



---

---

## **Capítulo 8. Diseño de un sistema de humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales de un edificio de oficinas**

---

---

Con base en el programa de manejo, uso y reúso del agua en la UNAM (PUMAGUA) liderado por el Instituto de Ingeniería, la Facultad de Ingeniería a través de la División de Ingenierías Civil y Geomática (DICyG) integró un grupo de trabajo con el propósito de desarrollar una metodología y procedimientos para el análisis de los microsistemas de uso y manejo del agua en los inmuebles propiedad de la UNAM, y la aplicación de dicha metodología a manera de prueba piloto para el análisis de los sistemas de suministro y evacuación de agua en los inmuebles de la Facultad. El estudio fue denominado Evaluación cualitativa y cuantitativa del suministro y evacuación del agua en los edificios de la Facultad de Ingeniería, y el informe final se concluyó en diciembre de 2008.

Dicho proyecto, encomendado al Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la DICyG, consideró la evaluación de la calidad del agua en los puntos de consumo y de descarga de aguas residuales que se generan en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería, así como el análisis de las condiciones de operación de los sistemas, prácticas y tecnologías actuales de uso, tratamiento y reúso, en su caso, o de disposición final, de acuerdo con los objetivos del PUMAGUA.

Los albañales de los edificios del conjunto norte o principal drenan hacia el colector localizado en el límite norte del conjunto (entre la parte posterior de los laboratorios y las islas). Dicho colector de concreto tiene un diámetro de 60 cm y pendiente de 26 milésimas. El sitio de vertido de estas aguas residuales es la planta de tratamiento de CU localizada en la avenida cerro del agua.

Las aguas residuales del conjunto sur se manejan de varias formas. Los albañales de los edificios de la División de Ciencias Básicas drenan hacia un colector de concreto de 30 cm de diámetro y 10 milésimas de pendiente, ubicado al norponiente (siguiendo el trazo del antiguo camino verde). El sitio de vertido de estas aguas residuales también es la planta de tratamiento de CU. Sin embargo, los albañales de los edificios de construcción reciente, como son la biblioteca Enzo Levi, los edificios de la Secretaría de Posgrado e Investigación y el edificio de la División de Ingenierías Civil y Geomática, vierten en tanques sépticos, en el mejor de los casos, o en pozos negros, por lo que las aguas residuales se infiltran directamente a través de las grietas de la roca basáltica. En estos edificios se tienen establecidos los laboratorios de Mecánica de Suelos, Ingeniería Ambiental, Electromecánica, Petrolera y Termofluidos, además de los sanitarios existentes. Dichos laboratorios vierten directamente sus residuos líquidos en el sistema de evacuación de aguas residuales de los edificios, por lo que se están infiltrando en el subsuelo de manera intermitente residuos peligrosos.

Como alternativa a la construcción de los colectores que permitan conducir el agua residual de la zona sur del campus a la planta de tratamiento de CU, está la del manejo descentralizado de los residuos líquidos, mediante pequeñas instalaciones de tratamiento por cada edificio o grupo de edificios, con lo cual se evitarían los costos de la excavación en roca para la construcción de alcantarillas así como los impactos ambientales que se producirían por las obras en un área ya urbanizada.

En virtud de lo anterior y como consecuencia del estudio citado, el Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental realizará el proyecto de factibilidad del manejo descentralizado de aguas



residuales en los inmuebles de la Facultad de Ingeniería del conjunto sur que carecen de conexión a la red de alcantarillado.

Inicialmente se realizará el proyecto de un humedal artificial como sistema de tratamiento de aguas residuales del edificio de cubículos del personal académico de la División de Ingenierías Civil y Geomática; se trata fundamentalmente de aguas residuales de características similares a las de tipo doméstico. La meta es que al lograr la estabilización del proceso de tratamiento se pueda sustituir el agua potable suministrada a urinarios e inodoros del edificio por agua tratada y, con los resultados de esta experiencia, se pueda intervenir en los restantes edificios de la Facultad de Ingeniería que disponen el agua residual de manera ambientalmente inadecuada.

En este capítulo se pretende dimensionar el humedal para la remoción de DBO, sin embargo en la caracterización del agua residual se midieron las concentraciones de SST (Sólidos Suspendidos Totales) y SSD (Sólidos Suspendidos Disueltos) para futuros análisis (ver anexos).

La razón principal para el diseño de una celda de humedal de flujo subsuperficial, es para evitar la presencia de mosquitos y malos olores.

La temperatura media del agua se obtuvo del promedio ponderado al multiplicar cada temperatura (por hora) por el volumen aforado (igualmente por hora), entre el volumen total de cada día. Cuyos resultados se muestran en la tabla 8.1:

**Tabla 8.1. Temperaturas medias por cada día de aforo**

| Día        | T med (°C) |
|------------|------------|
| 8/11/2010  | 15.50      |
| 9/11/2010  | 15.32      |
| 10/11/2010 | 15.74      |
| 11/11/2010 | 16.51      |
| 12/11/2010 | 16.03      |

La temperatura media del agua residual resultó de 15.82 °C.

1. Se asume una temperatura de diseño del agua en el humedal FS de 15.14 °C (método iterativo).

$$K_{15.14} = 1.104(1.06)^{(15.14-20)} = 0.8317d^{-1}$$

2. Se determina el área superficial requerida para el humedal FS utilizando la ecuación 24.

$$Q = 1.724[m^3 / d]$$

$$DBO_{afuente} = 287[mg / l]$$



$$DBO_{\text{efluente}} = 10[mg/l]$$

$$y = 0.6[m]$$

$$n = 0.29$$

$$k_s = 300[m^3/m^2/d]$$

$$A_s = \frac{(1.724)[\ln(287/10)]}{(0.8317)(0.60)(0.29)} = 40m^2$$

3. Se determina el tiempo de retención hidráulica utilizando la ecuación 2.

$$TRH = \frac{(40)(0.6)(0.29)}{1.724} = 4d$$

4. Se calcula la temperatura promedio del agua, usando las ecuaciones 13 a 18. Asumimos una capa de vegetación de 5 cm, el medio de 60 cm y una capa de arena de 5 cm que cubre el humedal (ver tabla 7.3 de conductividad térmica para los componentes de un humedal FS).

$$U = \frac{1}{\left(\frac{0.05}{0.05}\right) + \left(\frac{0.60}{2}\right) + \left(\frac{0.05}{1.5}\right)} = 0.75$$

Para la temperatura del aire se toma la temperatura mínima de las temperaturas medias mensuales desde 1989 a 2010, que corresponde a 12 °C.

$$T_c = \frac{q_L}{q_G} = \frac{(0.75)(86400)(4)}{(4215)(999.06)(0.6)(0.29)}(15.82 - 12) = 1.36^\circ C$$

$$T_e = 15.82 - 1.36 = 14.46^\circ C$$

$$T_w = \frac{15.82 + 14.46}{2} = 15.14^\circ C$$

La temperatura de 15.14°C asumida es correcta y el dimensionamiento del humedal también.

5. Ahora determinamos la relación largo: ancho usando la ecuación (10). Se propone un valor de m (pendiente) de 0.05, una  $k_s$  (conductividad hidráulica) de 300 con una  $n$  (porosidad) de 0.29

$$W = \frac{1}{0.6} \left[ \frac{(1.724)(40)}{(0.05)(300)} \right]^{0.5} = 3.57m$$



Tomamos un ancho de 3.6 m aproximadamente.

$$L = \frac{40}{3.6} \approx 11m$$

Por lo que se tiene una relación largo: ancho de 3: 1.

