

**FUNCION DE LAS PLANTAS, FLUJO Y TIPO DE VEGETACION EN HUMEDALES
TECNICOS CONSTRUIDOS COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE LAS
AGUAS RESIDUALES EN PAISES TROPICALES EN DESARROLLO**

SANDRA MILENA ARIAS MENDOZA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2010**

**FUNCION DE LAS PLANTAS, FLUJO Y TIPO DE VEGETACION EN HUMEDALES
TECNICOS CONSTRUIDOS COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE LAS
AGUAS RESIDUALES EN PAISES TROPICALES EN DESARROLLO**

SANDRA MILENA ARIAS MENDOZA

**Monografía para optar el título de
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**DIRECTOR
ING. SERGIO AUGUSTO GUERRA CASTELLANOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2010

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
OBJETIVOS.....	13
OBJETIVO GENERAL	13
OBJETIVOS ESPECIFICOS	13
INTRODUCCIÓN	14
1. CLASIFICACION Y TIPO DE HUMEDALES	16
2. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS.....	23
2.1. IMPERMEABILIZACIÓN	23
2.2. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS – ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA.....	23
2.3. MEDIO GRANULAR	25
2.4. VEGETACIÓN.....	25
3. EFECTO DE LAS PLANTAS EN LOS HUMEDALES.....	28
3.1. CLASIFICACION EFECTOS FISICOS Y BIOLOGICOS	28
3.1.1. CASO DE ESTUDIO 1	42
3.1.2. CASO DE ESTUDIO 2	43
4. COMPARACION REMOCION DE PATOGENOS EN DIFERENTES CONDICIONES DE CULTIVO, VARIACIONES DEL MEDIO Y PROFUNDIAD.....	45
4.1. CASO DE ESTUDIO.....	45
5. INVESTIGACION SOBRE HUMEDALES EN COLOMBIA.....	52
6. CONCLUSIONES.....	53
BIBLIOGRAFIA.....	55

LISTADO DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Esquema de humedal construido de flujo superficial flujo horizontal. Cedido por Hans Brix (Univ. Aarhus, Dinamarca).	16
Ilustración 2. (a) Flujo bajo la zona de raíces.....	17
Ilustración 3. (b) Flujo a través de un medio poroso.	17
Ilustración 4. (c) Flujo a través de la zona de raíces.	17
Ilustración 5 (d) Flujo de tipo vertical a través de un lecho mixto de arena, grabas gradadas.....	18

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Foto No. 1. Impermeabilización de dos humedales de flujo subsuperficial con geomembrana HR-500. PTAR.....	23
Foto No. 2. Humedales técnicos contruidos con la utilización de heliconias.....	26
Foto No. 3. Cosechadora de sistema de tratamiento por medio de Lemnaceas..	29
Foto No. 4. Corte transversal de un humedal con especies de tipo Phragmites ...	30
Foto No. 5. Apertura de agujeros y orificios alrededor de los tallos de la especie Phragmites en un humedal de flujo subsuperficial.....	31
Foto No. 6. Humedal técnico con especies de Phragmites con cero vertimientos	33
Foto No. 7. Las plantas proveen Carbono orgánico y los residuos vegetales, hojas y raíces muertas proveen el carbono para la denitrificación.	33
Foto No. 8. Experimentos para determinar la presencia de “halo”, o zonas aerobias de oxidación en las terminaciones radiculares con aumento de 200um.....	35
Foto No. 9. Vista general del sistema de tratamiento con Phragmites.....	42
Foto No. 10. Sistema de tratamiento de lodos de una PTAR de Lodos activados en Kolding (Dinamarca)	44
Foto No. 11. Muestra las diferentes composiciones de humedales con especies tipo papiro utilizadas en las pruebas.....	47

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura No. 1. Humedal técnico de 3 etapas ($Q = 300 \text{ m}^3/\text{dia}$, Área Total: 575 m^2 , Área zona de raíces: 220 m^2 , Indonesia).....	24
Figura No. 2. Corte Transversal de un sistema de control para especies flotantes (lemnas).....	29
Figura No. 3. Variabilidad de la altura en las especies	30
Figura No. 4. Contribución del sustrato.....	31
Figura No. 5. Metabolismo de la planta	32
Figura No. 6. Remociones alcanzadas en Nitrógeno, en sistemas plantados y no plantados	34
Figura No. 7. Zonas alrededor de la raíz, una zona priva de oxígeno (anoxia) y otra zona de oxidación. Internamente hay presencia de Oxígeno ..	35
Figura No. 8. Perdida radial de oxígeno con la distancia.....	36
Figura No. 9. (a) Mecanismo de transporte de Oxígeno por Difusión y (b) por Flujo convectivo.....	37
Figura No. 10. Estudio realizado sobre la especie <i>Eleocharis dulcis</i>	38
Figura No. 11. (a) y (b) se observa el máximo oxígeno liberado por las especies <i>T. latifolia</i> y <i>J. effusus</i> en correspondencia a una variación de la intensidad de luz.....	39
Figura No. 12. Demanda de Oxígeno en especies plantadas y no plantadas.....	40
Figura No. 13. Diferentes poblaciones en sistemas plantados y no plantados. ...	40
Figura No. 14. Comparación de la profundidad del medio en las cuatro celdas para diferentes configuraciones del medio con vegetación y sin vegetación.	42
Figura No. 15. Diferentes tasas o rangos de infiltración para las cuatro celdas en estudio y con periodos de dosificación.	43

Figura No. 16. Porcentaje de remoción en términos de DBO ₅ , DQO, SST y N total en humedales: Siendo: H: Horizontal; P: plantados; up: Sin plantas ; V: Vertical.	48
Figura No. 17. Comportamiento de los coliformes totales. Siendo : H : Horizontal; P: plantados; up : Sin plantas ; V : Vertical.....	49
Figura No. 18. Comportamiento de E-coli en humedales. Siendo: H: Horizontal; P: plantados; up: Sin plantas; V: Vertical.	50
Figura No. 19. Comportamiento de los huevos de helminto.Siendo : H : Horizontal; P: plantados; up : Sin plantas ; V : Vertical.....	51

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla No. 1. Importancia relativa del rol de las plantas en diferentes tipos de humedales construidos.	41
Tabla No. 2. Experiencias de tratamiento lodos en Dinamarca.....	43
Tabla No. 3. Parámetros, métodos analíticos y frecuencias de análisis.....	46
Tabla No. 4. Investigaciones que se adelantan en Colombia (Colciencias) con relación a los humedales.	52

TITULO: FUNCION DE LAS PLANTAS, FLUJO Y TIPO DE VEGETACIÓN EN HUMEDALES TECNICOS CONSTRUIDOS COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN PAISES TROPICALES EN DESARROLLO

AUTOR: SANDRA MILENA ARIAS MENDOZA

PALABRAS CLAVES: Aguas Residuales, Sistemas Biológicos, Humedales, Patógenos.

En nuestro país solo se trata el 9% de las aguas residuales por consiguiente existe la necesidad de construir alrededor de 1 millar de plantas de tratamiento. Para poblaciones pequeñas el tratamiento de las aguas residuales por medio de sistemas biológicos naturales ha demostrado ser la mejor opción desde el punto de vista en los rendimientos en la remoción de los contaminantes como en los costos de operación.

Desde hace ya 20 años se han venido implementando sistemas biológicos naturales en Colombia del tipo humedales técnicos construidos de tipo horizontal principalmente y en los últimos años del tipo vertical con buenos resultados lo cual significa que este tipo de sistemas deben ser estudiados desde varios conceptos básicos y en su integralidad.

En el presente proyecto se estudia el rol y la función de las plantas (desde el punto de vista físico y biológico), el tipo de flujo, combinación de sistemas (horizontales Vs Verticales) plantados y no plantados, el tipo de vegetación en el tratamiento de las aguas residuales domesticas por medio de la utilización de humedales técnicos construidos, así como casos reales en Colombia y en el mundo.

Se realizará un cuadro comparativo de las alternativas de tratamiento con relación a las diferentes configuraciones de humedales y la función de las plantas así (incluyendo la remoción de patógenos) como un cuadro de las investigaciones realizadas en el país con relación a este tipo particular de tratamiento de las aguas residuales domésticas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director Ing. Sergio Augusto Guerra Castellanos.

TITLE: ROLE OF PLANTS, VEGETATION, TYPE OF FLOW IN TECHNICAL CONSTRUCTED WETLANDS AS AN ALTERNATIVE FOR THE TREATMENT OF WASTEWATER IN TROPICAL DEVELOPING COUNTRIES.

AUTHOR: SANDRA MILENA ARIAS MENDOZA

KEY WORDS: waste water, biological systems, Wetlands, Pathogens.

In our country only about 9% of waste water therefore there is need to build about 1 thousand treatment plants. For small populations the treatment of wastewater through natural biological systems has proved to be the best choice from the point of view on yields on removal of contaminants such as operating cost.

Since 20 years ago have been implemented in Colombia natural biological systems technical type constructed wetlands mainly horizontal and the vertical type in recent years with good results which means that such systems should be studied from several basic concepts in its entirety.

In this project we study the role and function of plants (from the standpoint of physical and biological), the type of flow, a combination of systems (Vertical Vs Horizontal) planted and not planted, the type of vegetation in the treatment of domestic wastewater through the use of constructed wetlands technical and case studies in Colombia and in the world.

There will be a table comparing the treatment alternatives with respect to the different configurations of wetlands and the role of plants as well (including the removal of pathogens) and the research (universities) in our country with regard to this particular type of treatment of domestic wastewater.

• Thesis

•• Physicochemical Engineering Faculty. Chemical Engineer School. Environmental Engineer Specialist.
Director: Ing. Sergio Augusto Guerra Castellanos

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estudio del rol de las plantas, tipo de flujo, combinación de sistemas y el tipo de vegetación en el tratamiento de las aguas residuales domésticas por medio de la utilización de humedales técnicos construidos. Evaluación del efecto que tienen las plantas y la combinación de sistemas de flujo vertical y horizontal y los factores ambientales.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ❖ Estudio de los diferentes tipos de plantas utilizadas en el tratamiento de las aguas residuales domésticas.
- ❖ Comparar la remoción de patógenos en diferentes condiciones de cultivo (monocultivo, policultivo)
- ❖ Determinación del rol de las plantas en el tratamiento de las aguas residuales por medio de humedales técnicos construidos.
- ❖ Estudio de los casos reales en Colombia y países tropicales

INTRODUCCIÓN

En Colombia, el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial especifica que la cobertura del servicio de alcantarillado es mayor en ciudades con un número mayor a 500.000 habitantes. Llegando a cubrirse hasta el 88% de la población. Situación que no garantiza que la calidad del servicio prestado sea la más adecuada para certificar el bienestar de los usuarios. De acuerdo con esto, la comunidad científica a nivel nacional e internacional se ha ocupado cada vez más, en encontrar alternativas tecnológicas que permitan dar solución a la problemática del saneamiento, principalmente para pequeñas, medianas localidades y zonas rurales; para ello, desde hace ya varios años se han enfocado en investigar los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, ya que estos sistemas han demostrado ser apropiados para la descontaminación de aguas bajo diferentes condiciones climáticas y además, son sistemas naturales que por la presencia de plantas y su interacción con los microorganismos asociados a la zona radicular, permiten el sostenimiento de procesos físicos, químicos y biológicos que mejoran la calidad del agua.

Desde hace unos treinta años los sistemas de humedales construidos se han utilizado en determinadas zonas (centro y norte de Europa) para tratar las aguas residuales de pequeños municipios. En la actualidad estos sistemas se están aplicando de forma creciente en todo el mundo, tanto en los países del Norte como del Sur, para tratar aguas residuales de todo tipo. En Colombia los humedales constituyen una alternativa francamente viable para abordar el problema del saneamiento.

Son sistemas pasivos de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos plantados con vegetación propia de zonas húmedas (macrófitos acuáticos) y en los que los procesos de descontaminación son ejecutados

simultáneamente por componentes físicos, químicos y biológicos, contribuyendo a restaurar ecosistemas degradados.

El interés en esta tecnología se ha debido a su bajo costo en términos de operación, mínimo o nulo requerimientos de energía e insumos químicos, además de los altos niveles de eficiencia reportados al tratar un rango extenso de contaminantes, incluyendo drenaje de minas, lixiviados de rellenos sanitarios, aguas lluvias urbanas y residuos agrícolas.

En este sentido, Grupos de Investigación en todo el mundo han venido estudiando el tema y en Colombia el Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira, en el desarrollo y aplicación de humedales construidos con el fin de brindar soluciones en torno al sector de agua potable y saneamiento básico acorde con las condiciones sociales, económicas y topográficas de la región cafetera y del País, y por lo cual ha querido transferir el avance que ha tomado esta tecnología.

1. CLASIFICACION Y TIPO DE HUMEDALES

Se clasifican en dos tipos; de flujo superficial con circulación de agua subterránea o superficial (Ver fig. 1). En estos humedales de flujo superficial el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos de los macrófitos. En realidad este tipo de humedales se pueden entender como una modificación de las lagunas de oxidación convencionales con menor profundidad y con plantas.

En los humedales de flujo subsuperficial la circulación del agua es subterránea a través de un medio granular y en contacto con los rizomas y raíces de los macrófitos. Este tipo de humedales se podrían entender como una modificación de los sistemas clásicos de infiltración en el terreno. Así pues los humedales de flujo subsuperficial forman parte de los sistemas naturales de depuración basados en la acción del terreno mientras que los de flujo superficial pertenecen al grupo de los basados en la acción de mecanismos que suceden en el agua.

