

## **2 LOS MÉTODOS NATURALES DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS**

Se presenta en este capítulo una visión general de los sistemas naturales de depuración más empleados en la actualidad y se comparan sus principales ventajas e inconvenientes con los de la infiltración rápida.

Bajo la denominación de sistema natural de depuración se engloban aquellos procedimientos o técnicas en los que la eliminación de las sustancias contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas se produce por componentes del medio natural, no empleándose en el proceso ningún tipo de aditivo químico. Habitualmente se diferencian dos grandes grupos de técnicas de depuración natural: *los métodos de tratamiento mediante aplicación del agua sobre el terreno, y los sistemas acuáticos*. En todos ellos, el efecto depurador se debe a la acción combinada de la vegetación, del suelo y de los microorganismos presentes en ambos, y en menor medida, a la acción de plantas y animales superiores.

Hasta los años cincuenta la principal finalidad de estos métodos era la eliminación de efluentes, mediante un sistema barato y técnicamente simple, o el aprovechamiento de éstos para regadío. Posteriormente, se comenzó a aplicar esta técnica como sistema alternativo de depuración, como un mecanismo eficaz de regulación de los recursos hídricos en zonas altamente deficitarias e incluso, en determinados casos, como sistema para crear barreras hidráulicas y combatir la intrusión marina (Mantecón *et al*, 1991). Estos métodos se han puesto de actualidad con la aparición y divulgación del concepto *vertido de contaminación cero o vertido cero*.

Los procedimientos naturales se caracterizan, en general, por su escasa necesidad de personal de mantenimiento, consumo energético reducido y baja producción de fangos. Sin embargo, y esto en España suele ser un factor limitante, requieren mayor superficie de terreno disponible que los métodos convencionales (entre 4 y 40 m<sup>2</sup>/habitante equivalente) lo que limita su uso a pequeños núcleos de población donde la presión urbanística es menor.

El segundo factor limitante hace que estos sistemas sólo puedan ser empleados con éxito para determinado tipo de vertidos, pues han de ser totalmente degradables. Si las sustancias vertidas o sus productos de degradación, dejan restos tóxicos o peligrosos en el suelo o el agua deben ser eliminados previamente al tratamiento natural, pues si no es así, se corre el riesgo de inducir un proceso de envenenamiento del sistema depurador con la consiguiente contaminación del medio receptor. En general esto limita el tipo de vertido a aguas sin componente industrial o si esta existe, a aguas cuya naturaleza sea en todo asimilable a un vertido urbano.

Entre los métodos de tratamiento en el terreno se incluyen habitualmente los siguientes tipos:

- Filtro verde.
- Infiltración rápida.

- Escorrentía superficial.
- Lechos de turba.
- Lechos de arena.

El rasgo común a todos ellos es que la depuración se consigue a través de los procesos físicos, químicos y biológicos naturales, desarrollados en un sistema planta–suelo–agua. El avance en el conocimiento de los mecanismos de dichos procesos ha permitido desarrollar criterios científicos de diseño y operación para estos sistemas de depuración.

Los llamados métodos acuáticos se basan en la creación de un flujo controlado de agua residual, en el que microorganismos y plantas principalmente, transforman los contaminantes.

Incluyen tres tipos básicos:

- Lagunajes.
- Humedales.
- Cultivos acuáticos.

Estos últimos se han desarrollado como una variante del lagunaje convencional, aprovechando la captación de nutrientes por las plantas, lo que mejora los rendimientos de las lagunas de estabilización. Estos métodos acuáticos, en general, se proyectan para un flujo continuo con descarga a ríos o lagos próximos. Su sistema de operación puede ser estacional o anual, en función del clima o de los objetivos de tratamiento.

## **2.1 TRATAMIENTO MEDIANTE APLICACIÓN DIRECTA EN EL TERRENO**

En este tipo de tratamiento el suelo cumple dos funciones: por un lado es el medio receptor de las aguas residuales evitando de esta manera el vertido a otros medios, por otro lado, es el agente activo pues tanto en su superficie como en su interior se produce el proceso de depuración eliminando nutrientes, materia orgánica, microorganismos y otros componentes como metales pesados o microcontaminantes orgánicos.

### **Filtro verde**

Debido a sus elevados requerimientos de espacio disponible generalmente se utiliza en poblaciones inferiores a 25.000 habitantes. Consiste básicamente en la aplicación de un caudal controlado de agua residual sobre la superficie del terreno, donde previamente se ha instalado una masa forestal o un cultivo. Con ello se consigue, además de la depuración del efluente, el crecimiento de especies vegetales, generalmente arbóreas maderables, y la recarga artificial del acuífero.

