posibilidad de reutilización de las aguas tratadas puede ser un factor importante en este sentido.

Teniendo en cuenta estos criterios, el lagunaje constituye uno de los métodos más adecuados para el tratamiento de aguas residuales urbanas o industriales fácilmente biodegradables. Los principales inconvenientes de las lagunas de estabilización son la presencia de materia en suspensión en el efluente, debida a las altas concentraciones de fitoplancton, y ocupación de terreno, que es superior a la de otros métodos de tratamiento.

Estos inconvenientes resultan despreciables en relación con las ventajas del método cuando el efluente no se haya de verter en un cauce público donde puede provocar problemas de eutrofización (desarrollo de actividad fitoplanctónica debida a la elevación de los niveles de nutrientes), o en aquellos casos en los que el terreno es abundante y barato. Otro posible inconveniente de esta técnica cuando el efluente se va a reutilizar en riegos es que se producen pérdidas importantes de agua en verano debido a la evaporación. Aparte de estos factores, el lagunaje presenta una serie de ventajas respecto a otros procedimientos, entre las que destacan las siguientes:

a) La estabilización de la materia orgánica alcanzada es muy elevada. A igualdad de estabilización, ésta se consigue mediante lagunaje a un coste más bajo y con un mínimo de mantenimiento, ya que no se necesitan aportes energéticos o reactivos químicos para llevar a cabo el tratamiento.

b) La eliminación de microorganismos patógenos es muy superior a la alcanzada mediante otros métodos de tratamiento. La desinfección que presenta el efluente de una planta de tratamiento bien diseñada y operada es superior al 99,99 %, con niveles finales de coliformes del orden de 10^{-2} - 10^{-3} /100 ml (Radoux, 1981).

Por otra parte, los quistes y huevos de parásitos intestinales, presentes en el efluente de tratamientos convencionales no sujetos a cloración, no resisten las condiciones ambientales de las lagunas de estabilización. En general, puede afirmarse que es posible el vertido del efluente de una planta de tratamiento por lagunaje a un cauce público o su uso en riegos sin riesgos para la salud, mientras que es necesaria la desinfección de los efluentes de plantas convencionales en una etapa adicional de cloración (W. H. O., 1987).

c) Las lagunas de estabilización presentan una gran flexibilidad en el tratamiento de puntas de carga y caudal. Este comportamiento se debe a que el tiempo que el agua residual permanece en las lagunas tiende a ser largo (del orden de 20-50 días), por lo que éstas presentan una inercia acusada que les permite aceptar breves períodos de carga orgánica o caudal elevados. Sin embargo, si esta situación anómala persiste, la capacidad tampón de las lagunas de estabilización se agota, y puede requerirse un tiempo considerable (una semana a un mes, dependiendo de las condiciones climáticas) para que se recupere la marcha normal de

la depuración (Mara, 1976) Se han observado problemas de este tipo con los vertidos incontrolados de residuos industriales como los alpechines, como se comentaba en el capítulo 2

d) El lagunaje puede utilizarse para el tratamiento de aguas residuales industriales con altos contenidos en materias biodegradables, tales como los vertidos de centrales lecheras, mataderos y empresas conserveras. En especial, el lagunaje anaerobio constituye un excelente pretratamiento para estos vertidos, que poseen elevadísima carga orgánica y materias en suspensión (Middlebrooks y col., 1982).

e) El diseño de las lagunas puede ajustarse fácilmente para que la depuración se adapte a las necesidades de la población en distintas situaciones.

Por ejemplo, los dispositivos de salida del efluente pueden proyectarse de forma que se pueda variar su altura, y así mismo la profundidad de agua en las lagunas, con lo que se controla el tiempo de retención del agua residual y por tanto el nivel de depuración alcanzado. Un diseño de este tipo podría utilizarse en el caso de vertidos estacionales desde una fábrica de conservas o para el almacenamiento estacional de aguas residuales para riegos.

Otra posibilidad que permite aumentar la flexibilidad de la planta es el diseño en forma modular, con mayor número de lagunas de menor tamaño interconectadas, lo que permite reducir o aumentar el número de lagunas en servicio en función de la cantidad y carga de agua residual a tratar. Este tipo de diseño es el que se emplea normalmente en España para el tratamiento de efluentes de poblaciones turísticas. Esta flexibilidad de diseño es la base de la aplicación del lagunaje en sistemas mixtos para la depuración-regulación de aguas residuales para riegos que se está popularizando rápidamente en zonas del sureste español como el Campo de Cartagena (Moreno, 1984).

f) Desde el punto de vista económico, el lagunaje es mucho más barato que los métodos convencionales, con bajos costes de instalación y mantenimiento.

g) El consumo energético de las lagunas de estabilización es nulo, ya que las únicas fuentes de energía que necesita para su funcionamiento son la luz solar y la acción del viento, como veremos en los próximos capítulos. Sólo en el caso de que el agua residual deba ser bombeada para que alcance la planta es necesario un consumo de energía en este método de depuración.

h) La generación de lodos tiene lugar, fundamentalmente, en las lagunas anaerobias, en las que éstos se van acumulando durante un período de tres-cuatro años antes de que sea necesario su vaciado y limpieza. Por tanto, no se generan diariamente fangos que haya que retirar o tratar, y debido al largo período de almacenamiento los fangos resultantes presentan un elevado grado de mineralización (80-85 %) (Moreno, 1984, Ortuño, 1987).

i) En el proceso de lagunaje se generan biomasas potencialmente valorizables una vez separadas del efluente. Estos posibles subproductos son el fitoplancton, zooplancton, vegetación superior en lagunas con macrofitas y peces (Dinges, 1982).