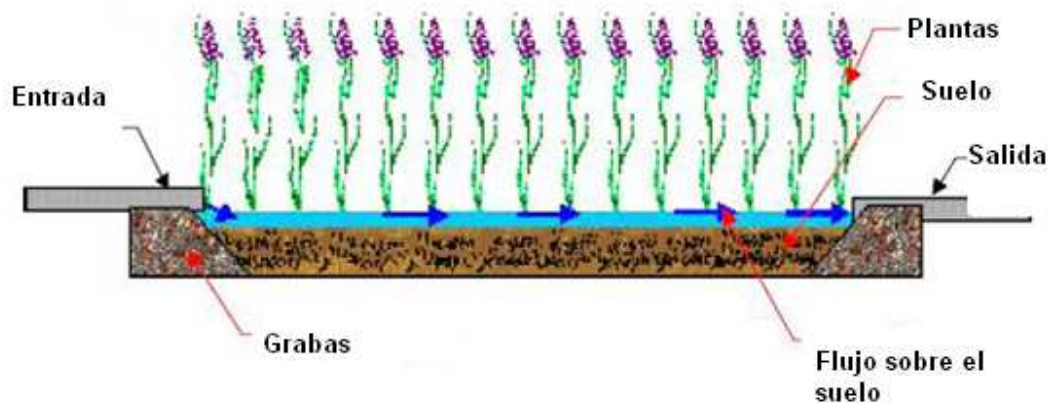


Ilustración 1 Esquema de humedal construido de flujo superficial con flujo horizontal. Cedido por Hans Brix (*Universidad de Aarhus, Dinamarca*).

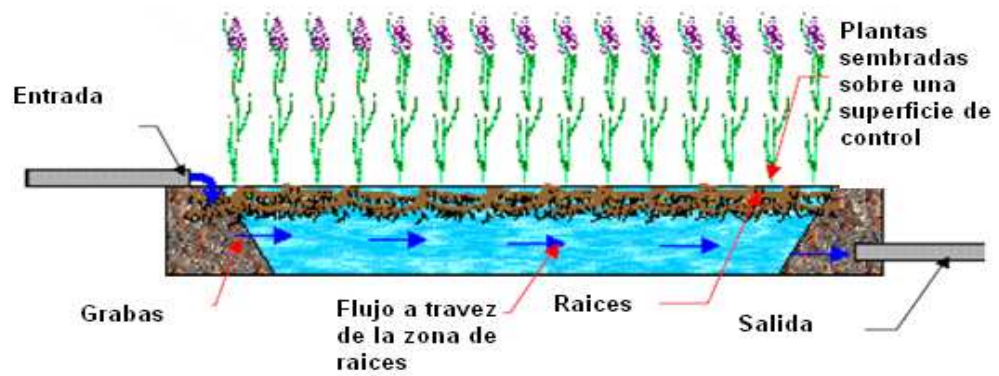


Ilustración 2. (a) Flujo bajo la zona de raíces.

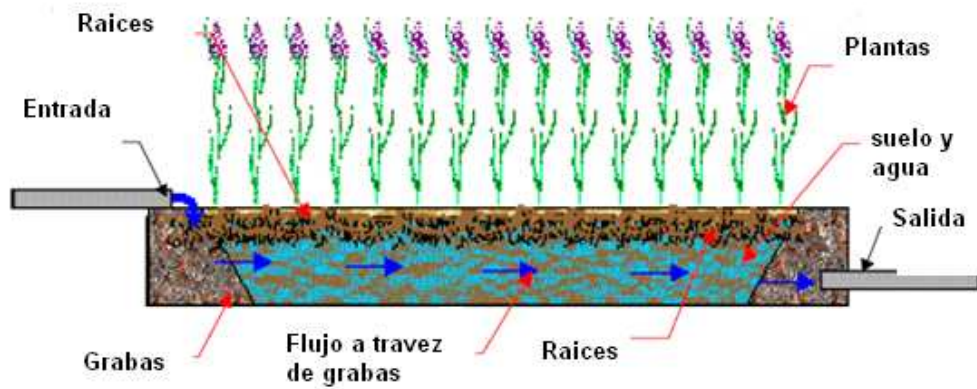


Ilustración 3. (b) Flujo a través de un medio poroso.

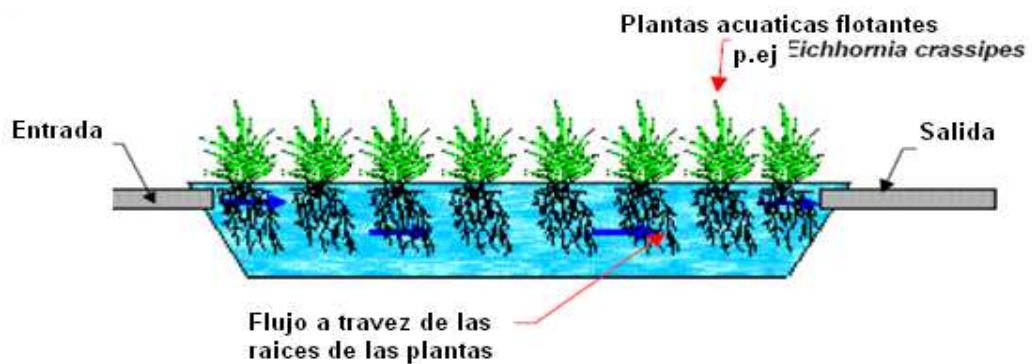


Ilustración 4. (c) Flujo a través de la zona de raíces.

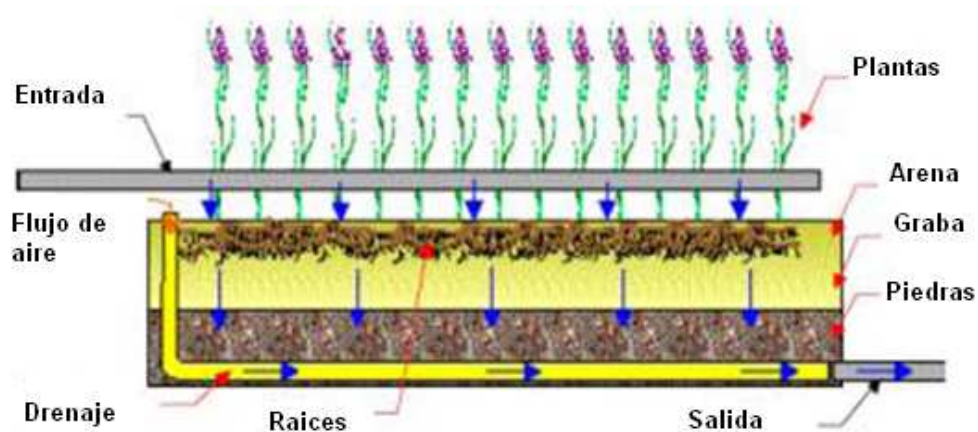


Ilustración 5 (d) Flujo de tipo vertical a través de un lecho mixto de arena, gravas gradadas.

La terminología aplicada a los humedales de flujo subsuperficial es particularmente confusa. En nuestro lenguaje castellano es corriente escuchar en foros técnicos o leer en la literatura términos como filtros con plantas, lechos de plantas, lechos de juncos y biofiltros. Incluso es muy frecuente la utilización del término inglés “wetland” en forma de neologismo cuando existe un equivalente castellano perfecto (humedal).

La terminología puede resultar confusa incluso en inglés, ya que también se utilizan términos como vegetated submerged beds y reed beds entre otros. En nuestro medio y en Colombia, el término más correcto probablemente sea el de filtro de plantas, ya que en definitiva se trata de filtros plantados, y la palabra filtro tiene un significado muy bien delimitado en tecnología de aguas. En España se conoce con el término “filtro verde”, que es un sistema de tratamiento muy bien conocido (en comunidades como Madrid, por ejemplo), también es un filtro de plantas. Un filtro verde es un sistema de infiltración en el terreno con aplicación superficial constituido por suelos con baja permeabilidad. Por otra parte, un filtro de plantas también es un biofiltro. A los filtros percoladores, que son sistemas

convencionales de depuración con biomasa fija, también se les suele denominar biofiltros.

Los humedales de flujo subsuperficial se clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales o verticales.

Los humedales con flujo horizontal funcionan permanentemente inundados, aunque hay algunas experiencias recientes satisfactorias con sistemas intermitentes [27].

Los humedales con flujo vertical se diseñan con funcionamiento intermitente, es decir, tienen fases de llenado, reacción y vertido. La intermitencia y la inundabilidad permanente confieren propiedades muy diferentes a los sistemas verticales y horizontales respectivamente.

Esta tipología de humedales fue desarrollada en Europa como alternativa a los humedales horizontales para producir efluentes nitrificados [4b]. En general los sistemas verticales se combinan con horizontales para que se sucedan de forma progresiva los procesos de nitrificación y desnitrificación y se consiga así eliminar nitrógeno y microorganismos patógenos.

En los humedales de tipo vertical la circulación del agua es de tipo vertical y tiene lugar a pulsos, de manera que el medio granular no está permanentemente inundado. La profundidad del medio granular es de entre 0,5 y 0,8m. Operan con cargas de alrededor de 20 g DBO/m²-día.

Los sistemas verticales tienen una mayor capacidad de tratamiento que los horizontales (requieren de menor superficie para tratar una determinada carga orgánica) pero son más susceptibles a la colmatación.

Los sistemas con flujo horizontal tratando aguas residuales urbanas, operando con cargas superficiales razonables (2-6 g DBO/m².dia) [5], producen efluentes con ausencia de oxígeno, potencial redox muy negativo (E_H menor en muchos casos de -100 mV) y posibilidad de malos olores [7], [14], [15] . Además estos efluentes pueden volverse blanquecinos debido a la precipitación de carbonatos y en relación con la sulfato reducción [13]. Todos estos problemas se pueden evitar operando con cargas menores o según trabajos recientes con profundidades de la lámina de agua de 0,3 m [8].

Los humedales con flujo horizontal se diseñan generalmente con profundidades de 0,6 m hasta 0,9 m. Los sistemas con flujo vertical operan con cargas superiores que los horizontales (entre 20 y 40 g DBO/m².dia, según estimaciones realizadas producen efluentes más oxigenados (valores de concentración de oxígeno de hasta 13 mg/L, cercanos al 90% de saturación según [18] en Dinamarca y durante el invierno) y libres de malos olores.

Las principales ventajas de los humedales de flujo subsuperficial respecto a los de flujo superficial son:

- Menor incidencia de malos olores debido a la naturaleza subterránea del flujo. Esta ventaja es relativa ya que los sistemas de flujo superficial se suelen aplicar para mejorar la calidad de efluentes secundarios, con lo que ya reciben aguas bastante tratadas, con bajo potencial para la emisión de malos olores.
- Bajo riesgo de exposición directa de las personas y de aparición de insectos gracias también al flujo subterráneo. El control de insectos puede llegar a ser una actividad costosa en sistemas con flujo superficial.

- Protección térmica debida a la acumulación de restos vegetales y del flujo subterráneo. Esta es una ventaja interesante en los países nórdicos, donde la cobertura de hielo y nieve invernal no afectan de esta forma al proceso. También evita la aparición de gradientes térmicos acusados. Por ejemplo, en un humedal sin plantas ni restos vegetales el gradiente térmico medido en verano ha sido de hasta 12 °C/m, mientras que en un humedal con plantas (1800 g/m² de biomasa aérea expresada en peso seco) y restos vegetales (310 g/m²) ha sido de 3,4 °C/m [5].

Entre los inconvenientes cabe destacar:

- Mayor costo de construcción debido fundamentalmente al material granular. Según los estudios de Collado [3], basados en proyectos constructivos de sistemas de lagunaje y humedales de flujo subsuperficial, el costo se puede llegar a incrementar hasta un 30% como consecuencia del material granular.
- Menor valor como ecosistemas para la vida salvaje debido a que el agua es difícilmente accesible a la fauna.

Los humedales de flujo superficial se suelen utilizar como tratamiento adicional a efluentes previamente tratados en depuradoras de tipo convencional. Hay muy pocos sistemas a escala real que traten directamente aguas residuales [17]. Los humedales de flujo superficial suelen ser sistemas de gran tamaño con extensiones de varias e incluso hasta centenares de hectáreas. Además, en este tipo de proyectos, los objetivos de restauración y creación de nuevos ecosistemas en general tienen una gran importancia.

En Europa y en especial el país Ibérico (Cataluña) destacan instalaciones como la de Empuriabrava con unas 7 hectáreas e integrada en el Parc Natural dels

Aiguamolls de l'Empordá [11] y la de Granollers de 1 hectárea y que forma parte de un parque periurbano. Son instalaciones que producen de forma fiable efluentes de gran calidad, por ejemplo en el caso de Granollers menos de 2 mg NH₃-N/L -con excepción de invierno- y menos de 100 CF/100 mL de forma bastante sistemática. En la actualidad hay en construcción un humedal de flujo superficial de 17 hectáreas en el delta del río Llobregat.

Los humedales de flujo subsuperficial son instalaciones de menor tamaño y que en la mayoría de los casos se utilizan como sistema de tratamiento de las aguas residuales generadas en casas, viviendas aisladas y núcleos de menos de 2000 habitantes. En Europa y específicamente en Colombia hay un buen número de instalaciones de estas características que combinan humedales de flujo subsuperficial con otros tipos de sistemas naturales de depuración.

En Europa también se destacan sistemas como el de la urbanización Can Suquet en Les Franqueses del Valles (110 hab-eq, 440 m²), y diversas PTAR'S gestionadas por la Agencia Catalana de l'Aigua como Arnes (1301 hab-eq, 3750 m²), Cervia de Ter (800 hab-eq, 2990 m²), Corbins (2000 hab-eq, 2450 m²), Verdú (2000 hab-eq, 2210 m²), Vilaplana (576 hab-eq, 2240 m²) y Els Hostalets de Pierola (1200 hab-eq, 800 m²) entre otras. En Colombia se destacan los humedales para tratamiento de aguas residuales domésticas del municipio de Rionegro (Antioquia), los humedales de tratamiento de aguas industriales (Megatrón en Pereira, Colpapel, Sony, Colombo Italiana de Curtidos en Villapinón) para el tratamiento de Metales pesados entre otros.

2. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

2.1. IMPERMEABILIZACIÓN

Es necesario disponer de una barrera impermeable para confinar al sistema y prevenir la contaminación de las aguas subterráneas. Dependiendo de las condiciones locales puede ser suficiente una adecuada compactación del terreno. En otros casos será necesario realizar aportaciones de arcilla o utilizar láminas sintéticas.



Foto No. 1. Impermeabilización de dos humedales de flujo subsuperficial con geomembrana HR-500. PTAR Villapinzón (Boyacá Colombia, para tratamiento efluentes con Cromo en la Empresa, Colombo Italiana de curtidos (Cortesía Ing. Guerra S.).

