MANUAL DE TECNOLOGÍAS NO CONVENCIONALES PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Obra realizada por el CENTA gracias a una subvención concedida por la Agencia Andaluza del Agua de la Consejería de Medio Ambiente y cofinanciada por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional

Dirección facultativa: Instituto del Agua de Andalucía

Autores:

Juan José Salas Rodríguez

Juan Ramón Pidre Bocardo

Isabel Martín García

Ilustraciones: Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA)

Diseño y maquetación: www.aspectocomunicacion.com

Impresión y Encuadernación: Coria Gráfica

Depósito Legal: SE-2066-07

ISBN 13: 978-84-611-6883-5

ÍNDICE GENERAL

Capítulo I.- Generalidades

Capítulo II.- Aplicación al terreno

Capítulo III.- Lagunaje

Capítulo IV.- Humedales Artificiales

Capítulo V.- Filtros de Turba

Fuensanta Coves
Consejera de Medio Ambiente
Junta de Andalucía

El constante crecimiento demográfico, concentrado en las ciudades, trae consigo la aparición de necesidades y demandas a las administraciones públicas. El deterioro del medio ambiente puede tener muchas procedencias, y uno fundamental es un mal modelo de gestión de los recursos, entre ellos el agua. Hoy en día, una gestión del agua basada en la oferta ya no tiene cabida, por lo que debemos hacer una redefinición del concepto en pro de una gestión más eficaz y equitativa, más respetuosa con la diversidad de nuestros ecosistemas y, sobre todo, más participativa.

La Comunidad Autónoma dispone en estos momentos de una buena cobertura en infraestructuras en materia de saneamiento y depuración. No obstante, existen desequilibrios importantes, que surgen de las características propias del territorio, entre las grandes ciudades, y las medianas y pequeñas poblaciones que es preciso resolver. Se requieren soluciones imaginativas que logren igualar las condiciones de los servicios en toda la región.

Dadas las directrices de la UE, la Junta de Andalucía trabaja en incorporar las premisas europeas, adaptadas a las características propias del territorio andaluz.

La premisa es una renovada visión de la gestión pública del agua como integrante de un mismo ecosistema. De esta forma, no sólo se implantará un nuevo modelo, sino que se prevé un mayor reparto de competencias entre las administraciones y entidades responsables y se promueve el consumo responsable mediante un sistema de fiscalidad ecológica, teniendo siempre en cuenta que el agua nos afecta a todos por igual. El objetivo es eliminar

esos desequilibrios existentes y a garantizar la prestación de servicios de calidad a todos los ciudadanos y ciudadanas.

En este panorama, la investigación juega un papel muy importante, especialmente en lo referente a la integración del ciclo urbano del agua dentro del ciclo hidrológico natural. El conocimiento, la gestión integral y eficiente, y un consumo responsable, son las claves para lograr un desarrollo sostenible que permita mejorar la calidad de vida de la población respetando la diversidad de nuestros ecosistemas.

Fiel reflejo de la importancia de la investigación es este Manual de tecnologías no convencionales, que recoge en sus páginas el resultado de veinte años de investigación en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes, y que se presenta como referente dentro del sector científico-técnico. El desarrollo y aplicación de las denominadas tecnologías no convencionales favorecen la implantación de sistemas de depuración más respetuosos con el medio ambiente así como la gestión eficaz de los recursos, dadas las características propias de estas técnicas.

En definitiva, la ciencia aplicada a hacer compatibles las exigencias del desarrollo con la protección del medio ambiente.

Hermelindo Castro Nogueira
Presidente CENTA

El saneamiento y la depuración de las aguas residuales ha sido una preocupación constante por parte de las autoridades competentes a lo largo de los últimos años. Pero cuando nos referimos a pequeñas colectividades, este problema adquiere un matiz diferente, ya que se tiene que hacer frente a una serie de obstáculos que no se dan en otros contextos.

Para proveer de servicios de agua y saneamiento sostenibles a las pequeñas localidades no existe una sola tecnología ni una sola solución. Toda solución debe ser adaptada al entorno ambiental, social y económico de cada caso, especialmente en lo que respecta a las localidades de pequeño tamaño.

Las denominadas Tecnologías no Convencionales (TNC) presentan una serie de singularidades que las hacen especialmente adaptables a las características de las poblaciones medianas y pequeñas: presentan una gran versatilidad y adaptabilidad, elevada integración en el entorno natural y unos costes de implantación y explotación muy por debajo de los estimados en los tratamientos de las aguas residuales urbanas procedentes de grandes poblaciones, donde las carencias de espacio y las elevadas exigencias en la depuración hacen insustituibles las llamadas tecnologías convencionales.

La Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC) forma parte de una estrategia de I+D+I en materia de depuración de aguas residuales, especialmente enfocada la estudio de las TNC, que se viene desarrollando desde hace casi 20 años en Andalucía y cuya característica más destacable es la de conjugar los trabajos puramente científicos y

de investigación con un extenso conocimiento de la depuración sobre la realidad del territorio.

Desde su puesta en marcha, la PECC ha sido una experiencia pionera y un referente tanto a nivel nacional como internacional. Los trabajos desarrollados en el entorno de esta planta no sólo han servido para mejorar nuestros conocimientos en esta materia sino que, además, han permitido la difusión y la divulgación de los mismos y el traslado de nuestra experiencia a otros territorios, como Marruecos y Latinoamérica.

Las páginas de este documento recogen los resultados de todo este esfuerzo desarrollado a la largo de casi veinte años de experiencia. En este sentido, podemos decir que estamos ante una publicación pionera ya que, en la actualidad, no existe un Manual Técnico sobre Tecnologías no Convencionales, tan específico y que abarque un periodo tan largo de análisis y una diversidad tan amplia de tecnologías.

Esta publicación se compone de cinco monográficos cada uno de los cuales presenta todos los conocimientos adquiridos, tanto a nivel de estudios de I+D+I en la PECC, como a nivel de análisis en el terreno, acerca de una tecnología concreta: lagunajes, humedales artificiales, filtros de turba y procesos de película fija, estando reservado el primero de los monográficos a las singularidades de la depuración en pequeñas colectividades.

Durante estas dos décadas de análisis y estudio, son muchos los técnicos que han aportado su trabajo en esta investigación experimental. Por todo ello, no quiero perder la oportunidad de agradecer el gran esfuerzo y la ilusión que el equipo humano de la PECC ha puesto en este proyecto.

La edición de este Manual no significa el fin de la investigación que se lleva a cabo en la planta, sino el final de una etapa que se cierra con las conclusiones que se presentan en estas páginas. La labor continua día a día para que el conocimiento científico siga avanzando y para que las tecnologías no convencionales logren alcanzar el máximo valor y utilidad en el sector, dadas las múltiples ventajas que conllevan, tanto medioambientales como económicas.

CAPÍTULO II
ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN 17

2.- FUNDAMENTOS.....21
2.1.- Sistemas de Aplicación Superficial al Terreno.....21
2.1.1.- Procesos de Baja Carga 21
2.1.1.1.- Filtros Verdes.....23
2.1.2- Infiltración Rápida 24
2.1.3.- Riego Superficial 25
2.2.- Sistemas de Aplicación Subsuperficial al Terreno.....26
2.2.1.- Zanjas Filtrantes.....26
2.2.2.- Lechos Filtrantes.....27
2.2.3.- Pozos Filtrantes 28
2.2.4.- Filtros Intermitentes de Arena Enterrados 28

3.- ESQUEMAS DE FUNCIONAMIENTO 31
3.1.- Sistemas de Aplicación Superficial: Filtros Verdes.....31
3.1.1.- Pretratamiento 31
3.1.2.- Tratamiento Secundario.....35
3.2.- Sistemas de Aplicación Subsuperficial 36
3.2.1.- Pretratamiento 36
3.2.2.- Tratamiento Primario.....36
3.2.3.- Tratamiento Secundario.....38

4.- MECANISMOS DE DEPURACIÓN 41
4.1.- Eliminación de sólidos en suspensión.....43
4.2.- Eliminación de materia orgánica.....43
4.3.- Eliminación de nutrientes 44
4.4.- Eliminación de organismos patógenos.....46
4.5.- Eliminación de metales.....46
4.6.- Eliminación de compuestos orgánicos a nivel de trazas.....46

5.- RENDIMIENTOS DE DEPURACIÓN.....49

6.- DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO POR APLICACIÓN AL TERRENO 53
6.1.- Aplicación Superficial. Sistemas de
Baja Carga tipo I: Filtros Verdes..... 53
6.1.1.- Cálculo de la superficie necesaria 53
6.1.2.- Características de la ubicación.....56
6.1.3.- Cultivos a implantar 57
6.2.- Aplicación Superficial: Infiltración Rápida 62
6.3.- Aplicación Subsuperficial 64
6.3.1.- Tratamientos Primarios 64
6.3.2.- Zanjas Filtrantes.....65
6.3.3.- Lechos Filtrantes.....65
6.3.4.- Pozos Filtrantes 66
6.3.5.- Filtros Intermitentes de Arena Enterrados 66

7.- CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO POR APLICACIÓN AL TERRENO 69
7.1.- Sistemas de Aplicación Superficial: Filtros Verdes 69
7.1.1.- Marco de plantación 69
7.1.2.- Sistemas de alimentación 72
7.1.3.- Toma de muestras 74
7.2.- Sistemas de Aplicación Subsuperficial 77
7.2.1.- Tratamientos Primarios 77
7.2.2.- Zanjas Filtrantes 79
7.2.3.- Lechos Filtrantes 80
7.2.4.- Pozos Filtrantes 81
7.2.5.- Filtros Intermitentes de Arena Enterrados 82

8.- PUESTA EN SERVICIO DE UNA INSTALACIÓN DE TRATAMIENTO POR APLICACIÓN AL TERRENO 85

9.- MANTENIMIENTO Y EXPLOTACIÓN DE INSTALACIONES DE TRATAMIENTO POR APLICACIÓN AL TERRENO 89
9.1.- Mantenimiento del Pretratamiento y Tratamiento Primario 89
9.1.1.- Desbaste 90
9.1.2.- Tratamiento Primario: fosas sépticas-tanques Imhoff 91
9.2.- Mantenimiento del Tratamiento Secundario 91
9.3.- Seguimiento del proceso 94
9.4.- Anomalías más frecuentes y su solución 98

10.- VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO POR APLICACIÓN AL TERRENO 101
10.1.- Ventajas..... 101
10.2.- Inconvenientes.....102

11.- LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO POR APLICACIÓN AL TERRENO EN ANDALUCÍA Y EN ESPAÑA 105

BIBLIOGRAFÍA.....121

1.- INTRODUCCIÓN

Desde la aparición del hombre, el terreno, junto con las masas de aguas, ha sido uno de los principales receptores de los vertidos líquidos que éste genera.

Las reacciones fisicoquímicas que tienen lugar en la matriz del suelo, la actividad de los microorganismos presentes en abundancia en el mismo, y la propia acción de la vegetación, permiten la depuración de las aguas en el percolar de las mismas a través del terreno. De forma, que puede considerarse al suelo como una de las "*primeras depuradoras de aguas residuales".*

Si bien, la aplicación de las aguas residuales al terreno data de la antigüedad, cuando este sistema de tratamiento alcanza sus mayores cotas de aplicación es en la segunda mitad del siglo XIX en Europa. En esos momentos los niveles de contaminación de numerosas masas de aguas eran ya muy elevados, por lo que se comenzó a emplear el terreno como medio receptor de los vertidos líquidos generados por las poblaciones, como único medio factible para su tratamiento. Hacia 1870, esta práctica fue reconocida en Gran Bretaña como una forma aceptable para el tratamiento de los vertidos líquidos urbanos.

En Estados Unidos también se generalizó, a finales del siglo XIX, la aplicación directa de las aguas residuales al terreno, en un primer intento para controlar la contaminación de las masas de agua *(Metcalf&Eddy, 1995).*

La *Tabla I* recoge las primeras instalaciones implantadas para el tratamiento de las aguas residuales basadas en su aplicación directa al terreno.

Posteriormente, hacia la primera mitad del siglo XX, el desarrollo de la tecnología de *Lodos Activos* para el tratamiento de las aguas residuales urbanas, junto con el crecimiento experimentado por las ciudades, que incrementó notablemente la necesidad de terrenos urbanizables, llevó al abandono de muchas de las instalaciones de aplicación directa de las aguas residuales al terreno, si bien, en algunos casos, continuaron recibiendo los efluentes depurados procedentes de las nuevas instalaciones de tratamiento.

Tabla I.- Primeras instalaciones de depuración de aguas residuales por *Aplicación al Terreno (Metcalf&Eddy, 1995).*

Localidad	País	Año	Superficie (has)
Croydon - Beddington	Gran Bretaña	1860	252
París	Francia	1869	640
Leamington	Gran Bretaña	1870	160
Berlín	Alemania	1874	2.720
Wroclaw	Polonia	1882	800
Reims	Francia	1885	620
Calumet City (Michigan)	Estados Unidos	1888	5
Woodland (California)	Estados Unidos	1889	96
Fresno (California)	Estados Unidos	1891	1.600
Melbourne	Australia	1893	4.160
San Antonio (Texas)	Estados Unidos	1895	1.600
Braunschweig	Alemania	1896	4.400
México DF	México	1900	44.800

En el caso del tratamiento descentralizado de las aguas residuales, ha sido muy habitual el empleo de pozos ciegos, en los que iban quedando retenidos los sólidos, que se extraían periódicamente, mientras que las aguas clarificadas percolaban en el terreno. Desafortunadamente, en gran número de ocasiones, la mala elección de la localización de estos pozos, o lo inadecuado del terreno filtrante, provocaban contaminaciones de las aguas subterráneas.

En la actualidad, el empleo de fosas sépticas y tanques Imhoff, como paso previo, antes de la infiltración controlada de las aguas en el terreno apropiado, constituye una práctica habitual para el tratamiento de los vertidos de las aglomeraciones urbanas de escaso tamaño.

Por otro lado, en aquellas situaciones en las que no se dispone a una distancia razonable, y con un coste aceptable, de redes de saneamiento para la evacuación de los efluentes depurados, el terreno se suele convertir en el único destino posible de los mismos.

En España las primeras instalaciones de aplicación al terreno, en su modalidad de *Filtros Verdes,* datan de la segunda mitad del siglo XX. En Monzón (Huesca), ya en 1957 se regaban unas 200 hectáreas de choperas con aguas residuales, una vez diluidas tras su vertido al río, y en Villarrubia de los Ojos (Ciudad Real, 1978), se alimentaba un *Filtro Verde* de unas 100 hectáreas con las aguas procedentes de una población de unos 9.000 habitantes.

En Andalucía el empleo de *Filtros Verdes* para el tratamiento de las aguas residuales constituye una práctica muy poco extendida, contando la Comunidad Autónoma con tan solo dos instalaciones, de reducido tamaño, implantadas en loca-lidades de Almería y de Granada.

La práctica, cada vez mas extendida, de reutilizar las aguas residuales una vez depuradas en riego agrícola, guarda similitudes con los sistemas de aplicación al terreno, dado que estos efluentes experimentan una mejora adicional de su calidad en su discurrir vertical a través del terreno.

2.- FUNDAMENTOS

Los sistemas de tratamiento de las aguas residuales mediante su aplicación al terreno se basan en el empleo del suelo como elemento depurador.

En función de cómo se apliquen al terreno las aguas residuales a depurar se distinguen dos tipos básicos de sistemas:

- *Sistemas de Aplicación Superficial*
- *Sistemas de Aplicación Subsuperficial*

2.1.- Sistemas de Aplicación Superficial al Terreno

Dentro de estos sistemas se encuadran los *Procesos de Baja Carga,* la *Infiltración Rápida* y el *Riego Superficial.*

2.1.1.- Procesos de Baja Carga

En los *Procesos de Baja Carga* se aplica el agua residual a tratar sobre un terreno con vegetación, con lo que se consigue, de forma conjunta, la depuración de las aguas y el crecimiento de la vegetación implantada.

Una fracción del agua aplicada al suelo se consume por evapotranspiración y la restante percola a través del terreno *(Figura 1).*

La depuración de las aguas se consigue a medida que estas percolan a través del terreno. En la mayoría de las situaciones, los efluentes filtrados acabarán incorporándose a las masas de aguas subterráneas.

La *carga hidráulica* (caudal aplicado de aguas a tratar por unidad de superficie del terreno), y el *tipo de vegetación* que se implanta, dependen de los objetivos que se pretendan alcanzar con el sistema de tratamiento y de las condiciones particulares de su emplazamiento.

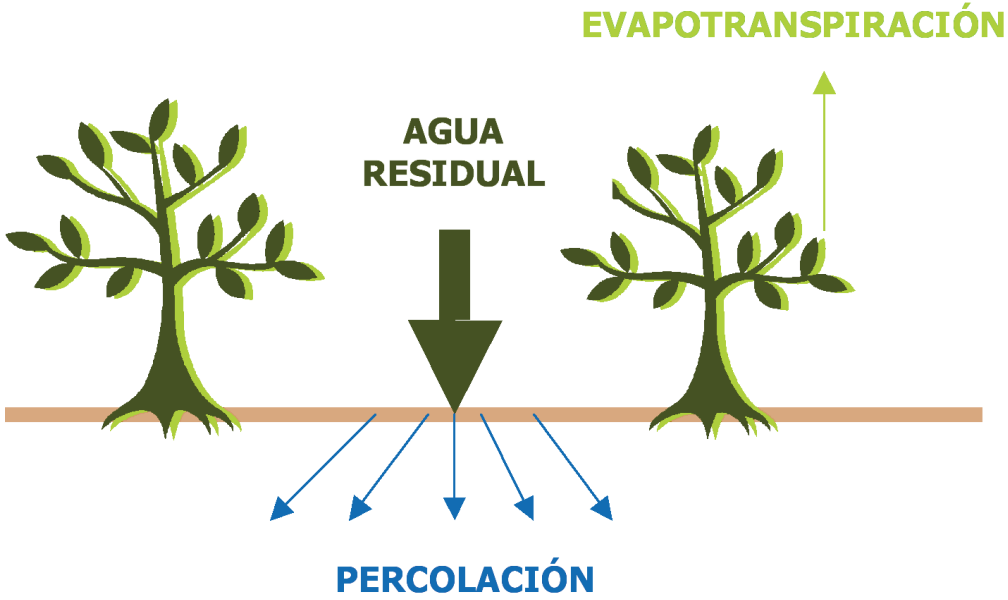


Figura 1.- Esquema de un *Proceso de Baja Carga*.

Dentro de los *Procesos de Baja Carga* se distinguen dos tipos básicos:

Sistemas Tipo I:
su principal objetivo es el tratamiento de las aguas, por lo que la carga hidráulica no está controlada por la demanda de agua de la especie vegetal implantada, sino por la permeabilidad del terreno. Dentro de este tipo se encuadra la tecnología *de Filtro Verde,* que es la más comúnmente implantada.

Sistemas Tipo II:
su objetivo principal se orienta a la reutilización de las aguas residuales mediante la producción de cosechas. En este caso, la carga hidráulica viene condicionada por los requisitos concretos de la especie vegetal implantada.

El agua residual se aplica al terreno mediante técnicas superficiales, generalmente mediante riego a manta o a través de surcos.

Con objeto de mantener el terreno al que se aplican las aguas a tratar en condiciones predominantemente aerobias, se recurre a ciclos de aplicación intermitentes, que suelen oscilar entre 4 y 10 días.

Las bajas cargas que se aplican, la presencia de vegetación y del ecosistema asociado al suelo, contribuyen a que los sistemas de *Baja Carga* presenten los mayores rendimientos de depuración entre los diferentes sistemas existentes de *Aplicación al Terreno.*

2.1.1.1.- Filtros Verdes

La tecnología de depuración de aguas residuales conocida como *Filtro Verde* se basa en la utilización de una superficie de terreno, sobre la que se establece una especie forestal, y a la que se aplica el agua residual a tratar *(Figura 2).*

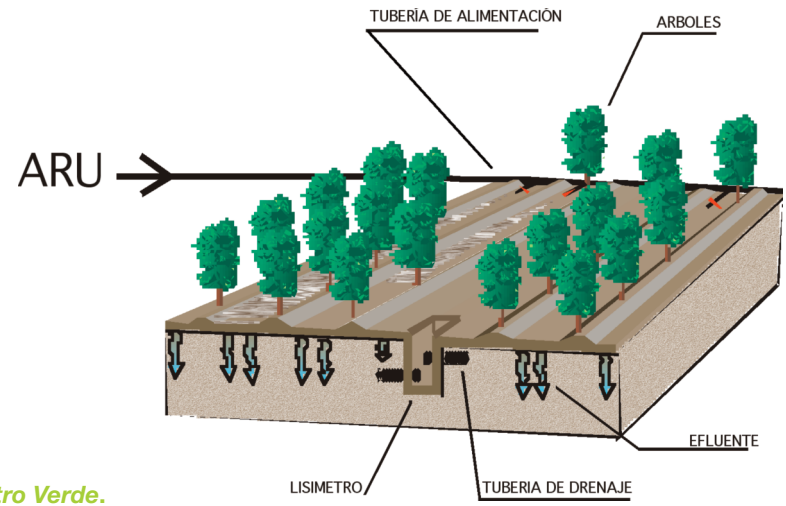


Figura 2.- Esquema de un *Filtro Verde*.

