



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ARAGÓN

“CONSTRUCCIÓN Y ARRANQUE DE UN HUMEDAL  
ARTIFICIAL A ESCALA BANCO DE LABORATORIO”

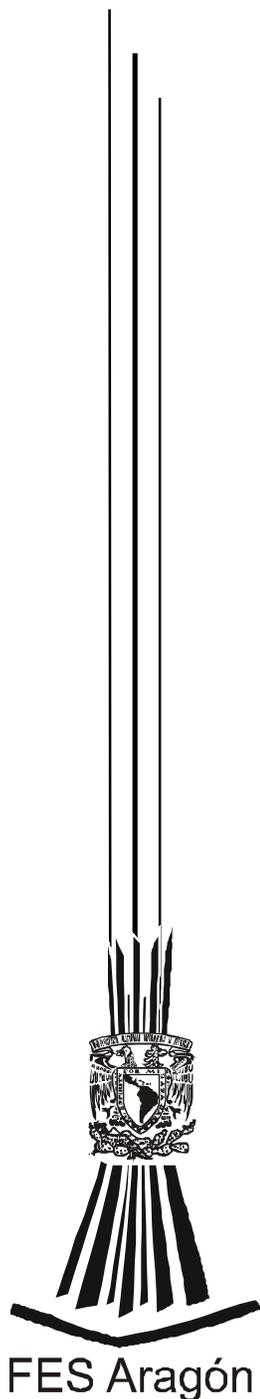
**T E S I S**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
I N G E N I E R A C I V I L  
P R E S E N T A :  
LOURDES APOLONIO ASTUDILLO

ASESOR: M. EN C. MARJORIE MÁRQUEZ VÁZQUEZ

MÉXICO

2011



FES Aragón



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# AGRADECIMIENTOS

## **A Dios**

Por darme la vida y estar conmigo en cada momento. Por permitirme hacer este sueño realidad.

## **A mis Padres**

Que con su guía y apoyo incondicional, fueron parte fundamental para terminar mis estudios y porque siempre me alentaron a seguir adelante. Son las personas que más admiro.

## **A mi esposo**

Un ángel, que sé que Dios puso en mi camino para enseñarme el significado del verdadero amor. Por tu paciencia y comprensión, por ayudarme a concluir este logro profesional.

## **A mi hijo**

José David (mi bebé) por haber cambiado mi mundo, eres mi impulso y la razón de que siga adelante. Por ti lo he logrado.

## **A mis hermanos**

Sergio, Gustavo, Osvaldo, y Eli, por todo lo que hemos vivido juntos y por el gran ejemplo de superación. Hilda, Por todos esos momentos que hemos compartido juntas. Por tus consejos y el apoyo incondicional, no tengo palabras para decirte lo mucho que te quiero, Además de ser mi hermana eres la mejor amiga. Gracias por creer en mí.

### **A mis amigas**

Nelly, Beti y Eva por su sincera amistad y por compartir conmigo los mejores momentos y hacer que los malos se pasaran rápido. Sus consejos, han sido parte fundamental de este esfuerzo.

Al **M. en C. Sergio Alfonso Martínez González**. Por confiar en mí para formar parte de este proyecto.

### **A mi asesora de tesis**

Por compartir su conocimiento no solo académico, sino como persona. Por la paciencia que me tuvo y por ir siempre a mi lado en la realización de este trabajo. Ha aprendí mucho de usted.

### **A la facultad**

Por cada uno de los maestros que participaron en mi desarrollo profesional durante mi carrera, sin su ayuda y conocimientos no estaría en donde me encuentro ahora.

**GRACIAS**

Se agradece la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA)  
por el apoyo otorgado para la realización del proyecto PAPIME **PE100310**  
**"Diseño, construcción y operación de sistemas de tratamiento de aguas  
residuales domésticas a escala banco de laboratorio"**, del cual se derivó este  
trabajo de tesis.

## ÍNDICE.

### INTRODUCCIÓN.

### CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.

1.1. Humedales Naturales .....	1
1.1.1. Impacto Ambiental en los Humedales Naturales .....	4
1.2. Humedales Artificiales .....	5
1.3. Clasificación de los Humedales Artificiales .....	8
1.3.1. Sistemas de Flujo Libre (Humedales de Flujo Superficial (FS)) .....	9
1.3.2. Sistemas con Flujo Subsuperficial (FSS) .....	12
1.3.2.1. Sistemas con Flujo Subsuperficial Horizontal (FSSH) .....	12
1.3.2.2. Sistemas con Flujo Subsuperficial Vertical (FSSV) .....	14
1.3.3. Sistemas Híbridos (SH) .....	17
1.4. Componentes de un Humedal Artificial .....	18
1.4.1. El Agua .....	18
1.4.1.1. Agua Residual (AR) .....	19
1.4.2. Relleno (Sustrato) o medio de soporte .....	20
1.4.3. Vegetación .....	22
1.4.3.1. Plantas Emergentes .....	23
1.4.4. Microorganismos .....	24
1.4.5. Fauna .....	25
1.5. Mecanismos Básicos de Depuración en un Humedal Artificial .....	26
1.5.1. Remoción de Sólidos Suspendidos .....	27
1.5.2. Remoción de Materia Orgánica .....	28
1.5.3. Remoción de Nitrógeno .....	29
1.5.4. Remoción de Fósforo .....	31
1.5.5. Remoción de Metales Pesados .....	31
1.5.6. Remoción de Patógenos .....	32
1.6. Concentraciones de Distintos Constituyentes en Humedales Artificiales .....	33
1.7. Ventajas y Desventajas de los Humedales Artificiales .....	33

1.8. Modelos.....	35
1.8.1. Clasificación de los Modelos.....	36
1.8.1.1. Modelo Mental .....	36
1.8.1.2. Modelo Físico .....	36
1.8.1.2.1. Tipos de Modelos Físicos .....	37
1.8.1.3. Modelo Matemático .....	37
1.8.1.3.1. Tipos de Modelos Matemáticos .....	38
1.9. Estado del Arte de los Humedales Artificiales a Escala.....	38
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.	
2.1. Diseño y Construcción del Humedal artificial de Flujo Subsuperficial a Escala Banco de Laboratorio .....	45
2.1.1. Cálculo del Área Superficial.....	46
2.1.2. Profundidad del Humedal. ....	46
2.1.3. Pendiente .....	46
2.1.4. Sustrato.....	47
2.1.4.1. Determinación de la Porosidad del Medio de Soporte.....	47
2.1.5. Relación Largo - Ancho .....	47
2.1.6. Tiempo de Retención Hidráulico.....	48
2.1.7. Temperatura del Agua .....	48
2.1.8. Vegetación.....	48
2.1.8.1. Selección de Vegetación.....	49
2.2. Arranque del Sistema de Tratamiento.....	50
2.2.1. Fase de Adaptación.....	50
2.2.2. Primer Período de Arranque.....	50
2.2.3. Segundo Período de Arranque .....	51
2.3. Análisis de Parámetros Físicoquímicos .....	51
CAPÍTULO 3. RESULTADOS.	
3.1. Diseño y Construcción de los Humedales a Escala Banco de Laboratorio.....	53
3.1.1. Cálculo del Área Superficial.....	54
3.1.2. Profundidad del Humedal .....	55

3.1.3. Pendiente .....	55
3.1.4. Sustrato.....	56
3.1.4.1. Determinación de la Porosidad del Medio de Soporte.....	56
3.1.5. Relación Largo - Ancho .....	57
3.1.6. Tiempo de Retención Hidráulico.....	58
3.1.7. Temperatura del Agua .....	58
3.1.8. Vegetación.....	59
3.1.9. Recuperación del Efluente Tratado.....	60
3.2. Arranque de los Sistemas de Tratamiento.....	60
3.2.1. Fase de Adaptación.....	60
3.2.2. Primer Período de Arranque.....	61
3.2.3. Segundo Período de Arranque .....	64
CAPITULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	
4.1. Conclusiones.....	74
4.2. Recomendaciones.....	75
CAPITULO 5. REFERENCIAS. ....	77
ANEXOS .....	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Manglares (México 2005) .....	2
Figura 1.2 Plantas Acuáticas comunes en los humedales (Llagas y Guadalupe 2006).....	3
Figura 1.3. Destrucción de turberas en Kalimantan, Indonesia, en la isla de Borneo, por el cultivo de palmera de aceite (6 de agosto de 2008). ....	5
Figura 1.4. Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas .....	9
FIGURA 1.5 Humedal de Flujo Superficial Libre (FS), (Llagas y Guadalupe, 2006). ....	10
FIGURA 1.6 Humedal de Flujo Subsuperficial (FSSH), (Llagas y Guadalupe, 2006) .....	13

Figura 1.7. Humedal subsuperficial de flujo vertical (vista corte sección), (Delgadillo, <i>et al.</i> 2010).....	15
Figura 1.8. Esquemas de sistemas Híbridos de Humedales Artificiales .....	17
Figura 1.9. Espadaña, Nombre científico o latino: <i>Typha latifolia</i> . .....	23
Figura 1.10. Diagrama del metabolismo del nitrógeno (Cooper, <i>et al.</i> 1996) .....	30
Figura 1.11. Clasificación de Modelos (Sánchez, 2005) .....	36
Figura 1.12. Humedal clásico. Vegetación Junco (Angarita, 2005).....	43
Figura 1.13. Humedal Optimizado diferentes profundidades del lecho, (Angarita, 2005). .	43
Figura 2.1 Peso de la leche en polvo (a) y el Fertilizante (b) .....	51
Figura 3.1. Caja distribuidora del afluente a los humedales .....	53
Figura 3.2. Captación de efluentes de los humedales.....	54
Figura 3.3. Humedales Artificiales .....	54
Figura 3.4. Profundidad del sustrato en el humedal con soporte de piedra de río .....	55
Figura 3.5. Pendiente del 1.3% con material arcilloso.....	55
Figura 3.6. Materiales pétreos de soporte para cada humedal: (a) tezontle, (b) piedra de río y (c) piedra pómez .....	56
Figura 3.7. Determinación de la porosidad para cada humedal: (a) piedra de río, (b) tezontle y (c) piedra pómez.....	57
Figura 3.8. Largo – ancho del humedal .....	58
Figura 3.9. Vegetación de los humedales (cuna de Moisés) .....	59
Figura 3.10. (a) Tubería de colecta del efluente, (b) Manguera reguladora.....	60
Figura 3.11. Adaptación del sistema con agua de la llave.....	60
Figura 3.12. Afluente de agua residual sintética de carga media .....	64
Figura 3.13 vista lateral de los humedales Piedra Pómez (a) Y Piedra de Río (b) .....	65
Figura 3.14 vista lateral del humedal cubierto con el cartoncillo negro .....	65
Figura 3.15 Muestras de agua provenientes del afluente y efluentes de cada humedal ....	72

## ÍNDICE DE GRAFICAS

Gráfica 3.1. Concentraciones de DQO en cada humedal artificial durante el primer período de arranque.....	61
Gráfica 3.2. Concentraciones de nitrógeno amoniacal en cada humedal artificial durante el primer período de arranque .....	62
Gráfica 3.3. Concentraciones de nitrato en cada humedal artificial durante el primer período de arranque .....	62
Gráfica 3.4. Concentraciones de nitrito en cada humedal artificial durante el primer período de arranque.....	63
Gráfica 3.5. Concentraciones de fosfatos en cada humedal artificial durante el primer período de arranque .....	63
Gráfica 3.6. Concentraciones de sulfatos en cada humedal artificial durante el primer período de arranque .....	64
Gráfica 3.7. Temperatura en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque .....	66
Gráfica 3.8. Conductividad eléctrica en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque.....	66
Gráfica 3.9. Salinidad en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque .....	67
Gráfica 3.10. pH en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque .....	67
Gráfica 3.11. Demanda Química de Oxígeno en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque .....	68
Gráfica 3.12. Demanda Química de Oxígeno en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque (sin graficar el afluente) .....	68
Gráfica 3.13. Concentración de Nitrógeno Amoniacal en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque.....	69
Gráfica 3.14. Concentración de Nitrógeno Amoniacal en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque (sin graficar el afluente) .....	69
Gráfica 3.15. Concentración de Nitrato en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque .....	70
Gráfica 3.16. Concentración de Nitrato en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque (sin graficar el afluente). .....	70
Gráfica 3.17. Concentraciones de Nitrito en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque .....	71
Gráfica 3.18. Concentraciones de Fosfatos en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque .....	
Gráfica 3.19. Concentraciones de fósforo en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque.....	72

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Principales funciones y servicios que brindan los humedales (Cronk y Fennessy 2001) .....	4
Tabla 1.2. Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales (Mecalf y Eddy, 2000).....	19
Tabla 1.2. Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales (Mecalf y Eddy, 2000). Cont. ....	20
Tabla 1.3. Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales (Delgadillo 2010).....	21
Tabla 1.4. Mecanismos de depuración predominantes en los humedales artificiales (Mena 2008) .....	26
Tabla 1.4. Mecanismos de depuración predominantes en los humedales artificiales (Mena 2008). Cont. ....	27
Tabla 1.5. Concentraciones naturales en humedales de flujo subsuperficial (EPA, 2000) ..	33
Tabla 1.6. Concentraciones naturales en humedales de flujo Libre superficial (U.S. EPA, 2000).....	33
Tabla 1.7. Comparación entre humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial (Delgadillo, et al. 2010) .....	34
1.8. Comparación entre humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal y vertical (Delgadillo, et al. 2010) .....	35
Tabla 1.9. Composición del agua residual sintética (Angarita, 2007) .....	44
Tabla 2.1. Parámetros determinados al agua residual de la FES Aragón. ....	51
Tabla 2.1. Parámetros determinados al agua residual de la FES Aragón. Cont. ....	52
Tabla 3.1. Tiempos de retención hidráulica para cada humedal .....	58

# INTRODUCCIÓN

---

Frente a la crisis que experimenta actualmente el mundo por causa del agotamiento acelerado del agua, se hace necesario buscar soluciones que garanticen de manera sostenible el uso racional de este recurso. Una de las acciones que colaboran a lo anterior, es el tratamiento y reúso de las aguas residuales, no solo a nivel industrial o de las grandes ciudades sino también en pequeñas comunidades.