2.2. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS – ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA

Los humedales son sistemas que requieren una buena repartición y recolección de las aguas para alcanzar los rendimientos estimados, es por ello que las estructuras de entrada y salida deben estar muy bien diseñadas y construidas.

El agua residual procedente de los tratamientos previos se hace llegar hasta una caja de repartición donde el caudal se divide equitativamente y mediante diversas tuberías se vierte al lecho. Alternativamente se puede hacer llegar el agua hasta un canal con vertedero que la distribuye de forma homogénea en todo el ancho del sistema.

La recolección del agua efluente se realiza con una tubería perforada asentada sobre el fondo del humedal. Esta tubería conecta con otra en forma de “L” invertida y cuya altura es regulable. Dicha estructura permite modificar el nivel de agua y a su vez drenar el humedal durante operaciones de mantenimiento. La configuración del humedal depende en gran manera del espacio disponible y las condiciones geométricas y topográficas del lugar, La figura No. 1 muestra un humedal técnico construido de tres etapas independientes [67].

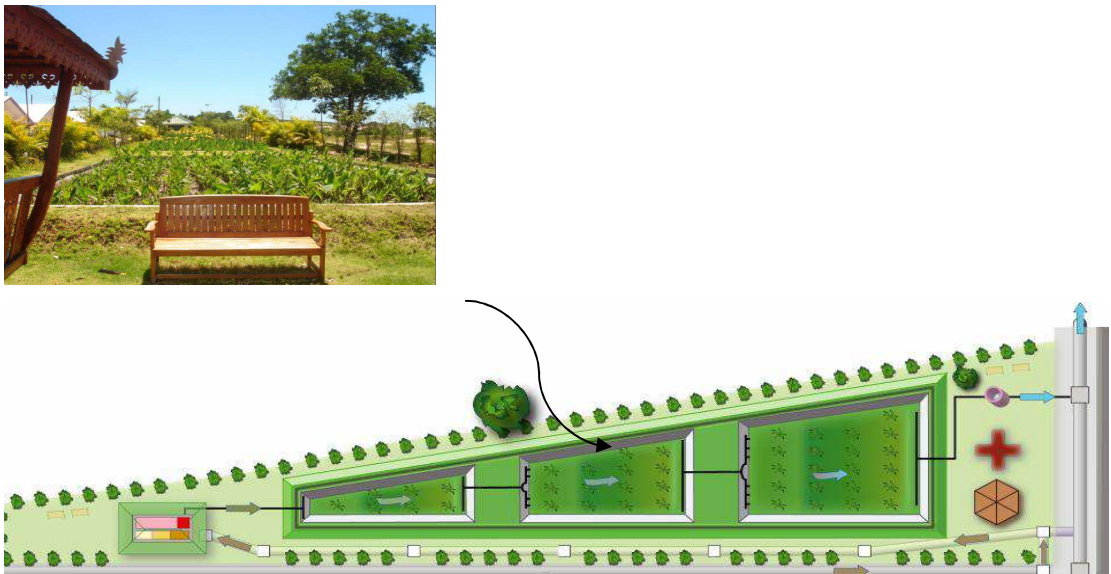


Figura No. 1. Humedal técnico de 3 etapas ($Q = 300 \text{ m}^3/\text{dia}$, Área Total: 575 m^2 , Área zona de raíces: 220 m^2 , Indonesia)

2.3. MEDIO GRANULAR

En las zonas de entrada y salida se colocan piedras que permiten diferenciar estas zonas de lo que es el medio granular principal ó medio de soporte. El conjunto medio granular/biopelícula/plantas debe ser considerado como el principal constituyente de los humedales.

En el medio granular ocurren múltiples procesos como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes, y la inactivación de los microorganismos patógenos. El medio granular debe ser limpio (exento de finos), homogéneo, duro, durable y capaz de mantener su forma a largo plazo.

Además, debe permitir un buen desarrollo de las plantas y de la biopelícula. En humedales verticales diámetros medios de alrededor de 3-6 cm ofrecen muy buenos resultados.

Una característica muy importante del medio granular es su conductividad hidráulica, ya que de esta propiedad depende la cantidad de flujo de agua que puede circular a través de él.

Durante el diseño debe tenerse en cuenta que la conductividad hidráulica puede alterarse con el paso del tiempo.

2.4. VEGETACIÓN

Las especies utilizadas son micrófitos emergentes típicos de las zonas húmedas como el junco ó carrizo (*Phragmites*), la espadaña (*Typha angustifolia*) o los juncos: *Scirpus* y *Phragmites communis*, Heliconia, papiros (*Cyperus papyrus* sp), Jengibre, Renealmia alpina, en humedales con flujo libre las más utilizadas son las

lemnáceas, buchón de agua, etc. Se documentan muchas más especies en especial para el tratamiento de metales pesados y componentes tóxicos con el término de fitodepuración (fitoremediación). En Europa las plantas más utilizadas son el carrizo y el junco, con densidades de plantación de 3 ejemplares por metro cuadrado (Fotografía 1).



Foto No. 2. Humedales técnicos construidos con la utilización de heliconias

Todas estas plantas presentan adaptaciones especiales para vivir en ambientes permanentemente anegados. Sus tejidos internos disponen de espacios vacíos que permiten el flujo de gases desde las partes aéreas hasta las subterráneas. Sus rizomas tienen una gran capacidad colonizadora. Los efectos de la vegetación sobre el funcionamiento de los humedales son Las raíces y rizomas proporcionan una superficie adecuada para el crecimiento de la biopelícula.

La biopelícula crece adherida a las partes subterráneas de las plantas y sobre el medio granular. Alrededor de las raíces se crean microambientes aeróbicos donde tienen lugar procesos microbianos que usan el oxígeno, como la degradación aeróbica de la materia orgánica y la nitrificación.

Tienen un efecto de amortiguamiento con las variaciones ambientales. Cuando las plantas están desarrolladas reducen la intensidad de la luz incidente sobre el medio granular evitándose así grandes gradientes de temperatura en profundidad que pueden afectar el proceso de depuración. En climas fríos la vegetación protege el medio de la congelación.

Las plantas asimilan nutrientes. Su contribución a la eliminación de nutrientes es modesta cuando se tratan aguas residuales urbanas de tipo medio (eliminan entre un 10% del N y un 20% del P). En aguas residuales diluidas su contribución es mayor (más del 50%).

La selección de la vegetación que se va a usar en un sistema de humedales debe tener en cuenta las características de la región donde se realizará el proyecto, así como las siguientes recomendaciones:

- ❖ Las especies deben ser colonizadoras activas, con eficaz extensión del sistema de rizomas.
- ❖ Deben ser especies que alcancen una biomasa considerable por unidad de superficie para conseguir la máxima asimilación de nutrientes.
- ❖ La biomasa subterránea debe poseer una gran superficie específica para potenciar el crecimiento de la biopelícula.
- ❖ Deben disponer de un sistema eficaz de transporte de oxígeno hacia las partes subterráneas para promover la degradación aeróbica y la nitrificación.
- ❖ Se debe tratar de especies que puedan crecer fácilmente en las condiciones ambientales del sistema proyectado.
- ❖ Debe tratarse de especies con una elevada productividad.
- ❖ Las especies deben tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales.
- ❖ Se deben utilizar especies propias de la flora local.

3. EFECTO DE LAS PLANTAS EN LOS HUMEDALES

El rol y efecto de las plantas en sistemas de tratamiento de aguas residuales es aun hoy en día materia de debate [29]. En general se reconoce que las plantas son componentes indispensables.

Los efectos demostrados de las plantas abarcan dos grandes campos:

- ❖ Efectos FISICOS
- ❖ Efectos BIOLÓGICOS

3.1. CLASIFICACION EFECTOS FISICOS Y BIOLÓGICOS

- ❖ En la categoría de los efectos físicos, las plantas proveen un medio de filtración físico en aguas residuales toda vez que operan como verdaderos filtros de retención de sólidos suspendidos.
- ❖ Las plantas operan como grandes superficies aéreas atenuadoras de luz por lo tanto proveen sombra al fitoplancton en Los humedales de tipo sumergido ó de tipo “free wáter “.
- ❖ Un caso específico lo reporta la empresa Lemna corp de EEUU. Se micro propaga la especie lemnácea en grandes superficies separadas por barreras flotantes como la de la figura.

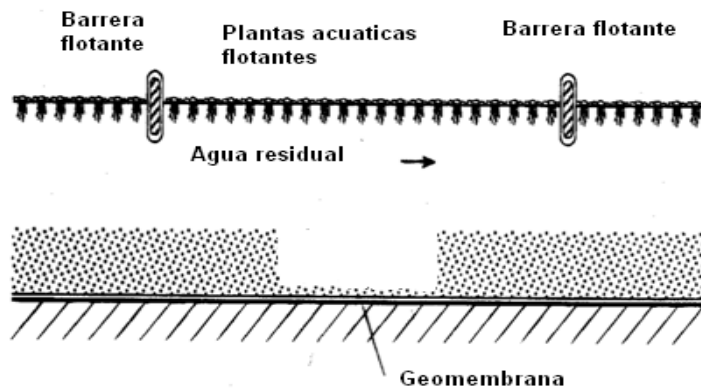


Figura No. 2. Corte Transversal de un sistema de control para especies flotantes (lemnas)

Una vista aérea del equipo cosechador de lemnáceas en un sistema de tratamiento con este tipo de especie se muestra a continuación (ver fotografía 3)



Foto No. 3. Cosechadora de un sistema de tratamiento por medio de Lemnaceas (Cortesía Lemna Corp.).

- ❖ Reducción de la velocidad del viento. Al reducir la velocidad del viento se ha demostrado que se reduce la re suspensión de los sedimentos.

Además se ha demostrado una reducción en la velocidad del agua (flujo superficial) con lo cual se crean condiciones favorables de sedimentabilidad. La figura siguiente (Figura 3) muestra que al variar la velocidad del viento en especial en especies de tipo papiro, y phragmites las cuales alcanzan una

altura considerable (2 – 5 mts en Colombia) varia la altura de las especies [29].

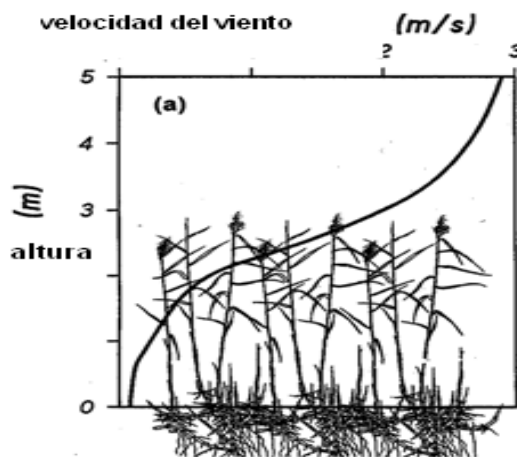


Figura No. 3. Variabilidad de la altura en las especies

- ❖ Se crean efectos de estabilización del suelo y se reduce la formación de grietas y surcos.
- ❖ Las plantas y las superficies radiculares proporcionan una superficie “importante” para el crecimiento microbiano. La fotografía 4, Muestra un corte de un humedal de flujo subsuperficial con especies de tipo hragmites. Se observa la gran superficie y rizomas, muy características de esta especie con profundidades radiculares hasta de 1 metro en Colombia.



Foto No. 4 Corte transversal de un humedal con especies de tipo Phragmites

La figura siguiente Muestra para dos diferentes especies la Phragmites y la Elodea como el proceso de denitrificación es diferente dependiendo del tipo de sustrato expresado en m^2 por día en ciclo diurno en un sistema de tipo humedal construido [27].

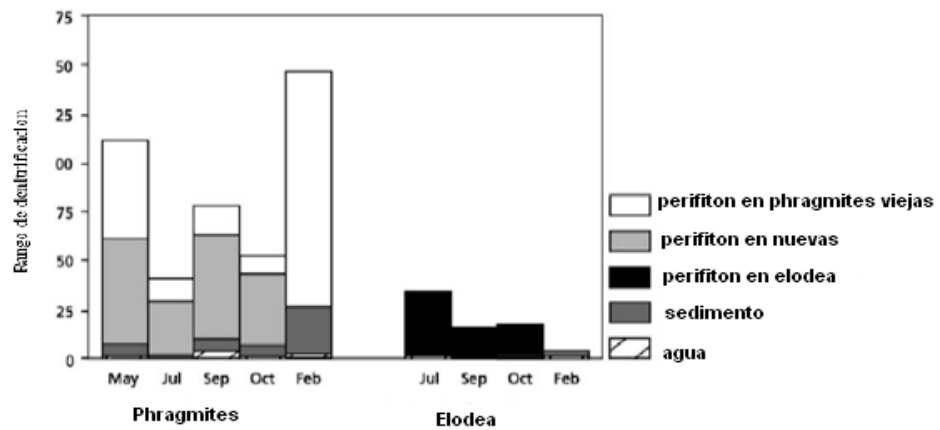


Figura No. 4 Contribución del sustrato

El crecimiento de las raíces y el movimiento del conjunto con el tallo, ejercen una acción de apertura de vacíos en el medio filtrante no permitiendo obstrucciones. Además se crean agujeros alrededor de los tallos los cuales proveen una mejor filtración manteniendo la biomasa con la permeabilidad requerida. La fotografía 5, Muestra este aspecto con la especie Phragmites en un humedal de flujo subsuperficial.



Foto No. 5. Apertura de agujeros y orificios alrededor de los tallos de la especie Phragmites en un humedal de flujo subsuperficial.

- ❖ El material vegetal muerto en épocas de invierno severo se ha demostrado muy útil para aislar el suelo y evitar el congelamiento del agua superficial.
- ❖ Metabolismo de la Planta. (Absorción de agua). En humedales técnicos contruidos con especies como la Phragmites, se ha demostrado que se incrementa el flujo de contaminantes al suelo en sistemas de tipo superficial o subsuperficial. Las siguientes figuras confirman lo expuesto.