La depuración de las aguas se consigue por la combinación de una serie de acciones físicas, químicas y biológicas, que tienen lugar en el discurrir de las aguas a través de las capas del terreno.

La especie arbórea más comúnmente empleada en los *Filtros Verdes* es el chopo, si bien, se comienza a trabajar también con eucaliptos.

El terreno en el que se implanta el *Filtro Verde* se subdivide en una serie de parcelas, que se riegan de forma rotativa, generalmente mediante riego a manta o por surcos. Esta rotación en los riegos permite la reoxigenación natural de las parcelas tras los períodos de encharcamiento.

Con esta tecnología de depuración las aguas depuradas no son reutilizables de forma inmediata, sino que se infiltran en el terreno y se acaban incorporando a los acuíferos.

Para controlar la calidad de las aguas que se infiltran es necesario instalar dentro la parcela en la que se implanta el *Filtro Verde* una red de lisímetros, que permitan la recogida de muestras a diferentes profundidades.

2.1.2.- Infiltración Rápida

En esta modalidad de tratamiento las aguas residuales pretratadas se aplican intermitentemente al terreno, generalmente mediante balsas de infiltración de poca profundidad. La alternancia de las balsas en operación permite mantener en condiciones de aerobiosis las primeras capas del sustrato filtrante.

Dado que se opera con cargas hidráulicas superiores a las que se emplean en los *Procesos de Baja Carga*, los sistemas de *Infiltración Rápida* precisan terrenos que presenten una mayor permeabilidad.

Al trabajar con cargas hidráulicas elevadas, las pérdidas por evaporación tan sólo suponen una pequeña fracción del agua aplicada, percolando la mayor parte del agua a través del terreno, lográndose en este tránsito la reducción de los contaminantes presentes en las aguas *(Figura 3).*

Figura 3.- Esquema de un proceso de *Infiltración Rápida*.

Para minimizar los riesgos de colmatación de la superficie inferior de las balsas de infiltración, se precisa que las aguas tras el pretratamiento se sometan a una etapa de tratamiento primario, generalmente en balsas de decantación.

Los sistemas de *Infiltración Rápida* alcanzan menores rendimientos de depuración que los procesos de *Baja Carga*, como consecuencia de las mayores cargas hidráulicas que se aplican y de la menor capacidad de retención de los suelos más permeables que se emplean.

2.1.3.- Riego Superficial

En este sistema, conocido también como *Escorrentía Superficial*, las aguas residuales a tratar, una vez pretratadas, se distribuyen en la parte superior de terrenos con vegetación y con pendientes adecuadas (1-8%), para que las aguas puedan fluir superficialmente hasta unas zanjas de recogida, que se ubican al final de las pendientes *(Figura 4).*

En los sistemas de *Riego Superficial* se recurre al empleo de suelos o estratos subsuperficiales relativamente impermeables, por lo que en este caso, la percolación en el terreno tiene una menor importancia que en los sistemas descritos con anterioridad, recogiéndose la mayor parte del agua aplicada en forma de escorrentía superficial, perdiéndose una menor parte por evapotranspiración, en un porcentaje variable según el clima de la región y la estación del año.

Estos sistemas se explotan alternado las fases de aplicación y de secado, dependiendo la duración de estas fases de los objetivos que se pretendan alcanzar con el tratamiento.

La aplicación de las aguas puede realizarse por aspersión o por métodos superficiales, tales como tuberías equipadas con orificios de reparto.

Se trata de un sistema de tratamiento poco empleado en Europa, pero que cuenta con numerosas instalaciones en Estados Unidos.

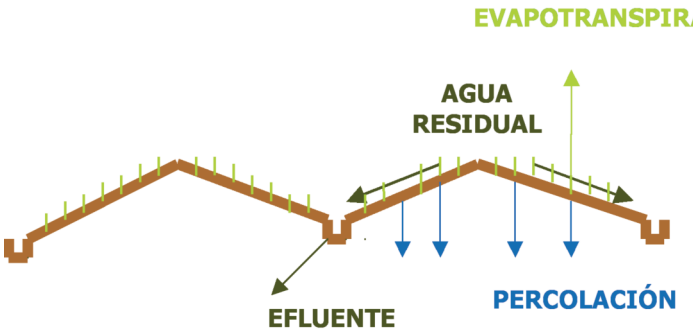


Figura 4.- Esquema de un proceso de *Riego Superficial.*

2.2.- Sistemas de Aplicación Subsuperficial al Terreno

En los sistemas de *Aplicación Subsuperficial* el agua residual se somete a un tratamiento previo, normalmente en una fosa séptica o tanque Imhoff, para posteriormente aplicarla al terreno por debajo de su superficie.

El objetivo que se pretende es lograr la depuración de las aguas residuales mediante el conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos, que tienen lugar en su discurrir a través del terreno, siendo su campo habitual de aplicación el tratamiento de las aguas residuales generadas en aglomeraciones urbanas de tamaño muy reducido.

La capacidad de infiltración del terreno es el parámetro clave para el dimensionamiento de este tipo de sistemas de depuración, descartándose aquellos suelos de naturaleza excesivamente permeable o impermeable.

Como tratamientos previos, las aguas se someten a desbaste y a tratamiento primario, recurriendo para ello al empleo de rejas de limpieza manual y a fosas sépticas o tanques Imhoff, respectivamente.

La aplicación del agua residual al suelo debe realizarse de forma intermitente para permitir la necesaria aireación del terreno, imprescindible para la degradación bacteriana vía aerobia.

Dentro de los sistemas de depuración mediante *Aplicación Subsuperficial* de las aguas residuales destacan: las *Zanjas Filtrantes,* los *Lechos Filtrantes,* los *Pozos Filtrantes* y los *Filtros Intermitentes de Arena Enterrados.*

2.2.1.- Zanjas Filtrantes

El agua a tratar se distribuye subterráneamente a través de tuberías de drenaje, que se disponen en zanjas de profundidad inferior a 1 m y de anchura comprendida entre 0,4 – 0,8 m. Las tuberías de reparto se recubren con grava y en la parte inferior se dispone un lecho de arena *(Figuras 5 y 6).*

La superficie de infiltración está constituida por el fondo de las zanjas, pero ante posibles obstrucciones, también las paredes verticales pueden contribuir a la infiltración de las aguas a tratar.

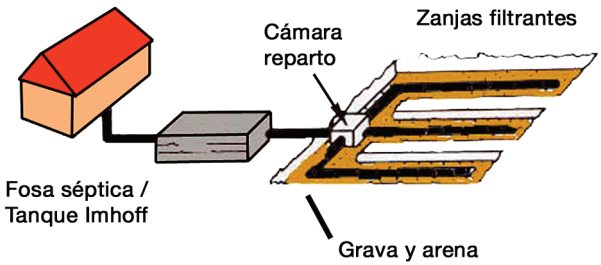


Figura 5.- Esquema de un proceso de *Zanjas Filtrantes*.

Figura 6.- Construcción de una *Zanja Filtrante* (Fuente: Trinity College Dublín).

2.2.2.- Lechos Filtrantes

En este caso, la superficie de filtración presenta una anchura mayor (0,9 - 2 m), dando lugar a lechos de grava que se alimentan mediante varias tuberías perforadas *(Figura 7)*. Con esta disposición la superficie filtrante está constituida únicamente por el fondo del lecho, y si bien, pueden ser más sensibles a las obstrucciones que las *Zanjas Filtrantes*, presentan frente a éstas la ventaja de una menor necesidad de superficie para su implantación.

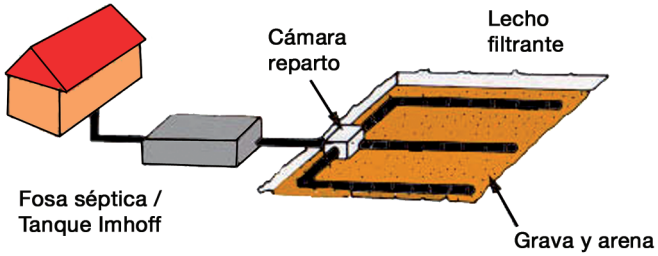


Figura 7.- Esquema de un proceso de *Lecho Filtrante*.

Dentro de la modalidad de los *Lechos Filtrantes* pueden englobarse los sistemas de *Riego Subterráneo*, en los que se emplean tuberías enterradas (aproximadamente unos 20 cm), que cuentan con goteros especiales para minimizar los problemas de obstrucción *(Figuras 8, 9 y 10).*

Figura 8.- Colocación de las tuberías en un sistema de *Riego Subterráneo* (Fuente: Geoflow).

Figura 9.- Detalle de las tuberías en un sistema de *Riego Subterráneo* (Fuente: Geoflow).

Figura 10.- Cubierta superior de un sistema de *Riego Subterráneo* (Fuente: Geoflow).

2.2.3.- Pozos Filtrantes

En aquellos casos en los que el nivel freático es profundo (> 4 m), pueden construirse pozos *(Figura 11)*, en los que la superficie vertical filtrante es mucho mayor que la horizontal, por lo que este tipo de sistema precisa una menor superficie para su implantación con relación a las *Zanjas* y a los *Lechos Filtrantes*.

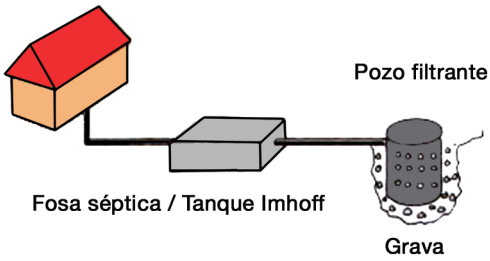


Figura 11.- Esquema de un proceso de *Pozo Filtrante*.

2.2.4.- Filtros Intermitentes de Arena Enterrados

Cuando la naturaleza del terreno disponible para la implantación del proceso depurador (permeabilidad excesiva o impermeabilidad), imposibilita la aplicación de los sistemas habituales de *Aplicación Subsuperficial*, puede recurrirse a un sistema artificial de infiltración mediante el empleo de *Filtros de Arena Intermitentes Enterrados*.

En estas unidades el lecho de arena filtrante presenta un espesor que oscila entre 0,6 y 1,0 m y descansa sobre una capa de grava, en la que se ubican las tuberías de recogida del efluente depurado.

Los filtros se disponen excavados en el terreno y en su parte superior se extiende una capa de tierra vegetal, por lo que la integración ambiental es máxima.

Las aguas residuales pretratadas se reparten sobre la superficie del filtro mediante el empleo de tuberías perforadas *(Figura 12)*.

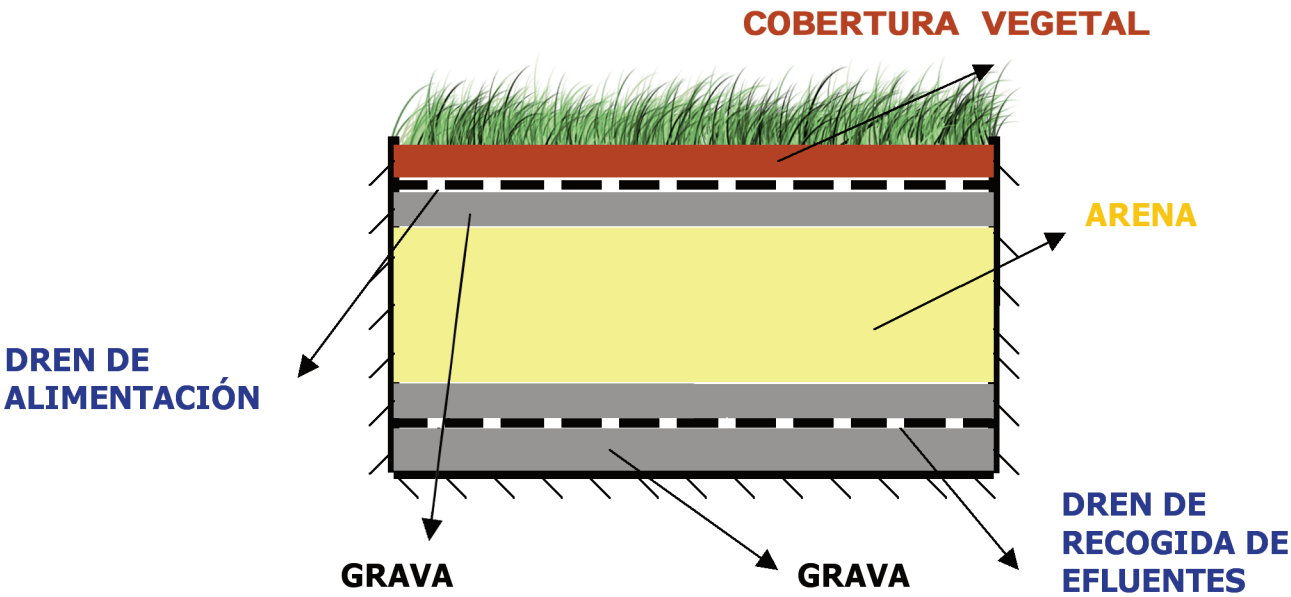


Figura 12.- Sección longitudinal de un *Filtro Intermitente de Arena Enterrado.*

3.- ESQUEMAS DE FUNCIONAMIENTO

3.1.- Sistemas de Aplicación Superficial: Filtros Verdes

El influente que se aplica a un *Filtro Verde* debe someterse previamente, como mínimo, a un proceso de desbaste mediante rejas, generalmente de limpieza manual, de forma que se eviten obstrucciones en las tuberías de conducción y reparto. Tras dicho desbaste, el agua residual podrá someterse, o no, a otras técnicas de Pretratamiento (desarenado, desengrasado) y de Tratamiento Primario (decantación-digestión), si bien, en la mayoría de los *Filtros Verdes* implantados el pretratamiento se limita básicamente a la eliminación de los elementos más groseros.

El empleo de tratamientos previos más o menos completos vendrá exigido por las características propias de las aguas residuales a tratar en cada caso concreto.

3.1.1.- Pretratamiento

Tiene como objetivo la eliminación de los objetos gruesos, de las arenas y de las grasas y flotantes que se encuentran en las aguas residuales, dado que su presencia en el resto de etapas del tratamiento podría provocar problemas de obturaciones en las conducciones y la rápida colmatación del terreno filtrante.

Normalmente, como se ha indicado con anterioridad, el Pretratamiento en la tecnología de *Filtros Verdes* está constituido exclusivamente por una etapa de desbaste, si bien, en determinadas ocasiones serán precisas también las etapas de desarenado y desengrasado.

Desbaste: La eliminación de sólidos gruesos suele llevarse a cabo haciendo pasar las aguas residuales a través de rejas de desbaste, de 2-3 cm de separación entre barrotes, y de limpieza manual *(Figura 13).*

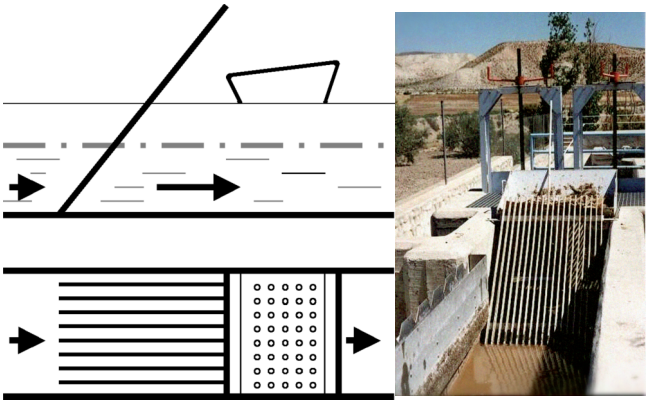


Figura 13.- Esquema y fotografía de una reja de desbaste de limpieza manual.

Desarenado: La operación de desarenado tiene por objetivo la eliminación de materias pesadas de tamaño superior a 0,2 mm, para evitar que sedimenten en canales y conducciones y para proteger a las bombas y otros elementos de la abrasión.

Aparte de las arenas, propiamente dichas, en esta operación se eliminan también gravas y partículas minerales, así como elementos de origen orgánico, no putrescible (granos de café, semillas, huesos, cáscaras de frutas y huevos, etc.).

Para la eliminación de las arenas presentes en las aguas residuales a tratar suele recurrirse al empleo de canales desarenadores estáticos *(Figura 14)*, tanto de flujo variable como de flujo constante.

Los canales desarenadores de flujo variable se emplean en pequeñas instalaciones de depuración, y en ellos las arenas se extraen manualmente de un canal longitudinal, con una capacidad para el almacenamiento de 4-5 días.

Los canales desarenadores de flujo constante mantienen una velocidad de paso fija, en torno a 0,3 m/s, independientemente del caudal que los atraviesa, con lo que se logra que sedimente la mayor parte de las partículas de origen inorgánico y la menor parte posible de las de origen orgánico (< 5% de materia orgánica).

La velocidad de paso se puede mantener constante:

- Mediante una sección adecuada de los canales, para ello la sección de los canales debe tener un perfil parabólico, finalizando la obra en una sección de control. Dado que en la práctica la sección parabólica es de difícil construcción, se recurre a su sustitución por una forma trapezoidal, que se aproxime a la sección teórica.
- Colocando al final de los canales desarenadores vertederos de salida de ecuación lineal (Parshall, Sutro), en los que las variaciones de caudal se traducen en variaciones de la altura de la lámina de agua.

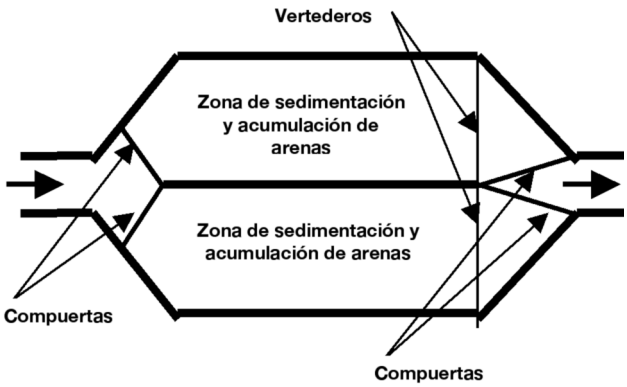


Figura 14.- Esquema y fotografía de canales desarenadores estáticos.

Desengrasado: Para la eliminación de las grasas y flotantes se recurre al empleo de desengrasadores estáticos, en los que se hacen pasar las aguas a través de un depósito dotado de una conducción o tabique, que obliga a éstas a salir por la parte inferior del mismo *(Figura 15)*, lo que permite que los componentes de menor densidad que el agua queden retenidos en la superficie.

La retirada de las grasas y flotantes se lleva a cabo de forma manual, haciendo uso de un recoge hojas de piscina.

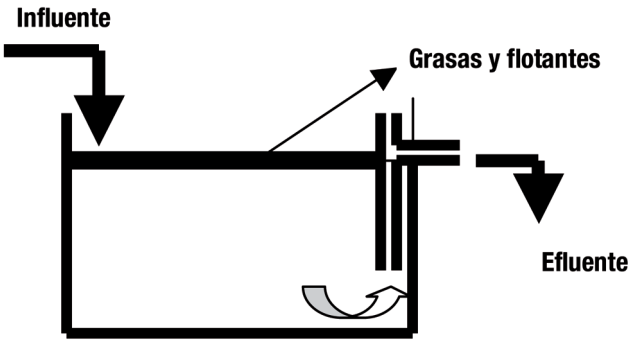


Figura 15.- Esquema y fotografía de un desengrasador estático.

3.1.2.- Tratamiento Secundario

El Tratamiento Secundario está constituido por el propio discurrir de las aguas a tratar a través de un terreno de características adecuadas *(Figura 16)*.

En el paso de las aguas a través del terreno, no sólo se eliminan sólidos en suspensión y materia orgánica, sino que también se obtienen importantes reducciones de nitrógeno, fósforo y de organismos patógenos, por lo que puede decirse, que en cierto modo, los efluentes percolados han experimentado procesos propios de los Tratamientos Terciarios.

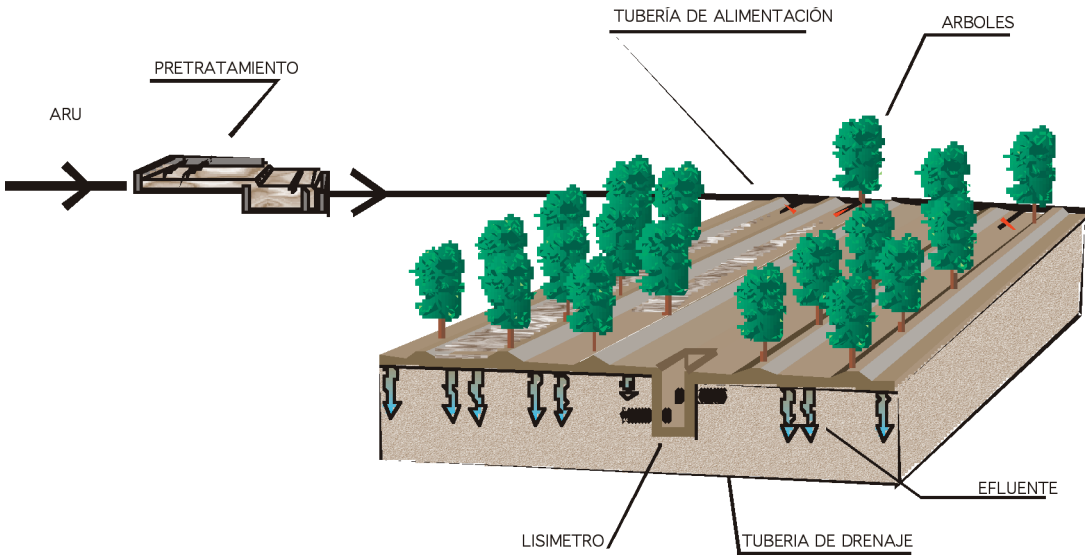


Figura 16.- Esquema de una instalación de *Filtro Verde*.

