

**GUIA  
PARA  
EL DISEÑO Y CONSTRUCCION  
DE UN  
HUMEDAL CONSTRUIDO  
CON FLUJOS SUBSUPERFICIALES**



**U.S. EPA - REGION 6**

**DIVISION DE MANEJO DE AGUAS  
RAMA DE INSTALACIONES MUNICIPALES  
SECCION TECNICA**

**GUIA  
PARA  
EL DISEÑO Y CONSTRUCCION  
DE UN  
HUMEDAL CONSTRUIDO  
CON FLUJOS SUBSUPERFICIALES**

**U.S. EPA - REGION 6**

**DIVISION DE MANEJO DE AGUAS  
RAMA DE INSTALACIONES MUNICIPALES  
SECCION TECNICA**

**AGOSTO DE 1993**



## INDICE

Prefacio . . . . .	i
I    Tecnología de humedales contruidos con flujos subsuperficiales (SFCW) . . . . .	1
Visión General . . . . .	1
SFCW . . . . .	3
Clases de tratamiento precedente . . . . .	4
II    Factores capaces de influenciar las expectativas de rendimiento . . . . .	5
III   Consideraciones para el diseño y construcción de humedales contruidos con flujo subsuperficial . . . . .	9
Requisitos para calcular el diseño . . . . .	9
Consideraciones de diseño y construcción recomendadas . . . . .	17
IV    Factores operativos que deben tomarse en cuenta . . . .	22

## PREFACIO

Este manual tiene el fin de proporcionar una guía para la selección, diseño, construcción, y operación de humedales construidos con flujos subsuperficiales. La información instructiva que contiene este documento se considera necesaria debido a la proliferación en el uso de esta tecnología, especialmente en comunidades pequeñas, en donde se ha estado llevando a cabo un esfuerzo notable para construir y mantener las instalaciones de tratamiento con un factor significativo de costo-beneficio, aprovechando los requisitos mínimos de energía que tiene dicha tecnología.

Esta tecnología también se considera una alternativa atractiva para ser utilizada en áreas sin red de alcantarillado, tales como los proyectos de las colonias a lo largo de la frontera de México-Estados Unidos. Además, también puede utilizarse en otras situaciones similares a nivel internacional.

Se reconoce que con el uso de esta tecnología han surgido problemas en algunas instalaciones. En este manual se discutirán las posibles causas de estos problemas y se dará orientación para tratar de evitar que se repitan dichos problemas.

El material instructivo que contiene este documento es el resultado de la experiencia práctica y de la observación de humedales construidos con flujos subsuperficiales que existen en el área de la Región 6, así como del trabajo llevado a cabo por el Sr. Herwood C. Reed, P.E., bajo contrato con la Agencia de Protección Ambiental.

Se agradece la contribución del Sr. Ancil A. Jones quien reconoció el valor que tenía la utilización de esta tecnología. El Sr. Jones se dedicó al uso de tecnologías nuevas e innovativas por sus características de ahorro de energía y de costos, especialmente para ser utilizadas en comunidades pequeñas. El Sr. Jones reconoció el potencial que tenía el uso de la tecnología de los humedales construidos con flujos subsuperficiales cuando entró en contacto con el trabajo experimental que llevaba a cabo la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio, para su posible uso en estaciones espaciales. Respetuosamente se dedica este manual al Sr. Jones quien falleció durante la preparación del mismo en marzo de 1993.'

Para mayor información, diríjase a:  
Jefe, Rama de Instalaciones Municipales (6W-M)  
División de Manejo de Aguas  
Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, Región 6  
Dallas, Texas 75202-2733



**CAPITULO I**  
**TECNOLOGIA DE HUMEDALES CONSTRUIDOS CON**  
**FLUJOS SUBSUPERFICIALES**

**VISION GENERAL**

El observador lego se preguntará, "¿Qué es un humedal construido con flujos subsuperficiales?" La respuesta a esta pregunta es la siguiente:

Un humedal construido con flujos subsuperficiales (SFCW), tal y como se discute en este manual, consiste en un lecho de estructura de piedra estratificada que tiene, en un extremo del lecho de piedra, un instrumento afluente que introduce las aguas residuales en forma distribuida y un instrumento efluente de recolección, en el extremo opuesto del lecho, para recoger y descargar el efluente tratado del lecho. También se puede utilizar vegetación en forma de plantas, las que se colocan estratégicamente en la superficie del lecho de piedra.

Los microbios se adhieren a la estructura de piedra y, si se utilizan plantas, al sistema de raíces de las plantas. Estos microbios son útiles ya que al sintetizar los orgánicos disueltos en las aguas residuales las están tratando. Los orgánicos disueltos son sintetizados por los microbios para proporcionar crecimiento celular. Se cree que algo de oxígeno es proporcionado a través del sistema de raíces de las plantas, pero hasta el momento no se sabe a ciencia cierta la cantidad de oxígeno que éstas proveen.

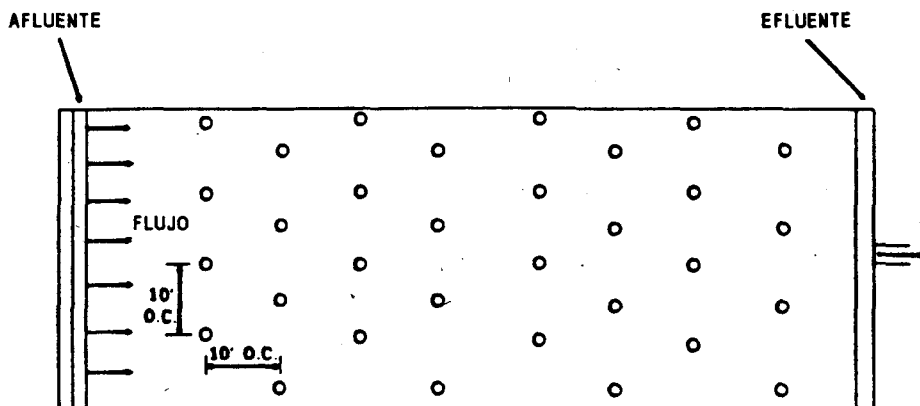
La tecnología SFCW, en la forma en que se utiliza en las aplicaciones de sistemas de tratamiento de aguas residuales, se atribuye generalmente al trabajo experimental efectuado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio, por los esfuerzos que ésta ha realizado para reciclar aguas residuales en las estaciones espaciales.

El uso de la tecnología SFCW por comunidades pequeñas y otras entidades relativamente pequeñas que buscan un método de tratamiento de aguas residuales relativamente sencillo, costo-eficiente y con rendimiento energético, ha dado como resultado la proliferación en el uso de dichos sistemas. Con el paso del tiempo, muchos de estos sistemas han experimentado problemas en su rendimiento constante. Este manual intenta identificar las posibles causas de los problemas que han ido surgiendo y recomendar el diseño, construcción y las características de operación con el fin de evitar las áreas que presentan problemas.

Cuando no se usan plantas en un SFCW, en la Región 6 esto se conoce comúnmente como un filtro de roca microbiano (MRF). Si en un SFCW se usa vegetación en forma de plantas, esto se conoce como filtro microbiano de roca con plantas (MRPF).