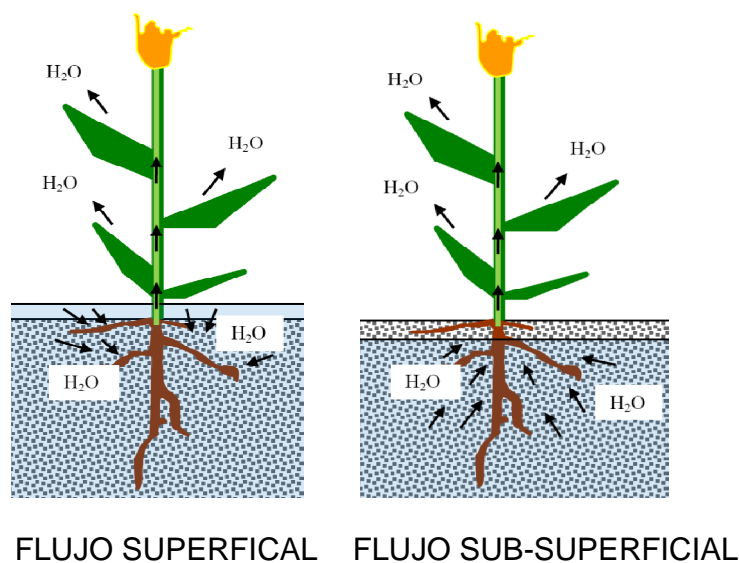


Figura No. 5. Metabolismo de la planta

- ❖ Por el proceso de **Transpiración** en la cual la planta opera como una bomba de transpiración, el agua es literalmente bombeada hacia las raíces por lo cual se obtiene una mayor concentración de contaminantes en la zona de raíces.
- ❖ Aumentan la tasa de **Evapotranspiración**. Se ha demostrado que las plantas aumentan la tasa de evapotranspiración por consiguiente la pérdida de agua en la zona humedal. En la figura se muestra un humedal técnico construido con especies Phragmites con cero vertimientos [2b].

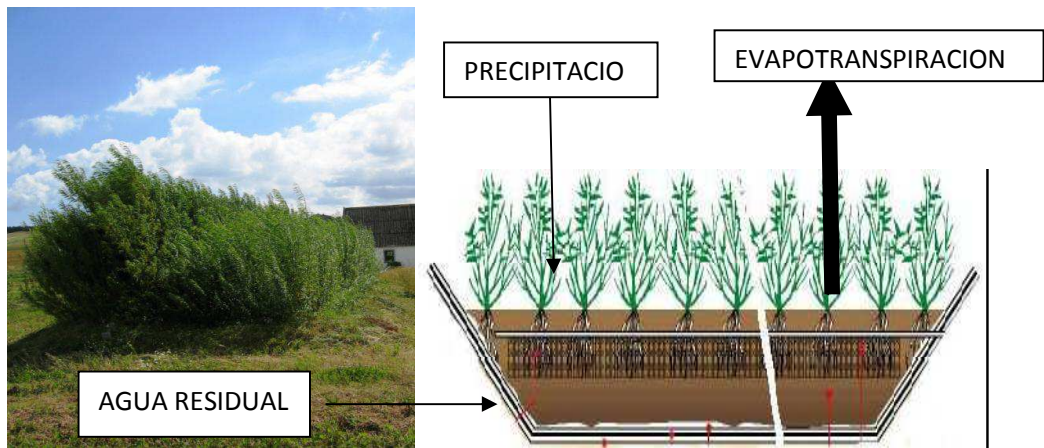


Foto No. 6 Humedal técnico con especies de Phragmites con cero vertimientos

- ❖ **FOTOSINTESIS:** Las plantas por medio de la fotosíntesis capturan CO₂ y liberan O₂. En la zona de raíces se demostró además liberación de O₂.
- ❖ **DENITRIFICACIÓN:** Las plantas expelen C- orgánico como se muestra en la fotografía 8, con especies de tipo phragmites. Las raíces muertas, lodo digerido y hojas proveen una fuente de carbono orgánico [4b].

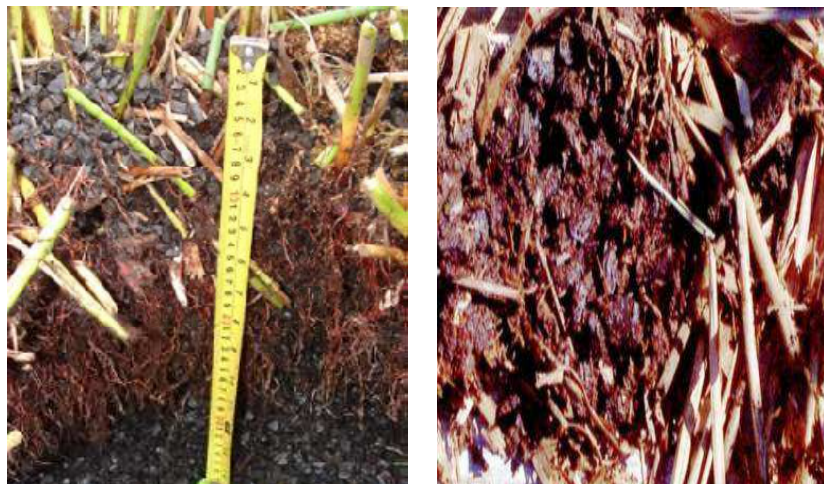


Foto No. 7. Las plantas proveen Carbono orgánico y los residuos vegetales, hojas y raíces muertas proveen el carbono para la denitrificación.

- ❖ **CONSUMO DE NUTRIENTES.** Se ha demostrado ser un proceso sostenible aun con bajas cargas (N, P, K). Brix [4b] reporta las siguientes cargas :

Captura en Plantas:

- N: 200-2500 kg ha⁻¹año⁻¹
- P: 30-150 kg ha⁻¹año⁻¹

En regiones con climas cálidos:

- N: 5-10% Remoción
- P: <5% Remoción

En el trópico: Supera el: 50 %

Las siguientes gráficas,[4b], [24] muestran para dos especies de plantas (Heliconias y Cannas o Phragmites) y en sistemas plantados y No plantados, las remociones alcanzadas en Nitrógeno.

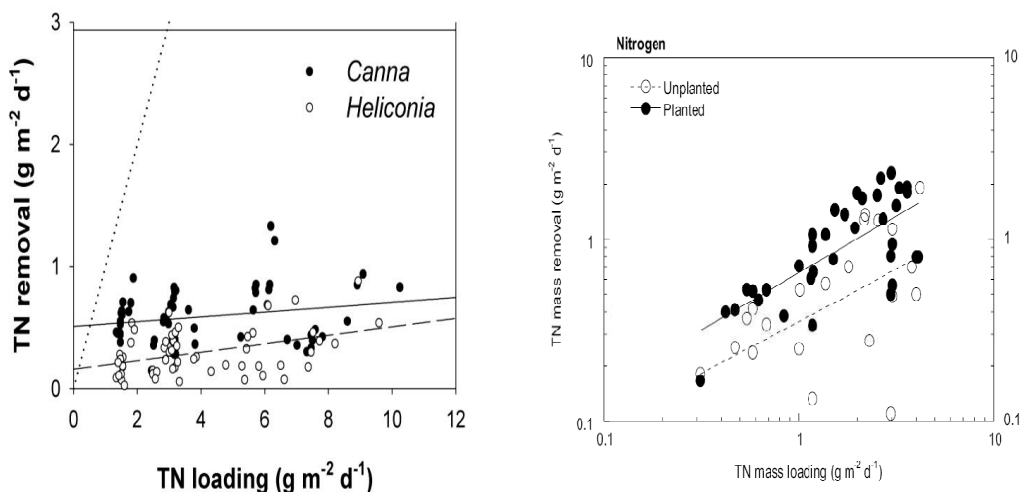


Figura No. 6 Remociones alcanzadas en Nitrógeno, en sistemas plantados y no plantados

- ❖ **XENOBIOTICOS.** Se ha demostrado que estos son degradados en la zona de raíces.

❖ LAS PLANTAS PROVEEN OXIGENO EN LA ZONA DE RAICES.

Se ha demostrado que las plantas liberan oxígeno en la zona de raíces y crean oxidaciones o zonas de oxidación en la rizosfera creando procesos aerobios (nitrificación). Las graficas muestran esta liberación en la zona de raíces. Se presentan dos zonas una denominada de reducción en donde no se presenta “halo”, y otra en el extremo de la terminación denominada de oxidación con presencia de “halo”[4b]. La siguiente grafica y fotografía demuestran este aspecto.

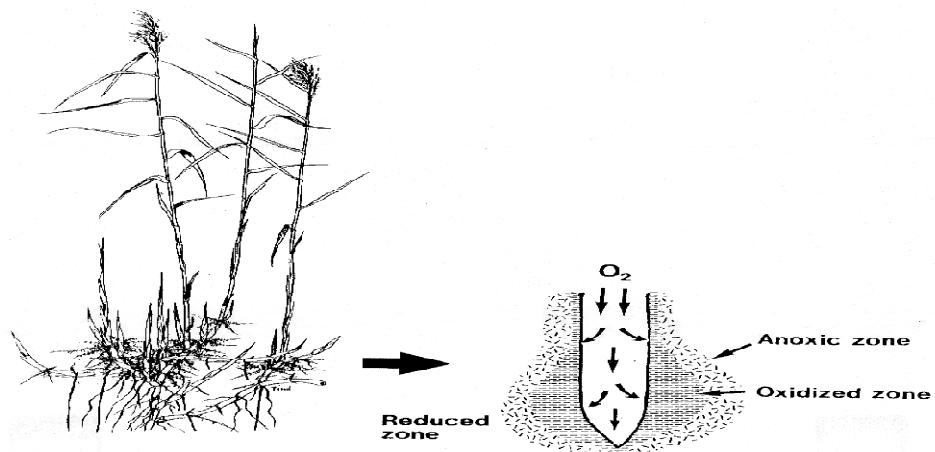


Figura No. 7. Zonas alrededor de la raíz, una zona priva de oxígeno (anoxia) y otra zona de oxidación. Internamente hay presencia de Oxígeno

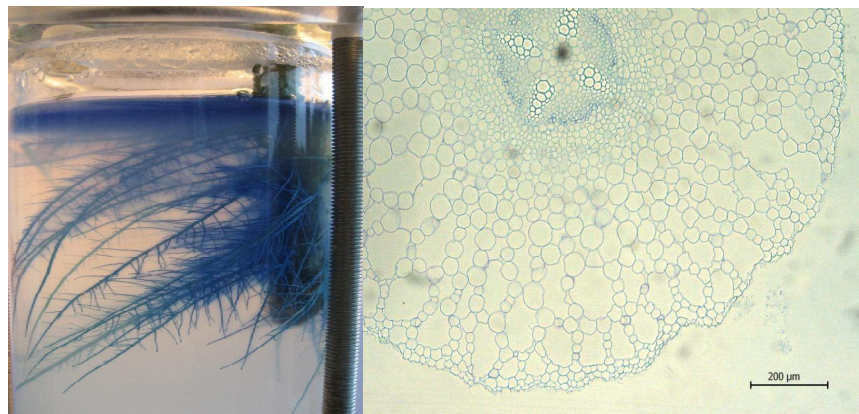


Foto No. 8 (a) y (b) muestran experimentos para determinar la presencia de “halo”, o zonas aerobias de oxidación en las terminaciones radiculares con un aumento de 200 μm .

❖ LIBERACION DE OXIGENO

Depende de:

- Mecanismos de Transporte de Gas
- Demanda de Oxígeno en el sedimento
- Permeabilidad de las raíces
- Especies

Las plantas en los humedales pueden crear barreras para fomentar la liberación de oxígeno dependiendo del tipo de tratamiento y de lo estrecha y débil que sean estas barreras. La gráfica siguiente [4b] muestra como a medida que se aleja de la raíz la pérdida radial de oxígeno aumenta.

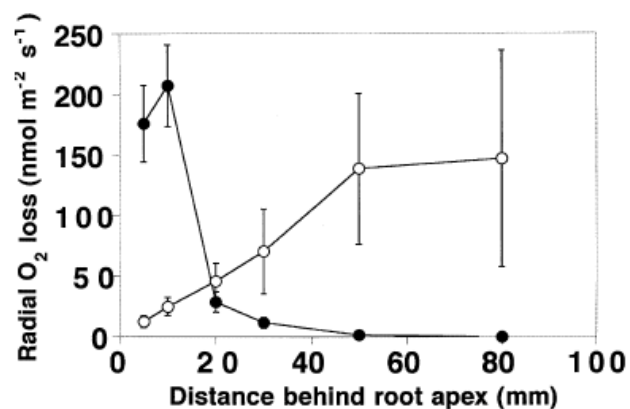


Figura No. 8 Pérdida radial de oxígeno con la distancia.

❖ MECANISMOS DE TRANSPORTE DE OXIGENO

En las plantas utilizadas en sistemas de tratamiento de aguas residuales por medio de humedales existen dos tipos de mecanismos de transporte de oxígeno.

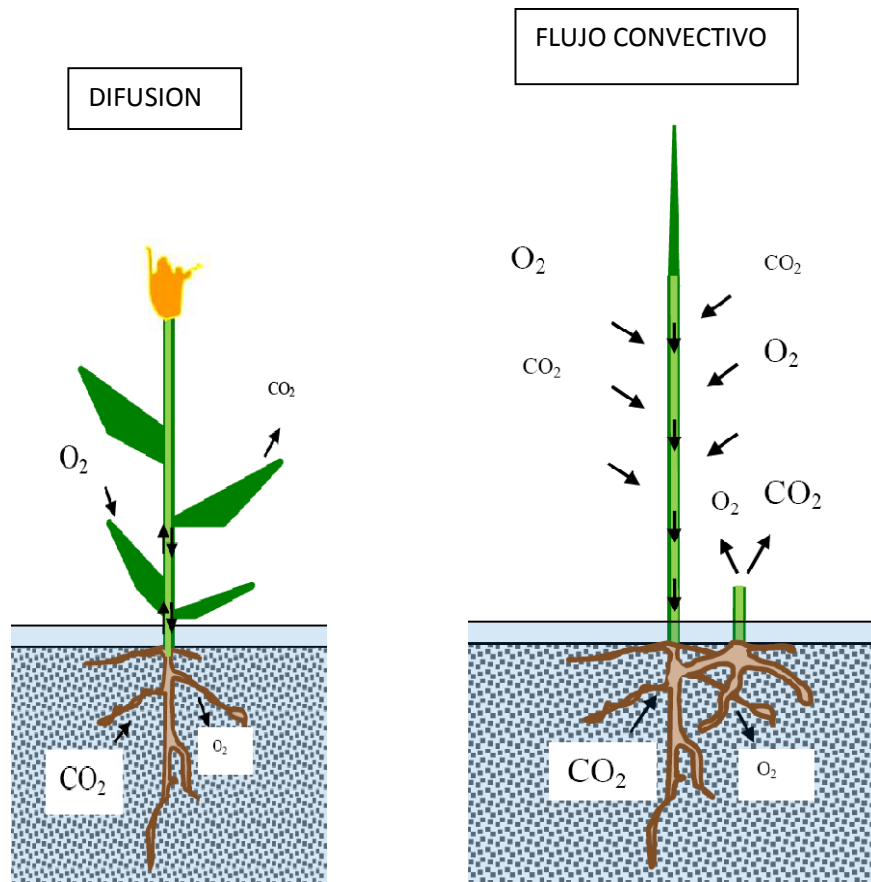


Figura No. 9. (a) Mecanismo de transporte de Oxígeno por Difusión y (b) por Flujo convectivo.