3.2.- Sistemas de Aplicación Subsuperficial

En el caso de los tratamientos de depuración mediante *Aplicación Subsuperficial* en el terreno de las aguas a tratar, el esquema habitual consta de: Pretratamiento, Tratamiento Primario y Tratamiento Secundario.

3.2.1.- Pretratamiento

Suele estar constituido, exclusivamente, por una etapa de desbaste en la que suele recurrirse al empleo de rejas de limpieza manual, de unos 2-3 cm de luz de paso.

3.2.2.-Tratamiento Primario

Para conseguir una mayor eliminación de los sólidos en suspensión presentes en las aguas residuales a tratar, y minimizar por tanto los riesgos de colmatación del terreno filtrante, se recurre a la implantación de fosas sépticas o tanques Imhoff, como paso previo a la aplicación de las aguas al terreno.

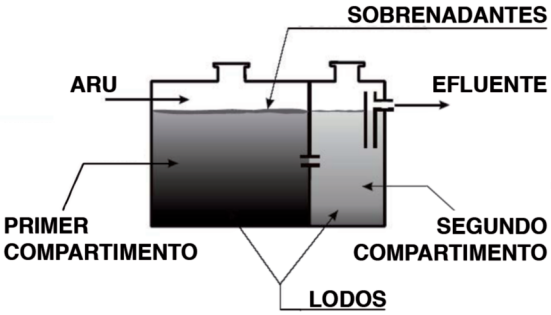
Fosas sépticas

Las fosas sépticas son dispositivos enterrados en los que decanta la materia sedimentable presente en las aguas residuales. La fracción orgánica de esta materia sedimentada experimenta reacciones de degradación anaerobia, mineralizándose paulatinamente.

Estos dispositivos se encuentran compartimentados, siendo la disposición más común la de dos compartimentos dispuestos en serie. Al llegar el agua al primer compartimento la materia particulada más densa sedimenta y se deposita en el fondo en forma de lodo, mientras que la materia particulada más ligera forma una costra en la superficie. El agua clarificada pasa al segundo compartimento a través de un orificio practicado en la pared de separación y situado por debajo del nivel líquido. En este segundo compartimento tiene lugar también una sedimentación de sólidos y la formación de costra, como consecuencia de los materiales que escapan de la etapa anterior, pero en menor cuantía *(Figura 17)*.

Los lodos retenidos en los fondos de los distintos compartimentos experimentan reacciones de degradación anaerobia, mineralizándose y reduciendo su volumen, lo que permite que las fosas funcionen durante largos períodos de tiempo sin necesidad de purgar el excedente de lodos.

Las burbujas de gas que se producen en la degradación anaerobia de los lodos decantados obstaculizan la normal sedimentación de los sólidos presentes en las aguas residuales influentes. Es por ello, por lo que se dispone un segundo compartimento, en el que las partículas más ligeras encuentran condiciones de sedimentación más favorables.



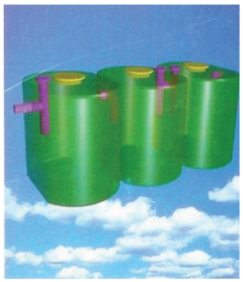


Figura 17.- Esquema de una fosa séptica de dos cámaras y equipo prefabricado de tres compartimentos (ISEA GROUP).

Tanques Imhoff

Los tanques Imhoff constan de un único depósito en el que se separan la zona de sedimentación, que se sitúa en la parte superior, de la de digestión de los sólidos decantados, que se ubica en la zona inferior del depósito. La configuración de la apertura que comunica ambas zonas impide el paso de gases y partículas de fango de la zona de digestión a la de decantación, de esta forma se evita que los gases que se generan en la digestión afecten a la decantación de los sólidos en suspensión sedimentables *(Figura 18)*.

Para minimizar los riesgos de colmatación del terreno filtrante, en los sistemas de *Aplicación Subsuperficial* es de vital importancia el correcto dimensionamiento y operación de los elementos constitutivos del Tratamiento Primario.

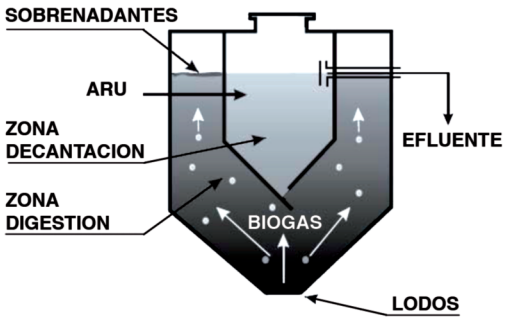


Figura 18.- Esquema un tanque Imhoff y equipo prefabricado (ISEA GROUP).

3.2.3.- Tratamiento Secundario

El Tratamiento Secundario está constituido por el propio paso de las aguas a tratar a través del terreno. En este discurrir subterráneo de las aguas tienen lugar, igualmente, procesos asimilables a Tratamientos Terciarios.

Las *Figuras 19 y 20* muestran los esquemas más habituales de los tratamientos de aguas residuales mediante *Aplicación Subsuperficial al Terreno.*

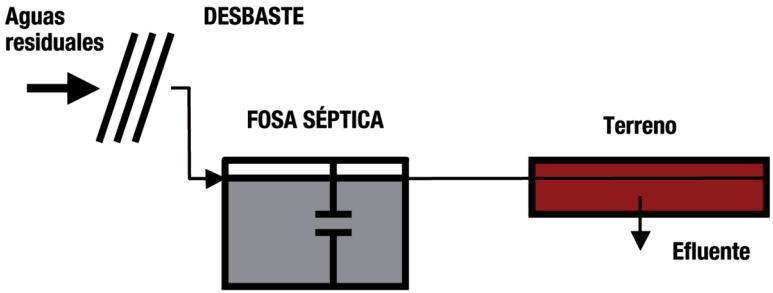


Figura 19.- Esquema del tratamiento de aguas residuales mediante *Aplicación Subsuperficial al Terreno.*

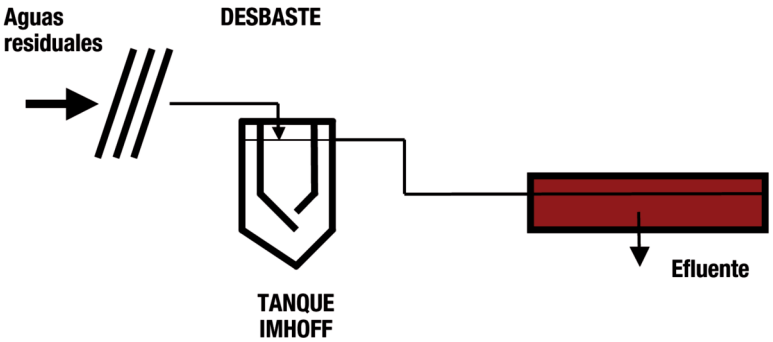


Figura 20.- Esquema del tratamiento de aguas residuales mediante *Aplicación Subsuperficial al Terreno.*

4.- MECANISMOS DE DEPURACION

En los sistemas de depuración de las aguas residuales mediante su aplicación al terreno, el suelo constituye el núcleo central. En el ecosistema suelo-agua-plantas tiene lugar una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, mediante los que es posible eliminar casi todos los contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas: sólidos en suspensión, materia orgánica, nutrientes (N y P), metales, compuestos orgánicos a nivel de traza y microorganismos patógenos *(Figura 21).*

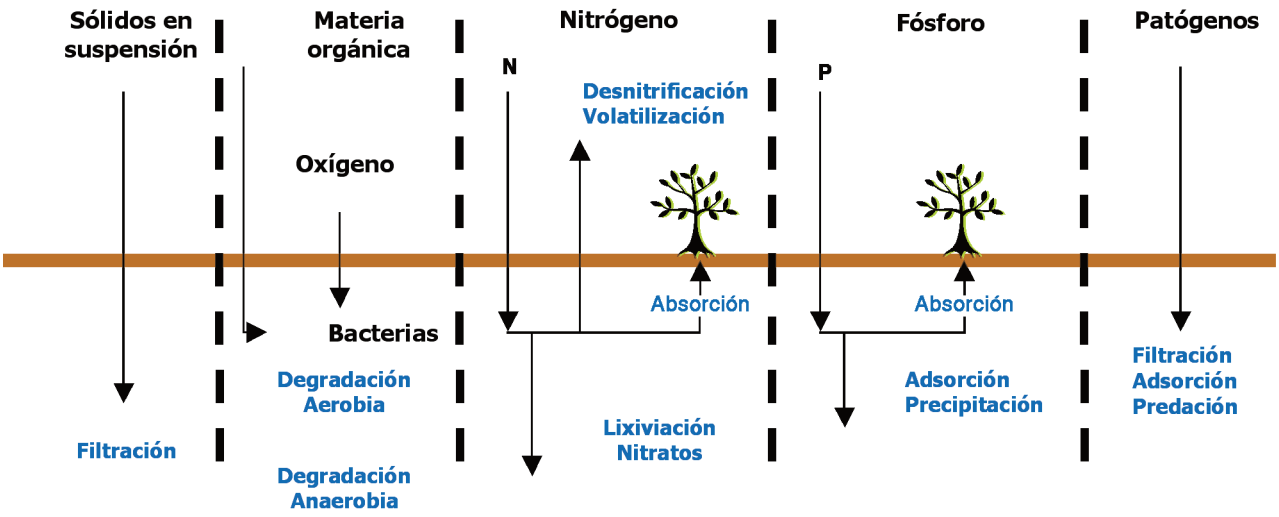


Figura 21.- El suelo como elemento depurador.

Los principales procesos que tienen lugar en los horizontes superiores del terreno, donde se encuentra una capa biológicamente activa, son:

- ***Procesos físicos**:* el más importante de estos procesos es la filtración, a través de la cual los sólidos en suspensión, presentes en las aguas residuales a tratar, quedan retenidos en los primeros centímetros del terreno.

  La capacidad de filtración depende de la granulometría y textura del suelo. En un terreno arcilloso, de granulometría fina, la filtración será muy efectiva pero excesivamente lenta, mientras que en un terreno arenoso ocurrirá lo contrario, alta velocidad de paso pero escasa retención de sólidos y baja depuración. Es pues conveniente disponer terrenos de permeabilidad media y textura franca.

- ***Procesos químicos:*** en estos procesos juega un papel muy destacado la capacidad de cambio iónico que tenga el suelo, así como su pH y las condiciones de aireación/encharcamiento, que afectan a los procesos de óxido/reducción.

  En función de todo ello, los componentes aportados por las aguas residuales podrán encontrarse en formas asimilables por las plantas, se inmovilizarán en el subsuelo, o se perderán por percolación, siendo arrastrados hasta los acuíferos.

- ***Procesos biológicos:*** dentro de este grupo de acciones puede diferenciarse entre las inherentes a las actividades radiculares de las plantas (establecidas en algunas de las modalidades de esta tecnología de tratamiento), y las producidas por los microorganismos del suelo.

  Las raíces de las plantas actúan a modo de bombas aspirantes, extrayendo del suelo el agua y las sales minerales necesarias para su desarrollo. La mayor parte de estos aportes procederá de las aguas residuales a tratar.

  En cuanto a los microorganismos del suelo, las acciones más importantes se deben a bacterias (fundamentalmente), hongos, algas y protozoos. Estos microorganismos intervienen tanto en la descomposición de la materia orgánica aportada por el agua residual como en el reciclaje de los nutrientes.

  Por otra parte, la conversión de una superficie de terreno en *Filtro Verde* originará unas condiciones ambientales típicas, que darán origen a una biocenosis, en la que se establecerán, entre otras, interacciones de “competición” y “antagonismo”. Como consecuencia de estas interacciones se logra una elevada tasa de eliminación de los organismos patógenos aportados por el agua residual.

Los principales mecanismos implicados en la eliminación de los principales contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas se describen a continuación.

4.1.- Eliminación de sólidos en suspensión

En los sistemas de tratamiento por *Aplicación de las Aguas Residuales al Terreno* la eliminación de sólidos en suspensión, orgánicos e inorgánicos, transcurre, principalmente, por filtración a través del suelo y, en menor medida, por filtración a través de las formas vegetales vivas y de los propios desechos vegetales.

Dado que la mayor parte de los sólidos en suspensión se eliminan en la superficie del terreno, es preciso diseñar los sistemas de tratamiento de forma que se minimice la pérdida en su capacidad de filtración.

4.2.- Eliminación de materia orgánica

La materia orgánica presente en las aguas residuales se elimina en el terreno mediante degradación bacteriana. Los microorganismos que llevan a cabo esta biodegradación se suelen encontrar asociados a biopelículas, que se desarrollan sobre la superficie de las partículas del suelo, de la vegetación y de los desechos vegetales.

Los sistemas de tratamiento por *Aplicación al Terreno* se diseñan y explotan de forma que se mantengan, en lo posible, condiciones aerobias en los perfiles superiores del terreno filtrante, al objeto de que la degradación de la materia orgánica transcurra por esta vía, que es más rápida y completa que la vía anaerobia. Para ello, los sistemas de tratamiento deben dimensionarse de forma que la demanda de oxígeno para la degradación de la materia orgánica sea inferior a la velocidad de transferencia de oxígeno al suelo.

Una hectárea de suelo seco puede llegar a contener 600 kg de oxígeno, que se van reduciendo al aumentar el contenido en agua (*MOPU, 1982).*

La renovación del aire contenido en el terreno se logra mediante la alternancia, en los periodos de alimentación y secado, de las parcelas que reciben las aguas residuales objeto de tratamiento.

A medida que los efluentes percolan en el terreno se van encontrando con concentraciones menores de oxígeno, llegándose a dar, en profundidad, condiciones de anaerobiosis.

4.3.- Eliminación de nutrientes

Nitrógeno

Los mecanismos implicados en la eliminación del nitrógeno presente en las aguas a tratar varían en función de la forma en que este nutriente esté presente: nitrógeno orgánico, amoniaco o nitrato.

Nitrógeno orgánico: la fracción que se encuentra asociada a los sólidos en suspensión presentes en el agua residual se elimina por filtración, pudiéndose incorporar directamente al humus del suelo. En el caso de la fracción soluble, parte de la misma se hidroliza dando lugar a aminoácidos, que pueden a su vez descomponerse en iones amonio.

Nitrógeno amoniacal: el amoniaco en forma soluble se puede eliminar por volatilización directa a la atmósfera en forma de amoniaco gas (≤10%), si bien, la mayor parte del amoniaco influente (y del convertido) se adsorbe, de forma temporal, mediante reacciones de intercambio iónico, sobre las partículas del suelo y sobre las partículas orgánicas cargadas eléctricamente. Este amoniaco adsorbido puede ser captado por la vegetación y por los microorganismos presentes en el suelo y, también, puede ser transformado en nitratos mediante reacciones de nitrificación biológica.

Nitrógeno nítrico: esta forma del nitrógeno no experimenta reacciones de intercambio iónico como consecuencia de su carga negativa, por lo que permanece en solución y escapa en el agua percolada. La vegetación puede asimilar los nitratos, pero esto tan sólo ocurre en las proximidades de sus raíces y durante los períodos de crecimiento.

Desnitrificación biológica: los nitratos pueden eliminarse mediante desnitrificación biológica y liberación de nitrógeno gaseoso y de óxido nitroso a la atmósfera. Este mecanismo constituye la principal vía de eliminación de nitrógeno en los sistemas de aplicación al terreno.

La desnitrificación la realizan bacterias facultativas bajo condiciones de anoxia, no siendo necesario que todo el sistema sea anóxico. Para ello, es preciso que la relación carbono/nitrógeno sea suficientemente elevada, al menos 2:1, (COT:N).

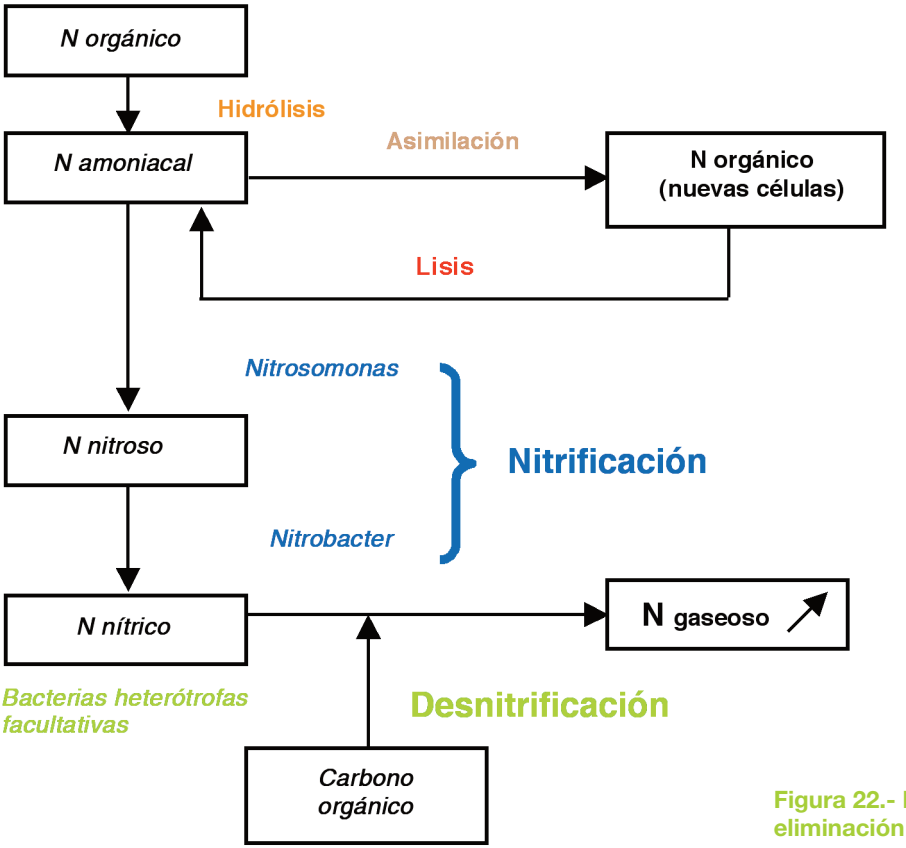


Figura 22.- Mecanismos de eliminación del Nitrógeno.

Fósforo

Este nutriente se elimina fundamentalmente por adsorción y por precipitación química en la matriz del suelo, y, en menor medida, por la propia captación por parte de las plantas para cubrir sus necesidades.

En las aguas residuales urbanas el fósforo se encuentra normalmente como ortofosfato, que es adsorbido por los minerales arcillosos y ciertas fracciones orgánicas de la matriz del suelo. La fracción adsorbida de fósforo suele permanecer retenida, siendo resistente al lixiviado.

Menor importancia que los fenómenos de adsorción en la eliminación del fósforo tienen las reacciones de precipitación química con calcio (a pH neutro o alcalino), o con hierro o aluminio (a pH ácidos).

4.4.- Eliminación de organismos patógenos

Los mecanismos de eliminación de organismos patógenos (bacterias, protozoos, helmintos), incluyen procesos de sedimentación, retención, depredación, radiación, desecación y adsorción. En el caso de los virus, estos se eliminan, casi de forma exclusiva, por adsorción y muerte posterior.

En los suelos de textura media-fina se puede lograr la casi total eliminación de los organismos patógenos a 1,5 m de profundidad.

4.5.- Eliminación de metales

Los metales en los sistemas de *Aplicación al Terreno* se eliminan principalmente por sorción (adsorción-precipitación), y en menor medida mediante la asimilación por parte de las plantas.

A pH por encima de 6,5 la capacidad de retención de metales de muchos suelos es muy elevada, sin embargo, bajo condiciones de anaerobiosis, y a valores bajos de pH, algunos metales retenidos pueden ser solubilizados.

Para la mayoría de los metales se han observado rendimientos de eliminación del 80-95%.

4.6.- Eliminación de compuestos orgánicos a nivel de trazas

Las principales vías por las que se eliminan estos compuestos son la volatilización y la adsorción, seguidas de la degradación biológica o fotoquímica.

5.- RENDIMIENTOS DE DEPURACIÓN

La *Tabla II* muestra las características de los efluentes tratados mediante diferentes sistemas de *Aplicación al Terreno*, especificándose la profundidad de percolación para los *Sistemas de Baja Carga* y de *Infiltración Rápida,* y la longitud recorrida para el caso de la tecnología de *Riego Superficial (Metcalf&Eddy, 1995).*

Tabla II.- Características de los efluentes de los diferentes tipos de tratamiento por *Aplicación al Terreno*.