# HUMEDAL TIPICO CONSTRUIDO CON FLUJO SUBSUPERFICIAL

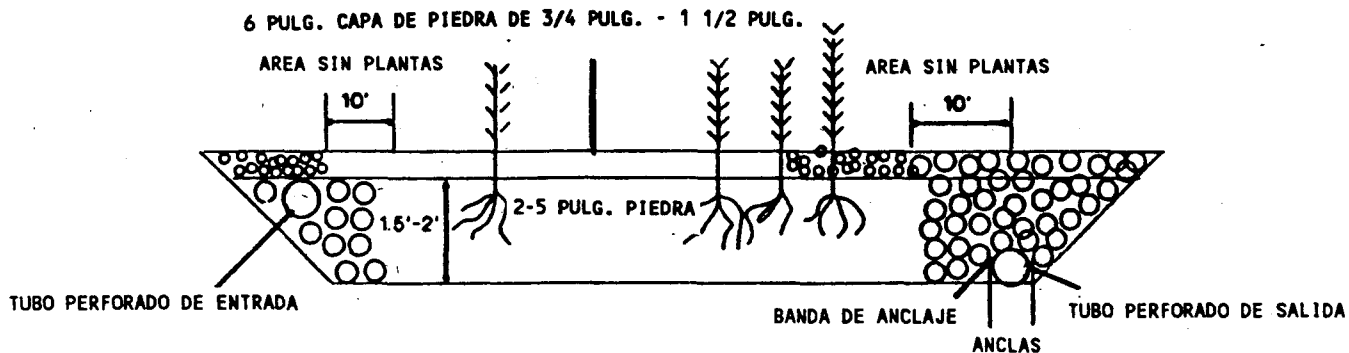
## VISTA DEL PLANO



NOTA: SE DEBE MANTENER LA DENSIDAD DE LAS PLANTAS COMO SE MUESTRA SE DEBEN ELIMINAR LAS PLANTAS ADICIONALES QUE PUEDAN DESARROLLAR Y REDUCIR LA SEPARACION ORIGINAL ENTRE LAS PLANTAS.

ILUSTRACION 1

## SECCION LONGITUDINAL



VOLUMEN - UN MINIMO DE 24 HORAS DE RETENCION EL ESPACIO VACIO ENTRE ROCAS DE 2 PULG.-5 PULG. ES DE 35% CUANDO SE USAN PLANTAS Y DE 45% CUANDO NO SE USAN PLANTAS. SE SUGIERE QUE LAS PLANTAS SE COLOQUEN A 10 PIES ENTRE LOS CENTROS.

ILUSTRACION 2

### CONFIGURACION DEL SFCW

El SFCW en el que se utilizan plantas, está representado en forma esquemática en las Ilustraciones 1 y 2. En un principio se creía que era necesaria una mayor proporción largo-ancho, en el orden de 10 a 1 o más, para evitar la posibilidad de un corto circuito de las aguas residuales a través del filtro. La experiencia ha demostrado que una mayor proporción largo-ancho puede afectar adversamente el gradiente hidráulico del lecho de piedra. Actualmente se prefieren menores proporciones largo-ancho, especialmente en los sistemas más grandes. Se puede prevenir el corto circuito si se divide el SFCW en componentes paralelos más pequeños.

La profundidad del lecho de piedra ha sido normalmente de 24 a 30 pulgadas (61.0 a 76.2 cms.). Existe alguna evidencia que indica que la profundidad del lecho puede ser de 18 pulgadas (47.5 cms.) y posiblemente evitar así condiciones aneróbicas en el fondo o cerca del fondo del lecho.

El instrumento del afluente es típicamente un tubo plástico perforado o con ranuras que se extiende a través de lo ancho del lecho para distribuir el flujo a través de lo ancho del sistema. Se recomienda que el tubo esté ubicado ya sea sobre la parte superior o bien cerca de la parte superior del lecho de piedra. Es muy importante el diseño del tubo afluente, ya que es necesario que el flujo se distribuya uniformemente a través de lo ancho del lecho.

El instrumento efluente de recolección es generalmente un tubo plástico perforado o con ranuras que se extiende a través de lo ancho del lecho para que recoja el efluente en forma uniforme. Se recomienda que el tubo esté ubicado en el fondo o cerca del fondo del lecho de piedra. Se recomienda que el tubo de salida que está al extremo del efluente del SFCW, tenga la capacidad de ajustar la elevación, la cual permita que se aumente o disminuya el nivel del agua en el lecho de piedra.

Las clases de plantas que se han utilizado en los sistemas SFCW de la Región 6 incluyen las siguientes:

- Anea del Sur (*scirpus californicus*)
- Caña (*phragmites communis*)
- Hierbas pontederiáceas como el camalote (*pontederia cordata*)
- Sagitaria (*sagitaris* spp.)
- Junco (*juncus effusus*)
- Lirio acuático (*iris pseudacorus*)
- Lenteja de Agua (*sagittaria falcata*)
- Nenúfar (*canna flaccida*)
- Aralia (*zantedeschia aethiopic*)
- Arundináceas (*dealbata* y *divericata*)

No hay información disponible sobre la cantidad de oxígeno que puede liberarse en el área de las raíces de las plantas. Se cree que se libera algo de oxígeno y que eso ayuda a mantener una condición aeróbica en las aguas residuales del lecho de piedra.

#### CLASES DE TRATAMIENTO QUE PUEDEN PRECEDER A UN SFCW

##### Tratamiento Precedente de Laguna

En un sistema de laguna que precede a un SFCW, los trabajos de tratamiento de laguna deben diseñarse y construirse para lograr un grado máximo de tratamiento factible de acuerdo con los criterios aceptables para los sistemas de laguna. Se recomienda que se organicen trabajos efluentes para minimizar la descarga de materiales sólidos de las lagunas al SFCW, y que se consulten las fuentes de información apropiadas sobre el diseño de sistemas de laguna a través de las agencias estatales correspondientes. El Manual de Diseño de la EPA, "Estanques de Estabilización de Aguas Residuales Municipales", EPA-62511-83-015 es recomendado como una fuente digna de confianza que puede usarse.

##### Tratamiento Precedente de Tanque Séptico

Se pueden utilizar los tanques sépticos como un proceso de tratamiento precedente. Se deben tomar las dimensiones apropiadas de los tanques para llevar al grado máximo la reducción de materiales sólidos que se asientan revisándolos a intervalos adecuados para mantener la eficiencia de eliminación. Se debe consultar a la agencia estatal apropiada con respecto al diseño y construcción de tanques sépticos. Por lo general, la concentración de orgánicos en los efluentes de los tanques sépticos será mucho mayor que la concentración de orgánicos en el efluente de las lagunas. Entre más alta sea la concentración en los efluentes de los tanques sépticos se necesitarán mayores períodos de retención en el SFCW para lograr la calidad deseada en los efluentes.