En el caso de tomar la temperatura mínima del aire de los registros mensuales de 1989 a 2010, existen registros del Servicio Meteorológico Nacional de hasta 4.6 °C, resultaría lo siguiente:

1. Se asume una temperatura de diseño del agua en el humedal FS de 13.64 °C.

$$K_{13.64} = 1.104(1.06)^{(13.64-20)} = 0.7621d^{-1}$$

2. Se determina el área superficial requerida para el humedal FS.

$$A_s = \frac{(1.724)[\ln(287/10)]}{(0.7621)(0.60)(0.29)} = 43.64m^2$$

3. Se determina el tiempo de retención hidráulica.

$$TRH = \frac{(43.64)(0.6)(0.29)}{1.724} = 4.4d$$

4. Se calcula la temperatura promedio del agua. Asumimos una capa de vegetación de 5 cm, el medio de 60 cm y una capa de arena de 5 cm que cubre el humedal.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{0.05}{0.05}\right) + \left(\frac{0.60}{2}\right) + \left(\frac{0.05}{1.5}\right)} = 0.75$$

La temperatura del aire se toma como 4.6°C.

$$T_c = \frac{q_L}{q_G} = \frac{(0.75)(86400)(4.4)}{(4215)(999.98)(0.6)(0.29)} (15.82 - 4.6) = 4.37^\circ C$$

$$T_e = 15.82 - 4.37 = 11.45^\circ C$$

$$T_w = \frac{15.82 + 11.45}{2} = 13.64^\circ C$$

La temperatura de 13.64 °C asumida es correcta.



$$W = \frac{1}{0.6} \left[ \frac{(1.724)(43.64)}{(0.05)(300)} \right]^{0.5} = 3.73m$$

$$L = \frac{43.64}{3.73} \approx 11.70m$$

Por lo que se tiene una relación aproximada, L: W= 3:1.

En la tabla 5.4 correspondiente a las tasas típicas de carga superficial para humedales FS (U.S. EPA, 2000), se tienen porcentajes de remoción de DBO entre 67% y 83% aproximadamente para una temperatura de 20°C, por lo que se deducen las siguientes relaciones:

$$\% \text{remoción} = \left| \frac{DBO_{ENTRADA} - DBO_{SALIDA}}{DBO_{ENTRADA}} \right| \times 100$$

Para la remoción del 67% de la DBO:

$$DBO_{ENTRADA} - DBO_{SALIDA} = 0.67DBO_{ENTRADA}$$

$$DBO_{SALIDA} = 0.33DBO_{ENTRADA}$$

Para la remoción del 83% de la DBO:

$$DBO_{ENTRADA} - DBO_{SALIDA} = 0.83DBO_{ENTRADA}$$

$$DBO_{SALIDA} = 0.17DBO_{ENTRADA}$$

En nuestro caso, teóricamente, en las mejores condiciones el porcentaje de remoción sería de aproximadamente 96%, reducir la DBO de 287 mg/l a 10 mg/l. Ahora diseñamos para una DBO de salida de 30 mg/l, lo que significaría reducir la DBO aproximadamente en un 89 %, que es un porcentaje razonablemente bueno que cumple fácilmente con los límites permisibles de la tabla 7.4, por lo que análogamente al análisis anterior resulta:

1. Se asume una temperatura de diseño del agua en el humedal FS de 15.38 °C.

$$K_{15.38} = 1.104(1.06)^{(15.38-20)} = 0.8434d^{-1}$$

2. Se determina el área superficial requerida.

$$Q = 1.724[m^3 / d]$$

$$DBO_{afuente} = 287[mg / l]$$



$$DBO_{\text{efluente}} = 30[\text{mg} / \text{l}]$$

$$y = 0.6[\text{m}]$$

$$n = 0.3$$

$$k_s = 500[\text{m}^3 / \text{m}^2 / \text{d}]$$

$$A_s = \frac{(1.724)[\ln(287/30)]}{(0.8434)(0.60)(0.3)} = 25.64\text{m}^2$$

3. Se determina el tiempo de retención hidráulica.

$$TRH = \frac{(25.64)(0.6)(0.3)}{1.724} = 2.7\text{d}$$

4. Se calcula la temperatura promedio del agua.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{0.05}{0.05}\right) + \left(\frac{0.60}{2}\right) + \left(\frac{0.05}{1.5}\right)} = 0.75$$

Tomamos la temperatura mínima del aire de las temperaturas medias mensuales desde 1989 a 2010, que corresponde a 12 °C.

$$T_c = \frac{q_L}{q_G} = \frac{(0.75)(86400)(2.7)}{(4215)(999.03)(0.6)(0.3)}(15.82 - 12) = 0.87^\circ\text{C}$$

$$T_e = 15.82 - 0.87 = 14.95^\circ\text{C}$$

$$T_w = \frac{15.82 + 14.95}{2} = 15.38^\circ\text{C}$$

La temperatura de 15.38°C asumida es correcta.

$$W = \frac{1}{0.6} \left[ \frac{(1.724)(25.64)}{(0.05)(500)} \right]^{0.5} = 2.21\text{m} .$$

$$L = \frac{25.64}{2.21} \approx 11.60\text{m}$$

Por lo que se tiene una relación aproximada, L: W= 3:1.



Análogamente se resuelve para el caso de la temperatura de 4.6°C, variando la DBO a la salida a 30 mg/l. La tabla 8.2 resume los cuatro casos descritos anteriormente:

**Tabla 8.2. Diferentes casos propuestos para el dimensionamiento de la celda de humedal artificial**

| Temperatura (°C) | DBO (entrada) | DBO (salida) | K (temperatura) | Área (m <sup>2</sup> ) | TRH (d) | L (m) | W (m) | L:W  |
|------------------|---------------|--------------|-----------------|------------------------|---------|-------|-------|------|
| 12.00            | 287           | 10           | 0.8317          | 40.00                  | 4.0     | 11.00 | 3.60  | 3: 1 |
|                  |               | 30           | 0.8343          | 25.64                  | 2.7     | 11.00 | 2.21  | 5: 1 |
| 4.60             | 287           | 10           | 0.7621          | 43.64                  | 4.4     | 11.70 | 3.73  | 3: 1 |
|                  |               | 30           | 0.7976          | 28.20                  | 2.8     | 9.40  | 3.00  | 3: 1 |

### 8.1. Criterios de construcción

De acuerdo a las dimensiones previas obtenidas para la construcción del humedal, se propone una lista de pasos que pueden seguirse para la construcción del humedal. Es necesario considerar las siguientes condiciones:

El agua debe estar disponible durante todo el año para mantener las plantas y las bacterias vivas.

- Los flujos grandes (causados por la lluvia torrencial) pueden agobiar el sistema, y debe ser desaguado en el caso de una tormenta grande hasta que el agua esté debajo de la superficie del suelo
- Las aguas residuales deben fluir naturalmente vía gravedad en el humedal
- Las aguas residuales no deben estancarse para evitar el crecimiento de mosquitos
- Las plantas de un humedal natural local pueden ser trasplantadas para el uso en humedales artificiales, o pueden ser compradas en un vivero local
- Una pared o capa impermeable debe rodear el humedal entero para prevenir que las aguas residuales salgan antes de ser tratadas completamente. El desagüe apropiado permitirá que el agua salga del sistema después del tratamiento



**Tabla 8.3. Principales materiales utilizados para la construcción de un humedal artificial**

|   |
|---|
| <b>Materiales principales</b>                             |
| Cemento   |
| Bloques de concreto                                       |
| Tubos de PVC o metal (entrada y salida)                   |
| Filtro (malla fina de plástico)                           |
| Cubierta impermeable                                      |
| Válvula de desagüe  |
| Arena y grava   |
| Cubierta de tierra  |
| Vegetación (de un humedal natural local ó el más cercano) |

## **8.2. Fases generales de construcción del humedal tipo FS**

Con base en el diseño conceptual, existen varios aspectos fundamentales que deben ser tomados en cuenta al momento de construir un humedal, tal es el caso de la impermeabilización del terreno, la selección y colocación del material granular, implantación de vegetación y las estructuras de entrada y descarga.