Las gráficas siguientes nos muestra un estudio realizado sobre la especie *Eleocharis dulcis* en donde se midieron parámetros como PAR (Photosynthetically Active Radiation band), RH (Humedad Relativa). Temperatura, Presión efectiva (%) , Presión potencial (Pa); en todos los casos con relación a la hora del día. Se observa la variabilidad de estos parámetros los cuales alcanzas picos altos en correspondencia a las 12 del día.

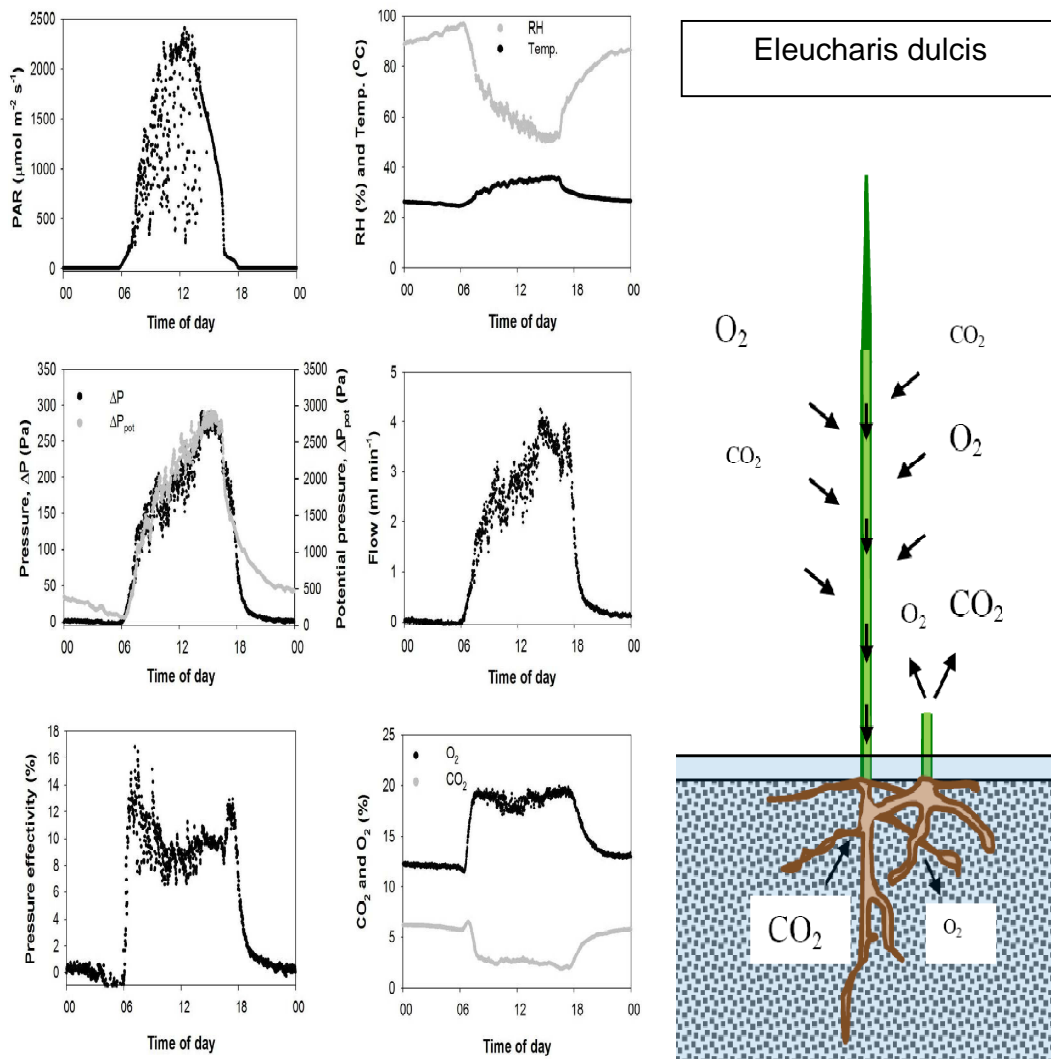


Figura No. 10. Estudio realizado sobre la especie *Eleocharis dulcis*.

- ❖ Brix [2b] reporta el siguiente gráfico para las especies *T. latifolia* y *J. effusus*, teniendo en cuenta efectos sobre la Demanda de Oxígeno, Tipo de especie y efecto de la luz.

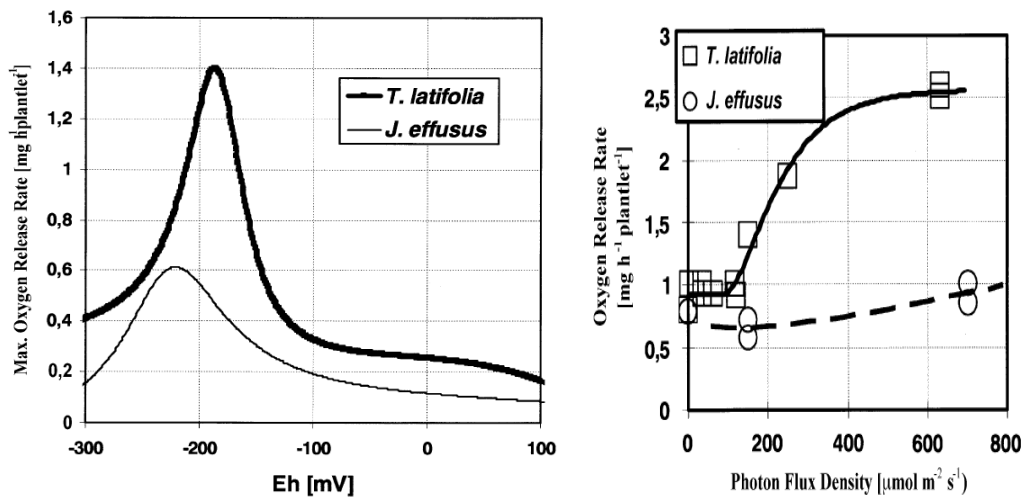


Figura No. 11 (a) y (b) se observa el máximo oxígeno liberado por las especies *T. latifolia* y *J. effusus* en correspondencia a una variación de la intensidad de luz.

En resumen el significado de la liberación de oxígeno según diferentes autores ha sido un tema de mucha significancia y demuestra que si es posible la liberación de oxígeno en sistemas de humedales.

El siguiente cuadro resume el resultado de las investigaciones con relación a la especie *P. australis* [2b].

- 0.02 g m⁻¹ dia⁻¹ (Brix and Schierup, 1990)
- 1-2 g m⁻¹ dia⁻¹ (Gries, 1990)
- 5-12 g m⁻¹ dia⁻¹ (Armstrong and Armstrong, 1990)

El siguiente gráfico demuestra lo anterior con relación a las cargas en términos de DBO₅, DQO teniendo en cuenta análisis realizados a sistemas plantados y sin plantas.

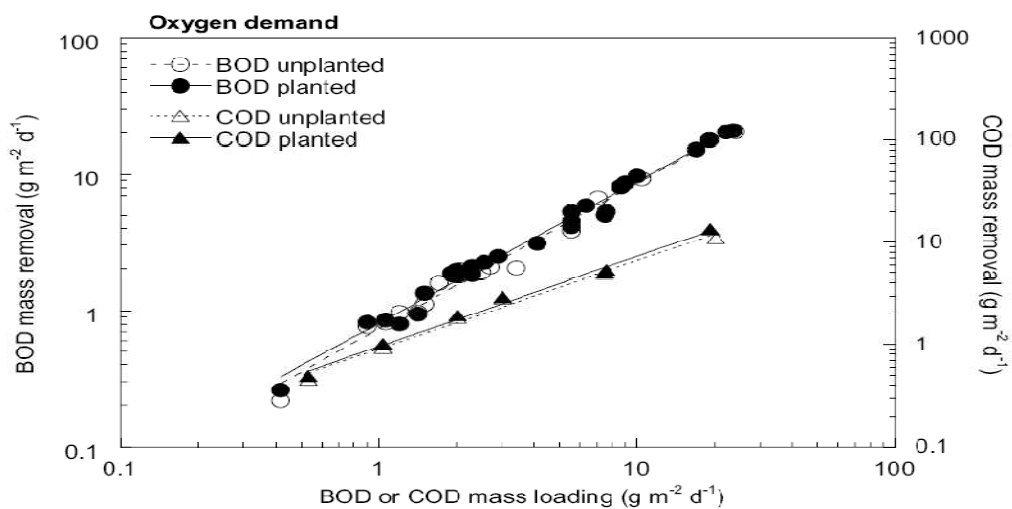


Figura No. 12 Demanda de Oxigeno en especies plantadas y no plantadas.

Esta grafica corrobora como en términos de DBO y DQO las muestras de sistemas con especies plantadas tienen un mejor comportamiento que las no plantadas o sin vegetación.

- ❖ **ACTIVIDAD MICROBIANA:** En múltiples estudios se han determinado diferentes poblaciones de bacterias nitrificantes. La figura, [2b] muestra las diferentes poblaciones en sistemas plantados y no plantados.

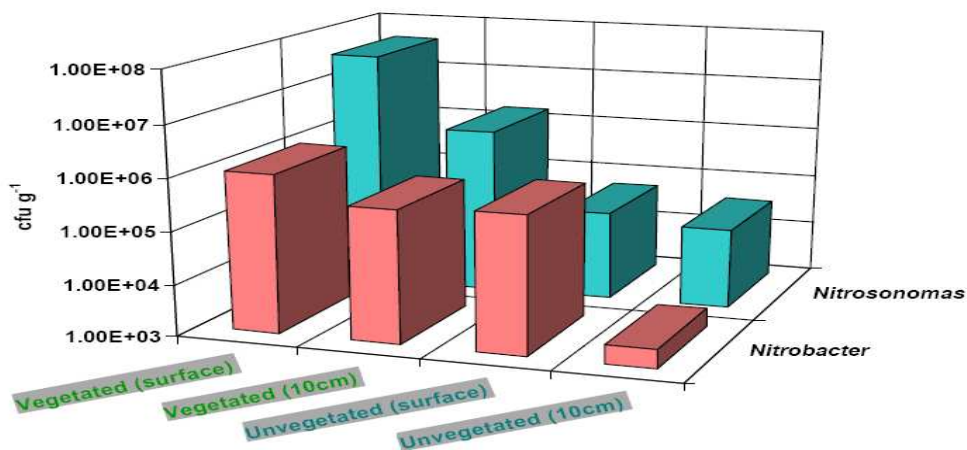


Figura No. 13 Diferentes poblaciones en sistemas plantados y no plantados.

- ❖ **OTROS ASPECTOS:** Estéticos, hábitats para otras especies, potencial para producción de biomasa.

El siguiente cuadro resume la importancia relativa de las diferentes especies en humedales [2b].

	FLUJO SUPERFICIAL	FLUJO HORIZONTAL	FLUJO VERTICAL
CARGA POR AREA	BAJO	MEDIO	ALTO
Establece una superficie estable	+++++	+++++	+++
Prevé taponamientos	-----	---	+++++
Reduce la velocidad en la superficie	+++	---	---
Atenuador de Luz	+++++	++	+
Insolación	+++	+++	+++
Microorganismos adheridos	+++++	+++	+
Toma de nutrientes	+++++	+	---
Liberación de Oxígenos en las raíces	+	++	+
Hábitats para fauna	+++++	+++	+
Estético	+++++	++++	+

Tabla No. 1. Importancia relativa del rol de las plantas en diferentes tipos de humedales construidos.

3.1.1. CASO DE ESTUDIO 1

Tratamiento de los efluentes de una industria de producción de azúcar por medio de cultivos de remolacha [2]. La Fotografía 5, muestra el esquema general del sistema de tratamiento, la figura 7 muestra el comportamiento de las cuatro (4) celdas con vegetación, sin vegetación y con diferente medio de soporte.



Foto No. 9. (a) Vista general del sistema de tratamiento con Phragmites.

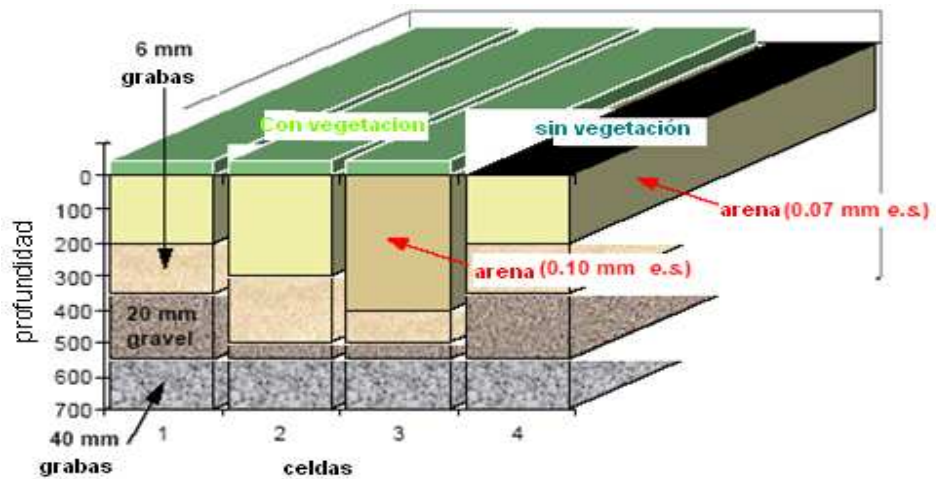


Figura No. 14 Comparación de la profundidad del medio en las cuatro celdas para diferentes configuraciones del medio con vegetación y sin vegetación.