	Baja Carga *(a)*		**Infiltración Rápida** *(b)*		**Riego Superficial** *(c)*	
	Media	**Máximo**	**Media**	**Máximo**	**Media**	**Máximo**
Sólidos en suspensión (mg/l)	< 1	< 5	0,5	< 5	15	< 25
DQO (mg/l)	< 2	< 5	2	< 5	10	< 15
Nitrógeno amoniacal (N) (mg/l)	< 0,5	< 2	0,5	< 2	1	< 3
Nitrógeno total (N) (mg/l)	3	< 8	10	< 20	5	<8
Fósforo total (P) (mg/l)	< 0,1	< 0,3	1	< 5	4	< 6

a) Percolación a través de 1,5 m de suelo.
b) Percolación a través de 4,5 m de suelo.
c) Escorrentía a lo largo de 45 m de pendiente.

Por su parte, la *Tabla III* recoge los rendimientos de depuración que se logran mediante los sistemas de *Aplicación Superficial al Terreno (Moreno, L., 2002).*

Tabla III.- Rendimientos de depuración de los sistemas de *Aplicación Superficial al Terreno*.

	Sólidos en suspensión	DBO_5	DQO	N	P
Filtro Verde	95 – 99%	90 – 95%	90 – 95%	90 – 95%	85 – 90%
Infiltración Rápida	90 – 95%	90 – 95%	70 – 80%	30 – 95%	25 – 40%
Escorrentía Superficial	70 – 80%	90 – 95%	60 – 70%	45 – 50%	20 – 30%

6.- DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO POR APLICACIÓN AL TERRENO

6.1.- Aplicación Superficial: Sistemas de Baja Carga tipo I: Filtros Verdes

6.1.1.- Cálculo de la superficie necesaria

Para el cálculo de la superficie necesaria para la implantación de un sistema de depuración de aguas residuales basado en la tecnología de *Filtro Verde* es precisa la determinación de la carga hidráulica (C_h) aplicable.

Se define como carga hidráulica el volumen de agua aplicado sobre una superficie de terreno durante un tiempo determinado, expresándose habitualmente como mm/semana ó mm/año.

En el caso de los *Filtros Verdes* la determinación de la carga hidráulica se efectúa para la condición más restrictiva de las dos siguientes:

- Permeabilidad del suelo.
- Concentración de nitrógeno en el agua percolada.

Carga hidráulica basada en la permeabilidad del suelo: se calcula mediante la ecuación de equilibro hídrico en el suelo, que para un período mensual viene dado por la expresión:

$$C_{hpm} = ETP_m - P_{rm} + T_{im}$$

siendo:

C_{hpm}: carga hidráulica mensual basada en la permeabilidad del suelo (mm/mes).

ETP_m: evapotranspiración potencial mensual (mm/mes).

P_{rm}: precipitación mensual. Se determina a partir de los valores medios durante un período de retorno de 10 años (mm/mes).

T_{im}: tasa de infiltración mensual (mm/mes). Para su cálculo se procederá a determinar "in situ" la permeabilidad más baja del terreno sobre el que se va a asentar el *Filtro Verde.* A partir de este dato se establece la tasa de infiltración de diseño, que no deberá exceder del 4-10 % de la permeabilidad mínima.

$$T_{i\,diaria} = Permeabilidad\ (^{mm}/_{h}) \times 24\ ^{h}/_{d} \times (0{,}04 \text{ a } 0{,}1)$$

La tasa de infiltración mensual se determina mediante la expresión:

$$T_{im} = T_{idiaria} \times (nº\ de\ días\ de\ riego\ al\ mes)$$

La frecuencia de los riegos oscila entre una vez cada 4 días para suelos arenosos y una vez cada 14 días para suelos arcillosos, siendo un valor bastante común un riego cada semana.

La carga hidráulica anual basada en la permeabilidad del terreno (C_{hpa}, mm/año), se obtiene como suma de las cargas hidráulicas obtenidas para cada mes.

Carga hidráulica basada en el balance de nitrógeno: para su determinación debe hacerse un balance entre el aporte de nitrógeno al terreno, consecuencia de la aplicación del agua residual, y la eliminación de este nutriente que tiene lugar por las distintas vías: fenómenos de nitrificación-desnitrificación, volatilización del amoniaco, captación por el cultivo, etc.

La carga hidráulica anual admisible según este concepto (C_{hNa}), viene dada por la expresión:

$$C_{hNa} = \frac{N_i(P_r - ETP) + 10C}{(1-f)N_a - N_i}$$

siendo:

C_{hNa}: carga hidráulica anual basada en las limitaciones de aplicación de nitrógeno (mm/año).

Pr: precipitación anual (mm/año).

ETP: evapotranspiración potencial anual (mm/año).

C: consumo anual de nitrógeno por el cultivo (kg/ha. año). En el caso de los chopos este consumo es del orden de 150 kg N/ha.año.

F: fracción eliminada por desnitrificación y volatilización del nitrógeno aportado (15-25%).

N_a: concentración media de nitrógeno en el agua residual (mg/l).

N_i: concentración de nitrógeno en el agua percolada (mg/l).

Una vez determinado el valor de C_{hNa} se compara con el valor de C_{hpa}:

- Si $C_{hpa} < C_{hNa}$, se toma C_{hpa} como carga hidráulica de diseño.
- Si $C_{hpa} > C_{hNa}$, se deben obtener los valores mensuales de C_{hN}, aplicando los correspondientes valores de P_{rm} y ETP_m. Los valores mensuales del término C, pueden estimarse suponiendo un reparto proporcional a los de la ETP.

Efectuados estos cálculos, se tomará como valor de C_h de diseño la suma de las cargas mensuales que resulten menores, bien por permeabilidad o por nitrógeno.

Establecido el valor de la carga hidráulica de diseño (C_h), se procede a calcular la superficie necesaria de *Filtro Verde* mediante la expresión:

$$S = \frac{365 \cdot Q}{10 \cdot C_h}$$

siendo:

S: superficie necesaria (ha).

Q: caudal medio diario de aguas residuales a tratar (m^3/día).

C_h: carga hidráulica de diseño (mm/año).

Merece un comentario el hecho de que en la determinación de la superficie necesaria para la implantación de los *Filtros Verdes* tan sólo se tiene en consideración la carga hidráulica aplicable, prescindiéndose de la carga orgánica, al asumirse que en los primeros centímetros del suelo se degrada toda la materia orgánica aportada por las aguas residuales. En el caso de la depuración de los vertidos procedentes de pequeñas aglomeraciones urbanas, esto no es totalmente cierto, dada las elevadas concentraciones de materia orgánica que estas aguas suelen aportar. Por tanto, para el diseño de *Filtros Verdes* en estas condiciones, se debe limitar la carga orgánica aplicable, al igual que se hace con la carga hidráulica, para poder lograr en los efluentes percolados las calidades exigidas.

Un factor importante en el dimensionamiento de un sistema de depuración mediante *Filtro Verde* es el hecho de las mayores necesidades de aporte de agua que éste presenta en los meses más cálidos, por lo que los emplazamientos en los que se instalen deberán contar con incremento de población en verano y/o aumento de dotación por habitante, o en su defecto, se deberá disponer de una vía de aportación hídrica complementaria: pozo, acequia de riego, etc.

6.1.2.- Características de la ubicación

Con relación al terreno, las características que éste debe reunir para el emplazamiento de un sistema de *Baja Carga,* quedan recogidas en la *Tabla IV (Metcalf&Eddy, 1995).*

Tabla IV.- Características que debe reunir el terreno en el que se implante un *Sistema de Baja Carga*.

	Óptimo	Conveniente	Pobre
Permeabilidad (mm/h)	5 – 50	1,5 - 5; 50 – 150	<1,5; >150
Profundidad hasta el freático (m)	>1,5	0,6 – 1,5	<0,6
Pendiente (%)	0 – 2	2 – 15	>15
pH	5,5 – 8,4	5,2 – 5,5	<5,2; >8,4
Conductividad (mmhos/cm)	<4	4 – 8	>8
ESP (%)	<5	5 – 10	>10

ESP: porcentaje de intercambio de sodio.

6.1.3.- Cultivos a implantar

Con relación a los cultivos a implantar en los *Sistemas de Baja Carga,* los más adecuados para los sistemas de Tipo I son los que presentan:

- Una elevada capacidad para la asimilación de nutrientes.
- Un alto consumo de agua.
- Una elevada tolerancia a los suelos húmedos.
- Una baja sensibilidad a los constituyentes del agua a tratar.
- Unas mínimas necesidades de control.

Entre los cultivos que reúnen todas, o la mayoría, de estas condiciones se encuentran diferentes tipos de céspedes (césped grama, raigrás, raigrás italiano, etc.), y ciertos cultivos arbóreos (chopos, eucaliptos, olmos, sauces, etc.).

Los sistemas de Tipo II, al no aplicar agua en exceso, permiten la aplicación de una gama más amplia de cultivos (alfalfa, trébol, algodón, soja, etc.).

En el caso de los *Filtros Verdes,* hasta el momento presente, la práctica totalidad de las instalaciones recurren al empleo de chopos como especie arbórea.

Los chopos presentan dos características muy marcadas: avidez de luz y de agua, lo que les ha convertido en pioneros, junto con los sauces, de la colonización de las riberas fluviales, de los espacios vacíos sobre los aterramientos provocados por las crecidas de los ríos en los valles, de los lechos de los torrentes, etc., donde otros árboles tienen dificultades de arraigo.

En concreto, en los *Filtros Verdes* se suele hacer uso del clon I-214: *P. x euroamericana (P. deltoides x P. nigra)*. Este clon, seleccionado en 1929 por Giacometti en Italia, es uno de los más representativos de la actual populicultura española.

El clon I-214 es de sexo femenino, por lo que desprende el clásico “algodón” (arilos) de cara al verano. Posee una copa bastante amplia, con baja dominancia apical, lo que crea problemas de poda. Su fuste es ligeramente tortuoso pero corregible con una poda correcta, que se debe aplicar antes de la formación de ramas excesivamente gruesas, dado que en este clon las ramas se rompen con relativa facilidad, desgajando la corteza (que es muy fina y lisa) del tronco. De floración precoz y defoliación a medio plazo, permite aprovechar muy considerablemente el período vegetativo.

Figura 23.- Chopos, clon I-214, procedentes de vivero, preparados para su plantación.

La propagación vegetativa es excelente, lo que sin duda es una de sus grandes virtudes, al eliminar prácticamente el riesgo de marras, con un mínimo cuidado de la plantación.

Su crecimiento es muy rápido, no siendo infrecuente alcanzar los 40 m^3/ha.año de producción y en casos excepcionales, los 60 m^3/ha.año. Su madera es lisa y muy ligera, con un peso específico de 250-280 g/dm^3.

El comportamiento del clon I-214 frente a los patógenos es desigual, pues si bien se muestra bastante resistente a las royas (*Melampsora* sp.*),* a *Dothichiza* y al chancro bacteriano (*Xanthomomas populi*)*,* es sensible a *Marssonina brunnea* y al virus del mosaico.

Respecto a las plagas, este clon es susceptible al ataque de todos los barrenadores y desfoliadores, como ocurre en la práctica totalidad de los clones de mayor crecimiento. Sin embargo, estos ataques, de producirse en buena estación, no crean serios problemas y son fácilmente controlables.

Con relación a los suelos, requiere suelos fértiles y ligeros, que no sean excesivamente gravosos ni turbosos. Se muestra sensible al fototropismo, creciendo en ocasiones inclinado. Prefiere climas cálidos y es relativamente sensible a las heladas precoces. Asimismo, es sensible al viento, desarrollando una sección de fuste ovalada, debido a esta circunstancia.

Sin salir de la familia de los chopos, otros dos clones ofrecen interesantes perspectivas para su aplicación en *Filtros Verdes*: el Campeador, que junto con el I-214 es el más representativo de la populicultura española, y el Negrito de Granada, que se cultiva fundamentalmente en la Vega del Genil.

El clon Campeador: *P. x euroamericana (P. deltoides x P. nigra)* obtenido en 1952 por cruzamiento artificial en la Sección de Genética del I.F.I.E. (Instituto

Forestal de Investigaciones y Experiencias), es un clon de gran parecido al I-124. Se trata de un clon de sexo femenino, con la copa bastante amplia, pues tiene poca dominancia apical, y fuste ligeramente flexuoso. De foliación muy precoz y defoliación intermedia.

Su capacidad de enraizamiento es excelente, lo que le permite incluso prosperar en condiciones de falta de riego, en plantaciones de raíz profunda.

Presenta un crecimiento muy rápido, similar al del I-214, siendo su comportamiento frente a los patógenos también muy parecido, destacando su resistencia al chancro bacteriano (*Xanthomomas populi*) y su sensibilidad a *Marssonina brunnea.*

El clon Negrito de Granada: *P. x euroamericana (P. deltoides x P. nigra)*, se cultiva sobre suelos muy fértiles, caracterizándose por tener una fuerte raíz pivotante, caso infrecuente en los chopos euroamericanos. De sexo masculino, presenta una copa ramosa y un fuste muy recto, produciendo una madera de buena calidad.

Con relación a otras posibles especies arbóreas para su aplicación en *Filtros Verdes*, en Melbourne (Australia), The Werribee Complex, aplica aguas residuales a una superficie de 10.851 hectáreas, ensayando con cuatro especies de eucaliptos: Flooded Gum (*E. Grandis)*, Tasmanian Blue Gum (*E. Globulus),* River Red Gum (*E. Camaldulensis)* y Sydney Blue Gum *(E. Saligna).*

Comparativamente, los chopos y los eucaliptos presentan las características siguientes, con vistas a su implantación en instalaciones de *Filtros Verdes:*

Chopos: aunque se trate de una introversión eurosiberiana, son autóctonos, lo que significa una buena adaptación, pero también un buen número de comensales, parásitos y patógenos dispuestos a instalarse sobre él. Su producción de madera es inferior a la de los eucaliptos y pasa por un período de reposo anual. No presenta problemas para que bajo su dosel se genere un buen sotobosque. Algunas especies presentan cierta tolerancia o adaptación a las aguas salinas.

Eucaliptos: se trata un género importado, y como tal carece de muchos enemigos de nuestras latitudes. No tiene período de reposo, por lo que incorpora más biomasa a lo largo de todo el año, pero en ciertas condiciones de dureza climática invernal no prosperará adecuadamente. Es sumamente aromático lo que contribuye a paliar la existencia de olores desagradables. Crea un potente sistema radicular, pero el sotobosque que genera es prácticamente inexistente, acidifica excesivamente el terreno y muchas plantas autóctonas no soportan vivir debajo de los mismos. Tiene mala prensa como árbol empleado en repoblaciones, aunque este no es el caso de un *Filtro Verde*. Existen numerosas especies de muy diverso porte, algunas de ellas se encuentran entre los árboles más altos del planeta (hasta 140 m), siendo necesario escoger una especie media, de un porte similar al de los chopos.

La *Tabla V*, compara, de forma gráfica, las características de chopos y eucaliptos, con vistas a su implantación en sistemas de tratamiento basados en la tecnología de *Filtros Verdes*.

Tabla V.- Características comparativas de chopos y eucaliptos.

	Chopos	Eucaliptos
Higrofilía	☺	😐
Resistencia a inundación	☺	😐
Resistencia a la sequía	☹	😐
Estacionalidad	☹	☺
Producción de biomasa	😐	☺
Formación de sotobosque	☺	☹
Acción sobre el suelo	☺	😐
Aprovechamiento de la madera	😐	☺
Resistencia a parásitos	☹	☺
Impacto visual	☺	😐
Aceptación popular	☺	☹

Con relación a los eucaliptos, dos son las especies de eucaliptos que presentan perspectivas más prometedoras para su empleo en *Filtros Verdes: Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus camaldulensis.*

Eucalyptus globulus: estos árboles, siempre verdes, pueden llegar a alcanzar alturas de hasta 60 m, presentando una corteza blanquecina que se desprende fácilmente en tiras en los ejemplares adultos, presentando una copa piramidal alta.

Florecen en septiembre-octubre y sus frutos son cápsulas campaniformes de color blanco, cubiertas de un polvo blanquecino y con un diámetro comprendido entre 1,4 y 2,4 cm.

Se multiplican por semillas y son sensibles a las sequías prolongadas, prefiriendo los suelos ligeramente ácidos y frescos. No resisten el frío intenso.

Su madera, con una densidad de 720 kg/m^3, presenta cualidades técnicas que la hacen muy apreciada en la industria de la obtención de celulosa.

Este árbol a parte de maderero también es medicinal, dado que sus hojas contienen aceites, que una vez destilados, se emplean en farmacia.

La densidad de plantación más habitual es de 3x3 m, llegándose a obtener producciones superiores a los 200 m^3/ha.año.

Figura 24.- Vista general y detalles de las hojas y de la corteza del *E globulus*. (www.arbolesornamentales.com) (©Jose Manuel Sánchez de Lorenzo-Cáceres).

Eucalyptus camaldulensis: árbol siempre verde que puede alcanzar los 50-60 m de altura, con copa amplia y el tronco muy grueso. Presenta una corteza lisa de color blanco, con tonos marrones o rojizos, que se desprende en placas con los años, siendo bastante resistente al frío y a las sequías.

Las hojas son alternas, colgantes, pecioladas, de color gris-verdoso y algo coriáceas. Las juveniles presentan formas de ovadas a anchamente lanceoladas, y las adultas lineal-lanceoladas, de 8-30 cm de longitud, con la punta algo torcida.

Presenta inflorescencias en umbelas de 7 a 11 flores en forma de copa, con numerosos estambres de color blanquecino amarillento.

Florece en abril-julio, presentándose el fruto en cápsulas cupuliformes con opérculo puntiagudo de 5-8 mm de longitud, multiplicándose por semillas.

Se trata de una especie maderera, siendo su madera rojiza, muy dura y densa y muy resistente al contacto con el suelo o con el agua, lo que la hace adecuada para la fabricación de postes, vigas, tablones de puentes etc. Posee además un elevado poder calorífico, que supera al del *E. globulus.*

Figura 25.- Vista general y detalles de las hojas y de la corteza del *E. camaldulensis*. (www.arbolesornamentales.com) (©Jose Manuel Sánchez de Lorenzo-Cáceres).

6.2.- Aplicación Superficial: Infiltración Rápida

En los sistemas de *Infiltración Rápida* la carga hidráulica anual, basada en la permeabilidad media del terreno en cuestión, se determina multiplicando la velocidad de infiltración (V_i), por un factor de aplicación (F_a), que depende del sistema empleado al realizar las mediciones de campo, y por el número de días que opera el sistema a lo largo del año (D_o) *(Metcalf&Eddy, 1995).*

$$C_h = V_i \times F_a \times D_o \times (24\ h/d)$$

siendo:

C_h: carga hidráulica (mm/año)

V_i: velocidad de infiltración (mm/h)

F_a: factor de aplicación

D_o: días de operación a lo largo del año (d/año)

Los valores a aplicar del factor F_a pueden obtenerse de la *Tabla VI*.

Tabla VI.- Factores de aplicación recomendados para sistemas de *Infiltración Rápida (Metcalf&Eddy, 1995)*.

Método de las mediciones de campo	Factor de aplicación (Fa)
Ensayo de infiltración en balsas	10 – 15% de la velocidad de infiltración mínima medida
Infiltrómetro cilíndrico y permeámetro con entrada de aire	2 – 4 % de la velocidad de infiltración mínima medida
Conductividad hidráulica vertical	4 – 10% de la conductividad del estrato más restrictivo

Para permitir la reoxigenación del terreno filtrante se precisa alternar los períodos de aplicación de agua a las balsas y los períodos de secado de las mismas. La *Tabla VII* muestra la duración típica de ambos tipos de períodos, en función del objetivo que se persiga, del tipo de agua aplicada y de la estación del año.

Tabla VII.- Ciclos de carga típicos en los sistemas de *Infiltración Rápida (EPA, 1981)*.

Objetivo	Influente Aplicado	Estación	Período de aplicación[a] (d)	Período de secado (d)
Maximizar la velocidad de infiltración	Primario	Verano	1 – 2	5 – 7
		Invierno	1 – 2	7 – 12
	Secundario	Verano	1 – 3	4 – 5
		Invierno	1 – 3	5 – 10
Maximizar la eliminación de nitrógeno	Primario	Verano	1 – 2	10 – 14
		Invierno	1 – 2	12 – 16
	Secundario	Verano	7 – 9	10 – 15
		Invierno	9 – 12	12 – 16
Maximizar la nitrificación	Primario	Verano	1 – 2	5 – 7
		Invierno	1 – 2	7 – 12
	Secundario	Verano	1 – 3	4 – 5
		Invierno	1 – 3	5 – 10

(a) Con independencia del objetivo o de la estación del año, los ciclos de aplicación de efluentes primarios deben limitarse a 1-2 días para evitar una colmatación excesiva del suelo.

6.3.- Aplicación Subsuperficial

6.3.1.- Tratamientos Primarios

Fosas sépticas

El volumen total de la fosa debe permitir operar con tiempos de retención hidráulica de, al menos, un día, una vez descontada la máxima capacidad reservada para el almacenamiento de lodos. Como norma general, el volumen total de las fosas sépticas oscila entre los 250 y 300 l/ h.e.

Cuando la fosa conste de dos compartimentos, se recomienda que el primero ocupe un 66% del volumen total, mientras que cuando se dispongan tres compartimentos, el primero de ellos no ocupará más del 50% del volumen total, repartiéndose el resto del volumen, a partes iguales, entre el segundo y el tercero.