Existen una serie de pasos generales para la construcción del humedal que, como ocurre en la mayoría de las obras civiles, requerirán de ajustes en el momento de la construcción debido a las dificultades que se van encontrando y que no se tenían previstas, es por eso que sólo se mencionan las fases generales de construcción, que deben ser llevadas a cabo por el criterio de la persona responsable(s) de la obra civil, tales fases se mencionan a continuación: (1) desmonte; (2) despalme y compactación; (3) excavación de las zanjas para los humedales; (4) nivelación de las zanjas para los humedales; (5) impermeabilización de los humedales; (6) selección y colocación del material granular; (7) implantación de vegetación; (8) estructuras de entrada y salida.

### **8.2.1. Desmonte y despalme**

El desmonte consiste en quitar toda la vegetación dentro del área de influencia de la construcción de la celda del humedal, en este trabajo se incluye el desenraíce, donde si quedan hoyos, se rellenarán con material de buena calidad y compactado adecuadamente. Una vez desmontado el terreno natural, se extrae la capa de material que contenga material vegetal. El espesor de esta capa puede variar de 10 a 50 cm (a esta etapa se le denomina despalme).





### 8.2.2. Excavación y compactación de las zanjas para los humedales

Inicialmente se realizarán en campo los trabajos de topografía de trazo y localización. La excavación puede ser realizada por personal, maquinaria ó una combinación de ambas que será decidida de acuerdo a las dimensiones del proyecto. En el caso de que se decida utilizar maquinaria, se recomienda una retroexcavadora, debiendo cavar a la profundidad deseada. En seguida se compacta el terreno natural sólo si se requiere y, cuando se hace, se llega generalmente al 90% del peso volumétrico seco máximo (PVSM) de acuerdo al equipo disponible, de lado a lado y a todo lo largo, se deberá hacer de manera cuidadosa y correcta, de tal forma que el terreno quede completamente nivelado y libre de palos, rocas, piedras o algún elemento que pudiera ocasionar daños en la barrera impermeabilizante.

Características del material de relleno:

- Los rellenos serán de material de banco, que no contengan más del 5 % de partículas mayores a 7.6 cm (3´´) y podrá estar constituido por una arena limosa o limo arenoso (tepetate) que cumpla con las siguientes características:
- El peso volumétrico seco máximo determinado con la prueba ASTM D-698 no deberá ser mayor de 1.8 t/m<sup>3</sup> ni menor de 1.6 t/m<sup>3</sup>
- El límite líquido de la fracción fina será menor al 30 %
- La fracción fina deberá tener una contracción lineal máxima del 4.5 %
- El material de relleno estará formado por capas de tepetate (20 cm) de espesor compactado. Para compactarla deberá humedecerse y homogenizarse hasta alcanzar un valor cercano la humedad óptima ( $\pm 2\%$ )
- Se recomienda equipo de compactación manual (pistón neumático)
- Deberá satisfacer la granulometría mostrada en la figura 8.1

Durante la compactación de los rellenos se deberá tener cuidado de no dañar las instalaciones de drenaje, en su caso.

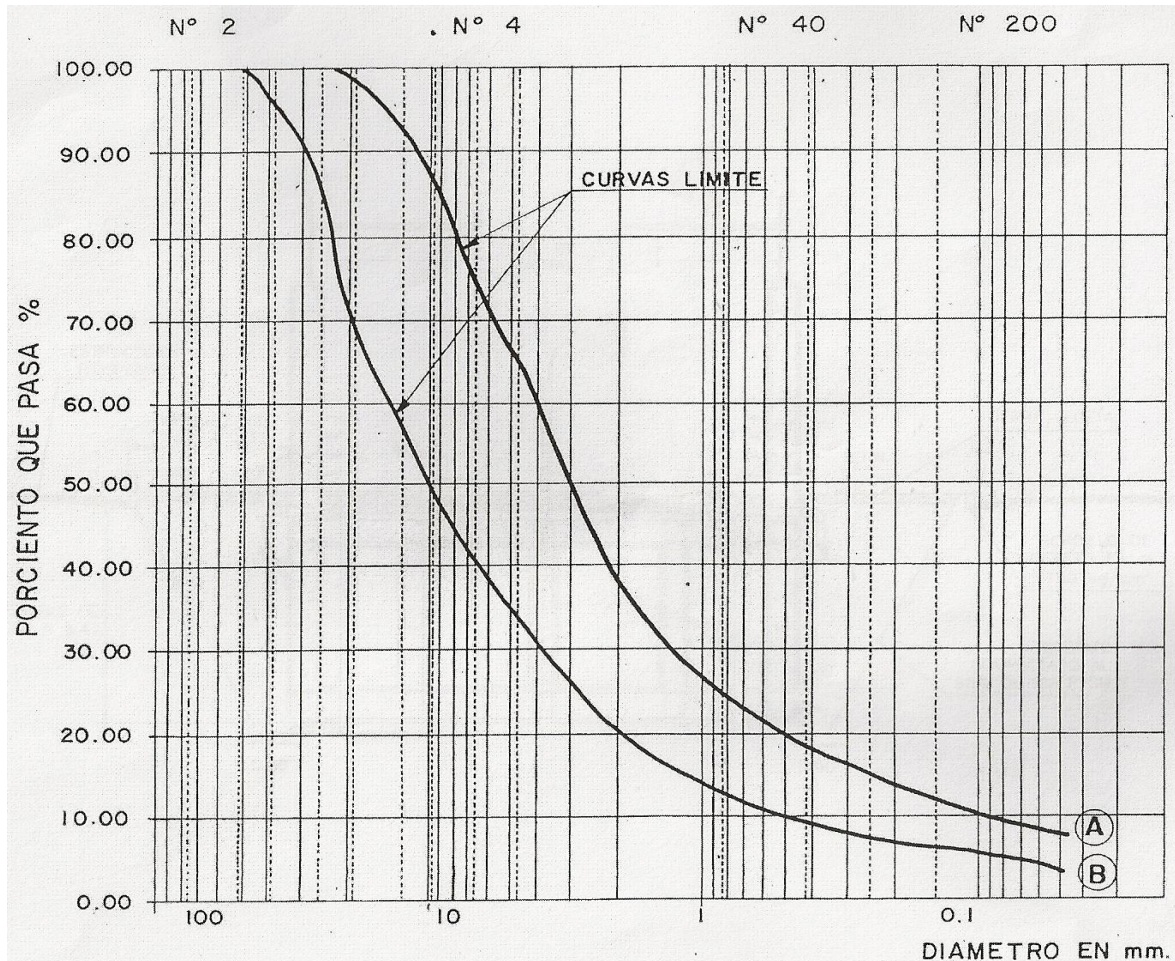


Figura 8.1. Granulometría del material de relleno

### 8.2.3. Nivelación de las zanjas para los humedales

Debe realizarse con equipo de topografía.