La depuración se realiza mediante la acción conjunta del suelo, los microorganismos y las plantas por medio de una triple acción: física (filtración), química (intercambio iónico, precipitación y coprecipitación, fenómenos de óxido-reducción) y biológica (degradación de la materia orgánica); tiene lugar en los horizontes superiores del terreno, donde se encuentra una capa biológica activa.



**Foto 2.1** Los filtros verdes consisten generalmente en el cultivo de masas forestales, chopos, que además de favorecer la depuración de las aguas residuales permiten la explotación maderera del cultivo, con lo que se consigue de forma indirecta la protección de los bosques y la mejora de la calidad de la atmósfera.

Para mantener en el terreno condiciones predominantemente aerobias el agua residual se aplica en ciclos intermitentes, generalmente variables, de entre 4 y 10 días.

Las cargas hidráulicas del agua residual aplicadas sobre la superficie activa de tratamiento varían, dependiendo de la naturaleza del terreno, de la época del año y del tipo de cultivo entre 0,5 y 6 m/año. (Metcalf y Heddy, 1998).

Tras su infiltración, el agua residual percola vertical y lateralmente a través del suelo. La cubierta vegetal juega un importante papel en el proceso de tratamiento. Su selección y cuidado dependen principalmente del grado de tratamiento perseguido y de las características de los suelos. El filtro verde tiene uno de los mayores potenciales de tratamiento de todos los sistemas de depuración en el terreno, debido a la aplicación de cargas relativamente bajas sobre el suelo vegetado y a la existencia de un ecosistema muy activo en el suelo, a escasa distancia de la superficie.

Para la instalación de un filtro verde se requieren una serie de condiciones relacionadas con el terreno y el agua residual (Metcalf y Heddy, 1998):

- Terrenos con características de permeabilidad y granulometría determinados. Los más idóneos son los terrenos franco-arcillosos y franco-arenosos.
- Nivel piezométrico a más de 1,5 m de la superficie (aunque generalmente este valor debe ser aumentado al doble o triple).

- Superficie del orden de 1 ha por cada 250 habitantes, lo que es igual a 40 m<sup>2</sup>/hab, que variará de 10 a 90 m<sup>2</sup>/hab dependiendo de la climatología (por ejemplo, en zonas más lluviosas la necesidad de terreno será mayor) y de las características hidrogeológicas de la zona.
- El efluente no debe contener sustancias nocivas para los cultivos.

Con este sistema se consiguen reducciones de DBO<sub>5</sub> del orden del 90% y de sólidos en suspensión del 95% destacando, además, el alto rendimiento en eliminación de microorganismos patógenos, fósforo y compuestos nitrogenados (más del 80%). Presenta, además, la ventaja de no producir fangos.

El principal inconveniente de este sistema de depuración es la gran extensión de terreno que requiere para su instalación. Otro inconveniente es que en climas de invierno frío se produce una parada vegetativa en el crecimiento de los cultivos instalados en el filtro (el cultivo más extendido son los chopos) disminuyendo sensiblemente el rendimiento del sistema, si a esto se une la disminución de los procesos de evapotranspiración se corre el riesgo de afectar al agua subterránea si el filtro no ha sido correctamente sobredimensionado y la distancia al nivel piezométrico no es suficiente en previsión de esta circunstancia.

### **Infiltración Rápida**

El tratamiento mediante infiltración rápida se define como la aplicación controlada del agua residual sobre balsas superficiales construidas en suelos de permeabilidad media a alta (con una capacidad de infiltración que oscila entre 10 y 60 cm/día).

Este sistema de depuración se aplica principalmente en poblaciones menores de 5.000 habitantes equivalentes (Mantecón et al, 1991).

El agua residual se aplica al terreno en tasas elevadas, bien por extensión en lagunas o bien por aspersión, alternando periodos de inundación con periodos de secado. La aplicación se realiza de forma cíclica para permitir la regeneración aerobia de la zona de infiltración y mantener la máxima capacidad de tratamiento.

En las balsas de infiltración no se suele poner vegetación, pero ésta se hace necesaria cuando se emplean los sistemas de aspersión como forma de aplicación del agua residual al terreno. La aspersión de agua residual puede plantear problemas por la creación de aerosoles cargados de microorganismos patógenos. En cualquier caso se exige un mantenimiento periódico de la superficie de las mismas.

El principal inconveniente de este sistema es la tendencia a la colmatación rápida del lecho filtrante por ello el agua residual suele requerir, al menos, un tratamiento primario previo a la aplicación, siendo las cargas hidráulicas anuales normales de 6 a 100 m/año.