La altura útil del agua en el interior de los compartimentos oscila entre 1,2 y 1,7 m, dejándose un resguardo en la parte superior de 0,3 m.

La longitud total de la fosa debe estar comprendida entre dos y tres veces la anchura de los compartimentos.

Se debe disponer de un volumen suficiente para el almacenamiento de lodos, al objeto de evitar la saturación y el consiguiente escape de parte de lo mismos con los efluentes.

Con relación a los rendimientos, la eliminación de sólidos en suspensión se sitúa en torno al 60% y la reducción de DBO_5 es de orden del 30%.

Tanques Imhoff

El dimensionamiento de las zonas de decantación y de digestión se lleva a cabo en función de criterios diferentes:

Zona de decantación

La zona de decantación de dimensiona para que el tiempo de retención hidráulica a caudal máximo sea de 90 minutos.

Zona de digestión

Para un tiempo de digestión del fango de 6 meses, el valor típico para el dimensionamiento de la zona de digestión es de 0,07 m^3/h.e.

En los tanques Imhoff se alcanzan eliminaciones de sólidos en suspensión y de DBO_5 del orden del 65 y del 35%, respectivamente.

Hoy en día es habitual recurrir al empleo de fosas sépticas y de tanques Imhoff prefabricados, generalmente en materiales plásticos, siendo necesario tan sólo especificar, en el momento de su adquisición, la población equivalente a tratar.

6.3.2.- Zanjas Filtrantes

La *Tabla VIII* recoge las recomendaciones para el diseño de las *Zanjas Filtrantes* (*EPA, 1980).*

Tabla VIII.- Recomendaciones de el diseño de *Zanjas Filtrantes.*

Parámetro	Valor
Carga hidráulica ($m^3/m^2.d$)	0,02 - 0,05
Profundidad de las zanjas (m)	0,50 - 0,70
Ancho de las zanjas (m)	0,45 - 0,80
Largo de la zanja (m)	< 20
Separación entre ejes de zanjas (m)	1,0-2,5
Separación del fondo al nivel freático (m)	> 0,60
Espesor de la cobertura (m)	> 0,15

6.3.3.- Lechos Filtrantes

Las principales recomendaciones para el diseño de los *Lechos Filtrantes* se muestran en la *Tabla IX (EPA, 1980).*

Tabla IX.- Recomendaciones de el diseño de *Lechos Filtrantes.*

Parámetro	Valor
Carga hidráulica ($m^3/m^2.d$)	0,02 - 0,05
Profundidad del lecho (m)	0,50 - 0,70
Ancho del lecho (m)	> 0,9
Largo del lecho (m)	< 30
Número de tuberías por lecho	> 2
Separación del fondo al nivel freático (m)	> 0,60
Espesor de la cobertura (m)	> 0,15

6.3.4.- Pozos Filtrantes

La *Tabla X* muestra las recomendaciones básicas para el diseño de *los Pozos Filtrantes (EPA, 1980).*

Tabla X.- Recomendaciones de el diseño de *Pozos Filtrantes.*

Parámetro	Valor
Carga hidráulica ($m^3/m^2.d$)	0,025 - 0,05
Profundidad del pozo (m)	3 - 6
Diámetro del pozo (m)	2,5 - 3,5
Separación del fondo al nivel freático (m)	> 1,2
Separación entre ejes de pozos (m)	> 4 Ø

6.3.5.- Filtros Intermitentes de Arena Enterrados

Las recomendaciones básicas para el diseño de los *Filtros Intermitentes de Arena Enterrados* se muestran en la *Tabla XI (EPA, 1980).*

Tabla XI.- Recomendaciones de el diseño de *Filtros de Arena Intermitentes Enterrados.*

Parámetro	Valor
Carga hidráulica ($m^3/m^2.d$)	< 0,040
Profundidad (cm)	60 - 90
Pendiente (%)	0,5 - 1,0
Dosificación	Inundación del filtro con frecuencia > 2 veces/d

7.- CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO POR APLICACIÓN AL TERRENO

7.1.- Sistemas de Aplicación Superficial: Filtros Verdes

7.1.1.- Marco de plantación

El marco de plantación viene definido por los objetivos que se persigan con los árboles que se implanten en el *Filtro Verde*, tanto económicos como tecnológicos. Si se pretenden conseguir elevadas producciones de madera destinadas a la industria (obtención de celulosa, combustible, etc.), los marcos de plantación que se emplean suponen menos de 16 m^2 por árbol (entre 2.500 y 625 plantas/ha). Por el contrario, si se desean obtener maderas de escuadría (sierra y desenrrollo), los marcos de plantación son medios y amplios, tanto más cuanto mayor sea el turno de corta. Esto supone superficies de más de 20 m^2 por árbol (menos de 500 plantas/ha).

Las ventajas e inconvenientes de los distintos marcos de plantación se recogen en la *Tabla XII*.

Tabla XII.- Ventajas e inconvenientes de los diferentes marcos de plantación.

	Ventajas	Inconvenientes
Marco de plantación amplio	Plantación más barata Beneficios comparativamente muy elevados Posibilidad de cultivos intercalares u otros aprovechamientos	Percepciones económicas a plazos más largos Tratamientos culturales caros, especialmente las podas
Marco de plantación estrecho	Percepción rápida de beneficios Costo reducido de tratamientos culturales, especialmente los de poda	Plantación más cara Obtención de beneficios comparativamente bajos Mayor riesgo

(Elaboración propia a partir de datos bibliográficos)

En el caso de los *Filtros Verdes* a esta serie de consideraciones debe añadirse una más, relacionada con las operaciones de mantenimiento de la instalación. Teniendo en cuenta esta consideración, se recomiendan marcos en torno a los 5 x 5 m, en base a los siguientes criterios de diseño:

- Insolación del sotobosque.
- Necesidad de vías de paso para la maquinaria.
- La elección del riego en surcos en lugar de los riegos a manta.

Las razones que determinan la importancia de estos aspectos son las siguientes:

- Una mayor separación de los árboles permite una mejor insolación del sotobosque, lo que redunda beneficiosamente en un incremento del rendimiento del *Filtro Verde*, sobre todo cuando los árboles aún no han alcanzado un buen desarrollo y sus sistemas radiculares no están muy extendidos. Tampoco debe olvidarse, que en los momentos de reposo de los chopos (otoño-invierno), es el sotobosque el que ejerce la extracción de nutrientes del suelo.

- Una mayor anchura facilita el paso de maquinaria y de los útiles de laboreo por diferentes lugares, con menor compactación del terreno. También hace posible renovar los surcos de riego por desplazamiento de los mismos, o si se considera necesario, aumentar su anchura, cambiando así las características y flexibilizando el comportamiento del *Filtro Verde.*

- La aplicación en surcos en lugar de a manta disminuye el riesgo de encharcamiento en la base de los troncos, reduciendo también el peligro de infecciones fúngicas. Se fomenta, además, un mayor desarrollo del sistema radicular, limitando la zona de formación de costra sobre el terreno a la superficie del surco, de donde es más fácil de extraer.

Si no existen motivos especiales que lo desaconsejen (por ejemplo vientos dominantes), se debe plantar a marco real en lugar de al tresbolillo.

En lo referente al mejor momento para la plantación de los chopos, la época ideal es la que discurre de primeros de febrero a mediados de marzo, anterior a la brotación primaveral.

Figura 26.- Preparación de los caballones para la plantación de los árboles en un *Filtro Verde*.

Figura 27.- Plantación de chopos en una instalación de *Filtro Verde*.

7.1.2.- Sistemas de alimentación

La superficie total ocupada por el *Filtro Verde* queda dividida en una serie de subparcelas, que van pasando, de forma rotatoria, por períodos de riego y de reposo.

Con relación al sistema de riego a aplicar cabe distinguir, entre los sistemas de riego por gravedad, el riego por inundación (o a manta) y el riego mediante surcos.

Riego por inundación: es un sistema de riego muy extendido en regadíos tradicionales. El tablar se encuentra rodeado completamente por un dique o caballón. Las características principales del riego por inundación son que la parcela está nivelada a pendiente cero y que no hay desagüe.

La forma del tablar es generalmente rectangular o cuadrada, y su tamaño muy variable. Dado que la parcela está completamente nivelada, el avance del agua en el campo es debido exclusivamente a la pendiente de la lámina de agua.

En la actualidad, el riego por inundación tiene un interés adicional debido a la introducción de la nivelación guiada por rayo láser, lo que ha facilitado considerablemente la labor de refino de la nivelación de las parcelas. Esta técnica permite disponer de parcelas de gran tamaño con una explanación muy precisa, en la que el riego por inundación puede alcanzar una elevada uniformidad y eficiencia, con un bajo coste de mano de obra.

En este tipo de alimentación es importante aportar en cada riego una capa de agua, lo suficientemente profunda, para evitar la ascensión de las raíces hacia la superficie del suelo, donde se secarían. Por otro lado, es preciso garantizar una perfecta nivelación del terreno, pues en caso contrario se provoca un fuerte gradiente de crecimiento de los árboles en la dirección de riego.

Riego por surcos: en el riego por surcos la superficie del terreno está ondulada, formando pequeños canales de longitud variable, a lo largo de los cuales circula el agua de forma independiente.

El agua se aplica de forma individual a cada surco mediante sifones o tuberías con compuertas.

Una característica importante del riego por surcos es que la parcela puede tener una pendiente lateral, sin que sea necesario realizar una labor intensa de nivelación para corregir este efecto, tal como debería hacerse en el riego por inundación.

El riego por surcos es agronómicamente muy aconsejable para cultivos que son muy sensibles al encharcamiento del cuello de las plantas, ya que al sembrarse sobre la parte superior del surco, el sistema radicular nunca se cubre por completo de agua, por lo que se garantiza su aireación aún durante riegos de elevada duración. También es un sistema indicado para suelos de mala estructura, en los que el contacto con el agua de riego produce encostramiento, lo que induce compactación y reducción del intercambio gaseoso del terreno.

En el caso de riego mediante surcos debe garantizarse la inhibición total de toda la parcela a regar, lo que es función de la permeabilidad del terreno.

Las aplicaciones en surcos en lugar de por inundación disminuyen el riesgo de encharcamiento en la base de los troncos, reduciendo también el peligro de infecciones fúngicas. Se fomenta así un mayor desarrollo del sistema radicular y la posible formación de costra sobre el terreno se limita a la superficie del surco, donde es más sencilla de controlar por volteo, con el consiguiente ahorro de laboreo. Además, la distribución del agua por medio de surcos, siempre que estos se mantengan limpios, estabiliza la tasa de infiltración.

Figura 28.- Tuberías de reparto a las distintas subparcelas de un *Filtro Verde*.

Figura 29.- Alimentación mediante inundación del terreno.

Figura 30.- Alimentación mediante surcos.

7.1.3.- Toma de muestras

Al objeto de poder determinar los rendimientos de depuración que se logran en los *Filtros Verdes,* se hace preciso disponer de sistemas que permitan la toma de muestras de las aguas percoladas.

A la hora de seleccionar un método de muestreo de las aguas percoladas debe adoptarse, como premisa fundamental, el hecho de que las muestras deben ser representativas, para ello se establecen una serie de criterios, cuyo cumplimiento se considera esencial para garantizar el objetivo propuesto. En base a ello, el método elegido:

- Ha de ser un sistema selectivo en profundidad, es decir debe permitir la toma de muestras a distintas profundidades.
- No debe alterar el material que se encuentra sobre él, de forma que no se modifiquen las condiciones naturales del terreno.
- Debe captar un volumen suficiente de muestra, para realizar en ella todas las determinaciones físicas, químicas y biológicas que sean necesarias.
- No debe alterar la composición de la muestra por someterla a condiciones anormales, o por ponerla en contacto con materiales no inertes.
- Debe permitir el muestreo de microorganismos.
- El equipo necesario para su instalación ha de ser de uso común.
- La extracción de la muestra debe poder ser realizada por cualquier operario.

Los dos sistemas más habituales para la toma de aguas percoladas, que suelen emplearse en las instalaciones de *Filtros Verdes*, son los tomamuestras de succión con cápsulas cerámicas y los lisímetros.

Tomamuestras de succión: el tomamuestras está constituido por un cilindro plástico de longitud variable, acabado en una cápsula de material poroso, generalmente cerámico. Este cilindro va cerrado herméticamente en su parte superior mediante un tapón de goma, en el que se introducen dos tubos de teflón de diferente longitud. Uno de los tubos, el más corto, permite hacer vacío en el interior del tomamuestras, con objeto de extraer el agua del suelo, o introducir aire si lo que se pretende es extraer la muestra de agua acumulada en el tomamuestras. El tubo de teflón más largo, que llega hasta la misma cápsula de cerámica, se emplea para sacar a la superficie el agua que contiene el tomamuestras.

El funcionamiento de este tipo de tomamuestras se basa en el supuesto de que, al ser instalado en el terreno, los poros de la cápsula constituyen una extensión de los poros del terreno original, con lo que el agua intersticial del terreno está sometida a la misma presión a la que están sometidos los poros de la cápsula. Si se produce un vacío en el tomamuestras, se origina un gradiente de presión, produciéndose un flujo de agua hacia el interior del tubo. El agua es extraída del tubo mediante una bomba manual, oscilando la succión producida entre los 50 y los 85 centibares.

La velocidad con la que se acumula el agua en el tomamuestras depende de la conductividad hidráulica del suelo, del valor de la succión y del vacío creado, pudiendo oscilar entre varias horas y varios días, en función del material muestreado, del grado de humedad del suelo, y por consiguiente, de la recarga existente en la zona considerada.

El volumen de agua recogida es muy variable, pudiéndose recoger desde varios centímetros cúbicos hasta un par de litros.

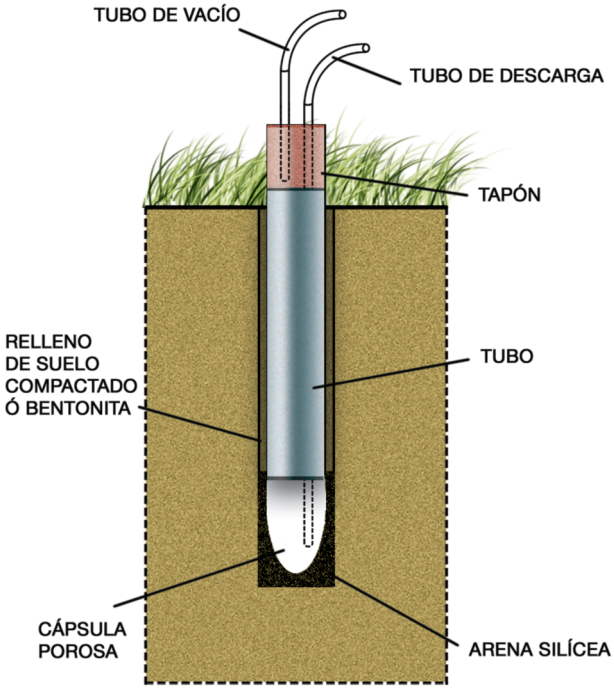


Figura 31.- Tomamuestras de succión con cápsula porosa.

Para su instalación se prepara un sondeo de la profundidad y anchura deseada, rellenando su base con arena silícea. Sobre esta arena se sitúa el tomamuestras y, finalmente, el anular del sondeo se sella con bentonita, o con el propio suelo extraído, una vez tamizado.

La utilización de este tipo de tomamuestras es bastante simple, pero presenta algunos inconvenientes:

- Problemas relacionados con la representatividad del agua muestreada, debido al tiempo de residencia de ésta en las cápsulas, y a posibles discontinuidades generadas en la instalación de los tomamuestras, que pueden originar flujos preferenciales.
- Se origina un cambio en el sistema de drenaje, dada la succión creada la colmatación de los poros de la cápsula y las limitaciones y restricciones asociadas a su funcionamiento e implantación sobre el terreno.
- Su utilización a profundidades elevadas puede presentar problemas para la extracción del agua, al tener que suministrar una gran presión de aire.
- El escaso volumen obtenido, en la mayoría de los casos, restringe la posibilidad de realizar determinados análisis.
- En época de estiaje, la succión del terreno es mayor que la que produce el tomamuestras al hacer el vacío, por lo que la recogida de muestras es problemática.
- No puede medirse oxígeno disuelto, al estar introduciendo aire para sacar la muestra.

Figura 32.- Tomamuestras de succión instalado en un *Filtro Verde*.

Lisímetros: consisten en pozos excavados en el terreno, en los que vierten drenes horizontales dispuestos a diferentes profundidades. Los drenes tienen pendientes positivas (del orden del 2%), para favorecer el discurrir de las aguas drenadas hacia el pozo de recogida.

Los pozos de captación presentan un diámetro suficiente, para que al final de cada dren se pueda disponer un recipiente para la recogida de muestras, y para que la operación de muestreo pueda realizarse con comodidad.

El fondo de los lisímetros se recubre con material filtrante (grava), para evitar el encharcamiento de los mismos.

Dado que para la colocación de los drenes se precisa excavar el terreno hasta la profundidad a la que éstos deben situarse, esto provoca la alteración de la estructura inicial del suelo, con lo que las muestras que se toman pierden representatividad con respecto a las aguas que percolan en los suelos sin alteración. Para evitar estos inconvenientes suele recurrirse al empleo de "cañas" o canaletas, que se introducen horizontalmente en el terreno, a la profundidad deseada, desde el mismo pozo de captación.

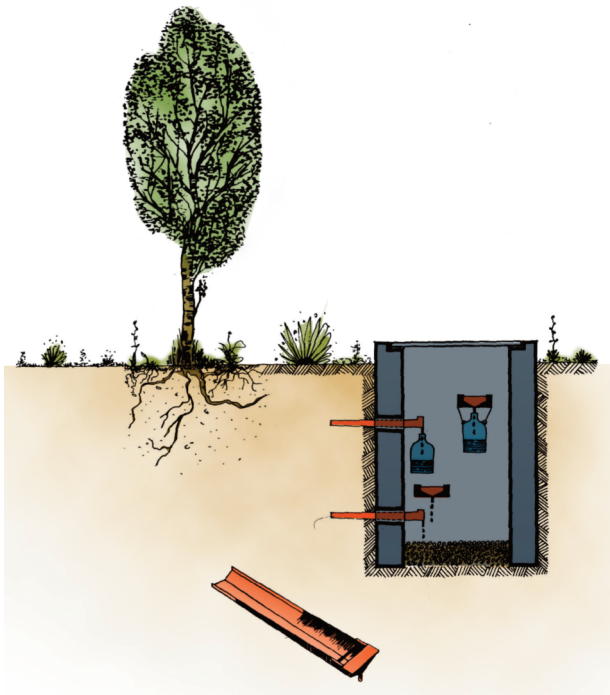


Figura 33.- Sección transversal de un lisímetro (Fuente: EMASESA).

Figura 34.- Vista superior de un lisímetro, en la que se aprecian las tuberías de toma de muestras ubicadas a distintas profundidades.

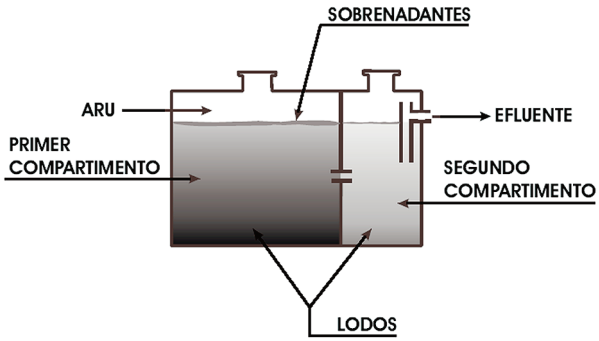


Figura 35.- *Fosa Séptica* de dos compartimentos.

7.2.- Sistemas de Aplicación Subsuperficial

7.2.1.- Tratamiento Primarios

Fosas sépticas

- Se disponen enterradas, con una capa de tierra vegetal sobre las fosas de unos 25 - 30 cm.
- Para evitar posibles contaminaciones de las aguas subterráneas, las fosas se ubican siempre más bajas que los pozos y fuentes de agua potable cercanos, y, como mínimo, a una distancia de 30 m de los mismos.
- Si las cámaras de las fosas sépticas no están comunicadas por encima de la superficie libre del agua, cada cámara independiente debe contar con su propia chimenea de ventilación, que permita la evacuación de los gases generados en la degradación anaerobia de los lodos. El diámetro de las chimeneas de ventilación debe ser al menos de 7,5 cm.

Tanques Imhoff

- Se disponen enterrados, con una capa de tierra vegetal sobre los tanques de unos 25 - 30 cm.
- Para evitar posibles contaminaciones de las aguas subterráneas, los tanques se ubican siempre más bajos que los pozos y fuentes de agua potable cercanos, y, como mínimo, a una distancia de 30 m de los mismos.
- Si bien se construyen también circulares, los tanques Imhoff suelen presentar una geometría rectangular, siendo su longitud de 3 a 5 veces la medida de su anchura.

La *Figura 36*, muestra las dimensiones típicas de un tanque Imhoff.