### 8.2.4. Uso de impermeabilizantes entre el suelo y el agua residual

Los humedales FS normalmente incluyen una o más celdas de poca profundidad con el fondo recubierto para prevenir la percolación a la capa freática susceptible a la contaminación; el tipo de recubrimiento depende de las condiciones locales, un punto importante es la selección del material de impermeabilización entre el agua residual y el suelo, algunas veces esta “barrera” se presenta de forma natural (como lo es una capa de arcilla con una permeabilidad muy baja que se aproxima a  $10^{-7}$  a  $10^{-9}$  cm/s) ó por los materiales del sitio y que por medio de la compactación se llegue a un estado cercano al impermeable. Otras alternativas sugieren tratamientos químicos, una capa de bentonita, asfalto ó el uso de alguna fibra sintética disponible en el mercado.

En este trabajo nos enfocaremos al uso de alguna geomembrana para la impermeabilización del humedal artificial, debido a la facilidad de colocación y efectividad de la misma, además de que se está haciendo más común el uso de este tipo de materiales para la construcción de obras civiles.



La geomembrana es el nombre genérico que recibe la lámina impermeable hecha a partir de diferentes resinas plásticas, su presentación es en rollos y viene en diferentes espesores, cada material sintético tiene cualidades físicas y químicas distintas que hacen la diferencia para cada geomembrana, los más comunes son HDPE, FPP, PVC y VLPDE.

El polietileno de alta densidad o HDPE por sus siglas en inglés, es la geomembrana de más demanda en el mercado, a pesar de su popularidad no es ni el más moderno ni el mejor de los plásticos, una de sus características importantes es su resistencia al ataque químico.

El polietileno de baja densidad es un material blando y elástico, mientras que el polietileno de alta densidad es más duro y rígido; ambos son inertes a la mayoría de los ácidos y álcalis. Los aditivos más empleados en el polietileno son los antioxidantes y los absorbentes de rayos ultravioleta, para evitar la degradación oxidativa y la fotodegradación.

El polipropileno flexible (FPP) es de la nueva generación de geomembranas, conserva las dos cualidades de los materiales más importantes, la flexibilidad de la geomembrana de PVC y la resistencia química del HDPE. Tiene la ventaja de su larga duración expuesta a la intemperie y en las de protección del medio ambiente es suficientemente resistente a la agresión química tanto o más que el HDPE.

La geomembrana de PVC es otro de los productos más solicitados, debido a las características de sus rollos (por lo regular de dimensiones reducidas) y por su fácil instalación sigue siendo un producto muy popular.

Las propiedades físicas, químicas, térmicas y mecánicas (ligero, inerte y completamente inocuo, resistente a la intemperie, económico en cuanto a su calidad-precio y reciclable) dependen de las formulaciones empleadas, no pudiéndose generalizar dada la gran variedad de formulaciones posibles a realizar. Dichas propiedades dependerán en gran medida a la proporción y tipo de aditivos, en especial los plastificantes.

Por estos motivos el PVC ofrece un gran número de posibilidades de aplicación, debido a su bajo costo y al conjunto de propiedades que el mismo presenta, ya que su resistencia a los agentes químicos es buena, soportando algunos ácidos y álcalis, siendo insoluble ante un gran número de disolventes orgánicos.

La geomembrana VLDPE es una membrana termoplástica de diferentes poliolefinas que puede ser empleada para hacer lagos artificiales, embalses, estanques y cisternas. Por sus características existen empresas que otorgan 10 años de garantía en este material con exposición a la intemperie.

El polietileno de muy baja densidad, es el avance tecnológico más importante en la fabricación de geomembranas, tiene la resistencia química del FPP y del HDPE, la flexibilidad de la geomembrana de PVC, su termofusión es sencilla y su tiempo de vida es superior al de cualquier otra geomembrana.

Por lo anterior se recomienda una geomembrana al menos de un material de PVC, tomando en cuenta los recursos disponibles.

### 8.2.5. Colocado de arena- grava en la celda de tratamiento

Actividad muy importante y delicada, por el material impermeabilizante utilizado, por ello se recomienda colocarlo manualmente durante varias jornadas, por la necesidad de controlar permanentemente el colocado de grava con cuidado, para evitar daños en la geomembrana.

El tamaño medio de la grava va desde ( $\geq 0.6$  cm ó  $\geq 0.25$  pulgadas) hasta roca grande triturada ( $\geq 15.2$  cm ó  $\geq 6$  pulgadas); la combinación de tamaños de 1.3 a 3.8 cm (0.5 a 1.5 pulgadas) es la más comúnmente usada, este medio de grava debe ser de piedras limpias, duras y duraderas, con capacidad de retener su forma y la permeabilidad del lecho del humedal a largo plazo.

### 8.2.6. Implantación de la vegetación

Debe de supervisarse el desarrollo y adaptación de la vegetación, al menos un vez al mes y por parcelas de  $1\text{m}^2$ , estableciendo programas de mantenimiento de acuerdo a las condiciones locales.

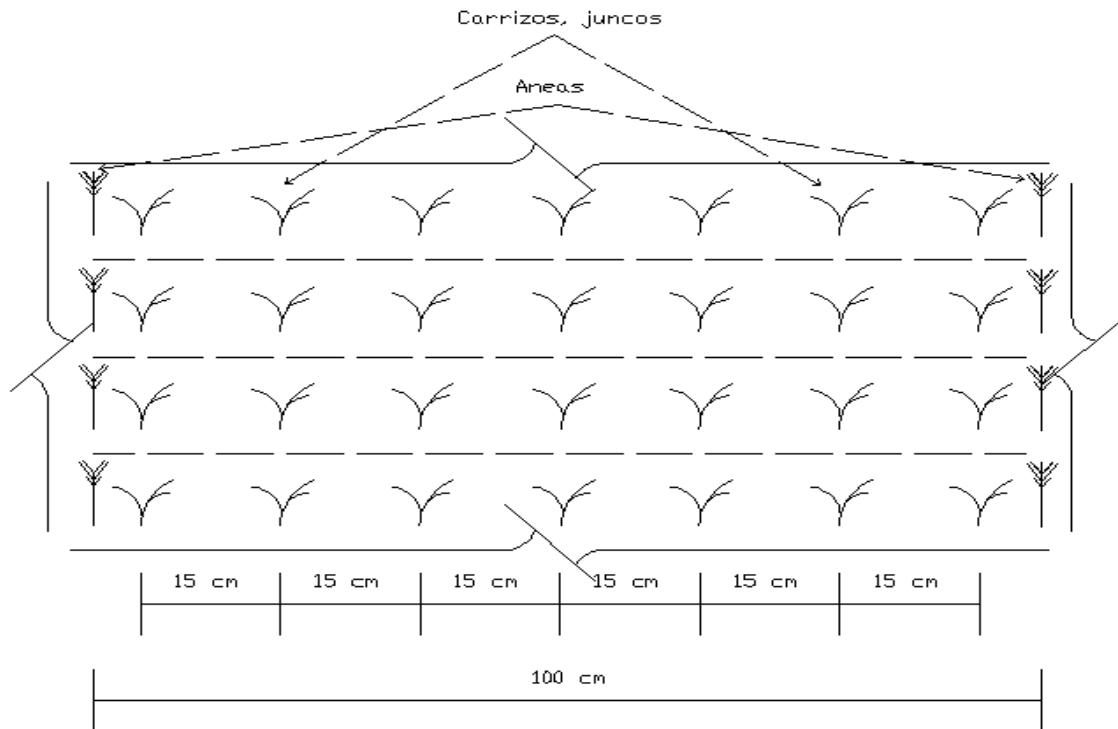


Figura 8.2. Corte de una distribución propuesta para la colocación de juncos, carrizos y aneas en un humedal artificial

### 8.3. Estructuras de entrada y descarga

Las estructuras de entrada y descarga se emplean para asegurar la distribución adecuada y la recolección uniforme del agua residual aplicada. El método más comúnmente utilizado en los sistemas de menor tamaño consiste de una tubería múltiple perforada. La profundidad del medio en estos humedales FS tiene un rango de 0.3 a 0.9 m, siendo el valor más común el de 0.6 m.