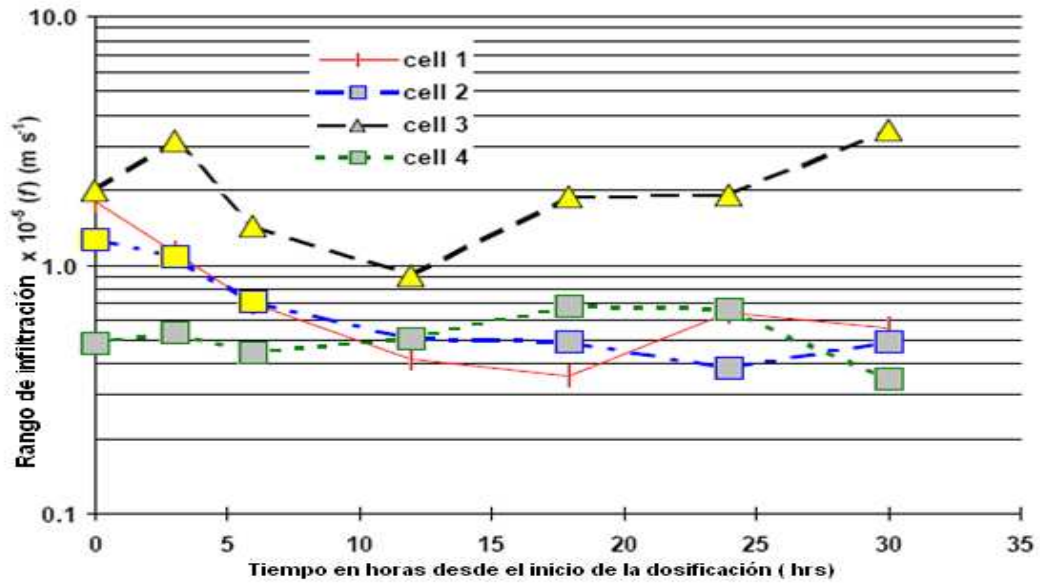


Figura No. 15 Diferentes ratas o rangos de infiltración para las cuatro celdas en estudio y con periodos de dosificación.

Como puede observarse la celda 3 la cual cuenta con vegetación con la especie Phragmites es la que mejor condiciones provee al medio filtrante en cuanto a permeabilidad.

3.1.2. CASO DE ESTUDIO 2

Tratamiento de lodos primarios de sedimentadores convencionales [69]. Arias reporta cuatro experiencias en Dinamarca así:

KOLDING	GREVE	HELSINGE	SKIVE
125000 Hab. Eq.	60000 Hab. Eq.	42000 Hab. Eq.	125000 Hab. Eq.
2.200 Ton/año Lodo Seco	1.000 Ton/año Lodo Seco	630 Ton/año Lodo Seco	2.200 Ton/año Lodo Seco
Lodos Activados 66%	Lodos Activados	Lodos Activados	Lodos Activados 66%
Lodo digerido 33%	Lodo digerido	Lodo digerido	Lodo digerido 33%
13 celdas, 6,2 Ha	10 celdas, 3,3 Ha	10 celdas, 2,2 Ha	

Tabla No. 2 Experiencias de tratamiento lodos en Dinamarca

Parámetros de diseño

- ❖ Producción de lodos (toneladas de materia seca al año) y el tiempo de producción del fango
- ❖ Calidad del lodo y tipo de fango (tipo de planta)
- ❖ Clima (evaporación)
- ❖ Periodos de operación
- ❖ Carga hidráulica superficial
- ❖ Número de lechos
- ❖ Capacidad de cada lecho

Dimensionamiento

- ❖ 30-60 kg MS/m²/a
- ❖ Sistema efectivo de drenaje(aeración)
- ❖ Cargas de lechos alternados (>8 lechos)
- ❖ Durante el establecimiento inicial cargas reducidas
- ❖ Periodo de descanso de 2 a 4 meses previo a vaciado
- ❖ No es necesario el replante después del vaciado



Foto No. 10 Sistema de tratamiento de lodos de una PTAR de Lodos activados en Kolding (Dinamarca)

4. COMPARACION REMOCION DE PATOGENOS EN DIFERENTES CONDICIONES DE CULTIVO, VARIACIONES DEL MEDIO Y PROFUNDIAD.

Los humedales construidos han demostrado ser tecnologías muy eficientes en cuanto a remoción de organismos patógenos de las aguas residuales. Las remociones reportadas en plantas piloto han sido cercanas al 99% en la remoción de huevos de helmintos, 2 unidades log para Coliformes totales y 4 Unidades log en E coli. [28].

Una fórmula interesante para mejorar el desempeño de humedales en términos de remoción de organismos patógenos ha sido demostrada como la combinación de sistemas verticales con horizontales, logrando mayores remociones con menores requerimientos de área [28]. A continuación se presentan casos de estudio en donde se demuestra la eficiencia en remoción de patógenos.

4.1. CASO DE ESTUDIO

El siguiente caso de estudio fue realizado en la PTAR UTP en Pereira con los siguientes datos experimentales:

DISEÑO EXPERIMENTAL			
FACTOR	NIVELES	No. NIVELES	No. TRATAMIENTOS
VEGETACION	<ul style="list-style-type: none"> • CON SIEMBRA • SIN SIEMBRA 	2	6
COMBINACION DE HUMEDALES	<ul style="list-style-type: none"> • VERTICAL – HORIZONTAL • VERTICAL – VERTICAL • HORIZONTAL - HORIZONTAL 	3	

UNIDADES EXPERIMENTALES
<ul style="list-style-type: none"> LOCALIZACION : PTAR UTP PEREIRA
<ul style="list-style-type: none"> UNIDADES EXPERIMENTALES : AREA : 0,24 m² (0,30 x 0, 80) - Humedales flujo horizontal subsuperficial: Tanques rectangulares - fibra de vidrio (0,30 x 0,80) - Humedales de flujo vertical subsuperficial: Canecas plásticas (Diam = 0,55) , 0,50m
<ul style="list-style-type: none"> PLANTAS: Papiros (Cyperus sp.) aprox 20 plantas / tallos por m²
<ul style="list-style-type: none"> SUSTRATO: Grava 2,5 cm Diam.
<ul style="list-style-type: none"> CAUDAL : 24 L/d
<ul style="list-style-type: none"> TASA HIDRAULICA DE APLICACIÓN : 0,1 m³/m²/d
<ul style="list-style-type: none"> TIEMPO DE RETENCION TEORICO : 4 dias

Parámetros, métodos analíticos y frecuencias de análisis:

PARAMETROS, METODO ANALITICO Y FRECUENCIA DE ANALISIS		
PARAMETROS	METODO ANALITICO	FRECUENCIA
pH	PH- metro	Diario In Situ
Temperatura	Termómetro de columna de Mercurio	Diario In Situ
Caudal	Volumétrico	Diario In Situ
DBO ₅	Incubación a 20 °C por 5 días, luego medida de oxígeno por método potenciométrico	Quincenal
DQO	Reflujo cerrado, método titulométrico	Quincenal
Sólidos suspendidos totales	Gravimétrico	Quincenal
Nitrogeno Total NTK	Kjeldahl	Quincenal
Coliformes totales y E. Coli	Filtración por membrana	Quincenal
Huevos de Helmintos	Bailenger	Quincenal

Tabla No. 3 Parámetros, métodos analíticos y frecuencias de análisis.

Las siguientes fotografías muestran los diferentes sistemas de tratamiento utilizados.

Vertical



Vertical



Vertical



Horizontal



Horizontal



Horizontal (Plantado)



Foto No. 11. Muestra las diferentes composiciones de humedales con especies tipo papiro utilizadas en las pruebas.

Composición Media del agua residual utilizada en los sistemas experimentales anteriores:

PARAMETRO	n	MEDIA	MIN.	MAX.
DQO, mg l ⁻¹	40	339	95	605
DBO ₅ , mg l ⁻¹	15	112	63	207
NTK, mg l ⁻¹	15	83	62.9	102
NH ₄ -N, mg l ⁻¹	15	76	58	91
NO ₃ -N, mg l ⁻¹	15	3.5	2.5	4.2
Coliformes Totales, CFU/100 ml x 10 ⁶	40	59	2.9	534
E. Coli, CFU/100 ml x 10 ⁶	40	6.4	0.6	26
Helmintos (huevos l ⁻¹)	40	27	16	43
DQO, mg l ⁻¹	40	339	95	605
DBO ₅ , mg l ⁻¹	15	112	63	207

(n= numero de muestras)

Los resultados fueron los siguientes:

❖ **PORCENTAJE DE REMOCIÓN EN TERMINOS DE DBO₅, DQO, SST Y N TOTAL PARA CADA UNA DE LAS UNIDADES.**

El siguiente gráfico muestra en diagramas de barras los porcentajes de remoción para la combinación de los diferentes sistemas.

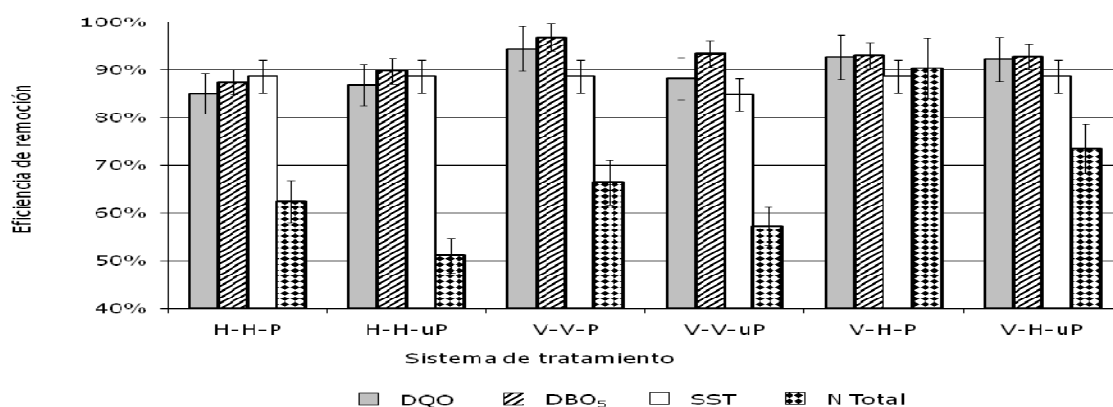


Figura No. 16 Porcentaje de remoción en términos de DBO₅, DQO, SST y N total en humedales: Siendo : H : Horizontal; P: plantados; up : Sin plantas ; V : Vertical.

En la mayor parte de los casos la remoción de DQO, DBO₅ y SST presenta un porcentaje de remoción superior al 80% y muy similar; sin embargo para el caso del Nitrógeno el porcentaje de remoción más alto se obtiene con la configuración V-H-p (Vertical – Horizontal con plantas).

❖ COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DE LOS COLIFORMES TOTALES PARA CADA UNA DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES

Los siguientes gráficos muestran el comportamiento de los coliformes totales en las diferentes configuraciones de humedales.

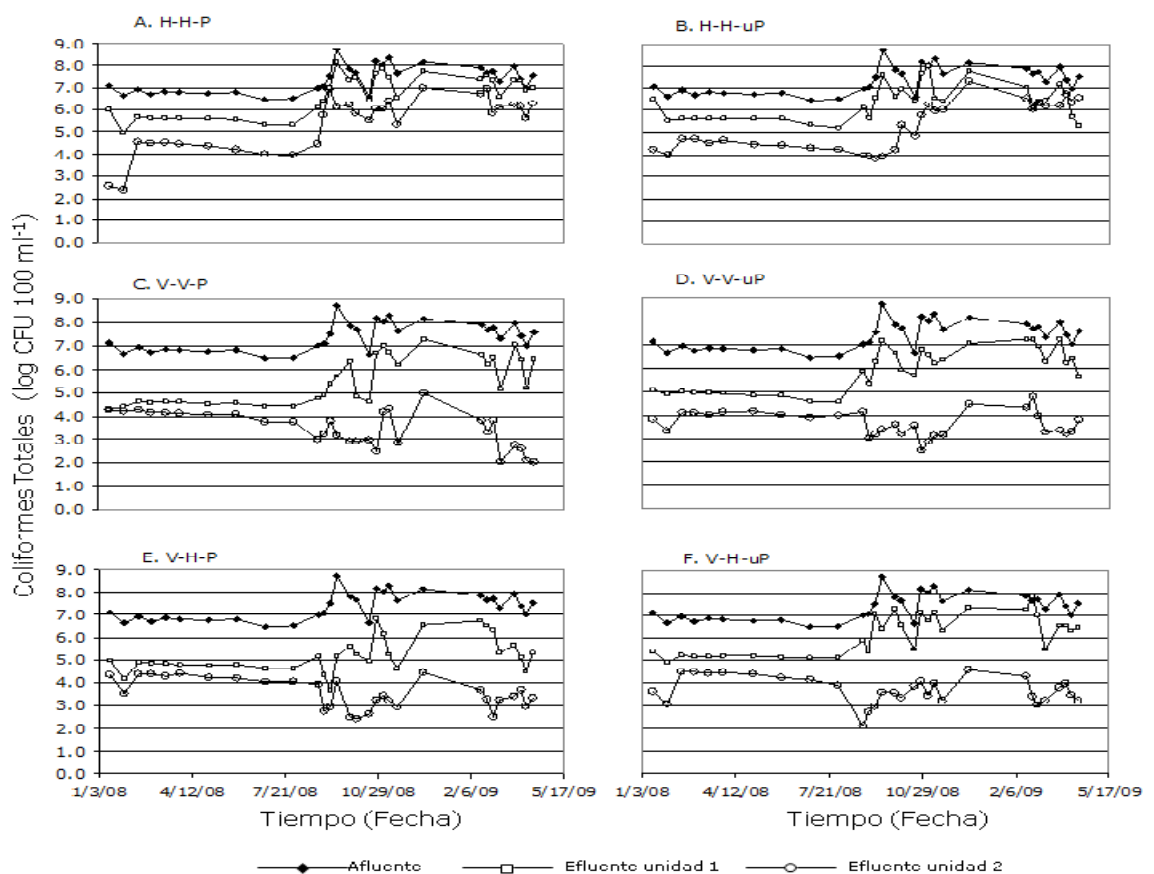


Figura No. 17 Comportamiento de los coliformes totales. Siendo : H : Horizontal; P: plantados; up : Sin plantas ; V : Vertical.