## **CAPITULO II**

### **FACTORES CAPACES DE INFLUENCIAR LAS EXPECTATIVAS DE RENDIMIENTO**

Basándose en la información reunida de las instalaciones existentes, como se muestra en la Tabla 1, el rendimiento del SFCW, Filtro Microbiano de Roca con Plantas (MRPF), parece muy atractivo. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que mucha de la información que aparece en la Tabla 1 fue obtenida en un período de uno a dos años después de que se inició la operación de las instalaciones. Desde que se obtuvo dicha información, el rendimiento de algunas de estas instalaciones se ha deteriorado. Es importante notar que muchos de estos primeros sistemas posiblemente fueron diseñados de acuerdo a información empírica y sin hacer referencia a procedimientos de diseño racionales y fueron construidos con gradientes hidráulicos inadecuados, con materiales que no proporcionaban la conductividad hidráulica suficiente, y con prácticas de construcción que después fueron perjudiciales en el rendimiento eficiente a largo plazo. Estas áreas de posibles problemas no fueron detectadas cuando se concibió o construyó el proyecto y sólo se han ido descubriendo conforme ha ido aumentando la experiencia, como sucede con cualquier tecnología relativamente nueva.

Se cree que las causas de algunos de los trastornos en el rendimiento fueron el control inadecuado de la estratificación y dimensión de la estructura de piedra; la estructura de una clase incorrecta de piedra; el no haberle quitado las partículas finas a la estructura de piedra, lavándola previo a la construcción; prácticas incorrectas de construcción tales como poner a funcionar repetidamente equipo pesado sobre la estructura de piedra después de que ya se había colocado; el no haber revestido la estructura del lecho con un forro impermeable; el no haber protegido los taludes laterales de la erosión, dando como resultado que se filtrara material fino en la estructura de piedra, lo cual contribuía a que se atascara; gradiente hidráulico inadecuado para acomodar el volumen del flujo; colocación impropia de las instalaciones del afluente y efluente; el no haber separado correctamente las plantas, lo que pudo haber contribuido a que se atascara la estructura de piedra; el no haber quitado el detritus de las plantas de la estructura de piedra; el haber tomado las dimensiones de los SFCW incorrectamente permitiendo así, con el tiempo, la pérdida de espacios vacíos, o vanos, en la estructura.

Se cree que el deterioro en el rendimiento de algunos de los sistemas, con el paso del tiempo, ha sido el resultado de una combinación de las causas arriba mencionadas. Debe hacerse notar que algunas de las instalaciones que presentan deterioro en su rendimiento aún están cumpliendo con sus requisitos de efluente.

Las características correspondientes al diseño de las instalaciones que contiene la Tabla 1, se muestran en la Tabla 2. Es significativo que existirá un gradiente hidráulico muy plano en aquellas instalaciones con una profundidad en el filtro del lecho de 2 pies o menos y una mayor proporción largo-ancho. Los sistemas que tienen mayores proporciones largo-ancho no proveen el gradiente hidráulico suficiente para forzar el flujo de aguas residuales a través de una estructura de piedra y de las raíces de las plantas, y con el tiempo muchos han experimentado deterioro en su rendimiento.

Dándosele la atención adecuada a las características de diseño hidráulico, y teniendo la capacidad de eliminación de orgánicos, los sistemas deberán proporcionar la eliminación de la demanda de oxígeno bioquímico (BOD) entre un 85% y un 90%. Esto se traduce en cualidades anticipadas de efluente tan bajas como 5 mg/l BOD dependiendo del BOD del afluente hacia el SFCW. Con el diseño hidráulico y capacidad de eliminación de orgánicos adecuados, la selección apropiada de piedra para la estructura, tamaño y estratificación, lavado adecuado de la piedra de la estructura, la preparación adecuada y el recubrimiento del lecho del filtro, la protección contra la erosión de los taludes laterales, el colocar cuidadosamente la piedra en la estructura durante la construcción, la colocación apropiada de los instrumentos de recolección del afluente y el efluente, y la separación adecuada de las plantas dará como resultado un sistema capaz de desempeñarse a largo plazo con muy poco deterioro en su rendimiento con el paso del tiempo.

También es importante reconocer que se necesitan ciertas prácticas en su manejo para asegurar un rendimiento continuo a largo plazo. Pueden ser necesarias prácticas tales como la eliminación del detritos de las plantas de la superficie de la estructura de filtro, y recortes periódicos de las plantas. También puede ser necesario quitar periódicamente la vegetación superflua no deseada. Para ayudar a que las plantas continúen creciendo será necesario que se poden cierto tipo de plantas. Si existe la capacidad de ajustar la elevación del instrumento de recolección del efluente, ajustes periódicos del mismo ayudarán al rendimiento del sistema.

Se recomienda que el SFCW tenga la capacidad de recircular el efluente de regreso al tratamiento precedente o al extremo del afluente del SFCW.

La atención adecuada a los factores anteriores que influyen el rendimiento del SFCW, deberá dar como resultado un sistema con capacidades de tratamiento eficientes y duraderas.

TABLA 1

FILTRO MICROBIANO DE ROCA CON PLANTAS - DATOS DE LOS SISTEMAS  
(Extraído del Borrador del Informe de febrero de 1993, Preparado por Sherwood C. Reed, P.E.)

MUNICIPALIDAD	BOD <sub>5</sub> TOTAL DEL AFLUENTE mg/l	BOD <sub>5</sub> TOTAL DEL EFLUENTE mg/l	TSS DEL AFLUENTE mg/l	TSS DEL EFLUENTE mg/l	NH <sub>3</sub> -N DEL AFLUENTE mg/l	NH <sub>3</sub> -N DEL EFLUENTE mg/l	NO <sub>3</sub> DEL AFLUENTE mg/l	NO <sub>3</sub> DEL EFLUENTE mg/l	COLIFORMES FECALES #/100 ml
Subdivisión Greenleaves (Mandeville, Luisiana)	36	12	42	10					
Corporación DeGussa (Mobile, Alabama)	5	4	23	4	4.2	2.3			
Phillips High School (Bear Creek, Alabama)	13	1	60	3	10.0	2.0	26.0	6.0	10
Monterey, Virginia	39	15	32	7	9.3	8.0			
Denham Springs, Luisiana	25	10	48	14	0.7	10.0			3800
Benton, Luisiana	18	6	57	4	0.6	2.8			
Haughton, Luisiana	12.5	2	47	14	1.1	7.2			
Carville, Luisiana	20	8	93	17	4.8	5.1	0	0	
Mandeville, Luisiana	41	10	59	7	1.4	2.1	4.4	0.8	
Benton, Kentucky	26	9	56	4	5.1	7.4	14.4	9.8	
Hardin, Kentucky (Lado Phragmites)	51	9	118	17	10.1	9.9	0.5	0.3	
Hardin, Kentucky (Lado Scirpus)	51	4.1	118	9.4	10.1	8.3	0.5	0.3	
Utica, Mississippi (Norte)	38	14	52	23	6.7	2.9	0.3	0.2	700
Utica, Mississippi (Sur)	31	11	32	11	5.6	3.1	0.3	0.2	

TABLA 2

FILTRO MICROBIANO DE ROCA CON PLANTAS - DATOS DE LOS SISTEMAS  
(Extraído del Borrador del Informe de febrero de 1993, Preparado por Sherwood C. Reed, P.E.)