Los humedales artificiales, (HA) representan una opción factible para llevarlo a cabo debido a sus bajos costos de mantenimiento y operación, que los hace una tecnología muy atractiva desde el punto de vista económico y técnico, dado que logran reducir adecuadamente los contaminantes presentes en el agua residual. Consisten en un ecosistema intermedio, entre acuático y terrestre, creado de forma artificial, en el cual interactúan tres elementos importantes: agua, suelo y plantas. Durante esta interacción ocurren varios procesos químicos, físicos y biológicos, que permiten obtener agua de mejor calidad a la salida del sistema.

En el presente trabajo, se muestra el diseño, construcción y arranque de tres humedales artificiales de flujo subsuperficial a escala banco de laboratorio con tres medios de soporte distintos, los cuales servirán para la realización de prácticas de laboratorio en las asignaturas del Área Ambiental de la Carrera en Ingeniería Civil de esta facultad.

El capítulo uno aborda los antecedentes de estas tecnologías utilizadas a nivel mundial desde sus inicios hasta la fecha. Así como una descripción detallada de sus componentes, sus mecanismos básicos de depuración y la forma en que están clasificados. También se incluyen algunos trabajos realizados por investigadores con humedales a esta escala y los resultados que han obtenido.

Con base en la revisión de la literatura mencionada en el capítulo uno, en el capítulo dos se indica la metodología para el diseño de los humedales artificiales, procedimientos de arranque y técnicas analíticas para la determinación de los parámetros fisicoquímicos de

interés tanto en el afluente como en los efluentes, con el fin de evaluar cuál es el desempeño de los mismos.

El producto final del diseño, construcción y arranque se ilustra en el capítulo tres de resultados, así como una serie de gráficas de cada uno de los parámetros evaluados con su correspondiente análisis y discusión, que dan pie a las conclusiones y recomendaciones del capítulo cuatro.

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.

---

### 1.1. HUMEDALES NATURALES.

El término humedal (*wetland*), fue empleado originalmente por la agencia norteamericana US Fish and Wildlife Service, a raíz de una propuesta para inventariar los ambientes donde se ubican poblaciones de aves acuáticas. Se aplicó inicialmente a mediados de la década de 1950-1960 y actualmente el término es de amplia aceptación a nivel mundial, existiendo un total de 141 participantes que han suscrito su adhesión a la Convención sobre los Humedales firmada en Ramsar, Irán en 1971.

En términos generales, los estatutos de la Convención de Ramsar permiten la inclusión de localidades representativas de humedales a una lista de sitios que por su importancia ecológica, botánica, zoológica, limnológica o hidrológica, merezcan atención especial por las partes contratantes. Estas a su vez se comprometen a favorecer los mecanismos para su conservación, sin menoscabo de su soberanía (Convención Ramsar 1971).

Los humedales son medios semiterrestres con un elevado grado de humedad y una profusa vegetación, que reúnen ciertas características biológicas, físicas y químicas, que les confieren un elevado potencial auto depurador (Llagas, Guadalupe 2006).

Son zonas de transición entre la tierra y el agua y se distinguen por los suelos húmedos y plantas que se adaptan a estos suelos a una profundidad de nivel freático que mantiene estas características.

La mayoría son sistemas de flujo libre superficial en el cual el agua está expuesta a la atmosfera; como son los fangales (principalmente con vegetación de musgos), las zonas pantanosas (principalmente de vegetación arbórea), las praderas inundadas (principalmente con vegetación herbácea y plantas macrófitas emergentes), (EPA, 2000).



Figura 1.1. Manglares

Fuente: INEGI. Anuario Estadísticas por Entidad Federativa (México 2005).

Los humedales son áreas de especial importancia por los beneficios que producen, tanto desde el punto de vista naturalista, como económico y estético, con base en lo siguiente:

1. Muy alta producción de materia orgánica.
2. Gran diversidad de especies animales y vegetales.
3. Efectos beneficiosos sobre el ciclo del agua, ya que favorecen la disminución de la irregularidad de las aportaciones (por ejemplo suavizando las crecidas), la retención de nutrientes, la mejora y regularización de la calidad del agua y la conformación y mitigación de la fluctuación del clima local.
4. Elevado interés económico para los habitantes locales y para la población aguas abajo y costera, y también como creciente fuente de ingresos por turismo (Custodio *et al.* 1999).

Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas, las profundidades típicas de estas extensiones de tierras son menores a 0.60 m donde crecen plantas emergentes como juncos, *typha* «totora», lenteja de agua, espadañas (Lara 1999).

Lo característico de un humedal es la presencia de agua durante períodos lo bastante prolongados como para alterar los suelos, sus microorganismos y las comunidades de flora y fauna (Llagas, Guadalupe 2006).

Así como la acumulación de materia orgánica debido a la alta tasa de productividad primaria y un tipo reducido de descomposición debido a las condiciones anaerobias. En la figura 1.2 se muestra las distintas especies de Plantas Acuáticas más comunes en los humedales.

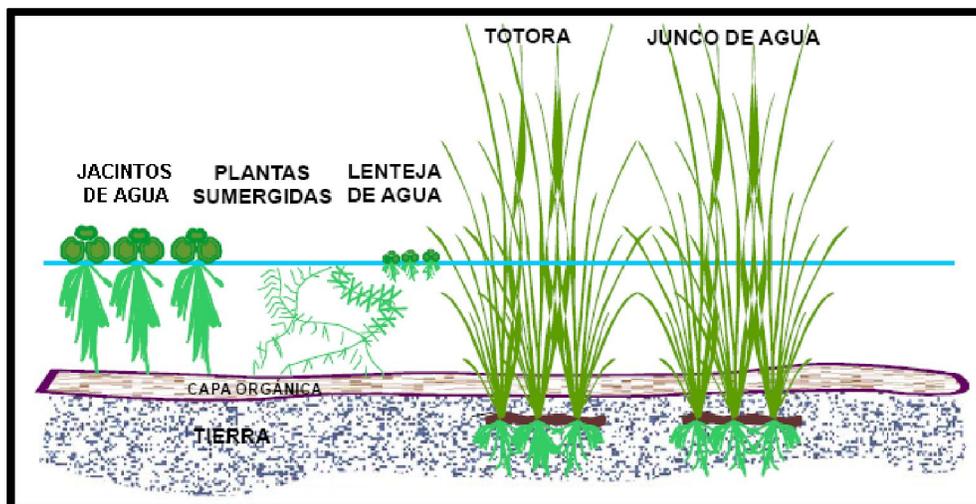


Figura 1.2 Plantas Acuáticas comunes en los humedales

Fuente: Adaptado de un dibujo (Llagas y Guadalupe 2006).

Los suelos de los humedales pueden ser originariamente de naturaleza predominantemente mineral u orgánica, aunque con el tiempo las condiciones de anegación y anaerobiosis ocasionan que la materia orgánica se acumule. Por lo que estos suelos poseen una serie de características químicas especiales, entre las que destacan una alta eficiencia para atrapar muchos compuestos químicos, en particular metales pesados y fosfatos (Cronk y Fennessy, 2001).

Los nutrientes entrantes apoyan el crecimiento de la vegetación, que convierte los productos químicos inorgánicos en materia orgánica, la base de la cadena alimenticia de los humedales. Como resultado de mucha luz, agua y suministro de nutrientes, que es la productividad primaria de los ecosistemas en los humedales.

El ciclo hidrológico es el principal factor que influye en el tipo de vegetación, la actividad microbiana, y los ciclos biogeo-químicos de los nutrientes en el suelo (Kivaisi, 2001).

Las poblaciones microbianas tienen una gran influencia en la química de dichos suelos, siendo de particular importancia las transformaciones de los compuestos de nitrógeno que, como consecuencia de la actividad microbiana bajo condiciones anóxicas, dan como resultado la desnitrificación, es decir, la transformación de nitrato en nitrógeno molecular que es liberado a la atmósfera (Cronk y Fennessy, 2001).

En la tabla 1.1 se muestra las Principales funciones y servicios que brindan los humedales naturales.

Los humedales son "purificadores naturales del agua". El papel funcional de estos es mejorar la calidad del agua, Aunque los estudios han demostrado que los humedales naturales son capaces de ofrecer altos niveles de tratamiento de aguas residuales (Kivaisi 2001).

Tabla 1.1. Principales funciones y servicios que brindan los humedales (Cronk y Fennessy 2001).

Función	Servicio
Regulación del régimen hidrológico	Control de inundaciones Recarga de acuíferos Protección de la línea costera
Retención de sedimento	Mejoramiento de la calidad del agua
Procesos relacionados con la química de los suelos hídricos: Adsorción de fósforo y metales pesados Desnitrificación Reducción de sulfatos	
Hábitat de animales y plantas	Producción de madera Conservación y recreación Pesquerías y otros productos derivados de la explotación de especies silvestres.

### 1.1.1. IMPACTO AMBIENTAL EN LOS HUMEDALES NATURALES.

A pesar de la importancia ambiental de los humedales, históricamente han sido de las comunidades naturales más dañadas por las actividades humanas, y se han perdido o alterado debido al deterioro de los procesos naturales, como consecuencia de la agricultura intensiva, la urbanización, la contaminación, la construcción de represas, la adecuación de tierra para infraestructura turística, la desecación y otras formas de intervención en el sistema ecológico e hidrológico, o como medida para reducir poblaciones de mosquitos.

En muchos casos los daños que sufren son indirectos como consecuencia de las actividades agrícolas, la explotación forestal u otros cambios de suelo en las partes altas de las cuencas.

La agricultura, produce efectos nocivos al incrementar la escorrentía dañando la estructura del suelo y reduciendo la infiltración de agua, lo que da lugar a mayores tasas de erosión con lo que incrementa la acumulación de sedimentos en los humedales.

Otro impacto de gran importancia, consecuencia de estas actividades es el aumento en el flujo de nutrientes y otros contaminantes hacia dichos ecosistemas.

La explotación forestal altera los regímenes hidrológicos al aumentar la escorrentía y disminuir el flujo subsuperficial de agua y al exponer comunidades rivereñas a condiciones

extremas de insolación, altera las condiciones físicas del agua lo que afecta a los humedales.

En otros casos, los humedales son sustituidos completamente, como cuando se construye en ellas granjas para la producción de camarones o se drenan y rellenan para crear zonas urbanas.

Otro factor importante para la degradación de estas zonas ha sido la introducción de especies exóticas, muchas de las cuales forman manchones monoespecíficos que desplazan a las especies nativas y alteran la dinámica natural de las comunidades nativas (Zedler y Kercher, 2004).



Figura 1.3. Destrucción de turberas en Kalimantan, Indonesia, en la isla de Borneo, por el cultivo de palmera de aceite. Humedales que contienen importantes cantidades de carbono comparable con lo que tiene la atmósfera al día de hoy (6 de agosto de 2008).

## 1.2. HUMEDALES ARTIFICIALES.

Los humedales son uno de los muchos tipos de sistemas naturales que pueden usarse para el tratamiento y control de la contaminación de residuos en el agua.

Los humedales construidos (HC) o humedales artificiales (HA) representan una opción alternativa para los problemas que encaran los países con economías emergentes, desde el punto de vista económico y tecnológico, pues son sistemas de tratamiento en los que, a través de procesos físicos, químicos y biológicos se logra la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales, pudiéndose utilizar una vez tratadas para uso agrícola o industrial (Guido y Durán de Bazúa, 2008).

Los primeros experimentos destinados a probar la capacidad de depuración de sistemas de humedales fueron llevados a cabo por la Dra. Kathe Seidel en 1952, en el instituto Max Plank de Alemania. A partir de entonces y durante las décadas de 1950 y 1960 la Dra. Seidel trabajó junto Kickuth y desarrollaron el tratamiento conocido como "Root Zone Method", que corresponde a un humedal de flujo subsuperficial relleno de arcilla.

En 1971 se inició el estudio de un humedal natural al que se le vertía un efluente secundario con el objetivo de evitar la eutrofización de un lago situado aguas abajo (Houghton Lake, Michigan).

A partir de 1972 se empezaron a estudiar otros humedales construidos de flujo superficial en Michigan, Florida y California que trataban efluentes secundarios.

El primer estudio de un humedal artificial de flujo subsuperficial a escala real se realizó en 1974 en Wolverton, Mississippi. Mientras que en Europa fue en Othefresen (Alemania) en 1974. Este humedal, que fue diseñado siguiendo el modelo del Instituto Max Plank, sigue operativo al día de hoy y trata agua residual doméstica (Sánchez 2010).