Los dos sistemas, FLS y FS, requieren condiciones de flujo uniformes para alcanzar rendimientos esperados. Esto se alcanza en sistemas de pequeño o moderado tamaño con tuberías de recolección perforadas que se extienden a lo ancho de toda la celda, tanto para la entrada como para la salida.

Un colector de entrada sobre la superficie permite el acceso para ajustes y control, por lo que se prefiere para muchos sistemas. Este colector generalmente consiste en una tubería plástica de 100 a 200 mm de diámetro, con una “t” ubicada sobre la línea, aproximadamente cada 3 m. El operario puede mover cada “t” alrededor de un arco vertical y de ese modo puede hacer un ajuste visual e igualar los caudales. Los pequeños sistemas FS incluyen normalmente una tubería perforada colocada en el fondo del lecho y rodeada por material rocoso.

El conducto de salida tanto para los sistemas FS como para FLS consiste normalmente en una tubería perforada colocada al final de la celda y en el fondo del lecho, en algunos casos se coloca en una zanja poco profunda, rellena con material rocoso, ligeramente por debajo del fondo de la celda del humedal para asegurar un drenaje completo.

Los sistemas grandes normalmente tienen estructuras de entrada y salida en concreto. En el caso de las de salida, suelen contar con un dispositivo variable que permita controlar el nivel del agua en la celda del humedal, como el que se muestra en la figura 8.3.

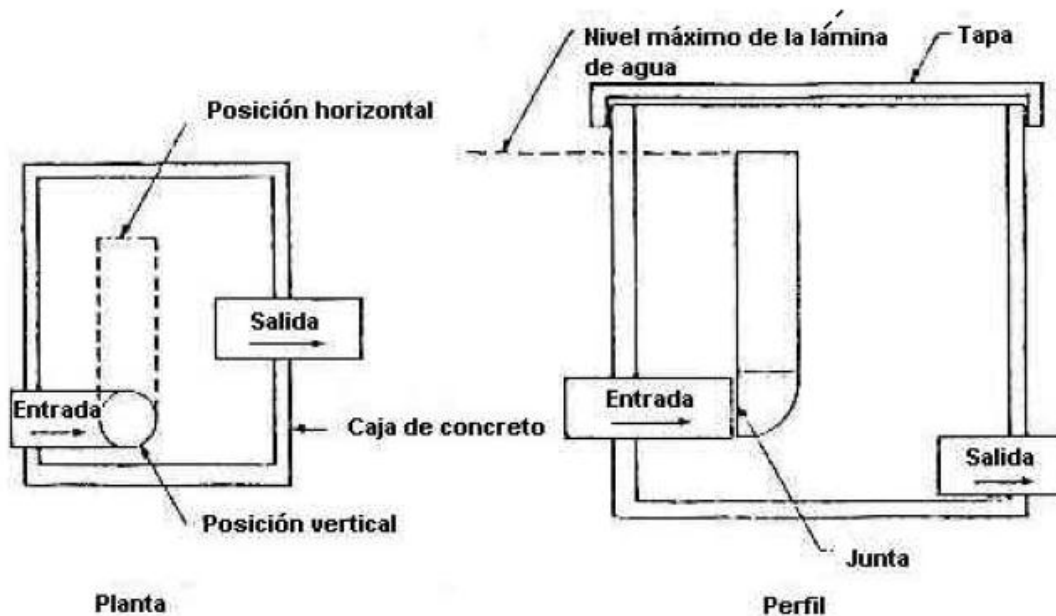
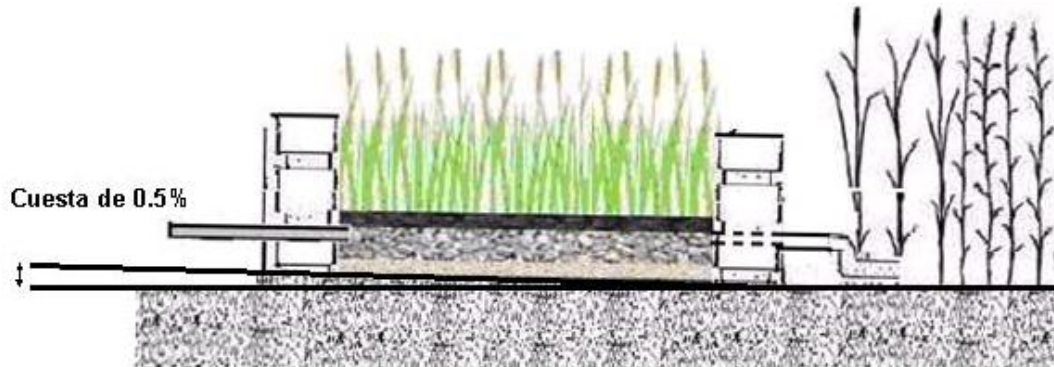


Figura 8.3. Estructuras de control

#### 8.4. Consideraciones a tomar en cuenta en el momento de la construcción del humedal

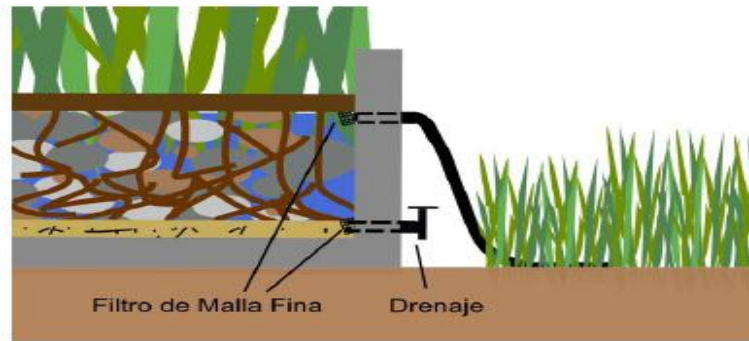
Muchos materiales diferentes pueden ser utilizados para construir el humedal, así que los diseños locales pueden variar.

- Identificar una ubicación para el humedal que conecta a la corriente de las aguas residuales.
- Calcular el tamaño del humedal construido que se planea construir (véase los cálculos previos).
- Graduar el fondo de la celda para que tenga una pendiente de 0.5%. La disminución resultante en la altura de una celda por cada 10 m es 0.05, es decir:  $10 \text{ m} \cdot [0.5/100] = 0.05 \text{ m}$  ó 5 cm.