Respecto a la profundidad recomendable a la que debe situarse el nivel piezométrico, existen opiniones muy variadas, aunque entre 18 y 20 metros desde la base de la balsa de infiltración es una cifra frecuentemente aceptada. Las superficies necesarias oscilan entre 1 y 22 m<sup>2</sup>/hab.

La depuración se produce mediante los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar al atravesar el agua residual urbana la zona no saturada. Por medio de este sistema se consigue la recarga artificial de acuíferos, y la posibilidad de reutilizar el agua tratada, recuperándola a través de zanjas o pozos. Se alcanzan reducciones medias de  $\text{DBO}_5$  y de sólidos en suspensión alrededor del 90% y una elevada eliminación de patógenos, entre el 70% y el 95%.

La evolución del efluente en el suelo y subsuelo es similar a la de los sistemas de filtro verde. No obstante, por tratarse caudales muy superiores, el suelo y formaciones infrayacentes han de tener mejores características hidráulicas.

### **Escorrentía Superficial**

La escorrentía superficial (Murillo *et al*, 1999) es un sistema de depuración relativamente nuevo, poco empleado en Europa, siendo en Estados Unidos donde existe mayor número de instalaciones de este tipo en funcionamiento. El ámbito óptimo de aplicación se encuentra en poblaciones pequeñas, con menos de 500 habitantes. La técnica consiste en forzar la escorrentía del agua residual, mediante riego por circulación superficial en láminas, sobre un suelo previamente acondicionado (en pendiente y con vegetación no arbórea), alternando periodos de riego con periodos de secado; dependiendo la duración de cada fase de los objetivos de tratamiento.

La aplicación del agua residual suele realizarse en ciclos de varias horas, durante 5 a 7 días a la semana, tras un escaso pretratamiento consistente en la separación de las fracciones sólidas de mayor tamaño. La distribución del agua se puede llevar a cabo mediante aspersores de baja carga, rociadores de baja presión o métodos superficiales como tuberías provistas de orificios.

El agua se depura por medio de procesos físicos, químicos y biológicos, al discurrir por bancales con suelos o estratos superficiales relativamente impermeables, aunque el proceso se ha adaptado a un amplio rango de permeabilidades ya que el terreno tiene tendencia a impermeabilizarse con el paso del tiempo.

Para la instalación de este sistema es necesario:

- Suelos con drenaje limitado tales como arcillas y limos arcillosos.
- Pendientes del orden del 2 al 8%.
- Superficies muy lisas para que el agua forme una lámina sobre el suelo. La extensión necesaria del terreno oscila entre 10 y 44  $\text{m}^2/\text{hab}$ .

El grado de tratamiento alcanzable es equivalente a uno secundario, generalmente con buena reducción de nitrógeno y un peor rendimiento en fósforo, estando los rendimientos alcanzados para la  $\text{DBO}_5$  y los sólidos en suspensión en torno al 90 y 70 % respectivamente.

### **Lechos de Turba**

El ámbito óptimo de aplicación de los lechos de turba se encuentra en poblaciones no muy grandes, en general menores de 2.000 habitantes. Este método de depuración de

aguas residuales requiere superficies entre 0.6 y 1 m<sup>2</sup>/hab, no debiendo superar la superficie total de cada lecho los 200 m<sup>2</sup>.

El sistema está formado por lechos de turba a través de los cuales circula el agua residual. Cada lecho descansa sobre una delgada capa de arena, soportada, a su vez, por una capa de grava. El efluente se recoge a través de un dispositivo de drenaje situado en la base del sistema. El terreno donde se asienta cada lecho debe ser impermeable para garantizar la no contaminación de las aguas subterráneas, en caso contrario hay que recurrir a la impermeabilización.

Para la depuración de aguas residuales se aprovechan las propiedades de absorción y adsorción de la turba, así como la actividad bacteriana que se desarrolla en su superficie. Se producen, por tanto, procesos físicos, químicos y biológicos en los que se elimina alrededor del 80% de DBO<sub>5</sub> y el 90% de sólidos en suspensión.

El proceso completo de los lechos de turba está formado por un pretratamiento, tratamiento primario compuesto de una serie de filtros autolimpiables; tratamiento secundario formado por los propios lechos de turba, y, opcionalmente, tratamiento terciario, cuyo objeto es la eliminación de patógenos, sometiendo el efluente de los lechos a un lagunaje aerobio, o bien a una cloración.

Los lechos se disponen en varias unidades, estando unas en funcionamiento y otras en conservación, para su mantenimiento y aireación. La turba necesita ser retirada y reemplazada cada 5-7 años, pudiendo ser aprovechada para fines agrícolas.