	FLUJO	AREA DE LA SUPERFICIE DEL FILTRO	LONGITUD DEL FILTRO	ANCHO DEL FILTRO	PROPORCION L:W	PROFUNDIDAD DEL FILTRO	AREA TRANSVERSAL DEL FILTRO	CARGA TRANSVERSAL BOD DEL FILTRO	AREA DE LA SUPERFICIE DEL FILTRO- CARGA HIDRAULICA	TRATAMIENTO PRELIMINAR	DISEÑO HRT
MUNICIPALIDAD	MGD	ACRES	PIES	PIES		PIES	PIES <sup>2</sup>	LB/DIA/PIE <sup>2</sup>	GAL/DIA/PIE <sup>2</sup>		DIAS
Subdivisión Greenleaves (Mandeville, LA.)	0.149	1.1	457	105	4.4:1	2	210	0.213	3.1	Laguna Aireada	1.0
Corporación DeGussa (Mobile, Alabama)	1.78	2.2	475	28	17.0:1	2	56	1.3	133.8	Zanja de Oxidación	1.0
Phillips High School (Bear Creek, Ala.)	0.0155	0.502	175	125	1.4:0	1	125	1.68	0.71	Aireación Extendida	3.9
Monterey, Virginia	0.022	0.056	74	33	2.2:1	3	99	0.07	9.0	Tanque Imhoff	0.9
Denham Springs, Luisiana	1.73	15.2	1050	630	5.0:1	2	1260	0.29	2.62	Laguna Facultativa	1.0
Benton, Luisiana	0.1	1.2	900	58	15.5:1	2	116	0.13	1.9	Laguna Facultativa	2.1
Haughton, Luis.	0.1	1.5	934	72	13.0:1	2.5	180	0.058	1.49	Laguna Facultativa	4.5
Carville, Luisiana	0.1228	0.64	528	62	8.5:1	2.5	155	0.13	3.75	Laguna Aireada	1.4
Mandeville, LA.	1.224	4.56	470	207	2.0:1	2	414	1.01	12.6	3 Celdas Aireadas	0.7
Benton, Kentucky	0.1881	3.6	1092	144	7.6:1	2	288	0.14	1.15	Laguna Facultativa	5.0
Hardin, Kentucky (Lado Phragmites)	0.062	0.79	475	72	6.6:1	2	144	0.16	1.81	Estabiliza- ción de Contacto	3.3
Hardin, Kentucky (Lado Scirpus)	0.0492	0.79	475	72	6.6:1	2	144	0.15	1.44	Estabiliza- ción de Contacto	4.2
Utica, Mississippi (Norte)	0.05	1.5	280	140	2.0:1	2.1	294	0.05	1.28	Laguna Facultativa	5.0
Utica, Mississippi (Sur)	0.11	2.0	315	158	2.0:1	2.1	332	0.09	2.21	Laguna Facultativa	3.7

### **CAPITULO III**

#### **CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE HUMEDALES CONSTRUIDOS CON FLUJO SUBSUPERFICIAL**

La información en este capítulo tiene que ver con los procedimientos que se sugieren para el diseño y la construcción de un SFCW para la reducción de la demanda de oxígeno bioquímico (BOD) y el total de sólidos suspendidos (TSS). A pesar de que en esta información no hay ecuaciones de diseño específicas relacionadas únicamente a la eliminación de TSS, históricamente la concentración de TSS en el efluente del SFCW ha demostrado una relación estrecha a la concentración de BOD en el efluente.

Este capítulo no incluye sugerencias para los procedimientos en el diseño para eliminar el amoníaco, lograr la desnitrificación, la reducción de fósforo o la reducción de coliforme fecal. Para establecer los elementos a usarse en dichos procedimientos de diseño será necesario llevar a cabo una mayor investigación.

Las características hidráulicas juegan un papel vital para tener éxito en el sistema SFCW. La importancia de la distribución uniforme del flujo afluente a través de la sección transversal del lecho de piedra es imperativa. El gradiente hidráulico a través del sistema debe ser suficiente para impulsar el flujo a través de la estructura en una forma subsuperficial. La estratificación de la estructura debe tener suficiente espacio vacío o vano, para acomodar la cantidad del flujo. Por lo consiguiente, deben hacerse las provisiones adecuadas para permitir algo de pérdida de vanos debido al crecimiento de las raíces, si es que se utilizan plantas, y para la acumulación de algunos sólidos.

#### **REQUISITOS PARA CALCULAR EL DISEÑO**

El proceso para diseñar un SFCW implica varios pasos, los cuales se discuten en los siguientes párrafos. El tamaño final del filtro puede necesitar varias iteraciones de este proceso. Las sugerencias de criterios específicos están basadas en los resultados observados en las instalaciones existentes en la Región 6.

1. Determinar las condiciones existentes (BOD, TSS del afluente, temperatura promedio de las aguas residuales en el invierno, promedio del flujo diario del afluente).
2. Determinar la calidad deseada del efluente (BOD y TSS).
3. Seleccionar la profundidad del lecho (se sugiere un máximo de 2 pies [0.62 m] de la estructura de filtro), tipo de estructura, y tamaño (use una roca dura e insoluble de 2-5 pulgadas de diámetro).

4. Seleccionar un valor para los espacios vacíos dentro de la estructura de roca.

$n = 0.35$  si se usan plantas  
 $n = 0.45$  si no se usan plantas

5. Una proporción inicial de largo-ancho del SFCW debe ser seleccionada basándose en el área calculada para alcanzar la reducción deseada de BOD. Se sugiere que inicialmente se seleccione una proporción de largo-ancho de 2:1. La proporción final global del largo-ancho dependerá de los factores hidráulicos.
6. Calcular el área de la superficie necesaria utilizando la ecuación de eliminación de BOD de primer orden que se presenta como Ecuación 1.

$$A_s = (L) (W) = Q [\ln (C_o/C_e)] + K_t d n \quad (\text{Ecuación 1})^1$$

$$K_t = K_{20} (\Theta) = K^{T-20} C$$

$$K_{20} = 1.104$$

$$\Theta = 1.06$$

<sup>1</sup> Reed, Sherwood C., P.E., "Humedales Construidos con Flujo Subsuperficial para el Tratamiento de Aguas Residuales", Borrador, febrero de 1993.