❖ **COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DE E. coli, PARA CADA UNA DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES**

Los siguientes gráficos muestran el comportamiento de los E coli en las diferentes configuraciones de humedales encontrando los valores más bajos en la configuración V-H-P (Vertical – horizontal – plantado).

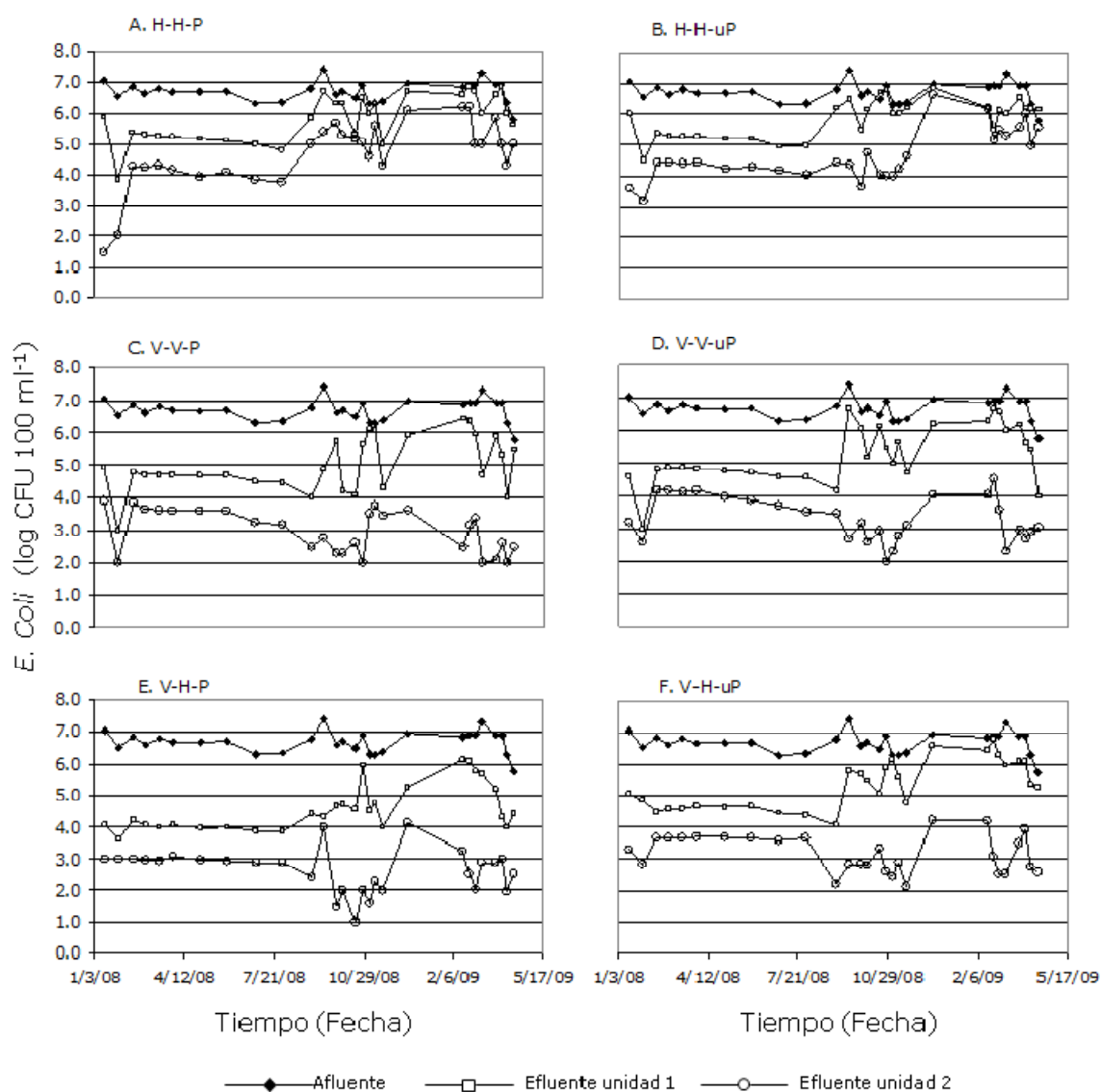


Figura No. 18 Comportamiento de los E-coli en humedales. Siendo: H: Horizontal; P: plantados; up: Sin plantas; V: Vertical.

❖ **COMPORTAMIENTO EN EL TIEMPO DE HUEVOS DE HELMINTO PARA CADA UNA DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES.**

La siguiente gráfica muestra el comportamiento de los Huevos de Helminto para las diferentes configuraciones de humedales encontrando una vez más los valores más bajos en las configuraciones V-H- P y uP (Vertical – Horizontal – plantado o sin plantar).

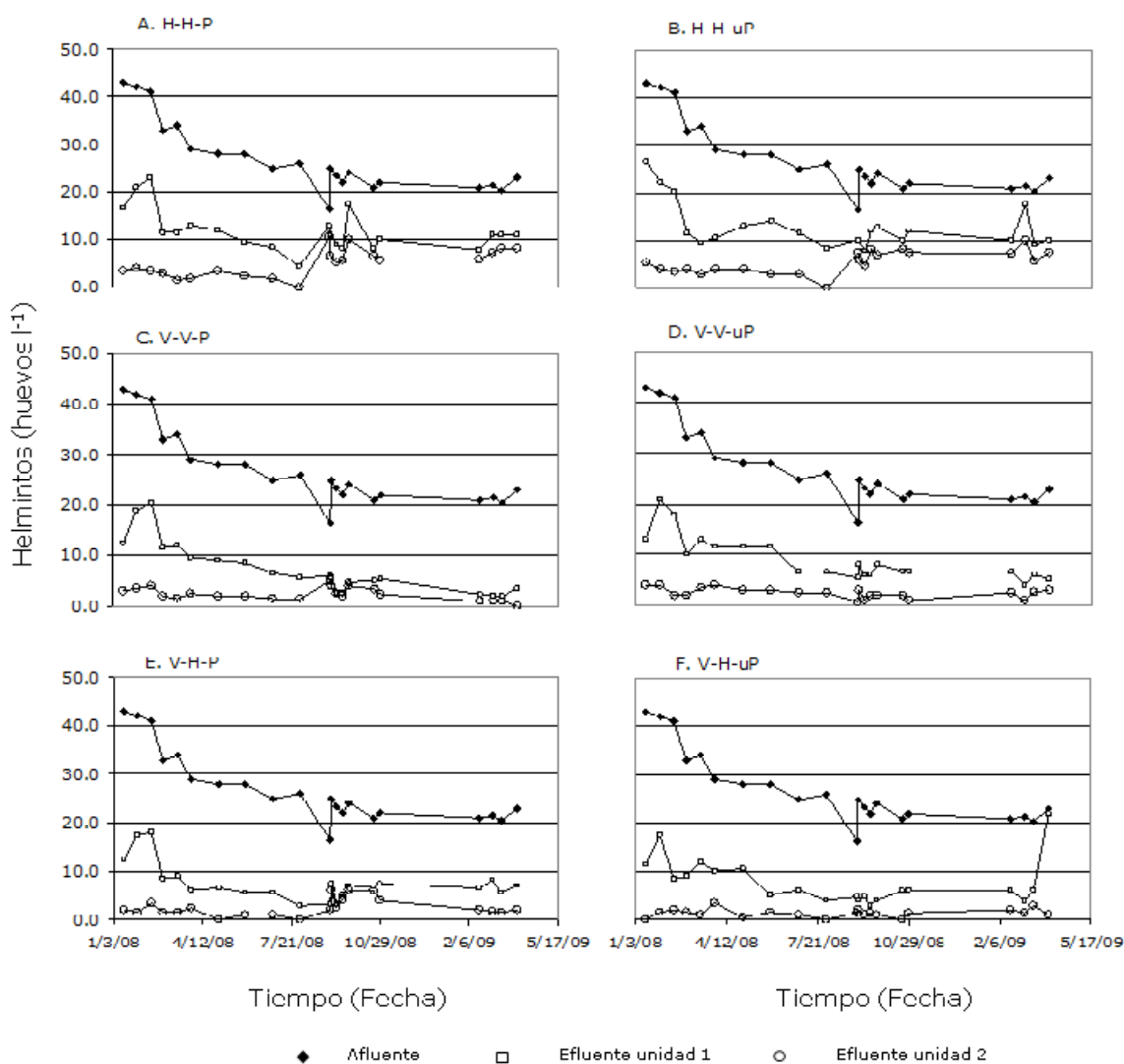


Figura No. 19 Comportamiento de los huevos de helminto. Siendo : H : Horizontal; P: plantados; up : Sin plantas ; V : Vertical.

5. INVESTIGACION SOBRE HUMEDALES EN COLOMBIA

En Colombia es baja la investigación sobre humedales. La siguiente tabla muestra las investigaciones por categoría, grupo de investigación y universidad que se adelantan en Colombia con relación a los humedales.

NUMERO	CATEGORIA	CODIGO	GRUPO DE INVESTIGACIÓN	UNIVERSIDAD
1	A1	COL0003893	Estudio y Control de la Contaminación Ambiental	Universidad del Valle
2	A	COL0020339	Agua y Saneamiento	Universidad Tecnológica de Pereira
3	A	COL0036849	GAMA	Corporación Universitaria Lasallista
4	A	COL0008782	Grupo de Investigación en Tecnologías del Agua	Universidad del Norte
5	A	COL0000882	Bioensayos y Control de la Contaminación Acuática	Universidad Nacional de Colombia
6	B	COL0008619	Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental GIGA	Universidad de Antioquia
7	B	COL0010136	Grupo de Investigación en Procesos Avanzados de Oxidación para Tratamientos Biológicos y Químicos	Universidad del Valle
8	B	COL0011419	Grupo de Investigación en Ingeniería y Procesos Biológicos	Universidad Nacional de Colombia
9	B	COL0040402	Diagnóstico y Control de la Contaminación	Universidad de Antioquia
10	C	COL0015428	REDAIRE	Universidad Nacional de Colombia
11	C	COL0055227	Grupo de Investigación en Prospectiva Ambiental	Universidad Nacional de Colombia
12	C	COL0020329	GRESIA. Grupo de Investigación en Recursos, Ecología, Desarrollo Sostenible e Ingeniería Ambiental	Universidad Antonio Nariño
13	C	COL0032124	GIA	Universidad de Cartagena - Fundación Universitaria Tecnológica Comfenalco
14	C	COL0044902	Grupo Biotecnológico Ambiental	Corporación Universitaria de la Costa
19	C	COL0007139	Abastecimiento de Agua	Universidad del Valle
21	C	COL0010969	Grupo de Saneamiento Ambiental	Universidad del Valle
22	C	COL0051291	Gestión Integrada de Recursos Hídricos	Universidad del Valle

Tabla No. 4 Investigaciones que se adelantan en Colombia (Colciencias) con relación a los humedales.

6. CONCLUSIONES

- ❖ Los efectos físicos y biológicos (filtración, atenuación de luz, reducción velocidad del viento, estabilización del suelo, medio de crecimiento microbiano etc) son esenciales y dependen del tipo y configuración del humedal construido.
- ❖ El oxígeno liberado en zona de raíces afecta la degradación y la nitrificación.
- ❖ La toma de nutrientes alcanza valores más significativos en países tropicales.
- ❖ Se facilita la degradación de componentes Xenobióticos.
- ❖ Los humedales proporcionan efectos positivos en cuanto al tema de la transpiración.
- ❖ Los humedales proporcionan efectos positivos en cuanto a la estética.
- ❖ Los humedales proporcionan hábitats para Fauna.
- ❖ Los sistemas de tratamiento conformados por la combinación de un humedal de tipo HV (horizontal – vertical) seguido de un HH (horizontal – horizontal) mostraron mejor rendimiento.
- ❖ El medio de soporte parece ser un aspecto crucial en la eliminación de Huevos de Helmintos y tal vez el principal mecanismo para su remoción es la filtración y/o sedimentación.
- ❖ La vegetación juega un papel importante en las remociones de E. Coli y Nutrientes.
- ❖ Con la combinación (VF-HF) es posible obtener eficiencias de remoción del 99% en los Huevos de Helmintos, 3 unidades log en CT y 4 unidades log en E. Coli.

- ❖ El uso de humedales contruidos de flujo vertical, como primera etapa, permite el desarrollo de procesos aeróbicos, mientras que la utilización de humedales contruidos de flujo horizontal en una segunda etapa favorece los procesos anaeróbicos.
- ❖ La combinación HV–HH permite un efluente que cumple con la normatividad para reutilización de aguas residuales.
- ❖ Es necesario desarrollar modelos de costos que permitan establecer con mayor precisión la utilidad de estos sistemas y su aplicabilidad a diferentes años poblacionales.
- ❖ Esta combinación de humedales se plantea como una muy buena opción tecnológica para la remoción de organismos patógenos presentes en aguas residuales domesticas.
- ❖ Resulta necesario investigar sobre la eficiencia de los sistemas de tratamiento y su relación con el oxigeno disuelto, potencial redox, materia orgánica, carga aplicada y diámetro (tamaño) del sustrato.
- ❖ Una discusión todavía abierta se da en el papel de las plantas.
- ❖ Para efectos de reducción de costos, puede también ser interesante evaluar la combinación de humedal de flujo vertical con radiación UV.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Arias C., Brix H. y Johansen N. (2003). Phosphorus retention in subsurface constructed wetlands: investigations focused on calcareous materials and their chemical reactions. *Wat. Sci. Tech.*, **48**(5), 51-59.
- [2a] Brix H. (1994). Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. *Wat. Sci. Tech.*, **30**(8), 209-223.
- [2b] Brix, H. (2010), Role of plants in constructed wetlands Seminario Internacional sobre humedales construidos. Pereira, 2010.,
- [3] Collado, N. (2000). *Análisis Económico de Sistemas Naturales de Depuración en Núcleos Rurales*. ETSECCPB dissertation, Technical University of Catalonia, 89 pp.
- [4] Cooper P. (2003). Sizing vertical flow and hybrid constructed wetland systems. In: *The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in constructed Wetlands*, 1st International Seminar. Dias V. y Vymazal J. (eds.), Instituto Nacional da Água, Lisbon, Portugal, pp. 195-218.
- [4b] Cooper P. (2005). The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates. *Wat. Sci. Tech.* 51 (9), 91-97.
- [5] García J. (2003). Design factors of horizontal flow constructed wetlands. In : *The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in constructed Wetlands*, 1st International Seminar. Dias V. y Vymazal J. (eds.), Instituto Nacional da Água, Lisbon, Portugal, pp. 497-520.