El tratamiento de aguas residuales mediante este proceso presenta como principales ventajas las siguientes:

- No produce olores.
- Se puede utilizar en climas muy fríos.
- Admite sensibles variaciones de caudal sin afectar, prácticamente, al rendimiento.
- Puede soportar puntos de caudal de 105 veces el caudal normal.
- Fácil adaptación estética al paisaje.
- Alta descontaminación bacteriana.

## **Lechos de Arena**

Los filtros de arena son una de las tecnologías más antiguas para la depuración de aguas residuales que se conoce. Cuando se emplean de forma adecuada consiguen llegar a niveles de depuración muy elevados. Consisten en lechos de material granular, de tamaño de grano relativamente uniforme, adecuadamente drenados en el fondo. Se emplean generalmente como un sistema de afino de aguas tratadas previamente mediante otros sistema como puede ser una fosa séptica.

La tecnología de filtros de arena incluye los filtros intermitentes, en los cuales, las aguas a depurar se vierten intermitentemente mediante tuberías de distribución en un filtro granular de entre 0,5 y 1,0 m de espesor y los filtros con recirculación, en los cuales, el agua recogida en el sistema de drenaje se vierte de nuevo en el filtro mezclada con agua nueva sin depurar.

La disposición de los filtros puede ser muy variada, incluyendo tanto filtros enterrados como sobre la superficie del terreno, estos últimos facilitan las labores de mantenimiento. El mantenimiento de estos dispositivos, que se colmatan con cierta facilidad, depende mucho de la eficacia del sistema de tratamiento previo.

Se considera que la adecuada aireación del filtro y la temperatura ambiente son los dos factores externos al diseño del mismo que más influyen en su rendimiento. Hay que tener presente no obstante que los lechos de arena (Ramos et al, 2002) presentan una capacidad de eliminación de la  $DBO_5$ , carbono orgánico disuelto y sólidos en suspensión, insuficiente para ser considerados como sistema único de tratamiento de las aguas residuales, pudiendo ser empleados no obstante como tratamiento complementario. Una ventaja de los filtros de arena frente a los de turba es su mayor resistencia a la colmatación, su menor volumen y menor costo.

## 2.2 MÉTODOS ACUÁTICOS

En este grupo de métodos naturales de depuración de aguas residuales, se incluyen aquellos cuya acción principal de depuración se ejerce en el seno del medio acuático, participando en el proceso plantas emergentes (especialmente sus raíces) y la actividad microbiológica asociada. Son sistemas que pueden funcionar estacionalmente o a la largo de todo el año, dependiendo fundamentalmente del clima, y que con frecuencia se diseñan para mantener un flujo continuo. Los sistemas más empleados son: lagunajes, humedales y cultivos acuáticos.

### Lagunaje

El lagunaje se puede aplicar a núcleos de población superiores a los 200 habitantes, siempre que se disponga de una superficie de terreno de al menos  $6,5 \text{ m}^2/\text{hab}$ .

La depuración por lagunaje de aguas residuales consiste en el almacenamiento de éstas durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y de las condiciones climáticas, de forma que la materia orgánica resulte degradada mediante la actividad de los microorganismos presentes en el medio acuático. El proceso de depuración tiene lugar gracias a reacciones biológicas, químicas y físicas, que ocurren en las lagunas y que tienden a estabilizar el agua residual. Los fenómenos que se producen tienen relación con la sedimentación, oxidación, fotosíntesis, digestión, aireación y evaporación. En función de los tipos de microorganismos, que dependen, a su vez, de la presencia de oxígeno disuelto, las lagunas, también conocidas como estanques de estabilización, se clasifican en anaerobias, facultativas y aerobias o de maduración.

#### *Lagunas anaerobias*

El proceso de depuración en este tipo de lagunas tiene lugar mediante una fermentación anaerobia. En estos procesos, en los cuales se puede llegar hasta la formación de metano, participan cuatro grupos microbianos: las bacterias hidrolíticas (*Clostridium*, *Streptococos*, *Lactobacillus*, *Peptococcus* .....) las bacterias acidogénicas (*Acetovibrio*, *Butyrvibrio*, *Lactobacillus* .....) bacterias acetogénicas (*Acetogenicum*, *Syntrophobacter*,

*Acetobacterium* .....) y las bacterias metanogénicas (*Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanospirillum*) todos ellos complementarios e imprescindibles para el proceso.

Este proceso se divide en dos grandes etapas. En la primera, un grupo de bacterias facultativas formadoras de ácidos descomponen las cadenas complejas de la materia orgánica en ácidos grasos, aldehídos y alcoholes. En la segunda etapa, otro grupo de bacterias estrictamente anaerobias, formadoras de metano, transforman los productos intermedios en gas metano, amoníaco y anhídrido carbónico e hidrógeno. El proceso anaerobio, lo mismo que el aerobio transforma carbono, nitrógeno y fósforo en protoplasma celular.