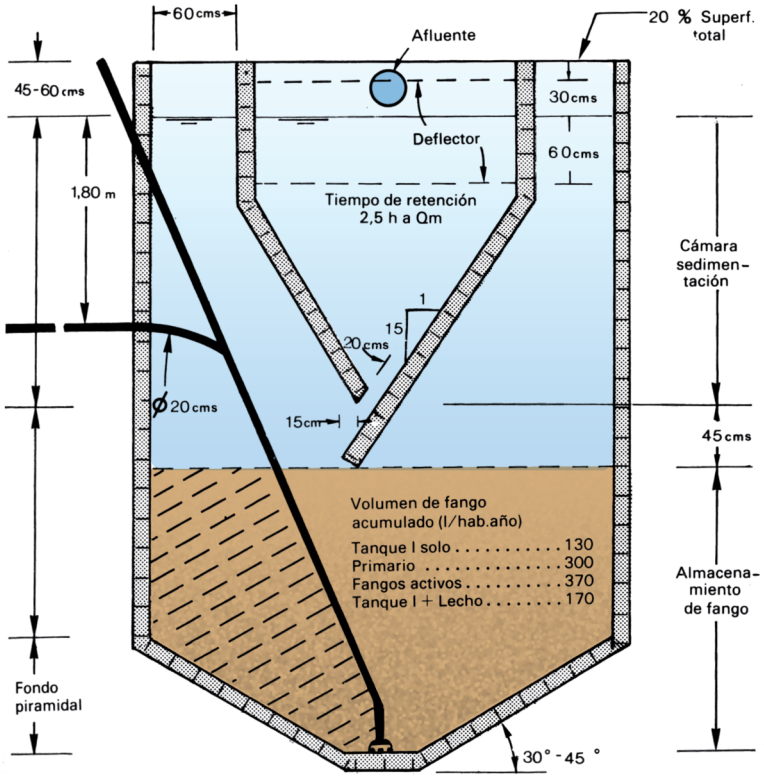


Figura 36.- Características constructivas de un *Tanque Imhoff (Salvato, J., 1982).*

7.2.2.- Zanjas Filtrantes

Las características constructivas de las *Zanjas Filtrantes* se muestran en la *Figura 37*.

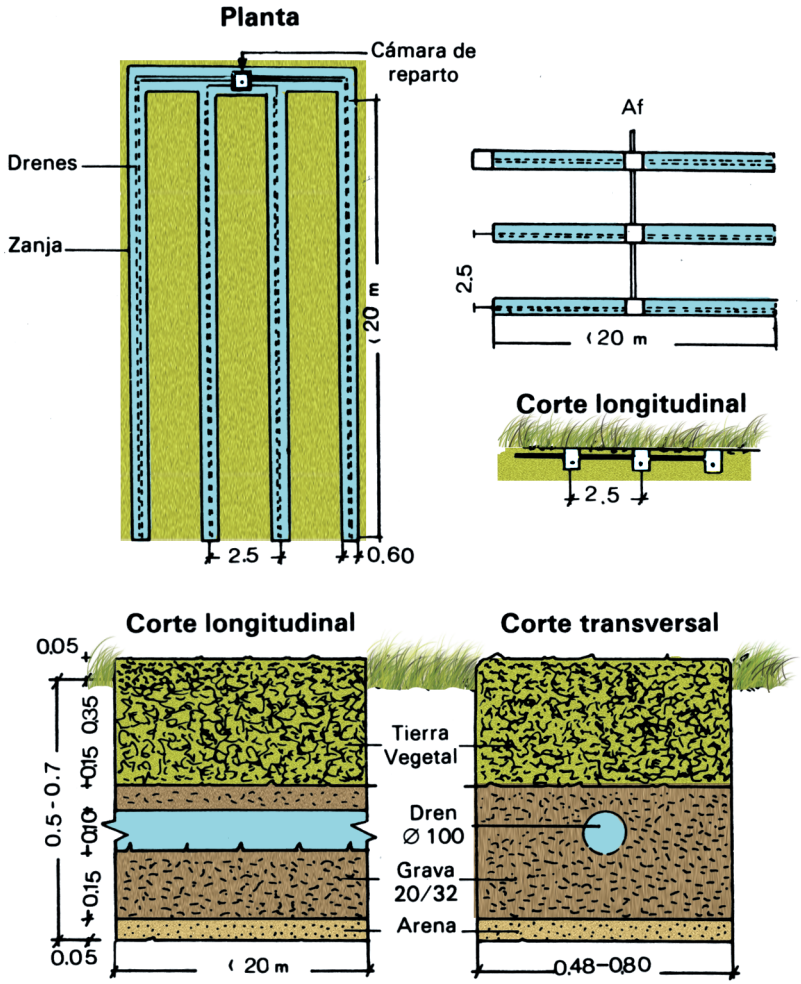


Figura 37.- Características constructivas de las *Zanjas Filtrantes (Rouhart, J., 1986).*

7.2.3.- Lechos Filtrantes

La *Figura 38* muestra las características constructivas de los *Lechos Filtrantes.*

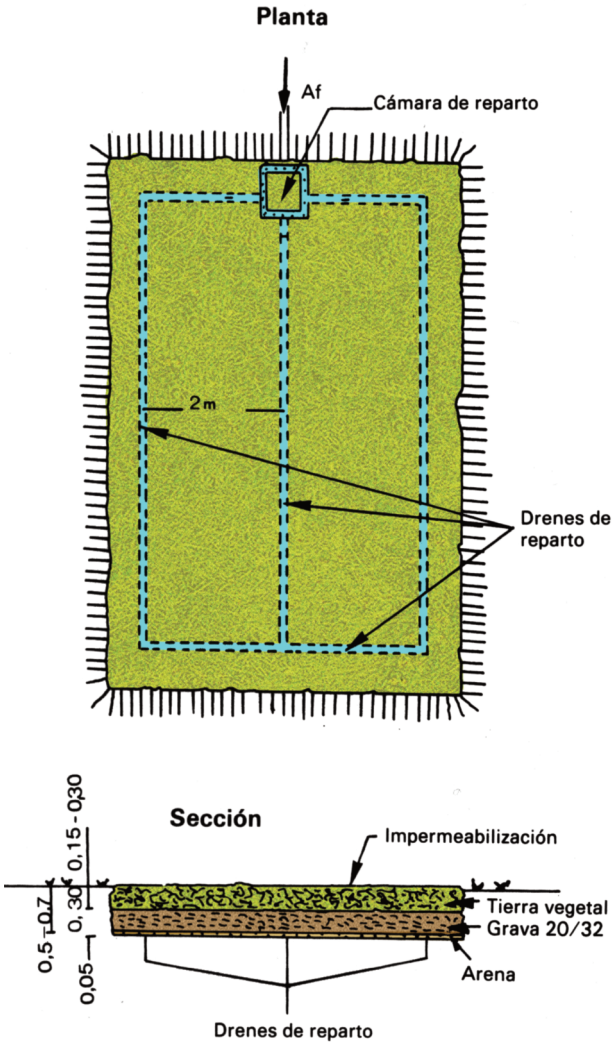


Figura 38.- Características constructivas de un *Lecho Filtrante (Rouhart, J., 1986).*

7.2.4.- Pozos Filtrantes

Las características constructivas de los *Pozos Filtrantes* se muestran en la *Figura 39*.

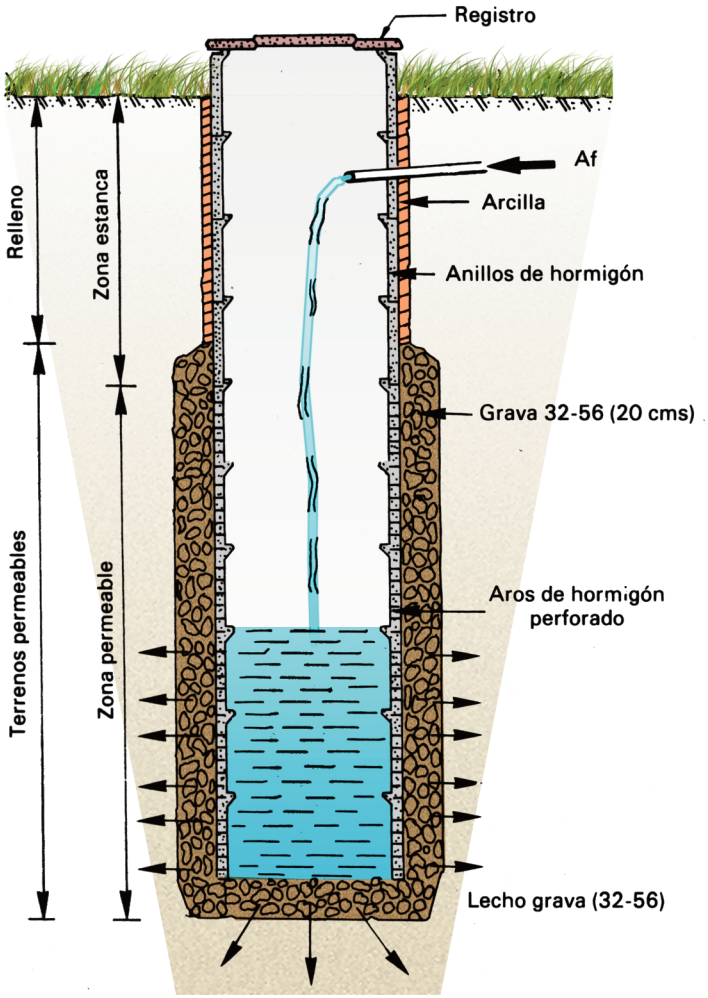


Figura 39.- Características constructivas de un *Pozo Filtrante (Rouhart, J., 1986).*

7.2.5.- Filtros Intermitentes de Arena Enterrados

Los detalles constructivos de los *Filtros Intermitentes de Arena Enterrados* se recogen en la *Figura 40*.

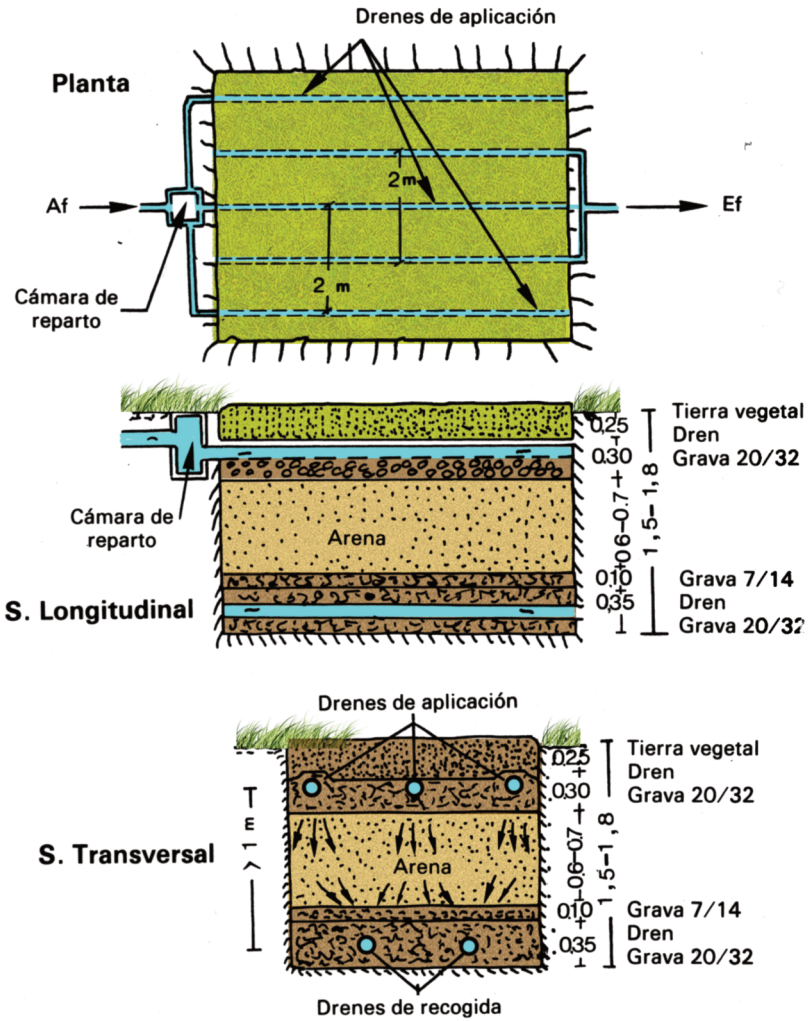


Figura 40.- Características constructivas de un *Filtro Intermitente de Arena Enterrado (Rouhart, J., 1986)*.

8.- PUESTA EN SERVICIO DE UNA INSTALACIÓN DE TRATAMIENTO POR APLICACIÓN AL TERRENO

La puesta en servicio de una instalación de tratamiento de aguas residuales mediante sistemas de *Aplicación al Terreno* no presenta ninguna complejidad, iniciándose la depuración de los vertidos de forma inmediata.

En el caso concreto de los sistemas de *Aplicación Superficial al Terreno*, y más concretamente de los *Filtros Verdes,* que es la modalidad más implantada, para su puesta en servicio se procederá en primer lugar a la revisión de los elementos integrantes del Pretratamiento (reja de desbaste, y en su caso, desarenador y desengra-sador), de las conducciones que transportan las aguas pretratadas hasta el terreno en el que se ubica el *Filtro Verde*, y de las válvulas, que permiten poner en operación las distintas subparcelas que integran la unidad de tratamiento.

Tras comprobar el correcto estado de los elementos mencionados, se procederá a permitir el paso a la depuradora de las aguas a tratar, actuando sobre las correspondientes compuertas o válvulas de entrada. Las aguas pretratadas alimentarán de forma rotativa el número de subparcelas estipulado en el diseño de la instalación, para lo que se abrirán las válvulas que permiten el paso de las aguas a estas subparcelas, mientras que las válvulas del resto de las subparcelas permanecerán cerradas.

Una vez en operación las primeras subparcelas, se comprobará el correcto funcionamiento de los lisímetros instalados, que posibilitan la toma de muestras de efluentes depurados a diferentes profundidades. El análisis fisicoquímico de estas muestras permitirá determinar si la instalación de tratamiento funciona conforme a lo previsto en la fase de diseño.

Para la puesta en servicio de los sistemas de *Aplicación Subsuperficial al Terreno* se procederá de forma similar, comprobando inicialmente el correcto estado de las instalaciones que constituyen el Pretratamiento (rejas de desbaste) y el Tratamiento Primario (fosas sépticas ó tanques Imhoff), y del sistema de tuberías que permiten el reparto de las aguas en el seno del terreno filtrante. Tras esta comprobación, se pondrá en marcha la instalación de tratamiento, permitiendo que las aguas pasen por las etapas previas, para desembocar finalmente en el terreno filtrante.

9.- MANTENIMIENTO Y EXPLOTACIÓN DE INSTALACIONES DE TRATAMIENTO POR APLICACIÓN AL TERRENO

Se describen a continuación las operaciones a llevar a cabo para la correcta explotación y mantenimiento de los diferentes elementos constitutivos de los sistemas de depuración de aguas residuales mediante la técnica de *Aplicación al Terreno.*

9.1.- Mantenimiento del Pretratamiento y Tratamiento Primario

El correcto funcionamiento de las operaciones previas de Pretratamiento y de Tratamiento Primario es de vital importancia en los sistemas de *Aplicación al Terreno*, al objeto de evitar obstrucciones en las tuberías de reparto de las aguas residuales a tratar y para minimizar los problemas de colmatación del suelo al que se aplican estas aguas.

9.1.1- Desbaste

- Cuando se detecten sedimentaciones en el fondo de los canales en los que se ubican las rejas de desbaste, se procederá a su extracción para su envío a vertedero.

- En aquellos casos en los que el desbaste se ubique en distintos canales, periódicamente se procederá a comprobar el funcionamiento y estanqueidad de las compuertas que permiten enviar las aguas hacia el canal que en cada momento se encuentre operativo. Si dichas compuertas tienen vástagos de accionamiento, periódicamente se efectuará el engrase de los mismos.

Rejas de desbaste de limpieza manual.

- La limpieza de estas rejas se efectuará por rastrillado, depositándose los residuos que se extraigan en los cestillos perforados dispuestos al efecto, con objeto de conseguir su escurrido antes de su recogida en un contenedor, para su posterior envío a vertedero.

Debe tomarse especiales precauciones al rastrillar las rejas de desbaste, dado que la firmeza de los pies del operario puede presentar dificultades debido al agua y a las grasas que suelen acumularse en la zona, a la falta de espacio para colocarse adecuadamente, y/o a la situación del contenedor en el que se depositan los residuos.

La periodicidad de la limpieza será, en principio, diaria, si bien la experiencia que se adquiera con el tiempo de explotación de la estación depuradora fijará la frecuencia real con que haya que realizarse esta operación. No obstante, es aconsejable que dicha periodicidad no sea muy superior a la citada, aunque el volumen de sólidos retenidos sea escaso, para evitar la aparición de olores desagradables.

Especial atención se prestará a la limpieza de las rejas de desbaste en períodos de lluvias, dado que en esos momentos será mucho mayor el volumen y la heterogeneidad de los sólidos retenidos en las mismas.

Rejas de desbaste de limpieza automática.

- Diariamente, para evitar la generación de olores desagradables, se deberá proceder a la retirada de los residuos extraídos para su envío a vertedero.

- Los tiempos de accionamiento de los peines de limpieza se ajustarán en consonancia con las observaciones que se efectúen sobre su funcionamiento, incrementándose en época de lluvias.

- De acuerdo con el programa de la casa fabricante de los equipos electromecánicos implantados en el desbaste, se procederá regularmente al engrase (empleando para ello el lubricante que se especifique), y a la supervisión de los elementos mecánicos que se indiquen.

- Los residuos que no sean extraídos por los peines se eliminarán de forma manual mediante rastrillado, previa desconexión del equipo.

9.1.2.- Tratamiento Primario: fosas sépticas-tanques Imhoff

- Las grasas y flotantes que se acumulen en la superficie de las fosas sépticas o tanques Imhoff se retirarán periódicamente, haciendo uso de un recoge hojas de piscina.

  La retirada de sobrenadantes se llevará acabo cuando se observe la formación de una capa consistente de los mismos, al objeto de minimizar la extracción de agua.

  Las grasas retiradas se irán acumulando en un contenedor dispuesto al efecto, para su posterior recogida por agente autorizado.

- Periódicamente, se procederá a la extracción de los lodos acumulados. Para esta operación se requerirá el empleo de un camión cisterna dotado con equipo de bombeo. Los lodos extraídos se transportarán a una estación de tratamiento de fangos o podrán deshidratarse "in situ", mediante el empleo de eras de secado.

9.2.- Mantenimiento del Tratamiento Secundario

En el caso concreto de una instalación de *Filtro Verde:*

- Periódicamente se procederá a cambiar las parcelas en riego, para lo que se cerrarán las correspondientes válvulas de alimentación de las parcelas anegadas y se abrirán las válvulas de alimentación a nuevas parcelas, hasta ahora en fase de secado/reposo.

  La rotación periódica de las parcelas a las que se aplica el agua residual dentro del filtro es un aspecto de gran importancia, pues la duración de los períodos de encharcamiento debe controlarse para evitar la aparición de condiciones de anaerobiosis y de pérdida de capacidad de filtración.

  Tras cesar la aplicación de agua a unas parcelas determinadas, éstas deben permanecer en reposo el tiempo suficiente para su reoxigenación.

- Tras la toma de muestras de las aguas lixiviadas en los correspondientes lisímetros se procederá a la limpieza de los depósitos de recogida, dejándolos preparados para la recepción de nuevos lixiviados.

- Mensualmente se inspeccionarán el tronco, las ramas y las hojas de los árboles para detectar posibles plagas o enfermedades y poder tomar las medidas pertinentes.

- Trimestralmente se le dará al filtro una labor de gradeo *(Figuras 41 y 42)*, al objeto de romper las costras que hayan podido formarse, reairear el terreno y eliminar malezas. Esta labor no será muy profunda, para evitar dañar las raíces de los árboles.

  El pase de grada nunca se efectuará en el período de reposo de los chopos (diciembre-marzo), momento en el que la extracción de nutrientes es realizada por el sotobosque que se desarrolla en el *Filtro Verde.*

Si tras el pase de grada se observase que se han formado en el filtro canales preferenciales, se procederá, con el empleo de una azada, a su eliminación.

Los restos de vegetación que quedan próximos a los troncos de los árboles se eliminarán manualmente, con el auxilio de una hoz o de una guadaña.

- La eliminación de la vegetación espontánea se podrá efectuar también mediante el empleo de guadañas o de desbrozadoras mecánicas *(Figura 43).*

Figura 41.- Pase de grada en una instalación de *Filtro Verde*.

Figura 42.- Aspecto del terreno de un *Filtro Verde* tras el pase de grada.

- Anualmente, durante los primeros años de la plantación, se someterá a los árboles a una labor de poda antes de la brotación primaveral, con el fin de conseguir que presenten un fuste lo más recto posible *(Figura 44).*

- Anualmente, para el control del crecimiento de la biomasa vegetal, se procederá a la medición de la altura de los árboles y a la determinación de su diámetro, a 1,30 m del suelo *(Figuras 45 y 46)*.

Figura 43.- Eliminación de la vegetación espontánea en un *Filtro Verde*.

Figura 44.- Labores de poda en chopos jóvenes de un *Filtro Verde*.

Figura 45.- Determinación de la altura de los árboles implantados en un *Filtro Verde*.