Cabe destacar que algunas de las primeras experiencias entre 1970 y 1980 fracasaron debido principalmente a que se utilizaba como material granular el propio suelo en el que se realizaba la obra y la colmatación en algunos casos aparecía en muy poco tiempo.

Hasta finales de los años 80 no se comprendió que no se podía utilizar como sustrato el propio suelo, a no ser que se garantizara una conductividad hidráulica adecuada y permanente.

Una vez superado este problema, gracias a la utilización de gravas como sustrato, se empezaron a construir gran número de humedales. En el año 1998 se estimaba millones de instalaciones repartidas por todo el mundo (Cole, 1998).

En los años noventa se vio un mayor incremento en el número de esos sistemas, pues su aplicación se expandía no solo para tratamiento de agua residual municipal, sino también para agua de lluvia, industrial y residuos agrícolas.

Autores como Kadlec Robert H. y Knight R. L. (1993) dan cuenta del empleo de humedales naturales y artificiales para el tratamiento de aguas residuales, viendo estas aguas como una fuente de sustancias nutritivas para la restauración y creación de estas tecnologías (Llagas y Guadalupe, 2006).

No fue hasta finales de 1980 que apareció el primer manual con criterios de diseño y construcción, y se realizó el primer simposio internacional sobre la tecnología en Chattanooga (EEUU), que se sigue repitiendo cada dos años.

También se creó el grupo especializado en humedales de la International Water Association. Desde entonces han aparecido excelentes manuales científicos y técnicos, y capítulos de libros que han ido recopilando el conocimiento y el estado de esta tecnología (USEPA, 2000).

Los humedales artificiales (HA) son tecnologías que demuestran su eficacia para el tratamiento de aguas residuales, mediante procesos naturales ya que requieren poca o ninguna energía para operar.

Estos sistemas están diseñados para imitar los sistemas de los humedales naturales, utilizando plantas, suelo y microorganismos asociados a retirar los contaminantes de los efluentes de aguas. Siendo una alternativa de bajo costo de operación y mantenimiento, haciéndose agradables a la vista.

- ❖ Los humedales artificiales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales que son:
- ❖ Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica.
- ❖ Utilizar y transformar los elementos por intermedio de los microorganismos.
- ❖ Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo grado de energía y mantenimiento (Lara, 1999).

Los humedales artificiales están basados en los siguientes principios fundamentales: la actividad bioquímica de los microorganismos, la entrada al sistema de oxígeno fotosintético por las raíces de las plantas y la presencia de un material inerte empacado que sirve de soporte tanto para los microorganismos como para la planta. Estos tres elementos eliminan sustancias disueltas y en suspensión del agua residual y degradan los compuestos orgánicos hacia su mineralización (Guido y Durán de Bazúa, 2008).

Los sistemas de un humedal artificial reducen o eliminan los contaminantes: como materia orgánica, materia inorgánica, oligoelementos orgánicos y agentes patógenos del agua.

Esta depuración o reducción es realizada mediante la combinación de procesos físicos, químicos y biológicos; incluyendo la sedimentación, precipitación, filtración, las transformaciones microbiológicas y la adsorción por la vegetación (Enciso *et al*, 2004).

La principal aplicación de los humedales artificiales o construidos es el tratamiento de aguas residuales domésticas y urbanas como tratamientos secundarios (eliminación de materia en suspensión y DBO) y en tratamientos terciarios (eliminación de nutrientes principalmente), (Guido y Durán de Bazúa, 2008).

Siendo también utilizados con éxito para tratar las aguas residuales procedentes de la agricultura (por ejemplo, las granjas, de cerdos y productos lácteos, los efluentes de peces de granja) y las aguas de escorrentía diversas (agricultura, aeropuertos, carreteras, invernaderos, viveros de plantas). También han sido efectivamente utilizados para el tratamiento de los lixiviados de vertederos (Vymazal, 2009).

Los humedales construidos son muy eficaces en la reducción de sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno de 5 días (DBO5), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), y / o total de fósforo (Coleman, 2003).

Los humedales logran el tratamiento de las aguas residuales a través de la sedimentación, adsorción y metabolismo bacteriano. Además, interactúan con la atmósfera (Llagas y Guadalupe, 2006).

El papel desempeñado por las plantas en los humedales es para influir en los procesos de tratamiento (Kivaisi 2001). Porque facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar (Lara, 1999).

Siendo una limitante el exceso de agua porque reduce la disponibilidad de oxígeno para las raíces, debido a que la difusión del oxígeno en el agua es alrededor de 10,000 veces más lenta en el agua que en el aire y porque existen muchos compuestos químicos en el agua que al oxidarse consumen su oxígeno (Cronk y Fennessy, 2001).

Los humedales artificiales pueden emplearse como un sistema complementario para mejorar la calidad del agua en comunidades pequeñas, especialmente en las zonas rurales y suburbanas (Durán de Bazúa, 2004), siendo un sistema de tratamiento sensible al medio ambiente y rentable para la renovación de las aguas residuales.

### 1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.

Los humedales artificiales pueden ser clasificados según el tipo de macrófitas que empleen en su funcionamiento: macrófitas fijas al sustrato (enraizadas) o macrófitas flotantes libres.

Vymazal (1998), sugiere una clasificación de acuerdo con las características de este material vegetal predominante en los lechos, siendo esta:

1. Humedales artificiales basados, en macrófitas flotantes. Ej.: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*.
2. Humedales artificiales basados, en macrófitas de hojas flotantes. Principalmente angiospermas sobre suelos anegados. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos. El Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna sp.*) son las especies más utilizadas para este sistema.
3. Humedales artificiales basados, con macrófitas sumergidas. Comprenden algunos helechos, numerosos musgos, carófitas y muchas angiospermas. Se encuentran en toda la zona fótica (a la cual llega la luz solar), aunque las angiospermas vasculares sólo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos. Ej.: *Littorella uniflora*, *Potamogeton crispus*.
4. Humedales artificiales basados, con macrófitas emergentes. En suelos anegados permanente o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos Ej.: *Thypha latifolia*, *Phragmites australis* (Cricyt, 2007).

Para el tratamiento de las aguas residuales existe la posibilidad de usar las diferentes alternativas siempre y cuando las plantas se puedan adaptar a las condiciones ambientales. Sin embargo las plantas correspondientes al grupo de macrófitas emergentes han demostrado buena capacidad de adaptación y en especial son resistentes a las condiciones ambientales adversas predominantes, cuando se trata de aguas residuales.

Una subdivisión de de estos humedales artificiales plantados con macrófitas emergentes, es:

1. Sistemas de flujo libre (humedales de flujo superficial (FS)).
2. Sistemas con flujo subsuperficial (FSS). Dentro del cual se pueden encontrar la siguiente clasificación:
  1. Sistemas con flujo horizontal (FSSH)
  2. Sistemas con flujo vertical (HFV).
  3. Sistemas híbridos (SH).

En la figura 1.4 se sintetizan los distintos tipos de humedales artificiales:

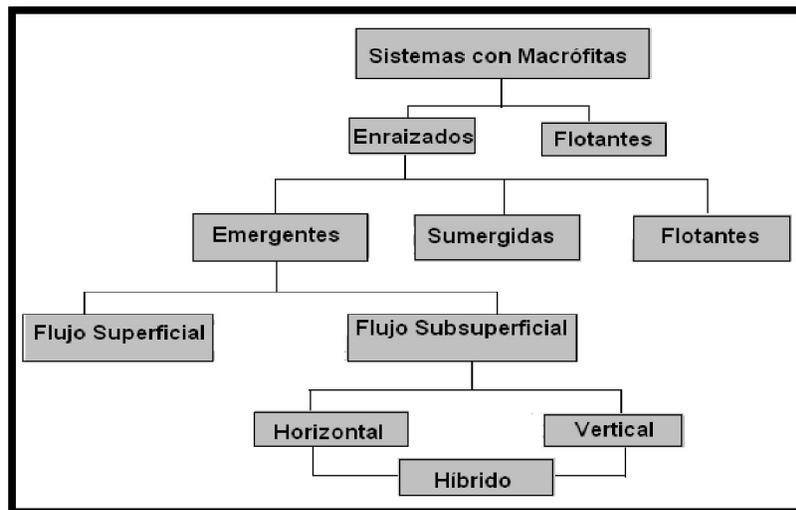


Figura 1.4. Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas.

### 1.3.1. SISTEMAS DE FLUJO LIBRE (HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL (FS)).

Estos sistemas consisten por lo general de estanques o canales paralelos con la superficie del agua expuesta a la atmósfera. El canal es recubierto con una barrera impermeable

(arcilla o geotextil) cubierta con piedras, grava y tierra y en él se planta vegetación. La figura 1.5 muestra los componentes del humedal artificial de flujo superficial libre.

El suelo es relativamente impermeable o con alguna clase de barrera subterránea, a fin de soportar la vegetación emergente, para prevenir la filtración, y agua en una profundidad relativamente baja (0.1 a 0.6 m) que atraviesa la unidad (Llagas y Guadalupe 2006).

El agua se vierte en superficie en un extremo del lecho, transportada y expuesta a la atmósfera, a una velocidad baja y horizontalmente, ya que el agua fluye libremente a través de la presencia de los tallos de la planta que hacen que se regule el flujo del agua, para finalmente ser evacuada en el extremo opuesto del lecho, por medio de un vertedero (Arias y Brix, 2003).

Por lo general se aplica agua residual pretratada, para prevenir un exceso de acumulación de sólidos y de basura, alimentándolos de forma constante. Una vez en el estanque, las partículas más pesadas se sedimentan, eliminando así los nutrientes sujetos a ellas.

Las plantas, y las comunidades de microorganismos que ellas soportan (en los tallos y raíces), toman los nutrientes como nitrógeno y fósforo. Las reacciones químicas pueden provocar que otros elementos se precipiten.

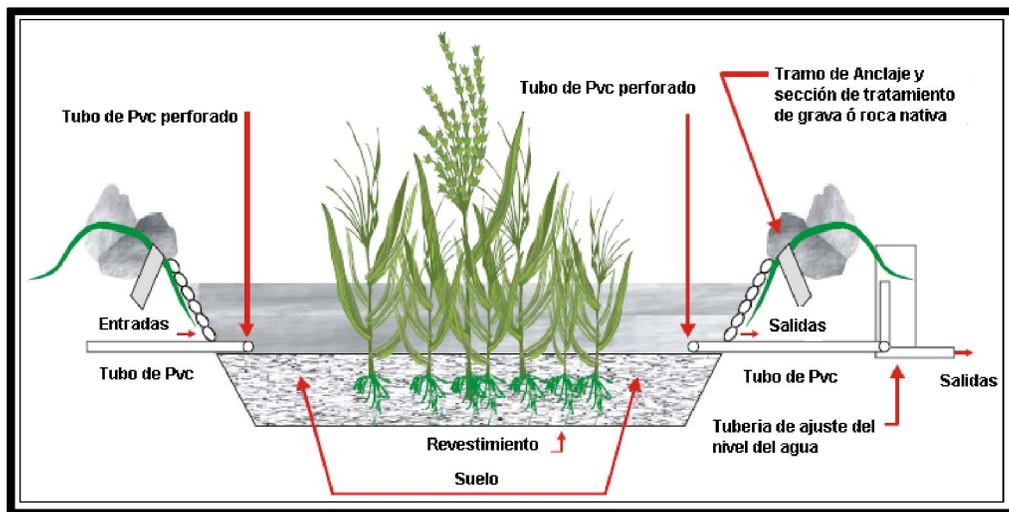


FIGURA 1.5 HUMEDAL DE FLUJO SUPERFICIAL LIBRE (FS)

Fuente: Adaptado de un dibujo (Llagas y Guadalupe, 2006).

Los patógenos son eliminados del agua por la descomposición natural, y el tratamiento ocurre cuando el flujo de agua atraviesa lentamente el tallo y la raíz de la vegetación emergente.

Aunque la capa de tierra bajo el agua es anaerobia, las raíces de las plantas liberan oxígeno en el área que rodea a los pelos radiculares, creando un entorno propicio para

actividades químicas y biológicas complejas. La eficiencia del Humedal Artificial de Flujo Superficial también depende de la buena distribución de agua en la entrada (Mena 2008).

La vegetación emergente más comúnmente utilizada en humedales HFS incluye las espadañas y aneas (*Typha spp.*), los juncos (*Scirpus spp.*) y los carrizos (*Phragmites spp.*). En sistemas diseñados principalmente para tratamiento, es común que sólo se seleccionen una o dos especies para la siembra. La cubierta vegetal producida por la vegetación emergente da sombra a la superficie del agua, previene el crecimiento y persistencia del agua y reduce la turbulencia inducida por el viento en el agua que fluye por el sistema.

Quizás aún más importante son las porciones sumergidas de las plantas vivas, los ramales erguidos de las plantas muertas, y los detritos acumulados del crecimiento vegetal previo. Estas superficies sumergidas proporcionan el sustrato físico para el crecimiento de organismos perifíticos adheridos que son responsables por la mayoría del tratamiento biológico en el sistema.