Debido a la elevada carga orgánica, a la profundidad de las aguas - que deberá ser superior a 2 metros- y al corto periodo de retención del agua residual - que será de 2 a 5 días - el contenido en oxígeno disuelto se mantiene bajo o nulo en toda la laguna.

La misión principal de estas lagunas de estabilización es la sedimentación de la mayor parte de los sólidos en suspensión y la eliminación de parte de la materia orgánica por medio de las bacterias presentes, pudiendo alcanzar reducciones en torno al 70% de DBO<sub>5</sub> y sólidos en suspensión. En el peor de los casos una laguna anaerobia funciona igual que un decantador primario, alcanzando rendimientos del 30% y 60% en DBO<sub>5</sub> y sólidos en suspensión respectivamente.

Normalmente estas lagunas son las primeras de una serie, correspondiendo al tratamiento primario en el proceso de depuración. Por otra parte, pueden constituir, por si solas un sistema de depuración para poblaciones inferiores a 2.000 habitantes que requieran exclusivamente tratamiento primario.

El principal inconveniente de este tipo de tratamiento, es la posibilidad de que produzca malos olores, si el diseño no es correcto o si el contenido en azufre, responsable de la formación de sulfhídrico, del influente es superior a 100 mg/l.

### *Lagunas facultativas*

En estas lagunas se distingue una zona aerobia próxima a la superficie, una zona anaerobia en el fondo, donde se dan procesos de fermentación, y una zona intermedia que contiene bacterias facultativas y es la que da el nombre a las lagunas.

El proceso aerobio de la materia orgánica hace que el carbono se utilice como fuente de energía para los microorganismos que al ser oxidado produce anhídrido carbónico. Los microorganismos que participan son bacterias fundamentalmente, pero también hay hongos y protozoos. Estos microorganismos utilizan el carbono restante, así como el fósforo y el nitrógeno para formar nuevas células.

El oxígeno necesario para la estabilización de la materia orgánica proviene de la re-aireación que se produce en la superficie y de la fotosíntesis que se lleva a cabo por medio de las algas presentes en la zona aerobia. En esta zona, las bacterias, utilizan el oxígeno producido por las algas y desprenden CO<sub>2</sub> que, a su vez, es utilizado por éstas, cerrando así el ciclo.

Las lagunas facultativas pueden ser las primeras de una serie o seguir a las lagunas anaerobias, correspondiendo así a un tratamiento secundario. Su finalidad última es la degradación de la materia orgánica.

La variación de temperatura en las diferentes estaciones del año, puede obligar a hacer más profundos los estanques. Esta profundidad puede variar entre 1 y 2 metros.

### *Lagunas aerobias o de maduración*

Las lagunas aerobias o de maduración son estanques de poca profundidad, entre 0.2 y 1 metro, con una producción máxima de algas y en las que se supone que toda la masa de agua está en condiciones aerobias. El grueso de materia orgánica ha debido de ser estabilizado previamente en las lagunas anaerobias y facultativas. Su función fundamental es reducir la  $DBO_5$  a los niveles mínimos y eliminar patógenos gracias a la radiación ultravioleta solar.

Además del efecto desinfectante, estas lagunas cumplen otros objetivos como son la nitrificación, cierta eliminación de nutrientes, y la clarificación y oxigenación del efluente; todo ello para lograr producir un efluente de alta calidad. El inconveniente es la presencia en el efluente de sólidos en suspensión en forma de algas, que en ciertos casos, como son los vertidos a ríos y lagos, puede limitar su uso.

El tiempo de retención de una laguna de maduración así como el número de lagunas, está condicionado por el grado de depuración bacteriana que se quiere alcanzar. La laguna debe proporcionar un periodo de retención de 7 a 10 días con una profundidad de un metro.

Las lagunas de maduración constituyen un tratamiento terciario en el proceso de depuración, tanto si se combinan con otras lagunas, como si lo hacen con otros sistemas de tratamiento. Por tanto, solo es necesario instalarlas en los casos en que se requiera un alto grado de depuración, bien sea por los objetivos de calidad del medio receptor o bien para la reutilización del agua para riego.

Como todos los métodos de depuración descritos, los sistemas de lagunaje también tienen sus ventajas e inconvenientes. Entre las ventajas podríamos citar las siguientes:

- Altos rendimientos en la disminución  $DBO_5$ , sólidos en suspensión, nutrientes y patógenos.
- Permite regular y almacenar agua que por sus características es sanitaria y agrícola, apta para el riego.
- La retirada de fangos se realiza cada 5-10 años, dependiendo del agua residual.