Figura 46.- Determinación del diámetro, a 1,30 m de altura, de los árboles implantados en un *Filtro Verde*.

9.3.- Seguimiento del proceso

Para comprobar el correcto funcionamiento de una estación depuradora basada en la tecnología de *Aplicación al Terreno,* y poder prevenir posibles anomalías, es necesario el seguimiento periódico de una serie de parámetros.

Lo ideal sería que las visitas a la estación depuradora fuesen diarias, al objeto de detectar, lo antes posible, cualquier posible incidencia que pudiese repercutir negativamente en su funcionamiento. Pero lo habitual es que esta frecuencia de visitas, en estaciones de tratamiento ubicadas en pequeñas aglomeraciones, no sea factible, y que esta periodicidad en la inspección venga marcada por la necesidad de ir cambiando las subparcelas en operación que integran el *Filtro Verde*.

En cada visita efectuada, y para dejar constancia de la misma y de cuanta incidencia se considere reseñable, el operador de la estación depuradora dispondrá de un cuadernillo en el que anotará:

- La fecha y hora de la visita a la estación depuradora.
- El caudal tratado de aguas residuales.
- El número e identificación de las subparcelas del *Filtro Verde* puestas en operación.
- El aspecto de los árboles y del efluente depurado.

- La fechas de realización de las diferentes tareas de mantenimiento: limpieza de rejas, pase de grada, poda, siega, etc.

- Los tiempos de funcionamiento de los sistemas de limpieza de las rejas automáticas (en su caso).

- Si la estación de tratamiento está dotada de energía eléctrica para el accionamiento de los elementos del Pretratamiento, del bombeo, de la iluminación, etc., se anotarán las lecturas de los contadores correspondientes.

- En el apartado de "observaciones" se registrarán cuantas incidencias se estimen oportunas sobre: características visuales y olfativas de las aguas residuales, duración de los períodos de lluvia intensa, aparición de plagas, etc.

En el caso de que la instalación de *Filtro Verde* cuente con equipos electromecánicos (rejas de desbaste de limpieza automática, caudalímetros, bombas, etc.), estos equipos dispondrán de fichas individualizadas donde se registrarán:

- Sus características operativas.

- Sus horas de funcionamiento.

- El calendario de operaciones de mantenimiento.

- Las averías sufridas.

- Todas aquellas observaciones que sobre su funcionamiento se consideren pertinentes.

Una tarea importante que habrá de realizar el operador de la estación de tratamiento es la medición de los caudales de las aguas residuales influentes. En aquellas estaciones dotadas de medidores de caudal con registro tan sólo será necesario anotar las lecturas, pero cuando se carece de estos elementos de medida será preciso recurrir a métodos *volumen-tiempo* (determinando el tiempo que tarda en llenarse un recipiente de capacidad conocida; en el caso concreto de instalaciones con cámaras de bombeo deteniendo el funcionamiento de las bombas, y determinando el incremento de altura que experimenta la lámina de agua en un tiempo determinado), o a métodos *sección-velocidad* (determinado el tiempo que una mancha, producida por la adición de un colorante, tarda en recorrer la distancia entre dos pozos de registro contiguos del colector de llegada a la estación depuradora).

Independientemente del seguimiento rutinario, será necesario realizar en laboratorio el control de una serie de parámetros que permitan conocer el nivel de depuración alcanzado, con objeto de poder determinar el grado de cumplimiento de la Directiva 91/271.

En el Diario Oficial de las Comunidades Europeas de 30 de mayo de 1991 se publicó la Directiva del Consejo 91/271, de 21 de mayo de 1991, referente al tratamiento de las aguas residuales urbanas. La Directiva contiene estipulaciones relativas al transporte, tratamiento y descarga de las aguas residuales, siendo su objetivo la protección del medio ambiente de los efectos adversos de estos vertidos, estableciendo unos requisitos mínimos para la descarga de dichas aguas residuales.

Para aglomeraciones urbanas entre 2.000 y 9.999 habitantes-equivalentes, la Directiva establece que se efectúen a lo largo del primer año de seguimiento de la estación de tratamiento un mínimo de 12 muestreos. Las muestras se tomarán durante períodos de 24 horas, a intervalos regulares y proporcionales al caudal circulante. Del total de muestreos efectuados deberán cumplir los requisitos anteriores, en cuanto a concentración o porcentaje de reducción, un mínimo de 10. Si esto se cumple en años próximos, el número de muestras a tomar será de 4.

La *Tabla XIII* recoge los parámetros a determinar, los requisitos de vertido (concentración/rendimiento) y los métodos analíticos a emplear.

Tabla XIII.- Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción.

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (1)	Método de medida de referencia
DBO_5 a 20ºC sin nitrificación (2)	25 mg/l O_2	70-90	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Determinación de oxígeno disuelto antes y después de 5 días de incubación a 20ºC ± 1 ºC, en completa oscuridad. Aplicación de un inhibidor de nitrificación
DQO	125 mg/l O_2	75	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Digestión ácida con dicromato potásico
Total de sólidos en suspensión (3)	35 mg/l (4) (más de 10000 h.e.) 60 mg/l (4) (de 2000 a 10000 h.e.)	90 (más de 10000 h.e.) (4) 70 (de 2000 a 10000 h.e.) (4)	Filtración de una muestra representativa a través de una membrana de filtración de 0,45 micras. Secado a 105ºC y pesaje Centrifugación de una muestra representativa (durante 5 minutos como mínimo, con una aceleración media de 2800 a 3200 g), secado a 105ºC y pesaje
(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada			
(2) Este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO), si puede establecerse una correlación entre DBO_5 y el parámetro sustitutivo			
(3) Este requisito es optativo			
(4) de conformidad con el apartado 2 del artículo 4, Directiva del Consejo 91/271.			

En el caso de que el vertido final de la estación de tratamiento se realice a una zona catalogada como "sensible", será necesario proceder también a la determinación de los contenidos en Nitrógeno y Fósforo, de acuerdo con la *Tabla XIV*.

Tabla XIV.- Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas realizados en zonas sensibles propensas a eutrofización. Según la situación local, se podrán aplicar uno o los dos parámetros. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción.

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (1)	Método de medida de referencia
Fósforo total	2 mg/l (10000 - 100000 h.e.)	80	Espectrofotometría de absorción molecular
	1 mg/l (más de 100000 h.e.)		
Nitrógeno total (2)	15 mg/l (10000 – 100000 h.e.) (3)	70-80	Espectrofotometría de absorción molecular
	10 mg/l (más de 100000 h.e.) (3)		
(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada			
(2) Nitrógeno total equivale a la suma de nitrógeno Kjeldahl total (N orgánico y amoniacal), nitrógeno en forma de nitrato y nitrógeno en forma de nitrito.			
(3) Estos valores de concentración constituyen medidas anuales. No obstante, los requisitos relativos al nitrógeno pueden comprobarse mediante medidas diarias cuando se demuestre que se obtiene el mismo nivel de protección. En ese caso, la medida diaria no debe superar los 20 mg/l de nitrógeno total para todas las muestras, cuando la temperatura del efluente del reactor biológico sea superior o igual a 12ºC. En sustitución del requisito relativo a la temperatura, se podrá aplicar una limitación del tiempo de funcionamiento que tenga en cuenta las condiciones climáticas regionales.			

El correcto mantenimiento de la estación depuradora y de su entorno contribuyen decisivamente a minimizar el impacto que produce este tipo de instalaciones. En este mantenimiento se incluyen el mantenimiento de la obra civil y de las conducciones, el control del buen estado del cerramiento, el cuidado de la ornamentación vegetal implantada, el control de roedores, etc.

Como norma general de obligado cumplimiento, en todas aquellas operaciones de mantenimiento en las que el operario entre en contacto con las aguas a tratar es imprescindible el empleo de guantes desechables, y al final de dichas operaciones se deberá proceder a una limpieza a fondo de las manos y de las herramientas empleadas.

En la caseta de servicio se dispondrá de un botiquín dotado de todo lo necesario para hacer frente a los pequeños accidentes que puedan ocurrir en el transcurso de las operaciones de mantenimiento de la depuradora.

9.4.- Anomalías más frecuentes y su solución

El chopo al ser un amante de la humedad, precisa un abastecimiento contínuo y constante de agua, por lo que el riego es fundamental para el buen crecimiento de la chopera.

La falta de agua se acusa en los chopos por sus hojas fláccidas, marchitas, poco desarrolladas y por una sombra ligera del árbol sobre el suelo. Esta ligera sombra es combinación de la pequeñez de las hojas, que aún quedan prendidas del árbol, junto con el desprendimiento de un gran número de ellas. En los casos de sequía las hojas que amarillean y caen antes son las de las ramas bajas del árbol y las situadas hacia el interior de la copa.

Los chopos que experimentan sequía son fácilmente atacables por muchas plagas y, en especial, por los hongos y por los insectos perforadores de la madera, por lo que el riego es esencial para conservar la chopera en un buen estado sanitario.

Copas densas, con hojas grandes y verdes y una sombra espesa sobre el suelo, son el resultado de unos buenos riegos y traen como consecuencia un adecuado crecimiento y una buena salud en la chopera.

La aparición de zonas en el filtro en las que las hojas de los chopos amarillean fuera de la época otoñal, es un claro indicio de falta de riego en esa zona en cuestión. En los casos en que esta falta de aporte de agua se deba a la formación de caminos preferenciales, desniveles etc., se procederá a su corrección.

Si se detectan síntomas de plagas o enfermedad en el material vegetal se consultará con expertos para aplicar los remedios pertinentes.

Como norma general para evitar los problemas que ocasionan los vertidos incontrolados a la red de saneamiento municipal (aceites usados, efluentes industriales, residuos de instalaciones ganaderas), se recomienda la implantación y el cumplimiento riguroso de una Ordenanza de Vertido a Colectores Municipales.

10.- VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO POR APLICACIÓN AL TERRENO

10.1.- Ventajas

Entre las ventajas que presenta la depuración de aguas residuales mediante la tecnología de *Filtro Verde* cabe destacar:

- Sencillez operativa, dado que las labores de explotación y mantenimiento se limitan a la retirada de residuos del pretratamiento, la rotación periódica de las parcelas a las que se aplica el agua residual y a un pase de grada cada trimestre, con objeto de romper las costras que hayan podido formarse y para reairear el terreno.
- Inexistencia de averías al carecer de equipos mecánicos.
- El sistema puede operar sin ningún consumo energético.
- Los costes de explotación de la estación depuradora pueden ser sufragados, en parte, por la comercialización de la madera producida.
- No se producen lodos en el proceso depurador.
- Perfecta integración en el medio rural.

- Se alcanzan rendimientos de depuración muy elevados (tanto en sólidos en suspensión y materia orgánica, como en nutrientes y patógenos).

- Admite perfectamente incrementos en los caudales de aguas residuales a tratar, ocasionados por incrementos poblacionales veraniegos.

- Actúa como sumidero de CO_2, fijando unas 10 t/año por hectárea de chopera.

10.2.- Inconvenientes

Entre los inconvenientes deben mencionarse:

- Exige una gran superficie de terreno para su implantación (la mayor de todas las *Tecnologías no Convencionales)*, por lo que su coste de implantación se relaciona directamente con el precio del suelo, requiriéndose, además, terrenos no muy escarpados, con una determinada capacidad de filtración y que no presenten acuíferos próximos a su superficie.

- No es aplicable en zonas de elevada pluviometría, dado que ésta limita enormemente las cantidades que se pueden aplicar de aguas residuales para su tratamiento.

11.- LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO POR APLICACIÓN AL TERRENO EN ANDALUCÍA Y EN ESPAÑA

El empleo de *Filtros Verdes* para el tratamiento de las aguas residuales urbanas no se encuentra muy extendido en Andalucía, que cuenta tan sólo dos con pequeñas instalaciones en Fornes (Arenas del Rey, Granada) y en Las Herrerías (Cuevas de Almanzora, Almería), con una capacidad total de tratamiento de unos 1.500 habitantes equivalentes.

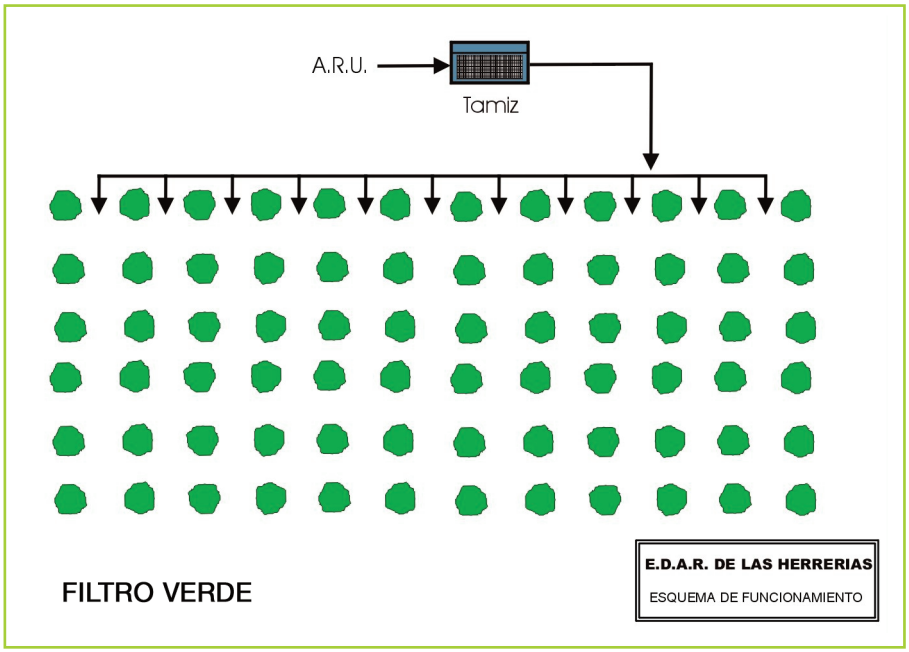


Figura 47.- Diagrama de flujo de la EDAR de Las Herrerías (Cuevas de Almanzora, Almería).

Dado el escaso número de instalaciones andaluzas, y al objeto de ampliar la información sobre este tipo de tratamiento, se considera de interés describir el comportamiento de los *Filtros Verdes* implantados en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (Sevilla).

Antiguo *Filtro Verde* implantado en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (Sevilla).

Descripción: este filtro, que estuvo operativo en el período 1989-2003, ocupaba una superficie total de 3.300 m^2, en la que se implantó el clon I-214 del *Populus euroameriacana,* (*Populus deltoides x Populus nigra*), en un marco de 6 x 3 m. El número total de árboles era de 170, con lo que la superficie por árbol se elevaba a 19,4 m^2.

La superficie *del Filtro Verde* se hallaba dividida en seis parcelas, dotadas cada una de ellas de su correspondiente boca de alimentación, que se ubicaba en el perímetro de la instalación.

Para el control analítico de su funcionamiento el sistema contaba con dos lisímetros, que recogían aguas percoladas a 30 y 60 cm de profundidad.

Figura 48.- EDAR de Las Herrerías (Cuevas de Almanzora, Almería).

Parámetros operativos: los caudales medios de aguas residuales con los que se alimentó al *Filtro Verde,* a lo largo del periodo de estudio, oscilaron entre los 8 m^3/d (en época invernal) y los 25 m^3/d (en época estival).

Rendimientos: la *Tabla XV* recoge los rendimientos medios de depuración alcanzados en el *Filtro Verde*, tras discurrir las aguas a tratar por un espesor del terreno de 60 cm.

Figura 49.- Antiguo *Filtro Verde* implantado en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes.

Tabla XV.- Rendimientos alcanzados en el antiguo *Filtro Verde* de la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes.

	Rendimientos de eliminación (%)
Sólidos en suspensión	90 – 95
DBO_5	90 – 95
DQO	85 – 90
NTK	80 – 90
Pt	75 – 85
Coliformes fecales	99 – 99,9

Evolución de las características fisicoquímicas del terreno en el que se asentaba el Filtro Verde: la *Tabla XVI* muestra la evolución temporal de los parámetros analizados en el terreno en el que se asentaba el *Filtro Verde*, en dos zonas próximas a los lisímetros, desde el inicio de su actividad (1989), hasta el momento de su eliminación (2003).

Tabla XVI. Evolución de las características del terreno en el que se asentaba el *Filtro Verde* (1989-2003).

	Original(1989)	Lisímetro a			Lisímetro b		
	1989	1994	2001	2003	1994	2001	2003
pH	7,1	7,6	6,6	7,4	7,0	7,7	7,5
Conductividad (µS/cm)	1.390	2.100	710	148	1.770	420	116
Materia Orgánica (%)	0,45	1,39	1,92	3,38	1,67	1,68	1,97
C orgánico (%)	0,26	0,80	1,13	1,99	0,97	0,99	1,16
N Kjeldhal (%)	0,03	0,08	0,08	0,12	0,09	0,05	0,07
C/N	8,6	10,6	14,1	16,6	10,6	19,8	16,6
P asimilable (ppm)	2	28	344	445	65	117	401
K asimilable (ppm)	166	445	884	1,060	390	863	889
Hierro (ppm)	17,2	67,7	954,3	1.617,2	71,2	850,7	1.453,7
Cobre (ppm)	8	18,1	40,3	31,4	19,2	30,6	39,5
Manganeso (ppm)	24,6	43,0	60,2	50,1	57,2	151,1	90,9
Zinc (ppm)	4,36	3,24	58,4	63,2	12,6	65,3	34,5
Cobalto (ppm)	0,60	0,94	< 5,89	< 5,70	1,42	< 5,92	< 5,80
Níquel (ppm)	0,46	0,39	< 5,89	< 5,29	0,64	< 5,75	< 5,92
Cadmio (ppm)	0,04	0,01	< 1,17	< 1,15	0,04	< 1,18	< 1,17
Plomo (ppm)	1,92	3,30	8,59	5,72	4,36	8,50	6,30

Notas:
Los resultados (salvo pH y Conductividad) se expresan sobre materia seca.
Lisímetro a: recoge aguas percoladas a 30 cm de profundidad.
Lisímetro b: recoge aguas percoladas a 60 cm de profundidad.

Evolución de la biomasa forestal a lo largo de la vida del Filtro Verde:
la *Tabla XVII* muestra la evolución temporal del diámetro medio de los árboles, medido a una altura de 1,30 m con relación al suelo.

Tabla XVII.- Evolución del diámetro de los chopos medidos a 1,30 m del suelo.

Fecha	03-89	06-91	01-92	03-93	12-94	03-96	03-98	03-00	04-02	24-03
Diámetro (cm)	2,5	11,1	14,9	18,2	21,5	26,4	30,3	33,5	35,1	36,0

Para la determinación del volumen de biomasa maderable (hasta 10 cm en punta delgada), se recurrió al empleo de una tabla de simple entrada, en la que en función del diámetro (en cm), se determinaba el volumen de madera (en m^3) *(Tabla XVIII).*

Tabla XVIII.- Determinación del volumen de biomasa maderable en función del diámetro.

Diámetro a 1,30 m (cm)	m^3
16	0,104
18	0,137
20	0,18
22	0,232
24	0,295
26	0,369
28	0,456
30	0,558
32	0,673
34	0,805
36	0,954

Con base a estos datos se elaboró la *Tabla XIX*, en la que se recogen:

- Columna I: el año en el que se efectuó la medición del diámetro y, entre paréntesis, los años transcurridos desde la plantación.
- Columna II: el diámetro de los árboles medido a 1,30 m de altura.
- Columna III: el volumen de biomasa maderable obtenido de la *Tabla XVIII*.
- Columna IV: el volumen de biomasa maderable por hectárea. Teniendo en cuenta que el marco de plantación era de 6 x 3 m, el número de árboles en una hectárea se elevaba a 555.
- Columna V: el volumen de biomasa maderable por hectárea y año.
- Columna VI: el incremento temporal de la biomasa maderable.

Tabla XIX.- Evolución diámetro-volumen y crecimiento medio y corriente para cada año.

I	II	III	IV	V	VI
año	cm	m^3/pie	m^3/ha	m^3/ha.año	m^3
1993 (4)	18,2	0,141	78,3	22,1	
1994 (5)	21,5	0,219	121,5	27,8	43,2
1996 (7)	26,4	0,386	214,2	33,4	92,7
1998 (9)	30,3	0,575	319,1	38,3	104,9
2000 (11)	33,5	0,772	428,5	41,7	109,4
2002 (13)	35,1	0,887	492,3	40,1	63,8
2003 (14)	36,0	0,954	529,5	37,8	31,7

Si se representa gráficamente *(Figura 50)*, el incremento temporal de la biomasa maderable en función de los años transcurridos desde la plantación de los árboles, se observa un paulatino aumento hasta que se cumplieron los once años de vida de la instalación, momento en que este incremento comenzó a decaer, lo que aconsejó la tala de los árboles.