La lenta velocidad que se produce y el flujo esencialmente laminar proporcionan una remoción muy efectiva del material particulado en la sección inicial del sistema. Este material particulado, caracterizado como sólidos suspendidos totales (SST), contiene componentes con una demanda bioquímica de oxígeno (DBO), distintos arreglos de nitrógeno total y fósforo total, así como trozos de metales y compuestos orgánicos más complejos. La oxidación o reducción de esas partículas libera formas solubles de DBO, nitrógeno total y fósforo total al medio ambiente del humedal en donde están disponibles para la absorción por el suelo y la remoción por parte de las poblaciones microbianas y vegetales activas a lo largo del humedal (EPA, 2000).

La exposición del agua a la atmósfera hace que el diseño adecuado de estos sistemas sea crucial para evitar problemas derivados de una posible sobrecarga del sistema, tales como aparición de olores y plagas de insectos. Los sistemas de flujo superficial también se pueden diseñar con el objetivo de crear nuevos hábitats para la fauna y flora o para mejorar las condiciones de humedales naturales próximos (Mena, 2008).

En términos de paisaje, este sistema es bastante recomendable por su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, etcétera. Pueden constituirse, en lugares turísticos y en sitios de estudio de diferentes disciplinas por las complejas interacciones biológicas que se generan y establecen. Esta clase de sistemas suele incluir combinaciones de espacios abiertos y zonas vegetadas e islotes con la vegetación adecuada para proporcionar estos hábitats (Delgadillo, *et al.* 2010).

### 1.3.2. SISTEMAS CON FLUJO SUBSUPERFICIAL (FSS).

El humedal artificial de flujo subsuperficial consiste en una balsa o canal impermeabilizado del exterior, que se encuentra relleno de un material sólido poroso, con una profundidad de agua cercana a los 0.6 m.

El agua residual circula a través del medio poroso y siempre por debajo de la superficie del mismo. Como medio poroso, se suele utilizar rocas o grava. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas, cuyo papel es fundamental para su buen funcionamiento.

La circulación del agua a través del suelo o material de soporte parece ser siempre más efectiva que la circulación de superficie para muchos de los mecanismos de degradación de los contaminantes presentes en las aguas residuales.

Durante el paso del agua residual a través del lecho poroso, se produce un contacto con zonas aerobias, anóxicas y anaerobias.

La zona aerobia se encuentra en las zonas muy cercanas a la superficie y alrededor de las raíces y rizomas de las plantas. Los microorganismos que degradan la materia orgánica se encuentran formando una biopelícula alrededor de la grava y de las raíces de las plantas.

Por lo tanto, cuanto mayor sea la superficie susceptible de ser ocupada por la biopelícula, mayor será la densidad de microorganismos y mayor el rendimiento del sistema. Este hecho hace que el área requerida sea menor que en los humedales de flujo superficial pero con un mayor coste debido al uso de una mayor cantidad de medio poroso. Además, con este sistema, se evitan problemas como posibles plagas de insectos, olores y, en climas fríos, aportan una mayor protección térmica (Mena, 2008).

Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos: en función de la forma de aplicación de agua al sistema: (a) humedales de flujo subsuperficial horizontal y (b) humedales de flujo subsuperficial vertical (Delgadillo, *et al.* 2010).

#### 1.3.2.1. SISTEMAS CON FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL (FSSH).

La tecnología de tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial (FSSH) se inició en Alemania sobre la base de la investigación por Käthe Seidel, que se inicia en la década de 1960 y por Reinhold Kickuth en la década de 1970.

Estos sistemas se diseñan con el objeto de proporcionar tratamiento secundario o avanzado y consisten en canales o zanjas excavadas, rellenos de material granular, generalmente grava, en donde el nivel de agua se mantiene por debajo de la superficie de la grava.

Durante este trayecto las aguas residuales entrarán en contacto con una red de zonas aerobias, anóxicas y anaerobias. Las zonas se producen alrededor de las raíces y rizomas que la fuga de oxígeno provoca en el sustrato (Vymazal, 2009).

El agua residual se distribuye en un extremo del lecho y fluye lentamente, infiltrándose y trasladándose en sentido horizontal o lateral (flujo pistón) a través del medio granular relleno y entre las raíces de las plantas, hasta llegar a la zona de salida. Al final y en el fondo del lecho, el agua tratada se recoge y se evacua por medio de tuberías y/o vertederos.

Las profundidades de estos humedales descritos no suele exceder los 0.60 m y para facilitar el traslado del agua deben ser construidos con una leve pendiente de entre 0.5% a 1% en el fondo, pero manteniendo en lo posible las condiciones hidráulicas del flujo laminar (Delgadillo, *et al.* 2010).

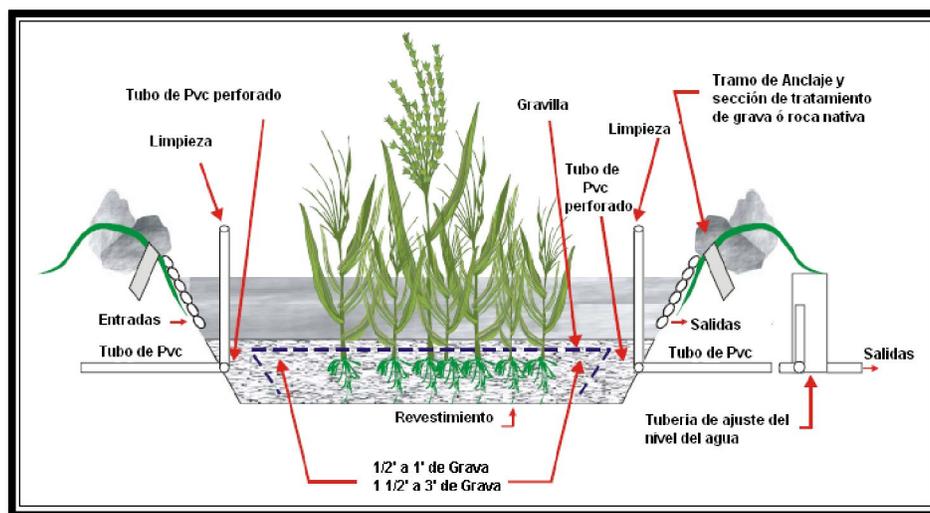


FIGURA 1.6 HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL (FSSH)  
Fuente: adaptado de un dibujo (Llagas y Guadalupe, 2006).

Los lechos deben ser aislados del suelo y subyacente para evitar la contaminación de suelos y de las aguas subterráneas (Arias y Brix, 2003).

Se caracterizan por el crecimiento de plantas emergentes usando el suelo, grava o piedras como sustrato de crecimiento en el lecho del canal. Dentro del lecho los microbios

facultativos atacan al medio y las raíces de las plantas, Estos sistemas son llamados «la zona de raíces» o «filtros de piedras de junco y caña» (Llagas y Guadalupe, 2006).

El medio se planta normalmente con los mismos tipos de vegetación emergentes presentes en las praderas inundadas y, por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio. Las principales ventajas de mantener un nivel subsuperficial del agua son la prevención de mosquitos y olores y la eliminación del riesgo de que el público entre en contacto con el agua residual parcialmente tratada.

La vegetación emergente más comúnmente utilizada en estos humedales incluye las espadañas y aneas (*Typha spp.*), los juncos (*Scirpus spp.*) y los carrizos (*Phragmites spp.*). Los *Phragmites* son las plantas preferidas para esta aplicación.

Esta planta tiene varias ventajas debido a que se trata de una planta durable de rápido crecimiento que no es una fuente alimenticia para aves o la vida silvestre.

Las raíces de las plantas sumergidas proporcionan sustrato para los procesos microbiológicos y dado que la mayoría de las macrófitas emergentes pueden transmitir oxígeno de las hojas a las raíces, se presentan microzonas aerobias en la superficie de las raíces y los rizomas.

El resto del medio sumergido de los humedales subsuperficiales tiende a carecer de oxígeno. Esta falta general de oxígeno limita la remoción biológica del amoníaco ( $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{-N}$ ) por nitrificación en los humedales subsuperficiales, pero aún así el sistema es efectivo en la remoción de DBO, SST, metales y algunos contaminantes orgánicos prioritarios, dado que su tratamiento puede ocurrir bajo condiciones aerobias y anóxicas. La remoción de nitratos por desnitrificación biológica también puede ser muy efectiva dado que las condiciones anóxicas requeridas están siempre presentes y se cuenta con suficientes fuentes de carbono (EPA, 2000).

### 1.3.2.2. SISTEMAS CON FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL (FSSV).

Un Humedal Artificial de Flujo Vertical es un lecho de filtración que se planta con vegetación acuática, el agua fluye de manera descendente, percolando en el humedal. El agua se vierte y se distribuye por toda la superficie del lecho y percola en el lecho entre las diferentes capas de material filtrante de relleno.

El material de relleno puede ser de distinta naturaleza y además sirve para facilitar el arraigo de las plantas. El lecho debe tener una profundidad no menor a 1 m. el sistema de distribución del agua afluente está en la superficie y reparte el agua por tratar uniformemente, para asegurar buenos resultados en la depuración. Una vez que el agua

pasa a través del lecho, se recoge en el fondo y se evacua por medio de una tubería (Arias y Brix, 2003).

Se puede diseñar el Humedal Artificial de Flujo Vertical como una excavación poco profunda o como una construcción sobre el nivel del suelo. Cada filtro debe tener un recubrimiento impermeable y un sistema de recolección de efluente. Habitualmente los Humedales Artificiales de flujo Vertical se diseñan para tratar aguas residuales que han pasado por un pretratamiento.

Estructuralmente, hay una capa de grava para drenar (un mínimo de 20 cm), seguida de capas de arena y grava (para efluente ya asentado) o arena y grava fina (para efluente primario) (Delgadillo, *et al.* 2010). La figura 1.7 muestra una vista corte sección del Humedal subsuperficial de flujo vertical.

El agua en los humedales de flujo vertical se puede dosificar de manera continua o intermitentemente hasta inundar totalmente el lecho, siempre dependiendo del modo de operación previsto en el diseño (Arias y Brix, 2003).

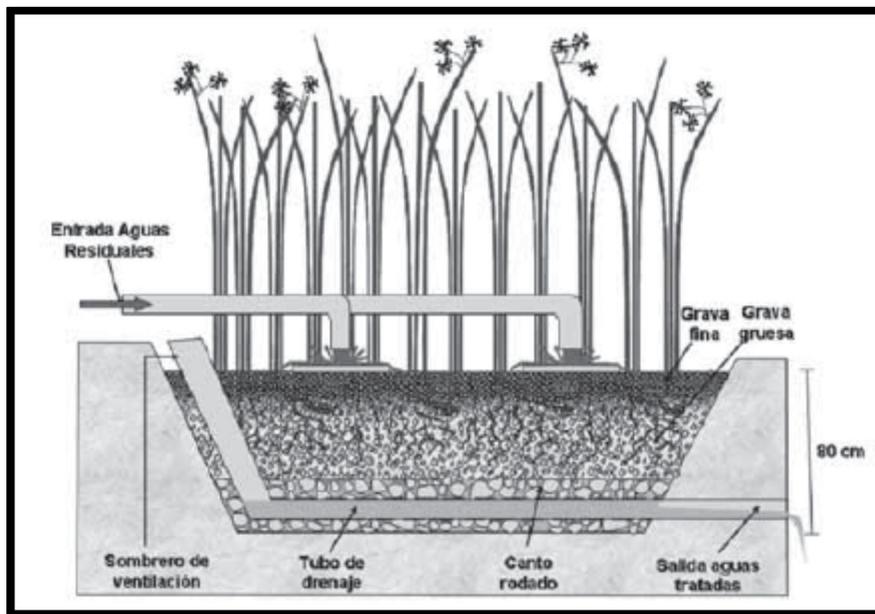


Figura 1.7. Humedal subsuperficial de flujo vertical (vista corte sección).

Fuente: adaptado de un dibujo (Delgadillo, *et al.* 2010).

Al dosificar intermitentemente el humedal (de cuatro a diez veces al día), el filtro pasa por periodos de saturación y, por lo tanto, diferentes condiciones aerobias y anaerobias. La frecuencia de dosificación se debe ajustar para que la dosis anterior de aguas residuales tenga tiempo de filtrarse por el material para que el oxígeno tenga tiempo de difundirse por el medio y llenar los espacios vacíos.

El medio filtrante actúa tanto como filtro para eliminar sólidos, como una superficie fija para que las bacterias se sujeten, y como una base para la vegetación. La capa superior es plantada con vegetación que puede desarrollar raíces profundas y gruesas, que entran en el medio de filtración (Akvopedia, 2011).

Las opciones más comunes de vegetación son *Phragmites australis*, *Typha cattails* o *Echinochloa Pyramidalis*. La vegetación transfiere una pequeña porción de oxígeno a la zona de raíces de manera que las bacterias aerobias pueden colonizar el área y degradar la materia orgánica. Sin embargo, la función primaria de la vegetación es mantener la permeabilidad en el filtro y proporcionar un hábitat para los microorganismos (Rodríguez y Ospina, 2005).

Durante la etapa de inundación, el agua residual fluye hacia abajo por el lecho no saturado y es filtrada por la mezcla de arena y grava.

Los nutrientes y la materia orgánica son absorbidos y degradados por las densas poblaciones microbianas sujetas a la superficie del material del filtro y las raíces. Al forzar a los organismos a una etapa de 'hambre' entre las dosis, el crecimiento excesivo de la biomasa se reduce y se incrementa la porosidad. Una red de drenaje en la base recolecta el efluente (Zedler y Kercher, 2004).