- [6] García J., y Mujeriego R. (1997). Humedales construidos de flujo superficial para tratamiento terciario de aguas residuales urbanas en base a la creación de nuevos ecosistemas. *Tecnoambiente*, **75**, 37-42.
- [7] García J., Ruíz A. y Junqueras X. (1997). Depuración de aguas residuales mediante humedales construidos. *Tecnología del Agua*, **165**, 58-65.
- [8] García J., Mujeriego R., Obis J.M. y Bou, J. (2001). Wastewater treatment for small communities in Catalonia (Mediterranean region). *Wat. Pol.*, **3**, 341-350.
- [9] García J., Bourrouet A., Mujeriego R., Freixes A., y Peñuelas G. (2001). Wastewater treatment by pond systems: experiences in Catalonia, Spain. *Wat. Sci. Tech.*, **42**(10-11), 35-42.
- [10] García J., Ojeda E., Sales E., Chico F., Píriz T., Aguirre P., y Mujeriego R. (2003). Spatial variations of temperature, redox potential, and contaminants in horizontal flow reed beds. *Ecol. Eng.*, **21**, 129-142.
- [11] García J., Aguirre P., Mujeriego R., Huang Y., Ortiz L. y Bayona, J. M. (2004a). Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater. *Wat. Res.*, **38**(7), 1669-1678.
- [12] García J., Aguirre P., Barragán J., Mujeriego R., Matamoros V. y Bayona, J. M. (2004b). Effect of key design parameters on the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands: long term performance. *Wat. Res.*, submitted.
- [13] Hammes F., y Verstraete W. (2002). Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Re/Views in Environmental Science and Bio/Technology* **1**, 3-7.
- [14] Huang Y., Ortiz L., García J., Aguirre A., Mujeriego R. y Bayona J.M. (2004). Use of headspace solid-phase microextraction to characterize odour compounds in

subsurface flow constructed wetland for wastewater treatment. *Wat. Sci. Tech.*, **49**(9), 89-98.

[15] Huang Y., Latorre A., Barceló D., García J., Aguirre A., Mujeriego R. y Bayona, J.M. (2004). Factors affecting linear alkylbenzene sulfonates removal in subsurface constructed wetlands. *Environ. Sci. Tech.*, **38**, 2657-2663.

[16] Kadlec R.H. y Knight R.L. (1996). *Treatment Wetlands*. CRC Press, Florida, 893 pp.

[17] Kadlec R.H., Knight R.L., Vymazal J., Brix H., Cooper P. y Haberl, R. (2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing. 156 pp.

[18] Martí E. (2003). *The Recycling Effect in the Nitrification-Denitrification Process in Vertical Flow Constructed Wetlands*. ETSECCPB dissertation, Technical University of Catalonia, 120 pp.

[19] Mander Ü., Kuusemets V., Lohmus K., Muring T., Teiter S. y Augustin, J. (2003). Nitrous oxide, dinitrogen and methane emission in a subsurface flow constructed wetland. *Wat. Sci. Tech.*, **48**(5), 135-143.

[20] Reed S.C., Crites R.W. y Middlebrooks E.J. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. 2nd Edition. McGraw-Hill, New York, 431 pp.

[21] Robusté, J. (2004). Humedales en explotación, experiencia en Catalunya. In : *Nuevos Criterios para el Diseño y Operación de Humedales Construidos. Una Alternativa de Bajo Coste para el Tratamiento de Aguas Residuales*. García J., Morató J. y Bayona J.M. (eds.). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, pp. X-x.

- [22] Rousseau D.P.L., Vanrolleghem P.A. y De Pauw N. (2004). Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: a review. *Wat. Res.*, **38**(6), 1483-1493.
- [23] Stottmeister U., Wiessner A., Kunsch P., Kappelmeyer U., Kästner M., Bederski O., Müller R.A. y Moormann H. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, **22**, 93-117.
- [24] Tanner C.C. y Kadlec R.H. (2003). Oxygen flux implications of observed nitrogen removal rates in subsurface-flow treatment wetlands. *Wat. Sci. Tech.*, **48**(5), 191-198.
- [25] USEPA. (United States Environmental Protection Agency) (2000). *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA/625/R-99/010, USEPA Office of Research and Development, Cincinnati, OH.
- [26] Vymazal J. y Masa, M. (2003). Horizontal sub-surface flow constructed wetland with pulsing water level. *Wat. Sci. Tech.*, **48**(5), 143-148.
- [27] Vymazal J., Brix H., Cooper P.F., Green M.B. y Haberl, R. (1998). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe*. Backhuys Publishers, Leiden, 366
- [28] García J., (2009), Efecto del uso de Plantas, flujo y combinación de los sistemas de remoción de patógenos. Conferencia internacional sobre humedales, Pereira, Feb 2009.
- [29] Arias C., Brix H. y Johansen N. (2003). Phosphorus retention in subsurface constructed wetlands: investigations focused on calcareous materials and their chemical reactions. *Wat. Sci. Tech.*, **48**(5), 51-59.
- [30] Brix H. (1994). Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. *Wat. Sci. Tech.*, **30**(8), 209-223.

- [31] Collado, N. (2000). *Análisis Económico de Sistemas Naturales de Depuración en Núcleos Rurales*. ETSECCPB dissertation, Technical University of Catalonia, 89 pp.
- [32] Cooper P. (2003). Sizing vertical flow and hybrid constructed wetland systems. In: *The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in constructed Wetlands*, 1st International Seminar. Dias V. y Vymazal J. (eds.), Instituto Nacional da Água, Lisbon, Portugal, pp. 195-218.
- [33] García J. (2003). Design factors of horizontal flow constructed wetlands. In : *The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in constructed Wetlands*, 1st International Seminar. Dias V. y Vymazal J. (eds.), Instituto Nacional da Água, Lisbon, Portugal, pp. 497-520.
- [34] García J., y Mujeriego R. (1997). Humedales construidos de flujo superficial para tratamiento terciario de aguas residuales urbanas en base a la creación de nuevos ecosistemas. *Tecnoambiente*, **75**, 37-42.
- [35] García J., Ruíz A. y Junqueras X. (1997). Depuración de aguas residuales mediante humedales construidos. *Tecnología del Agua*, **165**, 58-65.
- [36] García J., Mujeriego R., Obis J.M. y Bou, J. (2001). Wastewater treatment for small communities in Catalonia (Mediterranean region). *Wat. Pol.*, **3**, 341-350.
- [37] García J., Bourrouet A., Mujeriego R., Freixes A., y Peñuelas G. (2001). Wastewater treatment by pond systems: experiences in Catalonia, Spain. *Wat. Sci. Tech.*, **42**(10-11), 35-42.
- [38] García J., Ojeda E., Sales E., Chico F., Píriz T., Aguirre P., y Mujeriego R. (2003). Spatial variations of temperature, redox potential, and contaminants in horizontal flow reed beds. *Ecol. Eng.*, **21**, 129-142.

- [39] García J., Aguirre P., Mujeriego R., Huang Y., Ortiz L. y Bayona, J. M. (2004a). Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater. *Wat. Res.*, **38**(7), 1669-1678.
- [40] García J., Aguirre P., Barragán J., Mujeriego R., Matamoros V. y Bayona, J. M. (2004b). Effect of key design parameters on the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands: long term performance. *Wat. Res.*, submitted.
- [41] Hammes F., y Verstraete W. (2002). Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Re/Views in Environmental Science and Bio/Technology* **1**, 3-7.
- [42] Huang Y., Ortiz L., García J., Aguirre A., Mujeriego R. y Bayona J.M. (2004). Use of headspace solid-phase microextraction to characterize odour compounds in subsurface flow constructed wetland for wastewater treatment. *Wat. Sci. Tech.*, **49**(9), 89-98.
- [43] Huang Y., Latorre A., Barceló D., García J., Aguirre A., Mujeriego R. y Bayona, J.M. (2004). Factors affecting linear alkylbenzene sulfonates removal in subsurface constructed wetlands. *Environ. Sci. Tech.*, **38**, 2657-2663.
- [44] Kadlec R.H. y Knight R.L. (1996). *Treatment Wetlands*. CRC Press, Florida, 893 pp.
- [45] Kadlec R.H., Knight R.L., Vymazal J., Brix H., Cooper P. y Haberl, R. (2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing. 156 pp.
- [46] Martí E. (2003). *The Recycling Effect in the Nitrification-Denitrification Process in Vertical Flow Constructed Wetlands*. ETSECCPB dissertation, Technical University of Catalonia, 120 pp.

- [47] Mander Ü., Kuusemets V., Lohmus K., Muring T., Teiter S. y Augustin, J. (2003). Nitrous oxide, dinitrogen and methane emission in a subsurface flow constructed wetland. *Wat. Sci. Tech.*, **48**(5), 135-143.
- [48] Reed S.C., Crites R.W. y Middlebrooks E.J. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. 2nd Edition. McGraw-Hill, New York, 431 pp.
- [49] Robusté, J. (2004). Humedales en explotación, experiencia en Catalunya. In : *Nuevos Criterios para el Diseño y Operación de Humedales Construidos. Una Alternativa de Bajo Coste para el Tratamiento de Aguas Residuales*. García J., Morató J. y Bayona J.M. (eds.). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, pp. X-x.
- [50] Rousseau D.P.L., Vanrolleghem P.A. y De Pauw N. (2004). Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: a review. *Wat. Res.*, **38**(6), 1483-1493.
- [51] Stottmeister U., Wiessner A., Kunsch P., Kappelmeyer U., Kästner M., Bederski O., Müller R.A. y Moormann H. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, **22**, 93-117.
- [52] Tanner C.C. y Kadlec R.H. (2003). Oxygen flux implications of observed nitrogen removal rates in subsurface-flow treatment wetlands. *Wat. Sci. Tech.*, **48**(5), 191-198.
- [53] USEPA. (United States Environmental Protection Agency) (2000). *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA/625/R-99/010, USEPA Office of Research and Development, Cincinnati, OH.
- [54] Vymazal J. y Masa, M. (2003). Horizontal sub-surface flow constructed wetland with pulsing water level. *Wat. Sci. Tech.*, **48**(5), 143-148.

[55] Vymazal J., Brix H., Cooper P.F., Green M.B. y Haberl, R. (1998). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe*. Backhuys Publishers, Leiden, 366 pp.

[56] Garcia,J.A.,Paredes,D.,Arias,C.A.(2009).Effect of plants and the combination of wetland treatment type systems on pathogen removal in tropical climate conditions. Inproc.10 th International Conference on Wetland Pollutant Dinamic sand Control WETPOL, Barcelona,Spain.

[57] Paredes,D.(2009).Investigations on nitrogen transformation processes and stimulation of anaerobic ammonium oxidation activity in an experimental laboratory-scale wetland system.Dr.-Eng.Thesis. <http://digital.bibliothek.uni-halle.de/hs/urn/urn:nbn:de:gbv:3:4-1771>. Martin-LutherUniversität Halle - Wittenberg, Germany.

[58] Paredes, D.,Kuschk, P.,Köser,H.(2009). Enhancing nitrogen removal rates in subsurface constructed wetlands by anammox process. Inproc.10 th International Conference on Wetland Pollutant Dinamic sand Control WETPOL, Barcelona, Spain.

[59] Kuschk,P., Wiessner,A., Kästner,M., Kappelmeyer,U., Paredes, D.(2009). Dynamicsofcarbon-,nitrogen-and sulphur transformation processes in the root near environment of wetlands. Inproc.10 th International Conference on Wetland Pollutant Dinamic sand Control WETPOL, Barcelona, Spain.

[60] Paredes D.,CubillosJ.A.(2009).Water Resources Management in dairy farms located in the coffee area of Colombia (In spanish). Pereira.Colombia.Ed.PubliprintLtda.108pp.

- [61] Sabas,C.A., Paredes,D.(2009). Impact of the expansion of Pereira on water resources in the Cestillal river basin (Inspanish). Scientiaet Technica.XIV(42):399–404.
- [62] Sabas,C.A., Paredes,D.(2009). Study of water supply and demand in the Barbas river basin (In spanish). Scientiaet Technica.XIV(42):405–410.
- [63] Kuschk,P., Wiessner,A., Paredes,D., Kästner,M., Münch,C.,Müller,R.(2008). Pflanzenk läranlagen – Zukunft spotential und Forschungs bedarf (Constructed wetlands in future –needs for investigation). ChemieIngenieurTechnik,80(12):1785-1793.
- [64] Castaño,J.M. CubillosJ.A.,(2007). Hydrodynamic of subsurface constructed wetlands (In Spanish). In proc. Seminario internacional “Fundamentos y diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Universidad Tecnológica de Pereira
- [65] Paredes,D., Kuschk,P., Köser,H.(2007). Influence of plants and organic matter on the nitrogen removal in laboratory – scale model subsurface flow constructed wetlands inoculated with anaerobic ammonium oxidizing bacteria. Engineering Life Sciences,7(6):565-576.
- [66] Arias C.A., Sistemas de deshidratación de fangos. Seminario Internacional sobre humedales construidos. Pereira, 2010.
- [67]. Konnerup D, Brix H. Constructed wetlands in tropical countries. Seminario Internacional sobre humedales construidos. Pereira, 2010.
- [68] Langegraber G., Vertical flow constructed wetlands – current practices and optimization potential. Seminario Internacional sobre humedales construidos. Pereira, 2010.