Y entre los inconvenientes:

- Se necesitan superficies de aplicación relativamente extensas.
- Se producen elevadas pérdidas de agua por evaporación.
- A veces las aguas depuradas presentan una elevada concentración de algas.
- Son de difícil adaptación a los cambios climáticos.

### **Humedales**

Los humedales son terrenos inundados con profundidades de agua normalmente inferiores a 0,6 m con plantas emergentes. En estos sistemas el agua fluye continuamente y la

superficie libre permanece al nivel del suelo, o mejor (pues evita la proliferación de insectos) por encima del mismo, manteniéndolo en estado de saturación durante un largo periodo del año.

La vegetación presente en estos sistemas proporciona superficies adecuadas para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia del oxígeno a la columna de agua, y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de la luz solar.

Para el tratamiento del agua residual, se han empleado terrenos pantanosos naturales y artificiales, aunque el uso de terrenos pantanosos naturales, al formar parte del sistema de escorrentía superficial de la zona, está limitado al tratamiento adicional de efluentes de tratamientos secundarios o avanzados.

#### *Humedales naturales*

Desde el punto de vista normativo, los humedales naturales se consideran cuerpos de agua receptores. Por tanto el vertido a estos terrenos está sujeto, en la mayoría de los casos, a las limitaciones normativas aplicables que suelen obligar al tratamiento secundario o avanzado de las aguas a verter. Más aún, el principal objetivo del vertido a humedales debería ser la mejora del hábitat existente. La modificación de los terrenos pantanosos para aumentar la capacidad de tratamiento suele ser contraproducente para el ecosistema natural y, en general, no es una práctica que deba abordarse.

#### *Humedales artificiales*

Los humedales artificiales procuran idéntica capacidad de tratamiento que los naturales, con la ventaja añadida de que al formar parte del sistema proyectado, no están sujetos a las limitaciones de vertidos a ecosistemas naturales.

Suelen tener un fondo o base impermeable sobre la que se deposita un lecho de gravas, suelo u otro medio para el desarrollo de las plantas, que constituyen el principal agente depurador. Existen dos tipos de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento del agua residual, dependiendo de la situación del nivel de agua: el denominado de superficie libre de agua (FWS), en el que el agua está en contacto con la atmósfera y constituye la fuente principal del oxígeno para aireación; y el denominado de flujo subsuperficial (SFS), donde la superficie del agua se mantiene a nivel de la superficie del lecho permeable o por debajo de la misma.

En los casos en los que se emplean para proporcionar tratamiento secundario o avanzado, los sistemas FWS suelen consistir en balsas o canales paralelos con el fondo constituido por suelo relativamente impermeable o con una barrera superficial, vegetación emergente, y niveles de agua poco profundos (0,1 a 0,6 m). Normalmente, se aplica agua residual pretratada de forma continua, y el tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente. Los sistemas de flujo libre también se pueden diseñar con el objetivo de creación de nuevos hábitats para la fauna y flora, o para mejorar las condiciones de terrenos pantanosos naturales próximos. Esta clase de sistemas suele incluir combinaciones de espacios abiertos y zonas vegetadas e islotes con la vegetación adecuada para proporcionar hábitats de cría para aves acuáticas.

Los sistemas de flujo subsuperficial (SFS) se diseñan con el objeto de proporcionar un tratamiento secundario avanzado. Consisten en canales o zanjas con fondos relativamente impermeables rellenos de cantos o arena para el crecimiento de vegetación emergente.

En función del tipo de sistema, la carga hidráulica varía en el rango de 3 a 20 m/año, así como las características del agua de alimentación y los límites impuestos al efluente.

### **Cultivos acuáticos**

Los cultivos acuáticos o sistemas de plantas acuáticas flotantes son básicamente una variante de los humedales artificiales FWS, en la que se introduce un cultivo de plantas flotantes, como los jacintos de agua o las lentejas de agua, cuya finalidad principal es la eliminación de determinados componentes de las aguas a través de sus raíces, que constituyen un buen sustrato responsable de una parte importante del tratamiento.

Las profundidades de agua suelen ser mayores que en los sistemas de humedales, y varían entre 0,5 y 1,8 m. Para aumentar la capacidad de tratamiento y asegurar el mantenimiento de las condiciones aerobias necesarias para el control biológico de los mosquitos, en los sistemas de plantas acuáticas flotantes se han empleado sistemas complementarios de aireación.