El diseño y el tamaño del humedal dependen de las cargas hidráulica y orgánica, la eliminación de patógenos se logra por la descomposición natural, la depredación de organismos superiores, y la sedimentación.

Con este sistema, se consigue un mayor contacto entre el agua residual y el aire dentro de los poros, por lo tanto, mejores rendimientos en aquellos mecanismos aerobios que tuvieran lugar debido a un mayor aporte de oxígeno (Mena, 2008).

La diferencia importante entre el humedal vertical y el horizontal no sólo es la dirección del flujo, sino las condiciones aerobias.

Estos humedales presentan cierta ventaja con respecto a los humedales de flujo horizontal, en tanto que además de eliminar la DBO<sub>5</sub> tienen mayor capacidad para nitrificar totalmente el agua tratada, inclusive a niveles que solo se obtienen a sistemas de tratamiento terciario o secundario (Arias y Brix, 2003).

Algunos inconvenientes que presentan son que su operación es más compleja, un poco más cara y que no han sido tan estudiados como los horizontales.

### 1.3.4. SISTEMAS HÍBRIDOS (SH).

Aprovechando las diferentes características de los diferentes tipos de humedales, se pueden combinar los humedales artificiales de FSSH y FSSV para formar los sistemas híbridos o sistemas combinados. Los cuales se combinan para complementarse mutuamente, con el fin de lograr una mayor eficiencia del tratamiento, especialmente para la eliminación del nitrógeno, lo que también provoca una eliminación más alta de patógenos, de materia orgánica ( $DBO_5$  y DQO) y sólidos en suspensión (Münch, 2009).

Estas combinaciones de los humedales pueden estar compuestos de diferentes lechos y/o de zonas en donde el agua circula expuesta a la atmosfera, zonas en donde el flujo es subsuperficial e inclusive con sectores de flujo vertical.

Su disposición dependerá de los objetivos del tratamiento, de las características del agua por tratar, de las condiciones de operación y de la disponibilidad económica (Arias y Brix, 2003).

Los sistemas híbridos más utilizados comprenden de HFV primero seguido por el HFH de FSS, dispuestos de manera escalonada, con un flujo de reciclaje, que son las mostradas en la figura 1.8:

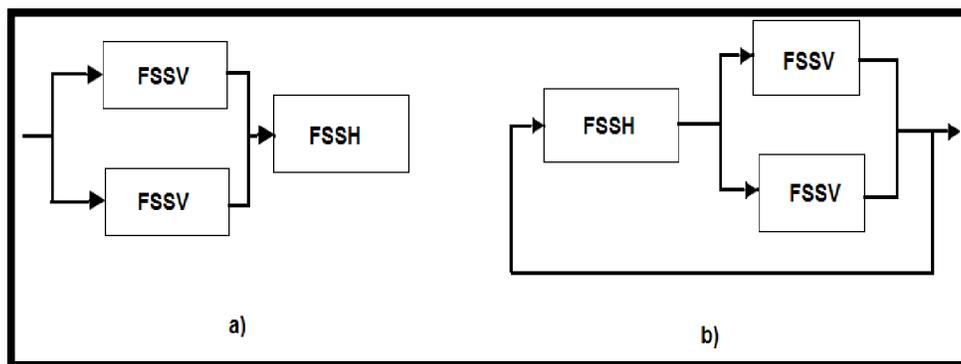


Figura 1.8. Esquemas de sistemas híbridos de humedales artificiales.

En ambas configuraciones, se trata de aprovechar las diferentes condiciones oxidativas que están presentes en los humedales. Mientras que en los humedales FSSV predominan los procesos aerobios (respiración aerobia, nitrificación), debido al mayor contacto que se tiene, aire-agua en las zonas insaturadas del lecho; en los humedales FSSH predominan los procesos anóxicos (desnitrificación) y anaerobios (reducción del sulfato, fermentación), debido al menor contacto aire-agua al estar el lecho saturado de agua.

Por lo tanto, con esta alternancia se logra favorecer la eliminación de los contaminantes, en especial, la del nitrógeno (Mena, 2008).

Para mejorar aun mas las calidad del agua, o cuando se requiere obtener resultados de calidad específicos y hacer los sistemas más efectivos, también es posible implementar procesos de recirculación del agua tratada en diferentes puntos de los sistemas (Arias y Brix, 2003).

Por lo tanto, hay un creciente interés en sistemas híbridos, aunque no son realmente relevantes para la mayoría de los países en desarrollo, porque son más caros de construir y más complicados de operar que los sistemas no híbridos (Münch, 2009).

## 1.4. COMPONENTES DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL.

Los humedales artificiales consisten en el diseño correcto de un medio de soporte o una estructura impermeable. Están constituidos básicamente por: agua, relleno sólido y plantas emergentes. Otros componentes importantes de los humedales, como lo son las comunidades de microorganismos y los invertebrados acuáticos, aparecen de forma espontánea o naturalmente durante su uso (Mena 2008, Delgadillo, *et al.* 2010).

### 1.4.1. EL AGUA.

El agua es la fase móvil dentro del humedal, la encargada del transporte de los contaminantes y en la cual se van a producir la mayoría de las reacciones responsables de la depuración.

De acuerdo a Lara (1999), la hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal artificial porque reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor primario decisivo en su éxito o fracaso, por los siguientes motivos.

1. Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento.
2. Debido al área superficial del agua y su poca profundidad, un sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración (la pérdida combinada de agua por evaporación del suelo y transpiración de las plantas).
3. La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, obstruyendo caminos de flujo siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de raíces y rizomas y bloqueando la exposición al viento y al sol.

Las condiciones hidrológicas son extremadamente importantes para el mantenimiento estructural y funcional del humedal. Éstas afectan a muchos factores abióticos, incluyendo el estado oxidativo del lecho, la disponibilidad de los nutrientes y la salinidad.

Estos factores abióticos, a su vez, determinan qué seres vivos van a desarrollarse en el humedal. Finalmente y para completar el ciclo, los componentes bióticos actúan alterando la hidrología y otras características fisicoquímicas del humedal (Mena, 2008).

#### 1.4.1.1. AGUA RESIDUAL (AR).

Las aguas residuales son las aguas usadas y los sólidos que por uno u otro medio se introducen en las cloacas y son transportadas mediante el sistema de alcantarillado.

En general, las aguas residuales consisten de dos componentes, un efluente líquido y un constituyente sólido, conocido como lodo (Romero, 2008). Según su uso precedente, estas aguas resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos, junto con residuos de industrias, de actividades agrícolas, así como las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación. En este caso son recogidas por una red de alcantarillado que las conducirá hacia el humedal. (Delgadillo, *et al.* 2010).

Los contaminantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales se presentan en la tabla 1.2.

Las aguas residuales no tratadas, pueden ocasionar graves problemas ambientales y sanitarios, como infecciones bacterianas, además de mantener vectores y hospedadores.

Desde el punto de vista ambiental, la contaminación de las aguas no sólo elimina una buena parte de la vegetación y fauna autóctona acuática, sino que también ocasiona desequilibrios generalizados a todo el ecosistema terrestre que de estas masas de agua depende.

Tabla 1.2. Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales (Mecalf y Eddy, 2000).

Contaminantes	Importancia
Sólidos suspendidos	Pueden llevar al desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias, cuando los residuos no son tratados son lanzados al ambiente acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas. Si se descarga sin tratamiento, su estabilización biológica puede llevar al consumo de las fuentes de oxígeno natural y al desarrollo de condiciones sépticas.
Microorganismos patógenos	Pueden transmitir enfermedades.
Nutrientes	Pueden llevar al crecimiento de vida acuática indeseable. Cuando se aplican al suelo en cantidades excesivas pueden contaminar también el agua subterránea.

Tabla 1.2. Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales (Mecalf y Eddy, 2000). Cont.

Contaminantes	Importancia
Compuestos tóxicos	En las aguas residuales, están presentes compuestos orgánicos e inorgánicos de los cuales se sospecha o conoce su carcinogenicidad, mutanogenicidad, teratogenicidad o elevada toxicidad.
Materia Orgánica Refractaria	Tiende a resistir los tratamientos convencionales. Ejemplos comunes son los detergentes, los fenoles y los plaguicidas agrícolas.
Metales pesados	Tienen una alta persistencia en el ambiente, lo que incrementa su posibilidad de acumulación y toxicidad.
Sólidos inorgánicos disueltos.	Componentes inorgánicos como calcio, sodio y sulfato, deben removerse si se va a usar nuevamente el agua residual por ser potenciales degradadores del suelo.

El exceso de materia orgánica y nutrientes en el agua (nitrógeno y fósforo) conduce a la eutrofización, es decir, el agotamiento de oxígeno y la muerte de la mayoría de los seres vivos. Los metales pesados y otros compuestos tóxicos producen envenenamientos y bioacumulación (Fernández, *et al.* 2001).

#### 1.4.2. RELLENO (SUSTRATO) O MEDIO DE SOPORTE.

En los humedales artificiales, el sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico. Es responsable directo de la extracción de algunas sustancias contaminantes mediante interacciones físicas y químicas.

La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con pocos finos (Mena, 2008).

La grava debe estar compuesta de piedras limpias, duras y duraderas, con capacidad de retener su forma y la permeabilidad del lecho del humedal a largo plazo (EPA, 2000).

Si se utiliza grava con diámetros muy grandes de sustrato, origina que se incremente la velocidad del paso del agua, resultando en un flujo turbulento y que no se cumpla la ley de Darcy, que describe el flujo a través de un medio poroso (Delgadillo, *et al.* 2010). Por lo que se altera el caudal a tratar o la calidad del efluente.

Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Pero también este medio presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal a tratar (Arias, 2004). En algunos casos se utiliza ciertos tipos de suelo (arcillas) para adsorber metales pesados, fosfatos, etcétera.

Por el contrario, si el lecho granular está formado por gravas y arenas, disminuye la capacidad de adsorción y el poder filtrador del medio, pero aumenta la conductividad hidráulica. De forma indirecta, el medio granular contribuye a la eliminación de contaminantes porque sirve de soporte de crecimiento de las plantas y colonias de microorganismos que llevan a cabo la actividad biodegradadora (biopelículas) (Delgadillo, *et al.* 2010).

Antes del inicio del diseño se recomienda realizar pruebas de conductividad y porosidad del substrato (grava), esto para definir exactamente el tipo de material a emplearse. Asimismo, se recomienda multiplicar el valor de la conductividad por 1/3 o bien por 0.1 (10%) para evitar problemas de atascamiento por acumulación de lodos, raíces y otros (Mena, 2010). En la tabla se muestra las características principales de los substratos usados en los humedales.

Tabla 1.3. Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales (Delgadillo 2010).

Tipo de material	Tamaño efectivo $D_{10}$ (mm)	Conductividad hidráulica, $k_s$ ( $m^3/m^2/d$ )	Porosidad, $\eta$ %
Arena gruesa	2	100-1.000	28-32
Arena gravosa	8	500-5.000	30-35
Grava fina	16	1.000-10.000	35-38
Grava media	32	10.000-50.000	36-40
Roca gruesa	128	50.000-250.000	38-45

El medio de soporte, junto con los sedimentos y los restos de vegetación, es importante por varias razones:

1. Actúan como barrera primaria de tamizado.
2. Actúan como estructura de soporte de las plantas y como superficie para el crecimiento y desarrollo de la masa microbiana. En esta función, el tamaño de partícula es importante, puesto que, cuanto más pequeño es el tamaño de partícula, mayor cantidad de biopelícula albergará, pero mayores

probabilidades existirán de que se produzca una obturación de los poros e inundaciones por encima del nivel subsuperficial. Por lo tanto, es necesario optimizar el tamaño de partícula.

3. La permeabilidad del relleno afecta al movimiento del agua a través del humedal.
4. Favorecen la precipitación química de contaminantes disueltos (Mena, 2008).
5. La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal (Lara, 1999).

El comportamiento del humedal depende también de si el relleno está saturado de agua (FSSH) o está insaturado (FSSV). En un relleno saturado, el agua reemplaza el aire atmosférico, hecho que afecta, sobre todo, a la disponibilidad de oxígeno y determina la predominancia de mecanismos aerobios o anaerobios en los procesos biológicos que tienen lugar en el humedal.

Cuando los aceptores de electrones alternativos al oxígeno (nitrato, hierro, manganeso, etc.) son insuficientes como para degradar la materia orgánica existente, aparecen zonas anaerobias en las que se dan procesos de fermentación. Por lo tanto, en un mismo sistema se estarán dando procesos aerobios, anóxicos y anaerobios.

La distribución de estas zonas dependerá de las características del agua afluyente, del aporte de oxígeno, de la morfología de las plantas (profundidad de las raíces, tipo de tallos, etc.), de las condiciones atmosféricas (viento, temperatura), etc., por lo tanto, el lecho es, en su mayoría anaerobio, quedando reducidas las zonas aerobias y anóxicas a las proximidades de las raíces y de la superficie de agua (Mena, 2008).

### 1.4.3. VEGETACIÓN.

El papel de la vegetación en los humedales está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Las plantas son organismos fotoautótrofos, es decir que recogen energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico.

Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde

los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación (Arias, 2004).

De forma general, la vegetación ofrece grandes beneficios en los humedales siendo estos:

1. Proporciona superficies para la formación de películas bacterianas.
2. Facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua a depurar.
3. Permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua.
4. Controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de la luz solar

#### 1.4.3. 1 PLANTAS EMERGENTES.

Las plantas emergentes están enraizadas en el fondo del lago, pero sus hojas y tallos se extienden fuera del agua. Frecuentemente se encuentran en los humedales artificiales para la depuración de aguas residuales, las más utilizadas incluyen espadañas (*Typha*), carrizos (*Phragmites australis*), juncos (*Scirpus*). La figura 1.9 muestra una imagen de una de las especies de plantas en los humedales.



Figura 1.9. Espadaña, Totorá, Enea, Anea, Junco, Bayón, Bayunco, Bohordo, Henea, Junco de la pasión, Maza de agua. Nombre científico o latino: *Typha latifolia*.

Las plantas acuáticas emergentes que crecen en los Humedales artificiales actúan como canales de transporte de gases (dióxido de carbono, metano, etc.) hacia la atmósfera y oxígeno hacia el relleno. Por lo tanto, al aporte de oxígeno por difusión atmosférica a través de la superficie de la grava se le suma el aporte de la planta.

La cantidad de oxígeno aportado por la planta depende de muchos factores: de la especie, del tamaño, de la época del año, de la edad de la planta, de las condiciones ambientales y del entorno, y de las condiciones oxidantes de las raíces.

Suministran oxígeno a sus propias raíces para mantenerlas en condiciones aerobias. Si se encuentran con un lecho muy reductor, tienen que suministrar más oxígeno para contrarrestar esas condiciones. Es por esto que una misma especie puede aportar más oxígeno cuando está en contacto con agua residual (Mena, 2008).

Las plantas acuáticas emergentes contribuyen a estabilizar el cauce, influyen en la conductividad hidráulica del terreno, distribuyen y ralentizan la velocidad del agua, lo que favorece la sedimentación de los sólidos suspendidos y aumenta el tiempo de contacto entre el agua y la vegetación.

Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y esorrentía de varias maneras:

1. Toman el carbono, nutrientes, y elementos de traza, y los incorporan a los tejidos de la planta (Lara, 1999).
2. La influencia de las raíces de las plantas es bastante grande. Alrededor de las raíces, existen gradientes de muchas de las especies químicas presentes en el agua. Éstos son atribuibles a la extracción de nutrientes y de otras sustancias por las plantas hacia su sistema de raíces. Esto agota las sustancias disueltas en el agua.
3. Compactan el lecho dotándolo de estabilidad.
4. Las raíces actúan como superficie para la fijación de microorganismos, aumentando así, la superficie de biopelícula (Col, 2005).
5. Cuando se mueren y se deterioran, dan lugar a restos de vegetación.

Cuando se diseñan sistemas que específicamente buscan un incremento en los valores del hábitat, además de conseguir el tratamiento del agua residual, usualmente incluyen una gran variedad de plantas, especialmente para proporcionar alimentación y nido a las aves y otras formas de vida acuática.

#### 1.4.4. MICROORGANISMOS.

Muchas transformaciones de los nutrientes y del carbono orgánico en humedales son debidas al metabolismo microbiano y están directamente relacionadas con el crecimiento de los microorganismos que se encargan de realizar el tratamiento biológico. Éstos incluyen, principalmente, bacterias, hongos, y protozoarios. Esta biomasa se encuentra formando una biopelícula alrededor de las partículas del lecho (Mena, 2008).

En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predominan los microorganismos anaerobios. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son:

1. Degradación de la materia orgánica.
2. Eliminación de nutrientes y elementos traza.
3. Desinfección (Arias, 2004).

En general, los procesos microbiológicos por los cuales los microorganismos depuraran el agua residual en el humedal son los mismos que en los sistemas biológicos convencionales.

Los microorganismos utilizan los nutrientes y el carbono tanto como fuente de energía como para la formación de nueva biomasa microbiana. La velocidad de crecimiento de esta nueva biomasa dependerá tanto de las condiciones ambientales como de la disponibilidad del sustrato. La energía es obtenida por la oxidación de compuestos reducidos (dador de electrones) con un oxidante (aceptor de electrones) a través de la cadena respiratoria. Ejemplos de donantes de electrones pueden ser compuestos orgánicos, amonio, hidrógeno o sulfuros; mientras que, como aceptores se pueden encontrar oxígeno, nitrato, hierro (III), manganeso (IV) ó sulfato (Mena, 2008).

La mayoría de los procesos son llevados a cabo por bacterias heterótrofas y autótrofas. Dependiendo del aceptor final de electrones, el proceso será más o menos rentable. La degradación aerobia de materia orgánica alcanza mayor energía por unidad de masa de donador de electrones que la nitrificación o cualquier otra degradación orgánica.

Las bacterias que no utilizan oxígeno como aceptor final de electrones tienen un crecimiento más lento ya que el proceso resulta, en general, menos eficiente que el de la respiración aerobia. Existe una relación entre el potencial redox y los aceptores de electrones que actúan en la respiración microbiana dentro del humedal (García, *et al.* 2003).

Los microorganismos, en su crecimiento, consumen nutrientes incorporándolos a su estructura celular. Es obvio, por tanto, decir que las condiciones químicas y físicas que condicionan qué tipo de microorganismos van a existir (heterótrofos, autótrofos) influyen en la cantidad de nutrientes absorbidas.

Las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua que les llega y se pueden extender rápidamente cuando se tiene la suficiente energía. Cuando las condiciones medioambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan. La comunidad microbiana de un humedal puede ser afectada por sustancias tóxicas, como plaguicidas y metales pesados, y debe tenerse cuidado para prevenir que tales sustancias se introduzcan en las cadenas tróficas en concentraciones perjudiciales (Mena, 2008).

#### 1.4.5. FAUNA.

Los humedales artificiales constituyen un hábitat natural para numerosas especies animales, especialmente invertebrados. Muchos de ellos contribuyen al tratamiento de las aguas residuales ya que descomponen la materia orgánica, incluso lo hacen en grandes cantidades durante su etapa larvaria.

Los animales invertebrados, como insectos y gusanos, contribuyen al proceso de tratamiento fragmentando el detritus consumiendo la materia orgánica.

Las larvas de muchos insectos son acuáticas y consumen cantidades significantes de materia durante sus fases larvales. Los invertebrados también tienen varios papeles ecológicos; por ejemplo, las ninfas de la libélula son rapaces importantes de larvas de mosquito. Aunque los invertebrados son los animales más importantes en cuanto a la mejora de la calidad del agua, los humedales artificiales también atraen a una gran variedad de anfibios, tortugas, pájaros, y mamíferos incluso patos silvestres (Lara, 1999).

## 1.5. MECANISMOS BÁSICOS DE DEPURACIÓN EN UN HUMEDAL ARTIFICIAL

En un humedal artificial se desarrollan diferentes mecanismos de depuración de contaminantes del agua residual. Evidentemente, un amplio rango de procesos biológicos, químicos y físicos tienen lugar. Por lo tanto, la influencia e interacción de cada componente involucrado es bastante compleja.

Los humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS), y nitrógeno, así como niveles significativos de metales, compuestos orgánicos y patógenos. Siendo la eliminación de fósforo mínima, debido a las limitadas oportunidades de contacto del agua residual con el suelo.

Los mecanismos básicos de tratamiento son: sedimentación, precipitación química, adsorción y degradación microbiana de la DBO y del nitrógeno, así como la captación por parte de la vegetación.

En la siguiente tabla, se muestran los principales procesos y mecanismos que se llevan a cabo en un humedal artificial y que permiten la depuración del agua residual (Mena, 2008).

Tabla 1.4. Mecanismos de depuración predominantes en los humedales artificiales (Mena 2008).

Contaminantes	Mecanismos de eliminación
Sólidos suspendidos	1. Sedimentación 2. Filtración
Materia orgánica	1. Degradación microbiana aerobia 2. Degradación microbiana anaerobia

Tabla 1.4. Mecanismos de depuración predominantes en los humedales artificiales (Mena 2008). Cont.

Contaminantes	Mecanismos de eliminación
Nitrógeno	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Amonificación seguido por nitrificación microbiana y desnitrificación.</li> <li>2. Asimilación por parte de las plantas.</li> <li>3. Volatilización del amoniaco</li> </ol>
Fósforo	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Adsorción por parte del lecho</li> <li>2. Asimilación por parte de las plantas (Adsorción principal)</li> </ol>
Metales	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Asimilación por parte de las plantas</li> <li>2. Intercambio iónico</li> </ol>
Patógenos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sedimentación</li> <li>2. Filtración</li> <li>3. Muerte natural</li> <li>4. Irradiación ultravioleta</li> </ol>

### 1.5.1. REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS.

Se denominan sólidos en suspensión a aquellos sólidos que quedan retenidos en un filtro estandarizado de tamaño de poro de 1.2  $\mu\text{m}$ .

Los humedales son capaces de proporcionar una alta eficiencia física en la remoción de contaminantes asociado con material particulado, como filtración del medio granular consiguiendo así la eliminación de la materia en suspensión y aparecen como:

1. Constricciones del flujo producidas por el medio granular produciéndose así un tamizado en sus espacios intersticiales.
2. Baja velocidad de circulación del agua.
3. Fuerzas de adhesión de las partículas que promueven la formación de partículas de mayor tamaño (Sánchez, 2010).

La sedimentación de los sólidos suspendidos se promueve por la baja velocidad de flujo y en efecto, las raíces de las mácrófitas y el sustrato reducen esta velocidad, favoreciendo dichos procesos en los humedales (Delgadillo, *et al.* 2010).

Las esteras de plantas en los humedales pueden servir como trampas de sedimentos, pero su rol primario es la remoción de sólidos suspendidos para limitar la resuspensión de material particulado.

La eficiencia de remoción de sólidos suspendidos es proporcional a la velocidad de particulado fijo y la longitud del humedal. Para propósitos prácticos, la sedimentación es usualmente considerada como un proceso irreversible, resultando en acumulación de sólidos y contaminantes asociados sobre la superficie del suelo del humedal.

Sin embargo, la resuspensión de sedimento puede resultar en la exportación de sólidos suspendidos y reducir algo más bajo, la eficiencia de remoción (Llagas y Guadalupe, 2006).

Aunque la mayor parte de los sólidos suspendidos y sedimentables son removidos en el tratamiento previo, los humedales filtran y sedimentan los remanentes, complementando esta remoción (Delgadillo, *et al.* 2010).



Los valores habituales de eliminación de sólidos en suspensión se encuentran en el intervalo 85-95 %, produciendo efluentes con concentraciones menores que 20 mg/L de forma sistemática (Sánchez, 2010).

### 1.5.2. REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA.

La remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aerobia o anaerobia. Una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos.

La biodegradación es realizada por los microorganismos, los cuales están adheridos a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos.

Todos los microorganismos involucrados en este proceso de tratamiento desempeñan el papel más significativo en la remoción de compuestos orgánicos. Los descompuestos microbianos, sobre todo bacterias del suelo, utilizan el carbono (C) de la materia orgánica como fuente de energía, convirtiéndola a gases de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) o metano (CH<sub>4</sub>) y para la síntesis de nuevas células, como también otros nutrientes y elementos traza.

Esto proporciona un mecanismo biológico importante para la remoción de una amplia variedad de compuestos orgánicos. La eficiencia y la velocidad de degradación orgánica de C por los microorganismos es altamente variable para los diversos tipos de compuestos orgánicos (Llagas y Guadalupe, 2006).

De acuerdo a su fuente de nutrientes, los microorganismos están clasificados como heterótrofos o autótrofos. Los heterótrofos requieren material orgánico como fuente de carbono para la síntesis de nuevos microorganismos, en cambio, los autótrofos no utilizan materia orgánica sino dióxido de carbono como fuente de carbono.

Ambos grupos usan luz o una reacción química de oxidación-reducción como fuente de energía para todas las síntesis y son llamados fotótrofos y quimiótrofos, respectivamente.

Dos clases diferentes de biodegradación microbiana, la aerobia o la anaerobia, tienen lugar en los humedales artificiales, dependiendo de la presencia de oxígeno disuelto.

En la degradación aerobia, dos grupos de microorganismos participan en este proceso de degradación: aerobios quimioheterótrofos, oxidando compuestos orgánicos y liberando amonio; y aerobios quimioautótrofos, los cuales oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrito y nitrato. El último proceso es llamado nitrificación.

Sin embargo, debido a la tasa de metabolismo más alta, los heterótrofos son principalmente responsables para la remoción del material orgánico; por lo tanto, la presencia de oxígeno disuelto es un factor limitante. La degradación anaerobia puede ser resumida de la siguiente forma:

Orgánicos alcohol, ácidos + nuevas células  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$ , nuevas células

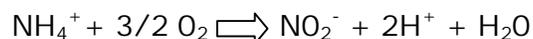
Éste es un proceso de cuatro pasos, realizado por heterótrofos anaerobios. Es menos eficiente comparado a la degradación aerobia, pero predominará si el oxígeno no está disponible (Delgadillo, *et al.* 2010).