TABLA 3.3
Ventajas e inconvenientes del lenguaje en relación con los métodos convencionales de depuración

Ventajas	Inconvenientes
Elevada estabilización de la materia orgánica. Desinfección del efluente Flexibilidad de tratamiento (puntas de carga y caudal). Posibilidad de tratar vertidos industriales fácilmente: biodegradables (lecherías, mataderos, conservas). Fácil adaptación a variaciones estacionales. Posibilidad de uso como sistemas reguladores para riegos. Bajo coste de instalación y muy bajo de operación. Nulo consumo energético. Generación baja de fangos. Biotomas potencialmente aprovechables.	Elevada ocupación de terreno. Presencia de materia en suspensión (fitoplancton) en el efluente. Pérdidas considerables de agua por evaporación en verano.

TIPOS DE LAGUNAS DE ESTABILIZACION

Como veíamos anteriormente, se utilizan distintos criterios para la clasificación de los estanques de estabilización. A continuación se ha incluido una lista con las definiciones de los términos utilizados más a menudo para referirse a los distintos tipos de lagunas. Como puede observarse, la presencia de oxígeno disuelto es uno de los criterios fundamentales en la tipología utilizada (W. H. O., 1987).

1. Lagunas anaerobias. La depuración en estas lagunas ocurre por la acción de bacterias anaerobias. En estas lagunas, como consecuencia de la elevada carga orgánica y el corto período de retención del agua residual, el contenido en oxígeno disuelto se mantiene muy bajo o nulo durante todo el año. El objetivo perseguido es retener la mayor parte posible de los sólidos en suspensión, que pasan a incorporarse a la capa de fangos acumulados en el fondo, y eliminar parte de la carga orgánica.
2. Lagunas facultativas. Estos estanques se caracterizan por poseer una zona aerobia, próxima a la superficie, y una zona anaerobia en el fondo. La extensión relativa de estas dos zonas varía durante el año en función de la carga aplicada y de la eficacia de los dos mecanismos de adición de oxígeno al medio: la fotosíntesis llevada a cabo por las algas y la reaeración a través de la superficie. La finalidad de estas lagunas es la estabilización de la materia orgánica en un medio oxigenado proporcionado principalmente por las algas presentes.
3. Lagunas de maduración. También se llaman lagunas de oxidación. En estas lagunas se mantiene un ambiente aerobio en toda su profundidad, lo que se consigue

con menores cargas aplicadas, de forma que la fotosíntesis y la reaireación sean suficientes para proporcionar oxígeno disuelto a toda la columna de agua. En las lagunas de maduración se consigue una elevada desinfección del agua tratada, así como la mineralización de los nutrientes orgánicos.

Dado que estos tres tipos de lagunas requieren niveles decrecientes de carga orgánica para funcionar correctamente, las plantas de tratamiento suelen estar constituidas por los tres tipos de estanques operando en serie, es decir, uno después del otro (ver figura 3.1, en la que aparecen algunas posibles combinaciones de lagunas en plantas de depuración por lagunaje). De esta forma se alcanza una mayor calidad en el efluente final del sistema.

Otra clasificación utilizada en lagunas de estabilización considera la forma en que se produce la alimentación y descarga del agua residual en la instalación (Middlebrooks, 1982). En función de los patrones de circulación utilizados, se tienen los tipos siguientes:

a) Lagunas continuas. Son aquellas en las que se produce la entrada y salida continua del agua residual y efluente. La mayoría de las lagunas para tratamiento de aguas residuales urbanas funcionan de acuerdo con este principio.

b) Lagunas semicontinuas o de descarga controlada. En este caso las lagunas se llenan con agua residual, que se almacena durante un período prolongado de tiempo, hasta que se inicia su vaciado. Este tipo de diseño se utiliza a menudo en zonas con grandes variaciones estacionales, o cuando la laguna de estabilización se utiliza simultáneamente como sistema regulador de riego.

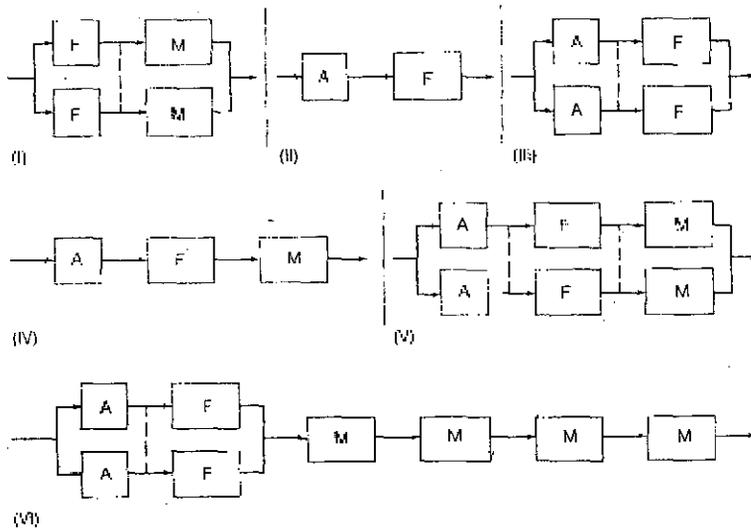


FIGURA 3.1
 Representación esquemática de algunas de las disposiciones más comunes de las lagunas en plantas de tratamiento por lagunaje (A = laguna anaeróbica; F = laguna facultativa; M = laguna de maduración)

c) **Lagunas de retención total.** Este tipo de lagunas se diseña de forma que el agua tratada se pierda por evaporación o infiltración en el terreno, con lo que no se produce su vertido final a un cauce público. Normalmente se trata de lagunas de poca profundidad y gran extensión para facilitar la evaporación del agua almacenada. Hasta la fecha no se ha instalado ninguna de estas lagunas en España.



Foto 3.2 Vista aérea de las lagunas de estabilización de Los Alcázarres (Murcia)