**Figura 8.4. La cuesta de la inundación de humedal debe estar cerca de 0.5%**

- Construir la celda de humedal sobre el suelo (y barrera impermeable), permitiendo el espacio para conectar la corriente de las aguas residuales a la celda del humedal en la entrada.
- Incorporar una válvula de drenaje en el fondo de la celda, en el lado al fondo de la pendiente. La válvula servirá para controlar el nivel del agua, y en su caso bajar el nivel de la misma, además de motivar el crecimiento de las raíces.
- Incorporar la entrada de agua residual.
- El agua residual debe ser distribuida uniformemente en el área de entrada para promover un flujo equitativo en el humedal.
- Para sistemas más pequeños, un tubo perforado o una serie de tubos pueden servir a este propósito.
- Asegurar la colocación de una malla de plástico fina sobre la apertura para evitar que se tape (ver figura 8.5).
- Crear un sistema de salida (uno o varios tubos).
  - El tubo debe estar a la misma altura que la entrada, apenas por debajo del nivel de la arena
  - Instalar un filtro de malla fina de plástico para prevenir que el piso y la grava pasen por el tubo, causando posibles estancamientos



**Figura 8.5. Filtros de malla fina de plástico y drenaje en la salida**

- Aplicar una capa de arena gruesa o capa vegetal de 5 cm aproximadamente de espesor en el fondo de la celda.
- Colocar una capa de grava por encima de la capa vegetal o de arena. El tamaño de la grava o roca triturada en el primer metro de entrada y el último metro a la salida debe estar entre 5 y 10 cm de diámetro; esto reduce el riesgo de obstruir la entrada y salida, en caso de que los sólidos suspendidos lleguen a estas áreas.
  - Aplicar 45 a 75 cm de capa de grava, (en los cálculos se supuso de 0.6 m)
  - La profundidad de grava variará según los cálculos previstos
  - Poner una capa de arena o tierra de 5 cm de espesor
  - Colectar y sembrar plantas de un humedal natural local (recomendado) o de un vivero, cuando se usan plantas de un humedal natural local, la planta debe de ser transplantada por completo (hojas, tallo, raíces, retoños) más un poco de tierra del lugar. Se puede traer la planta de un humedal local desde la base, y se debe tener cuidado que no se quiebren los tallos. Los tallos (la parte que no está sumergida en el agua) pueden ser cortados a aproximadamente 20 cm
  - La parte con la raíz debe ser colocada aproximadamente 5 cm debajo de la capa de arena ó tierra orgánica en el humedal construido. Las aneas pueden ser colocadas a una distancia de 1 m entre cada planta; los carrizos, juncos y espadañas pueden ser plantadas a 15 cm de distancia (Mitch y Gosselink 2000)
  - Con tiempo, es importante realizar una zona de raíces consistente. Se puede realizar esto bajando el nivel de agua gradualmente para motivar que las raíces crezcan desde lo más profundo
- Saturar el piso con agua hasta la superficie (no más) y permitir que se evapore lentamente, manteniendo el suelo húmedo durante todo el período de propagación, aproximadamente 2 a 3 meses.
- Después de que las plantas se hayan establecido, utilice el desagüe para ajustar el nivel del agua en la celda para alentar la penetración más profunda de la raíz de la planta en el medio de grava.



- Finalmente las raíces de la planta se extenderán al fondo del sustrato. Las plantas deben establecerse bien antes de que se empiece a tratar las aguas residuales. Si no se puede esperar hasta que se establecen completamente, aquellas plantas que mueran pueden ser sustituidas.

El agua del efluente debe salir en el nivel del suelo y fluir por un área con vegetación o llena con piedras. Una manguera puede ser conectada a la salida para bajar el agua al nivel del piso. Ya que el agua efluente no es potable, es importante que el agua no salpique cuando llegue el suelo, ya que contaminantes residuales pueden causar enfermedades si son ingeridos.





### Apartado gráfico del sitio de interés



**Figura 8.6. Vista panorámica del sitio propuesto para la construcción de la celda de humedal para el tratamiento de aguas residuales**



**Figura 8.7. Vista aproximada de las dimensiones de la celda de humedal. Las dimensiones necesarias para la remoción de DBO se proponen e  $40.00 \text{ m}^2$  (en el lecho), con una relación largo: ancho de 3:1**



**Figura 8.8. Desmonte y despalme**



**Figura 8.9. Excavación, compactación, nivelación e impermeabilización con geomembrana. Se recomienda excavar 75 cm aproximadamente (10 cm de la capa orgánica, 60 cm de medio- arena-grava y 5 cm de cubierta) además el talud de avance en el frente de la excavación será de 2:1 (vertical: horizontal) por lo que el área superficial tiene que ser de:**

$$\text{Largo: } 11\text{m} + (0.375*2) = 11.75 \text{ m}$$

$$\text{Ancho: } 3.6 + (0.375*2) = 4.35 \text{ m}$$

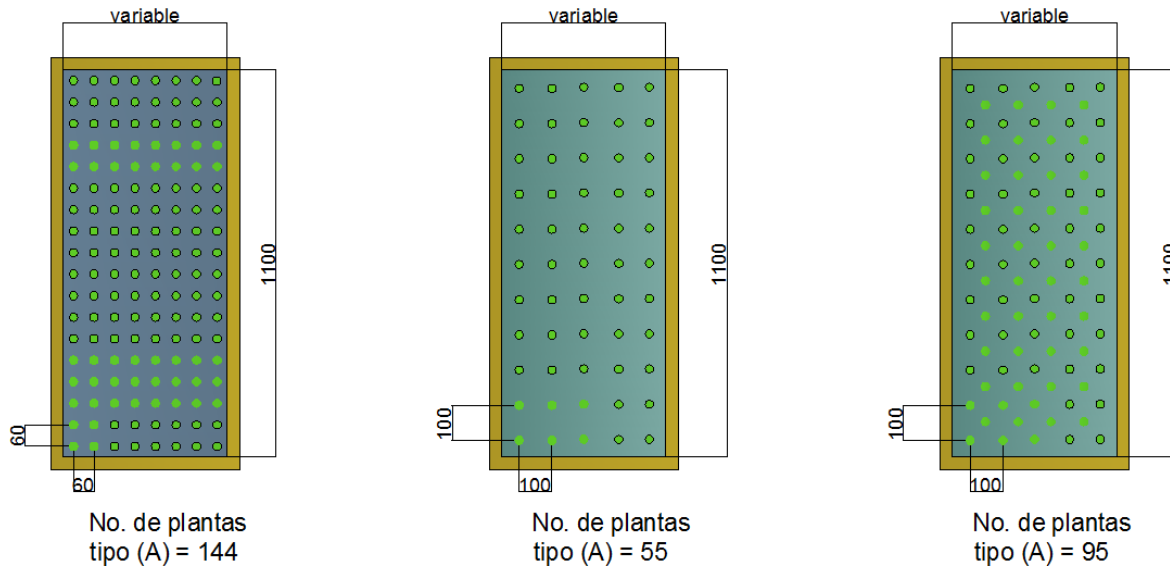
**Por lo que después de revisar nuevamente las dimensiones del lugar existe el espacio suficiente, (junto al edificio de la DICyG) para el tránsito de personas, principalmente trabajadores.**