En donde:

$A_s$  = Area de superficie del SFCW (Pie<sup>2</sup>) [m<sup>2</sup>]  
 $L$  = Longitud (Pie) [m]  
 $W$  = Ancho (Pie) [m]  
 $Q$  = Flujo (Pies<sup>3</sup>/día) [m<sup>3</sup>/día]  
 $C_o$  = BOD afluente (mg/l)  
 $C_e$  = BOD efluente (mg/l)  
 $K_t$  = Proporción de la constante de temperatura  
de las aguas residuales T°C  
 $K_{20}$  = Proporción de la constante de temperatura  
de las aguas residuales T = 20°C  
 $d$  = Profundidad promedio del agua en el filtro (Pie) [m]  
 $n$  = Porosidad de la estructura de filtro (% como decimal)

7. Después de determinar el área de la superficie y las dimensiones correspondientes basadas en la proporción inicial de largo-ancho, use la Ecuación de Darcy para determinar la capacidad del diseño para conducir el flujo a través del SFCW.

$$Q = K_s A S \quad (\text{Ecuación 2})^2$$

En donde:

$Q$  = Flujo capaz de pasar a través del SFCW (Pie<sup>3</sup>/día)  
[m<sup>3</sup>/día]

$K_s$  = Conductividad hidráulica de una unidad de área de la estructura (para una estructura de 2-5 pulgadas [50.8-127mm]  
 $K_s = 328,100$   
Pie<sup>3</sup>/Pie<sup>2</sup>/día [100,000 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día]) (se sugiere usar 0.3  $K_s$  como factor de seguridad)

$S$  = Gradiente hidráulico de la superficie del agua en el sistema ( $d/L$ ) (se sugiere usar 0.1 del máximo de  $S$  como un factor de seguridad)

$A$  = Area transversal del SFCW (Pie<sup>2</sup>) [m<sup>2</sup>]

Si  $Q$  en la Ecuación 2 no es igual o excede el flujo del diseño, la proporción largo-ancho debe ajustarse para disminuir la longitud, mientras se aumenta el ancho para mantener el área de la superficie determinada por la Ecuación 1. Se repite este proceso hasta que el flujo del diseño sea menor o igual al flujo determinado por la Ecuación 2.

<sup>2</sup> Ibid

NOTA: Siempre que se ajusta la proporción de largo-ancho, se debe revisar la capacidad hidráulica del flujo con la Ecuación de Darcy (Ecuación 2).

En algunos casos, las instalaciones grandes necesitarán un ancho mayor que el largo. En estos casos, se sugiere que el filtro se divida en varias unidades de filtros más pequeñas, para que individualmente cada filtro sea más largo que ancho. Esto ayudaría a prevenir un corto circuito dentro del filtro.

Los siguientes son ejemplos en los que se han utilizado los procedimientos de diseño arriba mencionados:

Ejemplo 1 - Construcción de un nuevo sistema con tratamiento precedente de laguna

Una pequeña comunidad sin red de alcantarillado debe construir un sistema de alcantarillado para tratar sus aguas residuales. La Oficina Estatal de Control de la Contaminación del Agua les exige que descarguen aguas residuales que contengan un máximo de 20 mg/l BOD y 20 mg/l TSS. El flujo que se calcula que entrará a la planta de tratamiento es de 50,000 galones/día [189.3 m<sup>3</sup>/día] y el promedio de la temperatura de aguas residuales durante el invierno es de 4.5°C. Además se debe suponer que el tratamiento precedente se hace en una laguna de 2 celdas que está diseñada para producir un efluente de 30 mg/l BOD y 90 mg/l TSS (que exige el Estado). ¿Qué tamaño de SFCW se necesitaría?

1. Condiciones existentes

a. Calidad del afluente

BOD - 30 mg/l

TSS - 90 mg/l

Flujo - 50,000 gal/día = 6,684 Pie<sup>3</sup>/día [189.3 m<sup>3</sup>/día]

b. Calidad del efluente

BOD - 20 mg/l

TSS - 20 mg/l

2. a. Profundidad del lecho - 2 pies [0.61 m]

b. Parámetros para el tamaño de la piedra en la estructura - 2-5 pulgadas [50.8-127mm] de diámetro de granito

c. Porosidad de la estructura - 35% (con plantas)

d. Proporción inicial largo-ancho - 2:1

3. Calcule el área de superficie necesaria para eliminar el BOD (Ecuación 1)

$$A_s = (L) (W) = Q [\ln(C_o / C_e)] \div K_t d n \text{ (Ecuación 1)}$$

En donde:

$$K_t = K_{20} (\theta)^{T-20^\circ C} \quad T = 4.5^\circ C$$

$$\theta = 1.06$$

$$K_{20} = 1.104$$

$$K_t = 1.104 (1.06)^{4.5^\circ - 20^\circ}$$

$$K_t = 0.447$$

d = profundidad promedio del agua en el filtro

$$d = 1 \text{ Pie } [0.305 \text{ m}]$$

$$n = 0.35$$

Basándose en estos valores, los cálculos de la longitud y del ancho serán los siguientes:

$$L \times W = (6,684 \text{ Pie}^3/\text{día}) [\ln (30/20)] \div (0.447) (1 \text{ Pie}) (0.35)$$

$$L \times W = 17,322 \text{ Pies}^2$$

$$L = 2W$$

$$2W \times W = 17,322 \text{ Pies}^2$$

$$W = (17,322 \text{ Pies}^2 \div 2)^{0.5}$$

$$W = 93 \text{ Pies } [28.3 \text{ m}]$$

$$L = 2W$$

$$L = 2(93 \text{ Pies})$$

$$L = 186 \text{ Pies } [56.7 \text{ m}]$$

4. Calcule el flujo hidráulico usando la Ecuación de Darcy

$$Q = K_s AS \text{ (Ecuación 2)}$$

En donde:

$$K_s = 328,100 \text{ Pies}^3/\text{Pies}^2/\text{día} [100,000 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}] \text{ (Use } 0.3 K_s \text{ como factor de seguridad)}$$

$$K_s = 109,366 \text{ Pies}^3/\text{Pies}^2/\text{día} [33,335 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}]$$

$$S = 2 \text{ Pies} \div 186 \text{ Pies} = 0.011 \text{ (Use } 0.1 S \text{ como factor de seguridad)}$$

$$S = 0.0011$$

$$A = 2 \text{ Pies} \times 93 \text{ Pies} = 186 \text{ Pies}^2$$

$$Q = (109,366 \text{ Pies}^3/\text{Pies}^2/\text{día}) (186 \text{ Pies}^2) (.0011)$$

$$Q = 22,376 \text{ Pies}^3/\text{día} [633.6 \text{ m}^3/\text{día}]$$

Tome nota que en este ejemplo, la capacidad hidráulica del filtro diseñado es de 22,376 pies<sup>3</sup>/día [633.6 m<sup>3</sup>/día] mientras que el promedio del flujo diario es de 6,684 pies<sup>3</sup>/día [189.3 m<sup>3</sup>/día]. Cuando existe una disparidad tan grande como ésta entre el diseño y la necesidad, el diseñador deberá revisar el área transversal del filtro para aproximarse al diseño óptimo.