El uso de jacintos de agua (*Eichornia sp.*) y lentejas de agua (*Lemna sp.*) evita la entrada de luz solar al estanque. Comúnmente se utilizan para la eliminación de algas de los efluentes de lagunas y estanques de estabilización. Los sistemas de jacintos de agua además están diseñados también para proporcionar niveles de tratamiento secundarios y avanzados. Estos sistemas han sido utilizados también como medios de producción de proteínas o biomasa, en cuyo caso la depuración de agua constituye un objetivo secundario del proyecto.

Las cargas hidráulicas anuales y las necesidades específicas de superficie de los sistemas de plantas flotantes son similares a las de los sistemas de humedales. El clima es un factor limitativo en su rendimiento, ya que las plantas sólo crecen a determinadas temperaturas.

Estos cultivos acuáticos suelen utilizarse como sistema de afino incorporados a otra cadena de procesos, empleándose generalmente como tratamiento terciario. En operaciones bien controladas, en las que las plantas se cosechan periódicamente, se pueden alcanzar rendimientos altos en la depuración. La carga orgánica admitida por estos procesos es del orden de 30 a 50 kg/ha/día, lo que para aguas de moderada carga contaminante ( $\text{DBO}_5 < 240 \text{ mg/l}$ ), significa una carga hidráulica del orden de 6 m/año.

## **2.3 COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS NATURALES DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS**

Para concluir este capítulo, y a modo de resumen, a continuación se muestran las tablas 2.1 y 2.2 en las que se compararan las características, tanto de ubicación como de diseño y rendimiento de los diferentes sistemas naturales de tratamiento descritos anteriormente.

**Tabla 2.1** Características de diseño de los diferentes sistemas de tratamiento naturales

Características	Filtro Verde	Infiltración Rápida	Escorrentía Superficial	Lechos de Turba	Lagunajes	Humedales	Cultivos Acuáticos
Técnicas de aplicación	Aspersión o superficial <sup>a</sup>	Generalmente superficial	Aspersión o superficial	Superficial	Superficial	Aspersión o superficial	Superficial
Carga hidráulica anual (m/año)	1,70-6,0	6,0-100	7,3-56,7			5,5-18	5,5-18
Superficie necesaria <sup>b</sup> (m <sup>2</sup> /hab)	10-90	1-22	10-44	0,6-1	6,5		
Pretratamiento o mínimo necesario	Sedimentación primaria <sup>c</sup> . Desbaste	Sedimentación primaria. Desbaste	Desbaste	Desbaste a través de filtros autolimpiables	Desbaste.	Sedimentación primaria. Desbaste	Sedimentación primaria. Desbaste
Evacuación del agua residual aplicada	Evapo-Transpiración y percolación	Principalmente percolación	Escorrentía superficial y evaporación con algo de percolación	Drenaje en la base del sistema		Evapo-transpiración, percolación y escorrentía superficial	Algo de evapo-transpiración
Vegetación	Necesaria	Opcional	Necesaria	No necesaria	No necesaria	Necesaria	Necesaria

<sup>a</sup> Incluye riego por surcos y amelgas.

<sup>b</sup> La superficie necesaria no incluye la zona de amortiguación, ni los accesorios y zanjas.

<sup>c</sup> Depende del uso del efluente y del tipo de cultivo.

Tabla 2.2 Características de ubicación de los sistemas de tratamiento naturales.

Características	Filtro Verde	Infiltración Rápida	Esorrentia Superficial	Lechos de Turba	Lagunajes	Humedales	Cultivos Acuáticos
<b>Limitaciones climáticas</b>	Suele ser necesario disponer de instalaciones de almacenamiento durante las lluvias y en tiempo frío	Ninguna (posibles modificaciones en la explotación en condiciones de tiempo frío)	Suele ser necesario Disponer de Almacenamiento Durante las lluvias y en tiempo frío	Ninguna (se puede utilizar incluso en climas muy fríos)	Dificultad de adaptación a los cambios climáticos (las variaciones de temperatura pueden obligar a hacer más profundos los estanques)	En clima frío puede ser necesario almacenar el agua. La posibilidad de utilización de las plantas está directamente relacionada con el clima.	
<b>Profundidad hasta el nivel freático</b>	0,6-0,9m (mínimo)	3m (en los casos en los que exista drenaje se pueden adoptar profundidades menores)	No crítica		No crítica	No crítica	No crítica
<b>Pendiente</b>	Inferior al 15% en terrenos cultivados e inferior al 40% en terrenos no cultivados	No es un factor crítico; las pendientes demasiado pronunciadas obligan a grandes movimientos de tierras	Pendientes del 1-8%, máximo 15%		Normalmente inferior al 5%	Normalmente inferior al 5%	Normalmente inferior al 5%
<b>Permeabilidad del suelo</b>	De moderadamente baja a moderadamente alta	Alta (arenas, arenas margosas)	Baja (arcillas, limos y suelos con barreras impermeables)	Baja (de lo contrario hay que recurrir a la impermeabilización)	Baja a moderada	Baja a moderada	Baja a moderada