**Figura 8.10. Colocación de arena ó capa vegetal (aproximadamente 5-10 cm)**

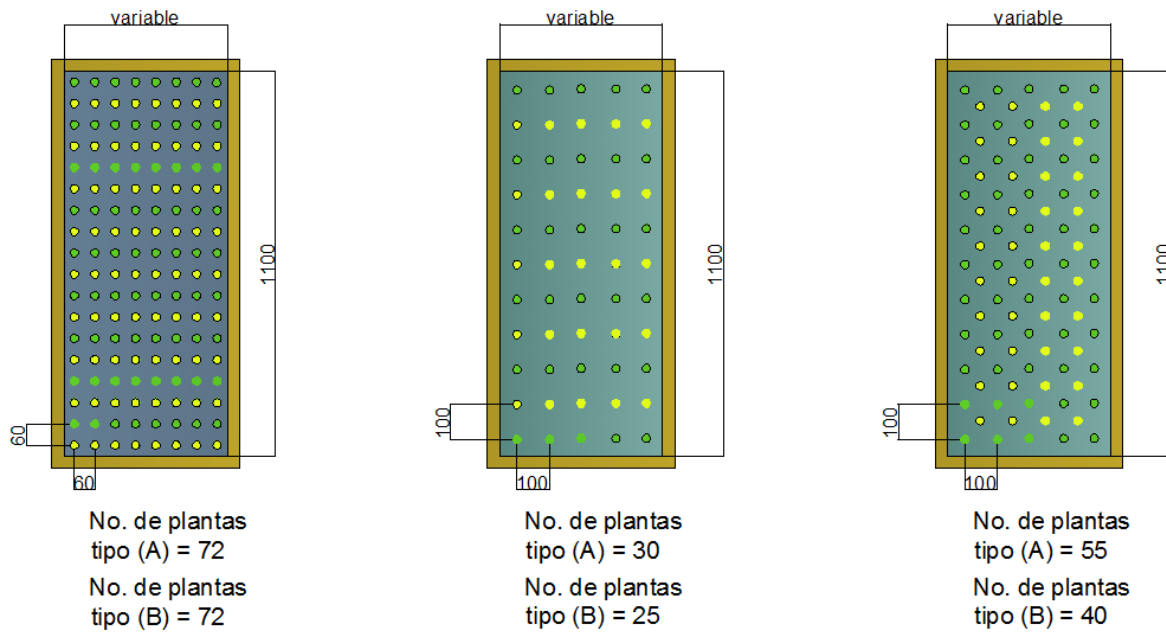


**Figura 8.11. Colocado de arena- grava en la celda de tratamiento (aproximadamente 60 cm). Es necesaria la colocación de la grava más gruesa (5 a 10 cm de diámetro) al inicio y al final, abarcando una distancia de 0.5 a 1 m. Para el medio se utilizará el tamaño calculado (dependientes de la relación de vacíos y la conductividad hidráulica). Se debe tener cuidado en la colocación de las estructuras de entrada y descarga, que vayan por debajo del medio**



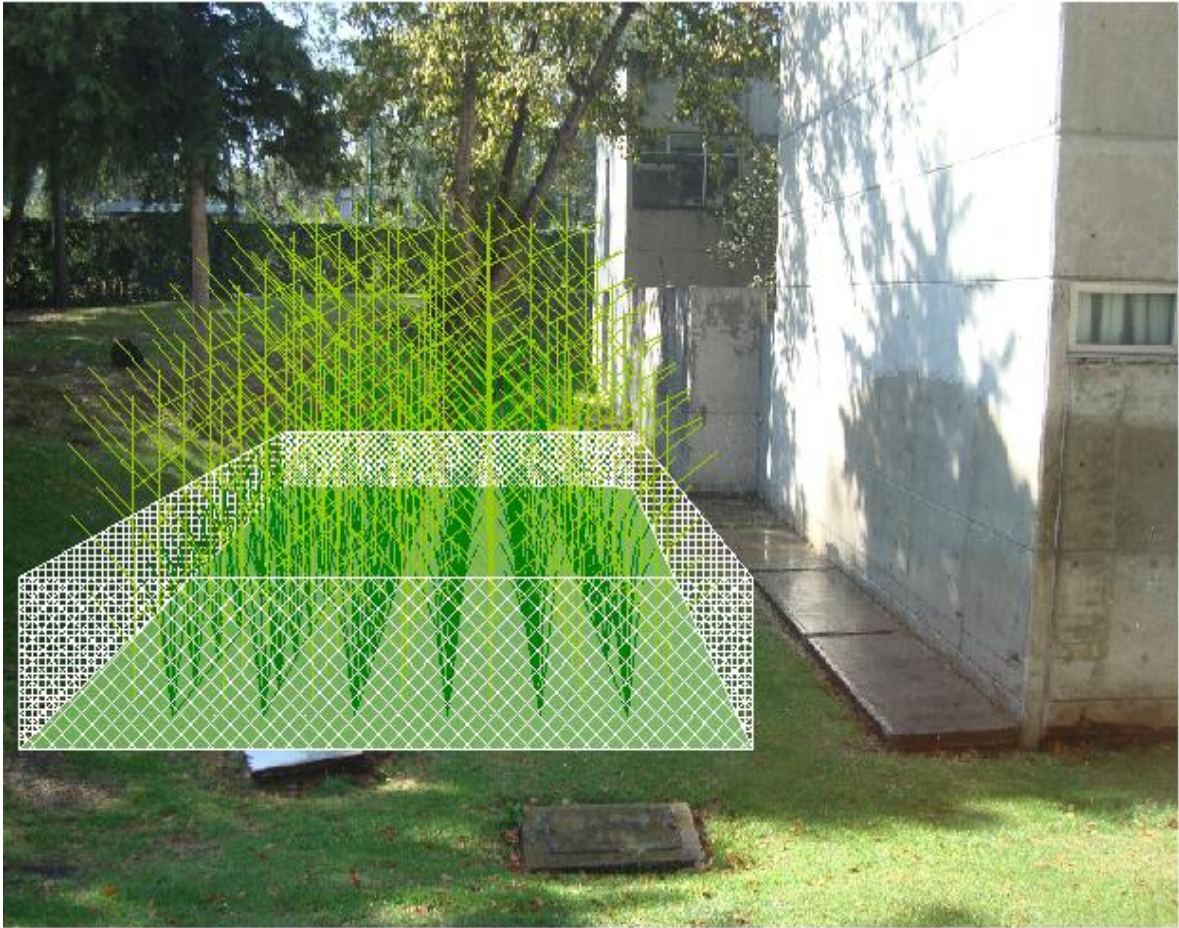
**Figura 8.12. Implantación de la vegetación.** La separación promedio de las plantas es variable, se pueden utilizar dos especies nativas de zonas aledañas (ver capítulo 6), como lo es la región de Xochimilco. Algunos autores recomiendan separaciones de 1 m para las aneas mientras que otros recomiendan 0.6 m, lo mismo sucede para las espadañas donde se recomiendan separaciones de 15 cm mientras que otros recomiendan separaciones de 0.6 m. Por lo anterior se muestran algunas posibilidades de separaciones en la colocación de las especies\*, que deben ser evaluadas en su momento y de la experiencia de otros sistemas ecológicos similares. La distribución de plantas usando una sola especie, (de izquierda a derecha), con separaciones de 0.6 m se estiman 144 unidades, separaciones de 1 m se estiman 55 unidades, en la última figura se muestra otra alternativa donde se modifica la anterior, colocando plantas intermedias entre cada metro (a cada 0.5 m)

\*Las dimensiones del área a implantar pueden variar al momento de la construcción, así como el número de plantas



**Figura 8.13. Distribución de plantas usando dos especies en filas alternadas**





**Figura 8.14. Es recomendable el uso de malla ciclónica para la protección y delimitación del sitio. La puerta de mantenimiento debe ser escogida en el momento de la construcción**