Usando la Ecuación 2, con una profundidad de 1.5 pies, calcule la capacidad hidráulica:

$$Q = K_s AS$$

$$K_s = 328,100 \text{ Pies}^3/\text{Pies}^2/\text{día} \times 0.3$$

$$K_s = 109,366 \text{ Pies}^3/\text{Pies}^2/\text{día}$$

$$S = 1.5 \text{ Pies} \div 186 \text{ Pies}$$

$$S = 0.008$$

$$0.1 S = 0.0008$$

$$A = 1.5 \text{ Pies} \times 93 \text{ Pies}$$

$$A = 140 \text{ Pies}^2$$

$$Q = (109,366 \text{ Pies}^3/\text{Pies}^2/\text{día} \times 140 \text{ Pies}^2) \times (0.0008)$$

$$Q = 12,249 \text{ Pies}^3/\text{día} [347 \text{ m}^3/\text{día}]$$

La capacidad hidráulica de 12,249 es aún mucho mayor que la necesaria de 6,684. Continuando con este proceso de revisión nos dará la configuración óptima de diseño de 186 pies de largo, 93 pies de ancho, y 1.25 pies de profundidad con una capacidad hidráulica de 8,881 pies<sup>3</sup>/día.

Se sugiere que en donde sea posible, se divida el SFCW en celdas múltiples, que estén separadas por bermas lo suficientemente anchas para acomodar el equipo pesado. Esto permitiría la colocación de la estructura de piedra y el mantenimiento del SFCW sin tener que poner el equipo pesado sobre la estructura en sí. Dicha división también ayudaría un flujo uniforme dentro de cada una de las celdas para facilitar el tratamiento y para permitir que por lo menos una celda pueda ser excluida mientras se le da mantenimiento.

Al usar esta sugerencia con el ejemplo anterior, el SFCW podría dividirse en tres celdas, siendo cada una de 31 pies x 186 pies, con una profundidad en la estructura de piedra de 1.25 pies.

En resumen, se debe hacer notar que para cada diseño se tendrá que seguir el proceso descrito en el ejemplo anterior. Tomará varios pasos el determinar la dimensión óptima para una instalación, pero si se toman en cuenta cuidadosamente estas sugerencias y procedimientos, esto minimizará los problemas que han ocurrido en instalaciones ya existentes.

#### Tiempo de Retención

El cálculo del tiempo de retención teórico es el siguiente:

$$\begin{aligned}\text{Tiempo de retención} &= (\text{Volumen} \times \text{espacio vacío}) \div (\text{Flujo}) \\ &= ((186 \text{ Pies}) (93 \text{ Pies}) (2 \text{ Pies}) \times 0.35) \div 6,684 \text{ Pies}^3/\text{día} \\ \text{Tiempo de retención} &= 1.81 \text{ días}\end{aligned}$$

#### Ejemplo 2 - Diseñe un SFCW para recibir el efluente de un tanque séptico

Se propone agregar un SFCW a un tanque séptico. Este sistema in-situ deberá tener las dimensiones para una típica familia de cuatro y un flujo efluente per cápita de 80 GPD [0.303 m<sup>3</sup>/día]. La calidad del efluente que se desea obtener del SFCW es de 20 mg/l BOD y 20 mg/l TSS. La temperatura promedio de aguas residuales durante el invierno es de 4.5°C.

##### 1. Condiciones existentes

$$\text{Carga orgánica/cápita} = 0.17 \text{ lbs. BOD/cap/día [77.1 gramos BOD/cap/día]}$$

$$\text{Carga} = 0.17 \text{ lbs/cap/día} \times 4.0 \text{ personas/residencia} = 0.68 \text{ lbs BOD/día [308.4 gramos BOD/día]}$$

$$\text{Flujo} = 80 \text{ gal/cap/día} \times 4.0 \text{ personas/residencia} = 320 \text{ gal/día}$$

$$\text{Flujo} = 43.0 \text{ Pies}^3/\text{día [1.22 m}^3/\text{día]}$$

Concentración de BOD al tanque séptico =  $0.68 \text{ lb BOD/día} \div 0.00032 \text{ MGD} \times 8.34 \text{ lb/gal} \times 1 \text{ ppm/mg/l}$

Concentración de BOD al tanque séptico =  $255 \text{ mg/l}$

Eliminación de BOD en el tanque séptico =  $30\%$  (Hipótesis)

Concentración de BOD al filtro =  $0.70 \times 255 = 180 \text{ mg/l}$

2. Calcule el área de superficie que se necesita para eliminar BOD.

$$A_s = L \times W = Q[\ln(C_o/C_e)] \div K_t d n \quad (\text{Ecuación 1})$$

En donde:

$$K_t = K_{20} (\theta)^{T-20^\circ\text{C}}$$

$$K_{20} = 1.104$$

$$\theta = 1.06$$

$$T = 4.5^\circ\text{C}$$

$$K_t = (1.104) (1.06)^{4.5-20} = 0.447$$

$$d = 1 \text{ Pie} [0.305 \text{ m}]$$

$$n = 0.35$$

$$L \times W = (43 \text{ Pies}^3) [\ln(180/20)] \div \{(0.447) (1 \text{ Pie}) (.35)\}$$

$$L \times W = 604 \text{ Pies}^2 [56.2 \text{ m}^2]$$

Suponiendo una proporción largo-ancho de 10:1

$$L = 10W$$

$$10W \times W = 600 \text{ Pies}^2$$

$$W = (600 \div 10)^{0.5}$$

$$W = 7.8 \text{ Pies} [2.38 \text{ m}]$$

$$\text{Longitud} = 78 \text{ Pies} [23.8 \text{ m}]$$

3. Calcule la capacidad hidráulica con la Ecuación de Darcy

$$Q = K_s AS \quad (\text{Ecuación 2})$$

En donde:

$$A = 2 \text{ Pies} \times 7.8 \text{ Pies} = 15.6 \text{ Pies}^2 [1.45 \text{ m}^2]$$



$K_s = 328,100 \text{ Pies}^3/\text{Pies}^2/\text{día}$  (use 0.3  $K_s$  como factor de seguridad)

$$K_s = 1/3(328,100) = 109,366 \text{ Pies}^3/\text{Pies}^2/\text{día} [33,335 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}]$$

$$S = d \div L = 2 \text{ Pies} \div 78 \text{ Pies}$$

$$S = 0.026 \text{ (use 0.1 como factor de seguridad)}$$

$$S = 0.10(0.026) = 0.0026$$

$$Q = (109,366) (15.6) (.0026)$$

$$Q = 4,436 \text{ Pies}^3/\text{día} [125.6 \text{ m}^3/\text{día}]$$

Basándose en los cálculos anteriores, el diseño deberá obtener la eliminación necesaria de BOD y deberá proporcionar la capacidad hidráulica adecuada.

Al usar el mismo procedimiento del Ejemplo 1, la profundidad del SFCW in-situ puede ajustarse para hacer más favorable el volumen del SFCW mientras se mantiene la capacidad de eliminación de BOD.

#### Tiempo de Retención

El cálculo del tiempo de retención teórico es como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Tiempo de retención} &= (\text{Volumen} \times \text{espacio vacío}) \div (\text{Flujo}) \\ &= (7.8 \text{ Pies}) (78 \text{ Pies}) (2 \text{ Pies}) \times 0.35 \div 43 \\ &\text{Pies}^3/\text{día} \end{aligned}$$

$$\text{Tiempo de retención} = 9.9 \text{ días}$$

#### CONSIDERACIONES DE DISEÑO Y CONSTRUCCION RECOMENDADAS

Al desarrollar el SFCW, se deben tomar en consideración varias características de diseño y construcción con el fin de aumentar en la instalación ya construida, la habilidad para funcionar adecuadamente y mejorar su capacidad operativa.