### 1.5.3. REMOCIÓN DE NITRÓGENO.

El nitrógeno se elimina por diversos procesos: absorción directa por las plantas y, en menor medida, por fenómenos de nitrificación-desnitrificación y amonificación, realizados por bacterias (Fernández, 2006).

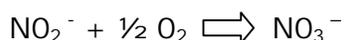
Todo el proceso es dividido en pasos, iniciando con la amonificación, seguido por la nitrificación y desnitrificación. Este proceso se muestra en la figura 1.10. Al momento que ingresa el agua residual al humedal artificial, la mayor parte del nitrógeno está presente como nitrato y amonio. El metabolismo microbiano produce la remoción de este nitrógeno inorgánico. Bacterias especializadas (*pseudomonas sp.*) transforman metabólicamente el nitrato en gas nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), proceso conocido como desnitrificación (Llagas y Guadalupe, 2006).

La amonificación ocurre en las zonas aerobias, así como también en zonas anaerobias, por la mineralización del nitrógeno contenido en los materiales orgánicos. La nitrificación requiere la presencia de oxígeno disuelto (condiciones aerobias), amonio o nitrito como fuente de energía y dióxido de carbono como fuente de carbono. La oxidación en sí ocurre en dos estados, cada uno involucra diferentes especies de bacterias nitrificantes quimioautótrofas. El primer paso es la oxidación de iones amonio a nitrito (nitrosificación).



En este paso, la liberación de iones de hidrógeno baja el pH, por lo que es necesario un medio fuertemente alcalino para mantener un pH en el rango de 7.5 a 8.6.

El género bacteriano que es considerado para catalizar esta reacción es Nitrosomas, en cambio el género Nitrobacter es responsable para la transformación de nitrito a nitrato.



Toda la reacción necesita un alto ingreso de oxígeno: alrededor de 4.5 kg por cada kg de amonio-nitrógeno ( $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$ ) oxidado. Las bacterias son sensibles a un amplio rango de inhibidores; así, altas concentraciones de nitrógeno amoniacal son inhibidoras. También concentraciones de oxígeno disuelto por más de 1 mg  $\text{O}_2/\text{l}$  son requeridos y temperaturas por debajo de 100 °C reducen el desempeño significativamente.

La desnitrificación es el paso final en la remoción de nitrógeno. Ocurre bajo condiciones anóxicas, esto significa, que no hay oxígeno disuelto presente (o con una concentración <a 2% de saturación) pero donde el oxígeno está disponible en fuentes tales como el nitrato, nitrito o incluso sulfato.

Un amplio rango de bacterias anaerobias facultativas, siendo las más comunes *Pseudomonas sp.*, *Achromobacter sp.* Y *Aerobacter sp.*, realizan el proceso. Toda la reacción que incluye como primer paso la conversión de nitrato a nitrito, seguida por la producción de óxido nítrico y gas nitrógeno, puede ser resumida como sigue:



Los tres productos son gaseosos, pero mayormente el gas nitrógeno es perdido en la atmósfera debido a que los primeros dos productos son pasajeros en la mayoría de los casos. Similar al proceso de nitrificación, la desnitrificación es también fuertemente dependiente de la temperatura y es necesario suficiente carbono como fuente de energía para que la bacteria realice la conversión (Delgadillo, *et al.* 2010).

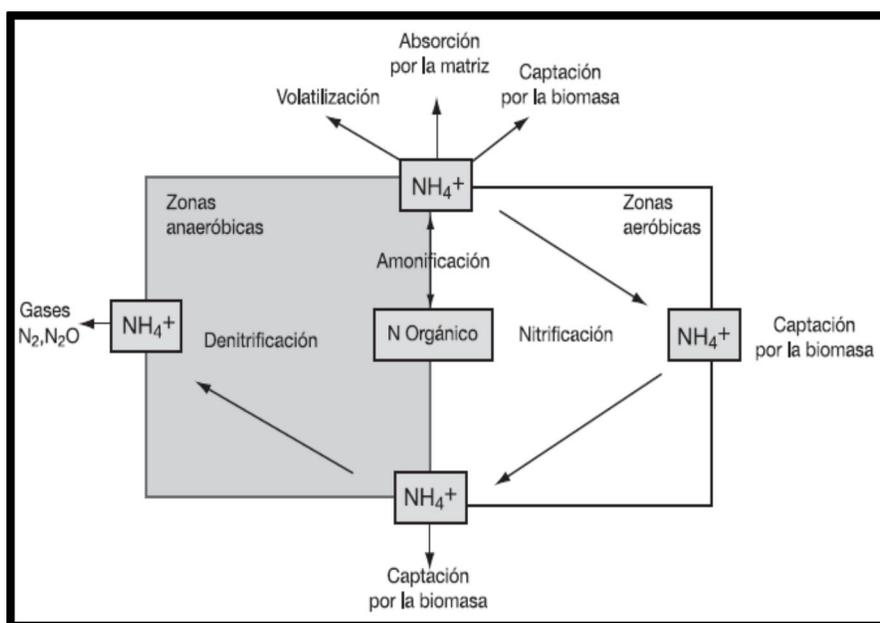


Figura 1.10. Diagrama del metabolismo del nitrógeno (Cooper, *et al.* 1996).

#### 1.5.4. REMOCIÓN DE FÓSFORO.

La eliminación del fósforo es complicada, siendo en los diseños más habituales entre un 10 y 20 % del fósforo inicial.

Los mecanismos de eliminación suelen ser de tipo biótico, asimilación por parte de las plantas y microorganismos, y abiótico, que incluye la adsorción por el medio granular. La pérdida de adsorción del material granular reduce la buena eficiencia inicial de eliminación del fósforo (Sánchez, 2010). El fósforo está presente en tres distintas formas: como ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. El último es un constituyente menor y como los polifosfatos, requieren una posterior descomposición a una forma de ortofosfato más asimilable.

Cerca del 25% del fósforo total fijado está presente como ortofosfatos tales como:  $PO_4^{3-}$ ,  $HPO_4^{2-}$ ,  $H_2PO_4^-$ ,  $H_3PO_4$ , que están disponibles para el metabolismo biológico inmediato. La remoción de ortofosfato ocurre principalmente como una consecuencia de la adsorción, complejación y reacciones de precipitación con Al, Fe, Ca y materiales arcillosos en la matriz del sustrato.

El consumo de fósforo por la planta puede ser considerado como insignificante comparado con los efectos de adsorción. Dependiendo del valor de pH dentro del sustrato, el fósforo está presente en la forma de sal soluble o minerales insolubles, lo cual significa que el fósforo puede ser transferido dentro de un humedal artificial. Debido al contenido de óxidos metálicos en el sustrato, la fijación de fósforo como fosfatos por medio de la adsorción varía (Wissing, 1998).

#### 1.5.5. REMOCIÓN DE METALES PESADOS.

Los metales traza tienen una alta afinidad para la adsorción y complejación con material orgánico y se acumulan en la matriz de un humedal artificial. Los metales pueden encontrarse en formas solubles o como partículas asociadas, siendo las primeras las formas más biodisponibles.

Los procesos físico químicos tales como la adsorción, precipitación, sedimentación, erosión y difusión, determinan la distribución entre las partículas y las fases disueltas. Los parámetros específicos que controlan la sedimentación en el agua incluyen la relación de flujo/sólidos suspendidos, condiciones óxicas/anóxicas, fuerza iónica, pH, contenidos de carbono orgánico particulados y disueltos, concentraciones de ligantes inorgánicos y orgánicos y movilización de metales mediante reacciones bioquímicas.

La adsorción involucra la unión de las partículas (o sustancias disueltas en solución), en partes de la planta o a la superficie de la matriz. En una reacción de intercambio catiónico, los iones metálicos positivamente cargados en solución se unen a los sitios negativamente cargados en la superficie del material adsorbente.

La fuerza atractiva para el intercambio catiónico es electrostática y la medida de esta fuerza depende de un amplio rango de factores. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de un material es una medida del número de puntos de unión por masa o volumen (Delgadillo, *et al.* 2010).

En cuanto a los procesos microbianos mediados, es necesario tener en cuenta que en un humedal artificial se pueden distinguir dos zonas: la zona aerobia, que contiene una alta proporción de material orgánico y la zona anaerobia, dominada por materia inorgánica. Entre estas dos principales zonas también existen zonas anóxicas.

La presencia de bacterias que oxidan metales en las zonas aerobias y bacterias que reducen sulfatos en las zonas aerobias, que causarán la precipitación de óxidos de metal y sulfatos respectivamente (Cooper, 1996).

#### 1.5.6. REMOCIÓN DE PATÓGENOS.

Los organismos importantes, desde el punto de vista de la salud pública son las bacterias patógenas y los virus. Todos los patógenos son capaces de sobrevivir al menos un corto tiempo en agua natural, y más aún, en agua con temperaturas más frías y con presencia de contaminación orgánica (como en las aguas residuales).

La remoción de estos microorganismos está basada en una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. Los factores físicos incluyen la filtración, sedimentación, agregación y acción de la radiación ultravioleta. Los mecanismos biológicos incluyen, como se mencionó antes, depredación y ataque por bacteriófagos y también la muerte (declinación *die-off*) (Delgadillo, *et al.* 2010).

Finalmente, los factores químicos son la oxidación, adsorción y la exposición a toxinas fijadas por otros microorganismos y exudadas por las raíces de las plantas (aunque la cantidad de estos antibióticos causa dudas respecto a su efectividad para afectar a los patógenos).

## 1.6. CONCENTRACIONES DE DISTINTOS CONSTITUYENTES EN HUMEDALES ARTIFICIALES.

A continuación se muestran las concentraciones de forma natural en humedales artificiales.

Tabla 1.5. Concentraciones naturales en humedales de flujo subsuperficial (EPA, 2000).

Parámetro	Unidad	Rango de concentración
DBO <sub>5</sub>	mg/L	1 a 10
SST	mg/L	1 a 6
Nitrógeno total	mg/L	1 a 3
Nitrógeno como NH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub>	mg/L	Menos de 0.1
Nitrógeno como NO <sub>3</sub>	mg/L	Menos de 0.1
Fósforo total	mg/ L	Menos de 0.2
Coliformes fecales	NMP/100ml	50 a 500

Tabla 1.6. Concentraciones naturales en humedales de flujo Libre superficial (U.S. EPA, 2000).

Parámetro	Unidad	Rango de concentración
DBO <sub>5</sub>	mg/L	1 a 10
SST	mg/L	1 a 6
Nitrógeno total	mg/L	1 a 3
Nitrógeno como NH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub>	mg/L	Menos de 0.1
Nitrógeno como NO <sub>3</sub>	mg/L	Menos de 0.1
Fósforo total	mg/ L	Menos de 0.2
Coliformes fecales	NMP/100ml	50 a 500

## 1.7. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Para conocer las ventajas y las desventajas que tienen los diferentes tipos de humedales artificiales, se presentan a continuación dos tablas comparativas.

El primero compara humedales artificiales de flujo superficial y de flujo subsuperficial (Tabla 1.7), y la segunda tabla compara humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal y vertical (Tabla 1.8).

Tabla 1.7. Comparación entre humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial (Delgadillo, et al. 2010).

	Flujo superficial	Flujo subsuperficial
Tratamiento	Tratamientos de flujos secundarios (aguas ya tratadas por otros medios, ej. Lagunas, biodiscos, fangos activados etc.).	Para tratar flujos primarios (aguas pre tratadas ej. Tanques, IMHOFF, pozos sépticos).
Operación	Opera con baja carga orgánica.	Altas tasas de carga orgánica.
Olor	Puede ser controlado.	No existe
Insectos	Control es caro.	No existe
Protección térmica	Mala, las bajas temperaturas afectan al proceso de remoción.	Buena, por acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo del agua mantiene una temperatura casi constante.
Área	Requieren superficies de mayor tamaño.	Requieren superficies de menor tamaño.
Costo	Menor costo en relación al subsuperficial.	Mayor costo debido al material granular que puede llegar a incrementar el precio hasta un 30%
Valor ecosistema	Mayor valor como ecosistema para la vida salvaje, el agua es accesible a la fauna.	Menor valor como ecosistema para la vida, el agua es difícilmente accesible a la fauna.
Usos generales	Son de restauración y creación de nuevos ecosistemas.	Tratamiento de aguas residuales, principalmente para casas aisladas y núcleos menores de 200 habitantes.
Operación	Son tratamientos adicionales a los sistemas convencionales (usadas para tratamiento terciario y mejoramiento de calidad del agua).	Puede usarse como tratamiento secundario.

En términos de costos, los humedales artificiales superficiales requieren menor inversión en relación a los de flujo subsuperficial ya que en los primeros no se incurren en los gastos mayores: la impermeabilización y la provisión y colocación del sustrato de grava.

Cabe destacar que los sistemas de flujo horizontal tienen mayor riesgo de colapsar en términos de circulación del agua (taponamiento del sustrato), por lo tanto requieren que el agua a tratarse tenga menor material en suspensión.