**Figura 8.15. Vista panorámica de las estructuras de entrada**



**Figura 8.16.** Vista de detalle de las estructuras de entrada

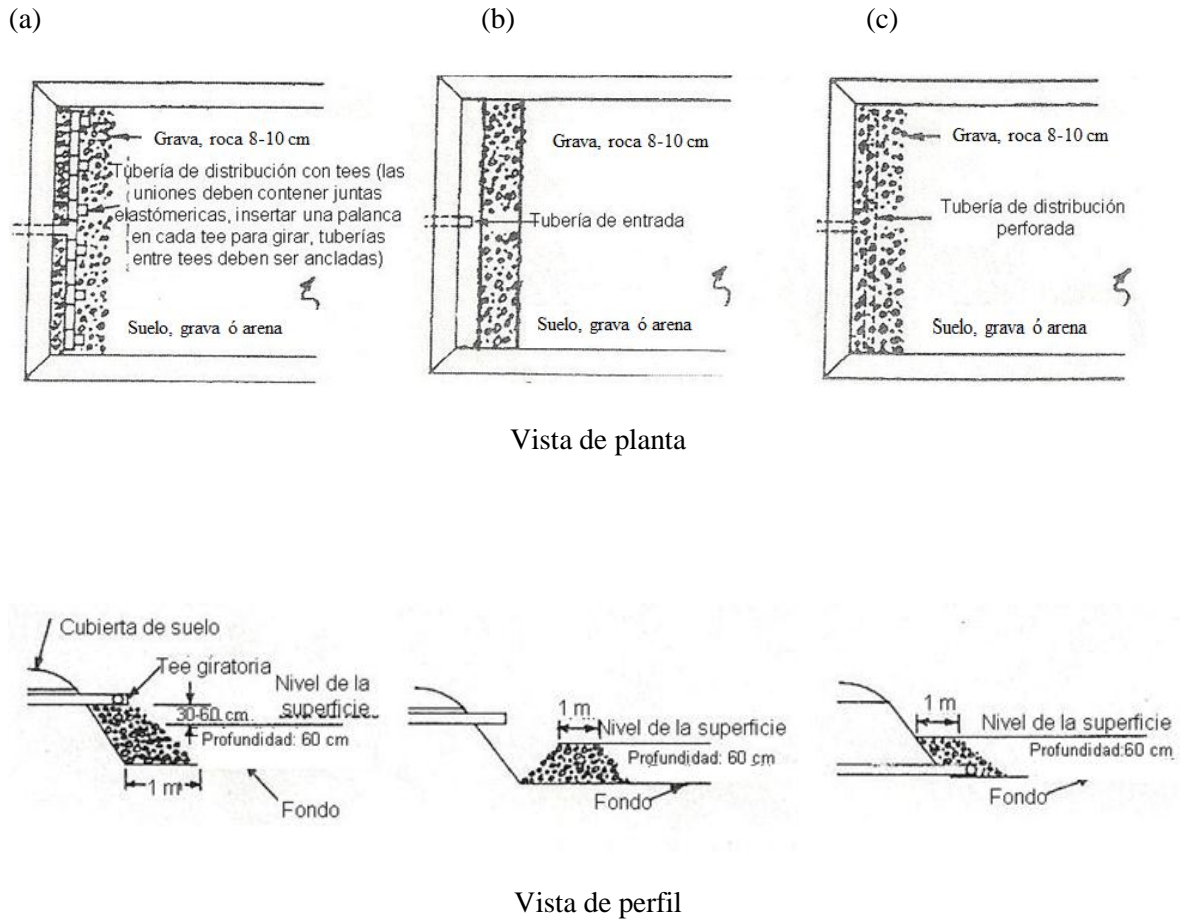


Figura 8.17. Propuestas de diferentes configuraciones de entrada para humedales FS: (a) entrada con tees giratorias; (b) entrada con gavión; (c) entrada con tubería de distribución enterrada



**Figura 8.18. Vista panorámica de las estructuras de salida**



**Figura 8.19. Vista de detalle de las estructuras de salida**

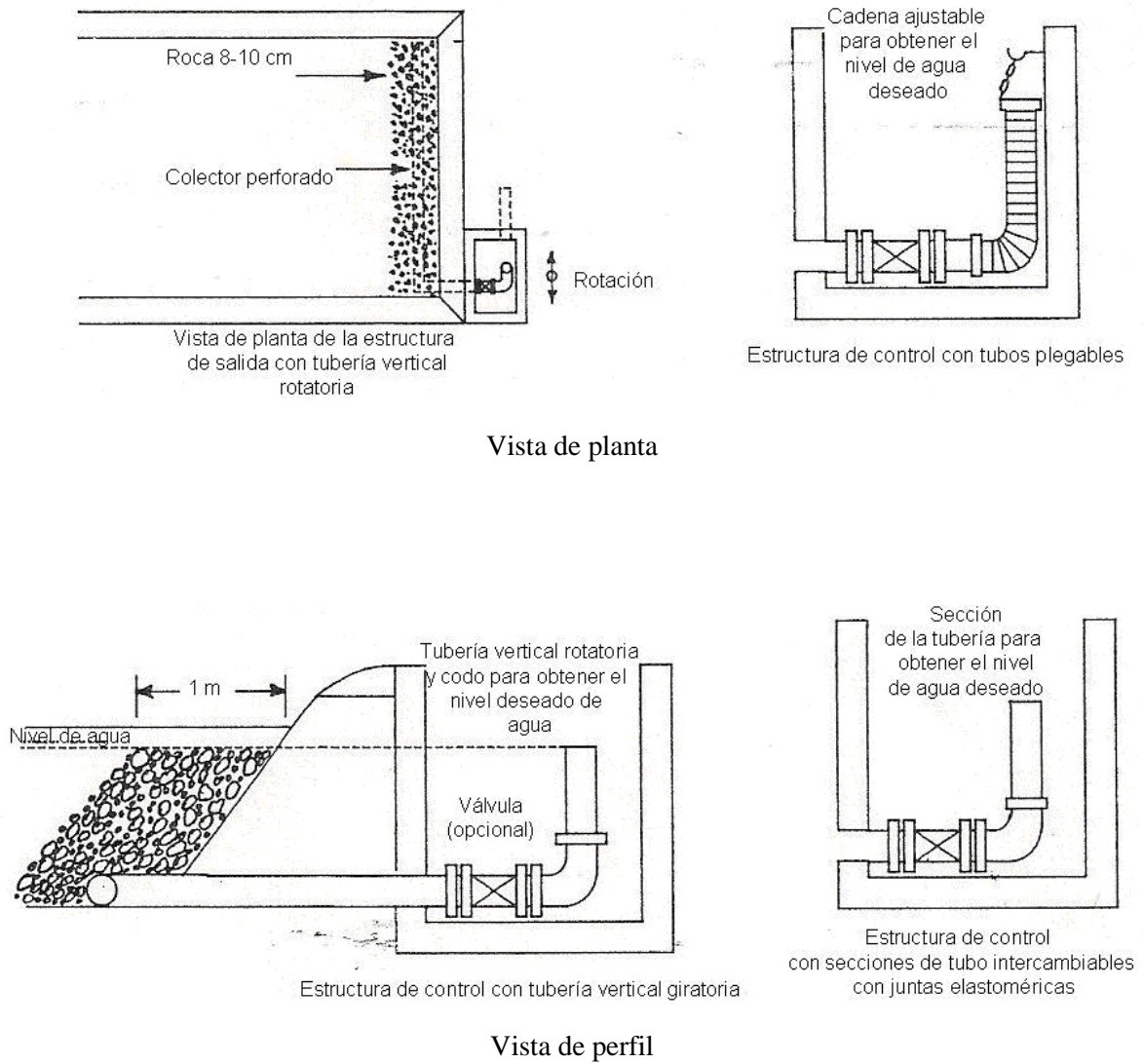


Figura 8.20. Propuesta de estructuras de control de nivel de agua a la salida para humedales FS