#### Estratificación de la Estructura

El SFCW tiene dos capas de estructura estratificada de piedra: (1) una capa subsuperficial a la que debe confinarse el flujo de las aguas residuales y (2) una capa superficial que se utiliza como base para las plantas. La capa subsuperficial tiene un máximo de 2 pies de profundidad y la capa superficial tiene un máximo de 6 pulgadas de profundidad. Cada capa debe estratificarse de la siguiente manera.

### Capa Subsuperficial

Con el gradiente hidráulico del SFCW relativamente plano, una estructura con espacios vacíos grandes aumenta el movimiento de las aguas residuales a través del SFCW. Para lograr un espacio vacío adecuado, se recomienda que el tamaño de piedra para la estructura sea de 2-5 pulgadas [50.8-127 mm] de diámetro con la siguiente estratificación:

#### Estratificación Recomendada para una Estructura SFCW

0% Retenido	5.0 pulg. [125 mm]	cedazo
10-20% Retenido	4.5 pulg. [106 mm]	cedazo
30-40% Retenido	4.0 pulg. [100 mm]	cedazo
50-80% Retenido	3.0 pulg. [ 75 mm]	cedazo
100% Retenido	2.0 pulg. [ 50 mm]	cedazo

La estratificación debe verificarse en el lugar en donde se origina y nuevamente en el lugar de la construcción. La piedra de la estructura deberá también lavarse antes de que se coloque en el SFCW, para quitarle cualquier material fino.

### Capa Superficial

La capa de seis pulgadas de roca que va en la superficie del SFCW deberá componerse de 3/4 - 1½ pulgadas [19.1-38.1 mm] de roca lavada lo que será la base para las plantas.

#### Estratificación Recomendada para la Estructura de la Superficie

0% Retenido	1.5 pulg. [37.5 mm]	cedazo
40 - 75% Retenido	1.0 pulg. [25.0 mm]	cedazo
85 - 100% Retenido	3/4 pulg. [19.0 mm]	cedazo
100% Retenido	1/2 pulg. [12.5 mm]	cedazo

### Colocación de la Piedra de la Estructura

La colocación de la piedra de la estructura es crítica debido a la necesidad de mantener espacios vacíos dentro del SFCW. La piedra debe colocarse en un subsuelo seco, preferentemente sobre un forro sintético. El forro evita que se transfieran hacia arriba partículas de tierra del subsuelo. Nunca se debe permitir equipo

pesado sobre la estructura de filtro. Esto se hace para evitar que los espacios vacíos se reduzcan a causa de compactación. La colocación de la piedra en la estructura debe hacerse a mano o con un cucharón bivalvo (de almeja).

#### Protección del Talud Lateral/Substrato

Es esencial prevenir la erosión del talud lateral y la transferencia del subsuelo para proteger la integridad del SFCW. Se recomienda la instalación de un forro sintético. Se debe instalar un forro para prevenir la infiltración por debajo del forro y sobre los taludes laterales.

#### Capacidades de Recirculación

Los sistemas más grandes, diseñados con tipos convencionales de tratamiento precedente, (a excepción de los tanques sépticos) deben tener la capacidad de recircular el efluente del SFCW de vuelta a través del tratamiento precedente. Se requiere la recirculación cuando el efluente no cumple con los requisitos del permiso. También es importante poder recircular para aumentar el flujo, cuando éste está bajo, para evitar que el filtro se seque.

#### Estructuras del Afluente/Efluente

La estructura del afluente debe diseñarse para distribuir el flujo uniformemente a través del ancho del SFCW y éste debe colocarse cerca de la superficie de la estructura de piedra. La estructura del efluente debe colocarse cerca del fondo del SFCW y el tubo de descarga del efluente debe diseñarse para que se pueda ajustar y así permitir el control del nivel del agua dentro del SFCW.

#### Uso de Plantas

A pesar de que se ha recomendado el uso de plantas en el SFCW, varios sistemas sin plantas han logrado la reducción deseable de BOD y TSS. Las plantas juegan un papel en la transferencia de oxígeno a las aguas residuales en el filtro, aunque no se sabe la cantidad real de transferencia conforme a cada clase de planta. Las plantas también pueden añadir carga orgánica en el filtro si se permite que las hojas caigan a la superficie y se descompongan. Esto se debe tomar en consideración cuando se selecciona la clase de plantas.

Algunas veces se utilizan las plantas por razones estéticas. Algunas comunidades prefieren usar las plantas para cubrir el SFCW. Ciertas comunidades creen que las plantas controlan el olor.

Las clases de plantas que se seleccionan deben ser oriundas de la región para que toleren el clima local. Consulte con un horticulturista, botánico, agente del condado u otras autoridades sobre la clase de plantas y la época para sembrarlas.

### Separación de las Plantas

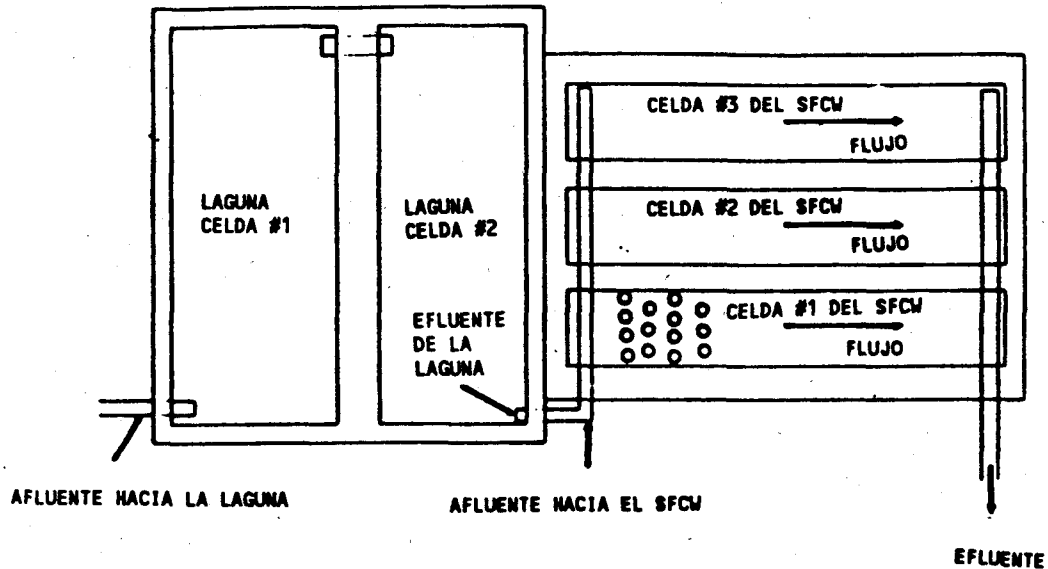
Las investigaciones y diseños iniciales recomendaron una separación entre las plantas de aproximadamente 2.5 pies entre los centros, para instalaciones relativamente grandes (hasta 0.5 MGD) precedidas por sistemas de laguna. Se ha comprobado que el dejar tan poca separación resulta en el crecimiento de las raíces que pueden llegar a reducir la disponibilidad de espacios vacíos y contribuir a una humectación de la superficie, es decir, flujo que no se queda debajo de la superficie en el SFCW. Actualmente se recomienda colocar las plantas 10 pies entre los centros y poner las filas en zig-zag. Si se utilizan patrones más densos, se debe dar mayor volumen para compensar por los espacios vacíos que pierden a causa de las raíces de las plantas. La separación entre las plantas en los sistemas SFCW in-situ puede ser mucho menor, en el orden de 2.5 pies, porque la capacidad hidráulica de estos sistemas es generalmente mayor que la de los sistemas más grandes.