Para comparar los rendimientos que se consiguen en los distintos sistemas, en la tabla 2.3 se recogen los porcentajes de reducción de los parámetros característicos de las aguas residuales

**Tabla 2.3** Comparación en el rendimiento de diversos sistemas naturales de depuración de aguas residuales urbanas.

SISTEMA DE TRATAMIENTO	RENDIMIENTOS (%)					PRODUCCIÓN DE FANGOS	RECOGIDA DE FANGOS
	DBO <sub>5</sub>	DQO	SS	P	N		
Filtro Verde	90-95	90-95	95-99	85-90	90-95	No	No
Infiltración Rápida	90-95	70-80	90-95	25-40	30-95	Reducida	> 6 meses
Escorrentía Superficial	90-95	60-70	70-80	20-30	45-50	No	No
Lechos de turba	80-85	80-85	90-95	10-30	10-50	0,5-1	> 1 año
Lagunajes	80-95	60-80	70-90	40-60	55-85		5-10 años

DBO<sub>5</sub>: Demanda bioquímica de oxígeno, DQO: Demanda química de oxígeno, SS: Sólidos en suspensión, P: Fósforo en cualquiera de sus formas, N: Nitrógeno en cualquiera de sus formas.

El filtro verde y después la infiltración rápida son los sistemas que alcanzan los rendimientos más altos en depuración. A estos le sigue el lagunaje y los lechos de turba. Por el contrario, el sistema de escorrentía superficial, no llega a eliminar más del 30% de fósforo, ni más del 50% de nitrógeno total.

En rendimiento en eliminación de nutrientes (fósforo y nitrógeno) destacan el filtro verde y los lagunajes sin necesidad de recurrir a modificaciones en el sistema de depuración o a la implementación de procesos adicionales. Frente a variaciones de temperatura, los sistemas que presentan una mayor estabilidad son los de infiltración rápida, seguidos del lecho de turba, mientras que los que se adaptan peor son los lagunajes.

En cuanto a las variaciones de carga y caudal, los sistemas de aplicación al terreno son los que peor las absorben, mientras que los lechos de turba son los que pueden asimilar mejor dichas variaciones de carga, aunque siempre es posible dimensionar los sistemas de infiltración directa teniendo en consideración las puntas estacionales de producción de agua residual. El mayor problema puede darse en algunas poblaciones turísticas en las que las variaciones de población son extraordinariamente grandes.

La construcción de cualquier sistema de depuración de aguas residuales puede ocasionar pequeños problemas a la población cercana si las instalaciones no están suficientemente alejadas de núcleo urbano, debido a la producción de ruidos, olores, presencia de insectos y a la posibilidad de riesgos sanitarios. Los sistemas que, en general, menos impacto de este tipo ocasionan, son los de lecho de turba. Por otra parte, los que causan más problemas a la población son los lagunajes debido, sobre todo, a los olores que producen y a la posible proliferación de insectos.



**Foto 2.2** La depuración de las ARU de las poblaciones turísticas supone un problema especial debido al incremento en la población que se produce en los meses de verano.

En cuanto a la producción de fangos, los sistemas de infiltración directa sobre el terreno se encuentran entre los que menos producen, mientras que en el caso contrario se encuentran los lagunajes en los cuales los fangos se retiran cada 5 o 10 años.

En general, los sistemas naturales de depuración de aguas residuales presentan una serie de ventajas e inconvenientes.

Entre las ventajas se pueden destacar:

- La eliminación eficaz de patógenos. Esto permite preservar la calidad sanitaria de las aguas superficiales, subterráneas y marinas. Son métodos especialmente útiles en zonas ambientalmente sensibles o donde se requiera reutilizar las aguas residuales.
- La economía de funcionamiento, debido a que emplean formaciones naturales o suelos aportados como sustrato depurador.

Entre los inconvenientes se encuentran:

- La necesidad de espacio, las nuevas tecnologías están permitiendo reducir esta necesidad.
- La posibilidad de contaminar el medio si no se gestiona adecuadamente o no se ha elegido cuidadosamente el emplazamiento. Se suele caer en la tentación de emplear estos sistemas de depuración por encima de su capacidad real, lo que redundará en perjuicios evidentes para el medio. Estos sistemas son especialmente sensibles, pues en muchas ocasiones siguen la ley del todo o nada cuando se supera su capacidad (Salgot et al. 1992).