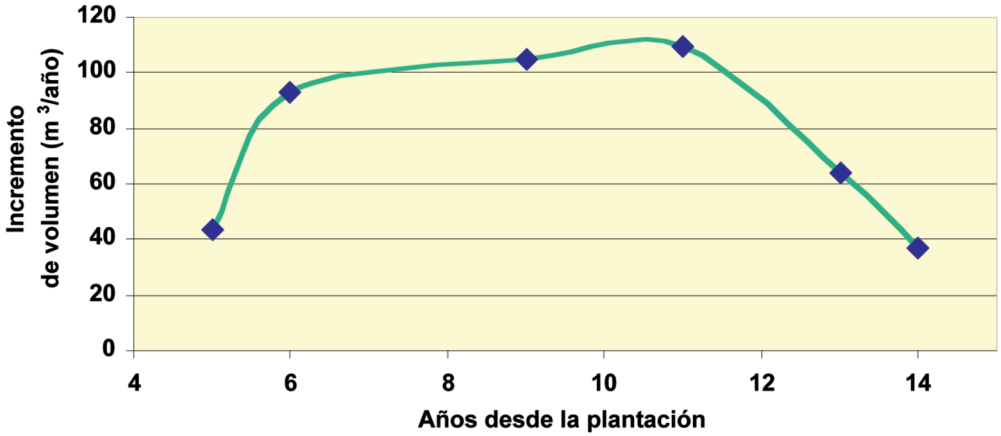


Figura 50.- Evolución del incremento anual de volumen maderable.

Nuevo *Filtro Verde* implantado en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (Sevilla)

Descripción: la nueva instalación de *Filtro Verde,* operativa desde el año 2005, se asienta en una parcela de 2.000 m^2. Como especies arbóreas se ha recurrido al empleo de chopos (clon I-214 del *Populus euroamericana*) y de eucaliptos (*Eucalyptus camaldulensis*). En concreto, se han plantado 40 chopos distribuidos en 5 filas, con un marco de plantación de 5 x 2,5 m, y 315 eucaliptos repartidos en 9 filas y en un marco de plantación de 3 x 1 m.

Los árboles se han plantado en la parte superior de los caballones que delimitan las calles, procediéndose a su riego con aguas residuales pretratadas, mediante la inundación de estas calles.

Para el control de los niveles de tratamiento que se alcanzan en el *Filtro Verde,* se han instalado un total de 6 lisímetros (3 en cada una de las parcelas que acogen a chopos y eucaliptos). Cada uno de esos lisímetros, mediante drenes, captan efluentes depurados a 30, 60 y 90 cm de profundidad.

El hecho de haber recurrido a la implantación de eucaliptos permite el estudio del comportamiento de esta especie arbórea en los *Filtros Verdes*, dado que hasta el momento presente, la totalidad de instalaciones en España recurren al empleo de chopos como especie arbórea, si bien, en otros países, principalmente en Australia, comienzan a desarrollarse experiencias con distintas especies de eucaliptos.

El *Filtro Verde* se alimenta con aguas desbastadas (3 mm), desarenadas y desengrasadas *(Figura 51).*

En la tubería de alimentación al filtro se ha instalado un medidor de caudal electromagnético para el control de los volúmenes de riego.

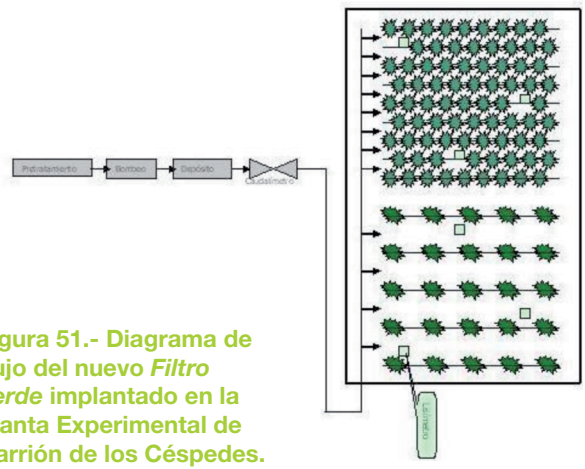


Figura 51.- Diagrama de flujo del nuevo *Filtro Verde* implantado en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes.

Parámetros operativos: los caudales medios de aguas residuales con los que se ha alimentado el nuevo *Filtro Verde* han oscilado entre los 6 m^3/d (en época invernal) y los 18 m^3/d (en época estival).

Rendimientos: la *Tabla XX* recoge los rendimientos de depuración alcanzados en el *Filtro Verde*, tras discurrir las aguas a tratar por espesores del terreno de 30 y 90 cm, respectivamente

Evolución de la biomasa forestal implantada en el Filtro Verde: las *Figuras 52 y 53* muestran la evolución temporal de las alturas de los chopos y de los eucaliptos.

Tabla XX.- Rendimientos alcanzados en el nuevo *Filtro Verde* de la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes.

	Rendimientos de eliminación (%)
Sólidos en suspensión	81 – 92
DBO5	70 – 90
DQO	75 – 92
NTK	88 – 89
Pt	57 – 86
Coliformes fecales	87,2 – 99,3

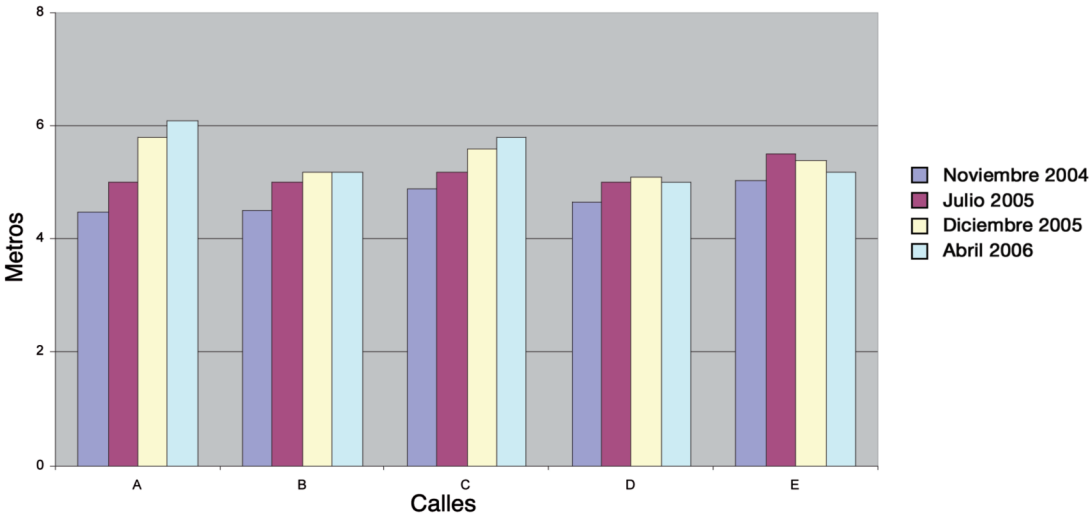


Figura 52.- Evolución de la altura de los chopos en el nuevo *Filtro Verde*.

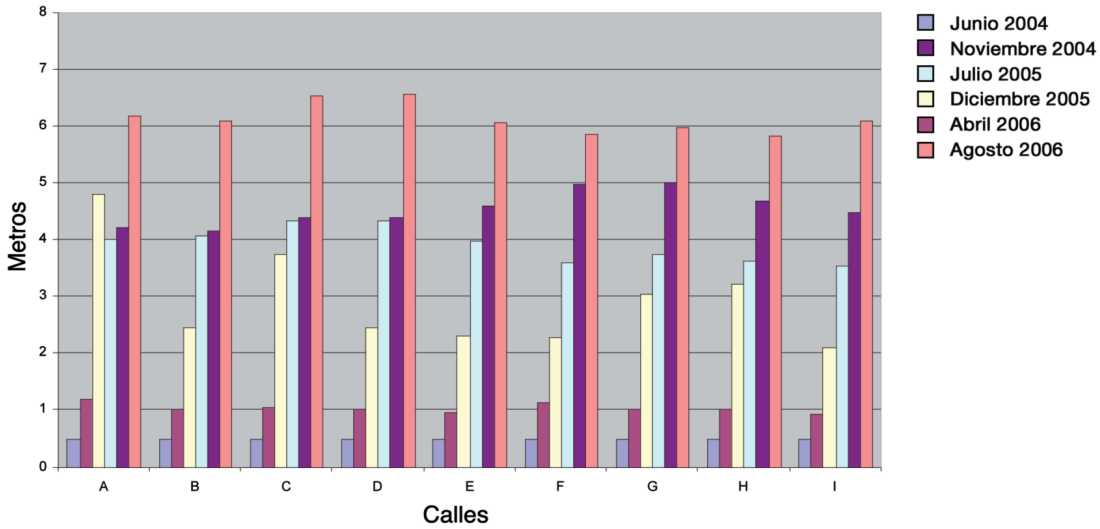


Figura 53.- Evolución de la altura de los eucaliptos en el nuevo *Filtro Verde*.

En las *Figuras 54* a *64*, puede observarse la evolución experimentada en las plantaciones de chopos (diciembre 2004 – septiembre 2006), y de eucaliptos (junio 2004 – septiembre 2006).

Figura 54.- Vista de los chopos en el momento de su plantación, Diciembre 2004.

Figura 55.- Vista de los chopos en abril 2005.

Figura 56.- Vista de los chopos en octubre 2005.

Figura 57.- Vista de los chopos en mayo 2006.

Figura 58.- Vista de los chopos en septiembre 2006.

Figura 59.- Vista de los eucaliptos en el momento de su plantación, junio 2004.

Figura 60.- Vista de los eucaliptos en septiembre 2004.

Figura 61.- Vista de los eucaliptos en abril 2005.

Figura 62.- Vista de los eucaliptos en octubre 2005.

Figura 63.- Vista de los eucaliptos en mayo de 2006.

Figura 64.- Vista de los eucaliptos en septiembre de 2006.

Con relación a otros *Filtros Verdes* existentes en España, merecen mención los implantados en Comunidad de Madrid, gestionados por el Canal de Isabel II.

Filtro Verde de Torremocha de Jarama: construido en 1988, trata las aguas de esta población, con un caudal del orden de 110 m^3/d en invierno y de 160 m^3/d en verano.

La superficie plantada es de unos 8.800 m^2, dividida en cuatro parcelas de 1.750, 1.990, 2.487 y 2.546 m^2, respectivamente.

El filtro cuenta con un total de 665 chopos plantados y su alimentación se efectúa mediante surcos.

Filtro Verde de Redueña: construido en 1988, recibe un caudal medio de unos 100 m^3/d y ocupa una superficie de unos 18.500 m^2, que se reparten en seis parcelas de 368, 826, 1.205, 1.409, 8.875 y 5.764 m^2, respectivamente. El número de chopos plantados se eleva a 374.

Las aguas residuales se someten a pretratamiento y se aplican al filtro mediante surcos.

Figura 65.- *Filtro Verde* de Redueña (Madrid).

Filtro Verde de Patones: implantado en 1993, presenta una superficie total de unos 2.300 m^2, repartidos en 6 parcelas de 108, 102, 121, 1.581, 122 y 395 m^2, respectivamente. El caudal de alimentación es de unos 100 m^3/d.

En lo referente a sistemas de *Infiltración Rápida*, España tan sólo cuenta con dos modelos experimentales diseñados y desarrollados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), al objeto de investigar la capacidad de esta tecnología en diversos tipos de materiales, unos de permeabilidad reducida (Dehesas de Guadix, Granada), y otros de elevada permeabilidad (Mazagón, Huelva). *(IGME, 2002).*

Infiltración Rápida en Dehesas de Guadix: las aguas residuales pasan por una etapa de pretratamiento (desbaste, desarenado y desengrasado), pasando a continuación a una balsa de almacenamiento (11,0 x 11,0 x 1,2 m), con una capacidad efectiva de 80 m^3.

Desde la balsa de almacenamiento las aguas pretratadas alimentan a una balsa de decantación, construida de forma similar a la balsa de almacenamiento, y de dimensiones 12 x 12 x 2 m y con un volumen de 80 m^3.

El tiempo de permanencia del agua en ambas balsas, al tener éstas igual volumen, es el mismo, unas 18 horas.

Tras su paso por la etapa de decantación, las aguas ingresan en una arqueta de control (1,5 x 1,5 x 2,0 m), que permite la descarga de las aguas clarificadas hacia la balsas de infiltración.

La instalación cuenta con dos balsas de *Infiltración Rápida*, construidas por excavación en el terreno, con unas dimensiones unitarias de 40 x 40 m en la zona superior de las balsas y de 35 x 35 m en sus bases. Las balsas se dividen a su vez en dos semibalsas. La inclinación de los taludes es del 66% y la profundidad de 2 m.

El reparto de las aguas sobre las áreas filtrantes se logra mediante sendas tuberías ranuradas de PVC, de 90 mm de diámetro.

Para la toma de muestras de efluentes lixiviados, cada balsa cuenta con un pozo de 1,5 m de diámetro, en el que descargan drenes situados cada 0,5 m, hasta una profundidad total de 3 m.

Los ensayos de infiltrometría llevados a cabo, al objeto de determinar la permeabilidad del sustrato filtrante, dieron lugar a una tasa media de infiltración de 0,0466 cm/min, oscilando entre un máximo de 0,09 y un mínimo de 0,02 cm/min.

Con relación a los rendimientos, se alcanzaron eliminaciones del 98% en DQO, la eliminación total del amoniaco, el 33% de eliminación del Nitrógeno total, el 97% de eliminación de Fósforo (como P_2O_5), y el 99,75% de reducción de los Coliformes Fecales.

Infiltración Rápida en Mazagón: a lo largo del año 1993, el IGME y el Boureau de Recherches Geominieres (BRGM) llevaron a cabo, de forma conjunta, una experiencia de tratamiento de aguas residuales urbanas mediante infiltración directa en el terreno, al objeto de:

- Determinar la capacidad de los materiales empleados como sustrato depurador.
- Esclarecer el mejor modo de funcionamiento de una estación de estas características.

Las instalaciones se construyeron a unos 4 km al oeste de Mazagón (Huelva), sobre el cordón dunar que separa el Océano Atlántico de una laguna, quedando el mar a unos 300 m de las instalaciones de tratamiento y la laguna a unos 100 m.

Mediante una serie de sondeos previos (de 7 a 32 m de profundidad), se determinó que el material del lecho filtrante estaba formado por unos 30 m de arenas de duna, sobre un sustrato de margas de gran homogeneidad. El nivel piezométrico se hallaba a una profundidad entre 6-8 m, con un gradiente hidráulico hacia el mar del 0,5%.

La instalación de tratamiento ocupa una superficie total de 0,5 hectáreas, dividida en dos zonas. La zona situada en la parte alta recibe las aguas residuales brutas, y en ella se ubican los elementos del Pretratamiento (rejilla de desbaste y desarenador estático), y del Tratamiento Primario (decantación prolongada). Las aguas decantadas pasan por rebose a una balsa de almacenamiento, que por sifón descarga en las balsas de *Infiltración Rápida*. Estas balsas, en número de 6 y acopladas por parejas, presentan unas dimensiones unitarias de 20 x 10 m.

Cada una de las balsas de infiltración cuenta con un pozo control, en el que asoman 5 puntos para el muestreo de los efluentes lixiviados, que recogen muestras a distintas profundidades (30, 60, 100, 150 y 200 cm).

Las descargas de aguas se realizaron a un ritmo de 100 m^3/d sobre dos de las balsas, lo que supone una carga hidráulica de 250 $l/m^2.d$.

Con relación a los rendimientos de depuración alcanzados, la eliminación de DQO llegó al 90% en el dren que captaba aguas a 2 m de profundidad. A este nivel la oxidación del amonio fue del 100%.

En lo referente a la eliminación de patógenos, a 2 m de profundidad se lograron abatimiento de coliformes totales de 1,3 unidades logarítmicas, de 1,1 unidades para los coliformes fecales y de 1,4 unidades para los estreptococos fecales.

El análisis de gases indicó que el sistema operaba en el rango de anaerobiosis, detectándose un rápido descenso del contenido en oxígeno con la profundidad. Los periodos de descanso de las balsas de infiltración permitían recuperar las condiciones aerobias en el sustrato filtrante.

BIBLIOGRAFÍA

Bouwer H. (1974). Design and operation of land treatment systems for minimum contamination of ground water. *Ground Water 12 (3). pp. 140-147.*

CENTA-Secretaria General de Aguas (2004). Planta Experimental de Carrión de los Céspedes. Informe 1999-2002. *Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.*

Comisión Europea (2003). Procesos extensivos de depuración de las aguas residuales. Adaptados a las pequeñas y medias colectividades (500 – 5.000 H. E.). *Oficina de las publicaciones oficiales de las comunidades europeas (Luxemburgo).*

Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. *McGraw-Hill Interamericana, Santa Fe de Bogotá (Colombia).*

Crites, R., Middlebrooks, E. y Reed, S. (2006). Natural Wastewater Treatment Systems. *CRC Press, Taylor & Francis Group.*

de Bustamante, I. (1990). Land Aplication: its effectiveness in purification of urban and industrial wastewaters in La Mancha (Spain). *Environ. Geol. Water Sci. Vol 16, nº 3. pp. 179-185.*

de Bustamante, I., Dorado, M., Vera, S. y Oliveros, C. (1998). *Filtros verdes*, un sistema para la depuración y reutilización de aguas residuales. *Tecnoambiente, nº 79. pp. 73-76.*

Dirección General de Obras Hidráulicas (1989). Plan de Investigación y Desarrollo de Tecnologías de Bajo Coste para la Depuración de Aguas Residuales. *Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.*

Dirección General de Obras Hidráulicas (1991). Tecnologías de Bajo Coste para la Depuración de Aguas Residuales. Seguimiento del Plan de Investigación y Desarrollo. *Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.*

Dirección General de Obras Hidráulicas (1993). Seguimiento del Plan I+D Tecnologías de Bajo Coste para la Depuración de Aguas Residuales. Memoria del Segundo Año de Experimentación. Junio 91-Junio 92. *Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.*

Dirección General de Obras Hidráulicas (1994). Seguimiento del Plan I+D Tecnologías de Bajo Coste para la Depuración de Aguas Residuales. Memoria del Tercer Año de Experimentación. Junio 92-Junio 93. *Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.*

Dirección General de Obras Hidráulicas (1995). Seguimiento del Plan I+D Tecnologías de Bajo Coste para la Depuración de Aguas Residuales. Julio 1993-Diciembre 1994. *Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.*

Dirección General de Obras Hidráulicas (1997). Planta Experimental de Depuración de Aguas Residuales. Evolución y Experiencias. *Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.*

EMASESA (1988). Aplicación de Tecnologías Blandas en el Centro Experimental de Aguas Residuales de Ranilla. *Ayuntamiento de Sevilla.*

IGME. (2003). La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno. *pp 168. ISBN: 84-7840-464-3.*

Isasa, N., Fernández M. (1984). Experiencias de *Filtros Verdes* en Madrid y Castilla-La Mancha. *II Congreso Nacional Recuperación de los Recursos del los Residuos. Soria.*

Jewel, W. y Seabrook, B. (1979). A History of Land Application as a Treatment Alternative.
EPA 430/9-79-012, U.S. EPA, Washington, DC.

Metcalf&Eddy. (2000). Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización.
McGraw-Hill. Inc.

Montoya, J. (1988). Chopos y choperas. *Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.*

MOPU. Dirección General de Obras Hidráulicas. (1982). Recomendaciones para la redacción del informe técnico previo para Depuración de Aguas Residuales por Aplicación al Terreno (*Filtro Verde*).

Padró, A. y Orensanz, J. (1987). El chopo y su cultivo. *Secretaría Técnica del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.*

Padró, A. y Cañada J. (1994). Las choperas como alternativas para la depuración de las aguas. *Dirección General del Medio Natural.*

Padró, A. y Cañada J. (1996). *Filtros Verdes* bajo cultivo de chopos en el río Cinca: el caso de Monzón (Huesca)*. Gobierno de Aragón.*

Reed, S., Crites, R. y Wallace, A. (1984). Handbook of Land Treatment Systems for Industrial and Municipal Wastes. *Noyes Data Crop, Park Ridge, NJ.*

Reed, S., Middlebrooks, E. y Crites, R. (1988). Natural Systems for Waste Management and Treatment. *MCGraw-Hill, New York.*

Reed, S., Crites, R. y Middlebrooks, E. (1995). Natural Systems for Waste Management and Treatment. 2nd Edition. *MCGraw-Hill, New York.*

Rohuart, J. (1986*).* *L´epuration des eaux usées domestiques. La Tribune du Cebedau, nº 513-514, 39. pp. 1-54.*

Salvato, J. (1982). Environmental engineering and sanitation*.* Third edition. *Wiley-Interscience publication. New York.*

Tragsatec (1993). Tratamiento de aguas residuales, basuras y escombros en el ámbito rural. *Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Centro y Canarias. Ed. Agrícola Española S.A.*

USEPA (1981). Process Design Manual Land Treatment of Municipal Wastewater. *U.S. Environmental Protection Agency, U.S. Army Crops of Engineers, U.S. Department of Interior, U.S. Department of Agriculture, EPA 625/1-81013.*

USEPA (1984). Process design manual for land treatment of municipal wastewater. Supplement on rapid infiltration and overland flow.
U.S. Environmental Protection Agency.

WPCF (1990). Natural systems for wastewater treatment. Manual of practice. *Water Pollution Control Federation. Imperial Printing, St. Josep, Mich. (USA). ISBN. 0-9432-44-31-5.*

White, E. y Dornbush, J. (1988). Soil changes caused by municipal wastewater applications in eastern South Dakota. *Water Resources Bulletin. 24 (2). pp. 269-273.*

http://www2.uah.es/filver/