### Configuraciones Típicas

En las Ilustraciones 3 y 4 respectivamente, se muestran arreglos típicos de los sistemas SFCW con tratamiento precedente de laguna y de tanque séptico.

## CONFIGURACION TIPICA PARA UN SFCW

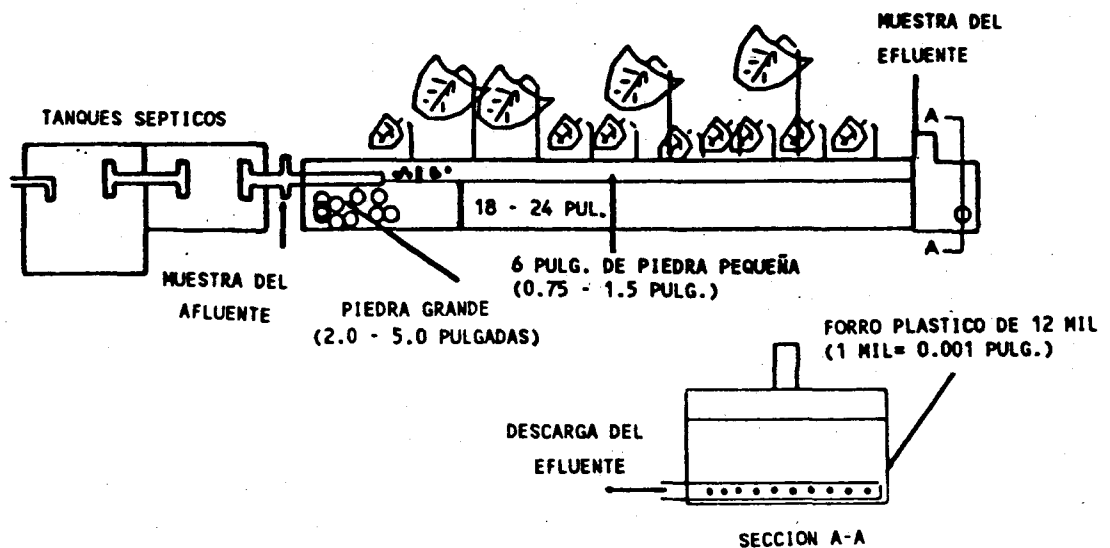
### VISTA DEL PLANO



ILUSTRACION 3

## CONFIGURACION TIPICA DE UN SFCW PARA TRATAMIENTO IN-SITU

### SECCION LONGITUDINAL



ILUSTRACION 4

#### **CAPITULO IV**

##### **FACTORES OPERATIVOS QUE DEBEN TOMARSE EN CUENTA**

A pesar de que el sistema SFCW es muy simple en cuanto a diseño y operación, no puede operar por sí solo. Mientras que éste no es un sistema que no necesita mantenimiento, el mantenimiento necesario es principalmente trabajo manual. Con excepción de una bomba de recirculación que puede usarse sólo parte del tiempo, existen pocas partes mecánicas que necesitan mantenimiento. Al mismo tiempo, se debe poner atención a la operación de la instalación. Los factores operativos o prácticas de manejo afectarán la habilidad de la instalación de mantener sus capacidades de rendimiento a largo plazo. Las siguientes prácticas de manejo son necesarias para que el sistema opere debidamente:

1. **RECIRCULACION** - El sistema deberá tener la capacidad de recircular el efluente del SFCW de vuelta, ya sea al tratamiento precedente o al extremo del afluente del SFCW. Cuando el efluente del sistema no cumple con los requisitos del permiso de descarga del efluente o cuando se necesita más flujo dentro del SFCW, se debe recircular el flujo del efluente.
2. **MANEJO DE LA PLANTA** - Las instalaciones del SFCW están diseñadas para un volumen específico de raíces y se debe hacer un esfuerzo para mantener dicho volumen. Cualquier aumento en el volumen de raíces por encima del cual fue diseñado el SFCW dará como resultado una disminución en los espacios vacíos disponibles. Por consiguiente, conforme van creciendo y se van multiplicando las plantas, será necesario aclarar las plantas para mantener el volumen diseñado. Todo material muerto o a punto de morir deberá ser removido para prevenir que el material que está en descomposición ingrese en los espacios vacíos, en donde podría contribuir a la reducción de los espacios vacíos disponibles dentro de la estructura de piedra. Dicho material también podría aumentar el BOD y amoníaco de las aguas residuales.

Toda vegetación extraña indeseable debe eliminarse periódicamente para prevenir su crecimiento excesivo dentro de la estructura de piedra. Dicho crecimiento podría obstruir la eficiencia del SFCW.

Con el fin de que este sistema sea efectivo, algunas de las plantas deben estar en etapa de crecimiento. Esta clase de plantas pueden necesitar una poda periódica para ayudarlas a crecer. Siempre que se poden las plantas, se debe remover toda la basura de la superficie del SFCW para evitar cualquier posible transferencia de ésta dentro de la estructura de piedra.



3. **MANTENIMIENTO DEL LECHO** - Cuando se utilizan paralelamente múltiples celdas en el SFCW, se deben diseñar dentro del sistema que permitan remover una o varias de las celdas para hacerles mantenimiento (limpieza, reemplazo de piedras, etc.). Se recomienda que periódicamente se inunde en sentido contrario la estructura de piedra para extender la vida del sistema. Esto se puede hacer con una manguera de alta presión insertada en la línea de recolección del efluente. Dicho procedimiento ayudará a eliminar algo de los detritos de la superficie de la estructura de piedra y algunos de los depósitos de sólidos de los espacios vacíos dentro de la estructura.
4. **CONTROL DEL LIQUIDO EN EL SFCW** - Si se construye el SFCW con una línea del efluente que se pueda ajustar, tal y como se recomienda, será necesario hacer ajustes periódicos para mantener el nivel apropiado del líquido en la estructura de piedra. Por ejemplo, durante periodos de flujo bajo, la línea del efluente debe ajustarse para elevar el nivel de líquido del SFCW. En otras circunstancias, se necesitará vaciar el SFCW para su mantenimiento. La experiencia ha demostrado que si ocurren temperaturas de congelamiento, se deberá inundar el SFCW para proteger las raíces de las plantas y para evitar que se congele la estructura, lo cual ocasionaría que las plantas fueran empujadas hacia arriba, fuera de la estructura.