1.8. Comparación entre humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal y vertical (Delgadillo, et al. 2010).

	HORIZONTAL	VERTICAL
Funcionamiento	Continuo	Discontinuo
Estado oxidación	Más reducido	Más oxidado
Eficiencia	Más superficie	Menos superficie
Carga superficial	4-6 g DBO <sub>5</sub> /m <sup>2</sup> -d	20-40 g DBO <sub>5</sub> /m <sup>2</sup> -d
Nitrificación	Complicada	Se consigue
Operación	sencilla	Más compleja

## 1.8. MODELOS.

Un modelo es un bosquejo que representa un conjunto real con cierto grado de precisión y en la forma más completa posible, pero sin pretender aportar una réplica de lo que existe en la realidad. Los modelos son muy útiles para describir, explicar o comprender mejor la realidad, cuando es imposible trabajar directamente en ella.

Un modelo puede ser un aparato, un plan, un diagrama, una ecuación, un programa de computadora o incluso sólo una imagen mental; así como también modelos físicos, matemáticos o conceptuales, y su valor radica en la sugerencia de cómo funcionan o podrían funcionar las cosas.

El uso de modelos, llamado también "modelación", es un instrumento muy común en el estudio de sistemas de toda índole. En este trabajo sobre los sistemas de humedales artificiales, los modelos son especialmente importantes porque ellos ayudan a comprender el funcionamiento de estos sistemas.

El empleo de modelos facilita el estudio de los sistemas, aún cuando éstos puedan contener muchos componentes y mostrar numerosas interacciones como puede ocurrir si se trata de conjuntos bastante complejos y de gran tamaño.

El trabajo de modelación constituye una actividad técnica como cualquiera otra, y dicha labor puede ser sencilla o compleja según el tipo de problema específico que deba analizarse.

### 1.8.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS.

Hay diversos tipos de modelos en uso y difieren entre ellos según el propósito que se persiga. En la figura 1.11 se muestra un diagrama de la clasificación de un modelo. La diversidad va desde el más básico, hasta modelos muy complicados.

En una clasificación de acuerdo a lo mencionado anteriormente, se ha tratado de distinguir entre los modelos abstractos que se forman en la mente, los modelos simbólicos que se emplean para tener un registro de los modelos abstractos y los modelos físicos o matemáticos, que se utilizan en oportunidades como substitutos de situaciones del mundo real (Sánchez, 2005).

En este caso se utilizó un modelo físico para la construcción de un humedal artificial.

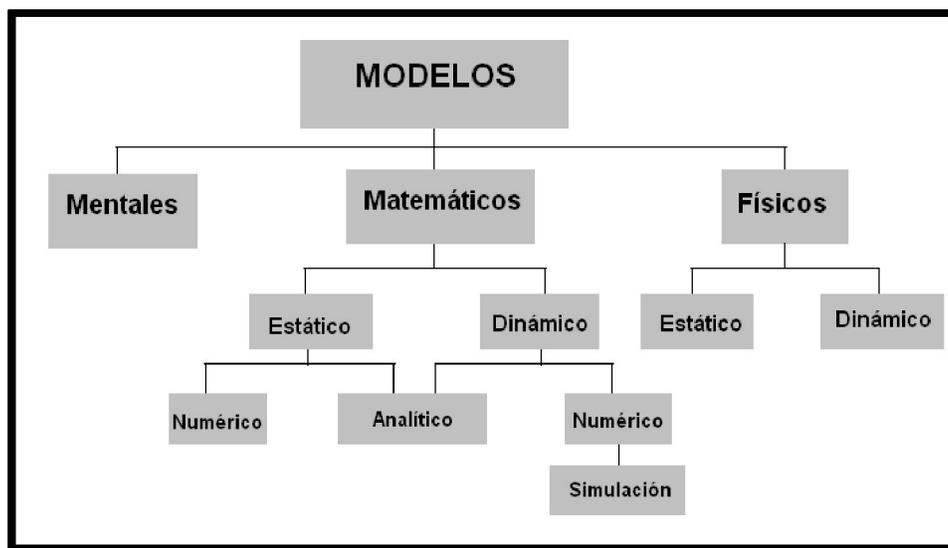


Figura 1.11. Clasificación de Modelos (Sánchez, 2005).

#### 1.8.1.1. MODELO MENTAL.

Es una simple explicación con palabras de lo fundamental de una realidad. En la resolución de cualquier problema del mundo real, se debe encontrar la forma de describir, explicar o bien predecir la parte de la realidad en que reside el problema. Como la realidad permanece en el exterior, lo único que se puede hacer es crear en el cerebro, ideas o pensamientos de la realidad. De este modo los pensamientos son solo abstracciones de la realidad. A este tipo de modelo se le llama modelo mental o verbal (Sánchez, 2005).

#### 1.8.1.2. MODELO FÍSICO.

El modelo físico es un dispositivo o proceso real que se comporta igual al fenómeno del cual se tomó el modelo y que se espera aprender algo de él. Puede referirse a una

construcción teórica o a un montaje con objetos reales que trata de reproducir el comportamiento de algunos aspectos de un sistema físico o mecánico más complejo.

De tal manera, es mucho más fácil trabajar con un modelo físico que con lo que él representa en virtud de su tamaño más pequeño, menos caro en términos de material y más corto en duración.

En estos modelos físicos se pueden realizar modelos a escala o en forma natural, a escala menor, e escala mayor, sirven para hacer demostraciones de procesos como para hacer experimentos nuevos (AAAS, 1990).

Experimentos en los cuales las variables están controladas estrechamente pueden hacerse en un modelo físico, con la esperanza de que la respuesta de éste sea igual a la del fenómeno en escala real.

Pero no siempre los modelos a escala van a ser más pequeños y más económicos. Un modelo puede hacerse a escala en tiempo, así como en tamaño y materiales.

No se puede esperar que la conducta de un modelo físico siempre represente la del fenómeno en escala real con precisión completa, ni siquiera en el conjunto limitado de características que se están estudiando (AAAS, 1990).

### 1.8.1.2.1. TIPOS DE MODELOS FÍSICOS

#### a) Estáticos.

Corresponden a los modelos a escala y es que en ellos no se toma en cuenta el tiempo dentro del proceso, por ejemplo: los modelos de juegos, modelos donde se observa las ganancias de una empresa.

Ejemplo: Arquitectónicos: líneas de teléfono, tubos de agua

#### b) Dinámicos.

Se encargan de representar una propiedad determinada de un objeto o sistema. Se toma en cuenta la variación del tiempo, ejemplo: la variación de la temperatura, del aire durante un día, movimiento anual de las finanzas de una empresa.

Ejemplo: Laboratorio de química: reacción entre elementos

### 1.8.1.3. MODELO MATEMÁTICO.

Un Modelo Matemático describe un problema en forma mucho más concisa. Esta característica tiende a hacer más comprensible toda la estructura del problema y ayuda a

revelar las relaciones importantes causa-efecto. En segundo lugar, indica con mayor claridad que datos adicionales son importantes para el análisis.

También facilita el manejo del problema en su totalidad y, al mismo tiempo, el estudio de sus interrelaciones. Por último, un modelo matemático forma puente para el empleo de técnicas matemáticas y computadoras de alto poder para analizar el problema (Hilliier y Lieberman, 2006).

En los modelos numéricos se usan magnitudes y ecuaciones matemáticas para describir con exactitud los distintos componentes del sistema y las relaciones entre ellos.

#### 1.8.1.3.1. TIPOS DE MODELOS MATEMÁTICOS

1. Modelo Cuantitativo: es aquel cuyos principales símbolos representan números. Son los más comunes y útiles en los negocios.
2. Modelo Cualitativo: Representan símbolos en su mayoría a cualidades no numéricas. Una fuente importante es la teoría de conjuntos.
3. Modelo Probabilístico: Están basados en la estadística y probabilidades (donde se incorpora la incertidumbre que por lo general acompaña a las observaciones de eventos reales).
4. Modelo Determinístico: Corresponde a aquel modelo cuantitativo que no contiene consideraciones probabilísticas.
5. Modelo Descriptivo: Cuando el modelo simplemente describe una situación del mundo real en términos matemáticos, descripción que puede emplearse para exponer una situación con mayor claridad, para indicar como pueden reajustarse o aun para determinar los valores de ciertos aspectos de la situación.
6. Modelo Optimizador: Corresponde al modelo ideado para seleccionar entre varias alternativas, de acuerdo a determinados criterios, la más óptima (Sánchez, 2005).

### 1.9. ESTADO DEL ARTE DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES A ESCALA.

Los humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial (HA FSSH) son sistemas extensivos que se utilizan para el tratamiento de aguas residuales, que son particularmente adecuadas para el saneamiento de pequeñas comunidades. La eficiencia de remoción del contaminante alcanzado por los humedales (como la eliminación de amonio) depende en gran medida sobre el estado redox de los sistemas. En consecuencia,

más condiciones oxidantes conducen a una mayor eficiencia de remoción de contaminantes que se producen principalmente por medio de reacciones anaerobias.

La profundidad del agua es uno de los factores principales de diseño en los humedales de flujo horizontal subsuperficial ya que influyen en el estado redox del sistema. Si la profundidad es menor, serán mayores las condiciones oxidantes en el lecho del humedal (Pedescoll, *et al.* 2011).

En la actualidad, los humedales artificiales FH se utilizan para tratar otros tipos de aguas residuales y se han ido diseñado para tratar aguas residuales domésticas a si como para aplicaciones industriales que incluyen las aguas residuales de las refinerías de petróleo, fábricas de productos químicos, la producción de papel, industrias textiles y curtiembres, mataderos, destilerías, industrias, bodegas, en productos farmacéuticos y sustancias químicas (Vymazal, 2009).

Las actividades humanas han dado y siguen dando origen a varios tipos de humedales de interés. Con el fin de evaluar el tratamiento de las aguas residuales se crean humedales artificiales de pequeña escala reduciendo las grandes extensiones que ocupan pero sin dejar de tratar el agua residual

En la planta de tratamiento de aguas residuales en Morgantown en el norte de Virginia Occidental se crearon dos diseños de tratamiento de pequeña escala (una mezcla de *Typha*, *Scirpus*, *Juncus* y especies; testigo sin cubierta vegetal) se sembraron en dos profundidades (45 o 60 cm) con grava. Cada humedal recibió 19 L/día de aguas residuales domésticas tratadas.

Fueron controlados (muestras de entrada y de salida) sobre una base mensual durante un período de 2 años para el pH, sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno de 5 días (DBO<sub>5</sub>), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), oxígeno disuelto (OD) y la conductividad. Los análisis microbiológicos incluyeron la enumeración de coliformes fecales, enterococos, Salmonella, Shigella, Yersinia y colifagos.

El objetivo en este estudio fue determinar la eficacia de un pequeño humedal construido artificialmente, diseñado para el servicio de los hogares individuales para el retiro de las principales características físicas, químicas y contaminantes biológicos en condiciones climáticas del sitio. En los estudios, se observó la eliminación sustancial de la SST, DBO<sub>5</sub>, NTK, amoníaco, y coliformes fecales en los humedales artificiales.

La evaluación se extendió a 2 años con el fin de comprender mejor la eficacia a largo plazo y la estabilidad potencial del tratamiento de los humedales, con un esfuerzo especial dirigido a evaluar el potencial de la eliminación de microorganismos patógenos que representan una amenaza para la salud del público (Hencha y Colemanb, 2003).

En la Facultad de Química de la UNAM, realizado en el Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental (2008), se realizaron experimentos con reactores a escala de laboratorio en un sistema modelo de humedales artificiales para evaluar el papel que juegan las plantas (*Phragmites australis* o carrizo) en sus primeras etapas de

crecimiento en la remoción de contaminantes medidos como demanda química de oxígeno soluble ( $DQO_{\text{soluble}}$ ) y como conductividad eléctrica (CE). Los objetivos de esta investigación fueron los de evaluar el efecto de la fotosíntesis de una hidrofita en sus primeras etapas de crecimiento sobre las eficiencias de remoción de contaminantes medidos como  $DQO_{\text{soluble}}$  y la variación de la conductividad eléctrica a diferentes profundidades en reactores biológicos a escala de laboratorio.

Se construyeron dos reactores de 25 litros, con un volumen de trabajo de 12.5 L empleando recipientes de plástico (uno con un brote de la planta de 1.5 cm de altura, RA1 y el segundo, como control, RA2, sin planta), empacados con escoria volcánica (tezontle). Los reactores fueron iluminados durante 16 horas por día empleando lámparas de tubos fluorescentes con características similares a la luz natural. Ambos se mantuvieron inundados para eliminar el ingreso de aire por convección. Se utilizó agua residual sintética preparada diariamente disolviendo sacarosa,  $(NH_4)_2SO_4$  y  $Na_3PO_4$  con una  $DQO_{\text{soluble}}$  experimental promedio de 450 mg/L.

El tiempo de residencia hidráulica (TRH) de los dos reactores fue de 1.8 días. Se tomaron muestras de agua residual a la salida de cada reactor y a las profundidades de 2, 10 y 30 cm respecto al nivel del agua de los reactores para poder observar el perfil de remoción de la  $DQO_{\text{soluble}}$  y la CE empleando metodología estandarizada para la determinación de la  $DQO_{\text{soluble}}$  y para la medición de la CE se empleó un electrodo comercial.

Los resultados obtenidos al alcanzar la etapa estable, cuando la hidrofita tenía aproximadamente 50 cm de altura, indican que el reactor (RA1) mostró los más altos valores de remoción de  $DQO_{\text{soluble}}$  y CE (54 y 9.3% respectivamente) con respecto al reactor control (RA2) sin planta (38.1 y 4.4%, respectivamente). El análisis de los resultados indica que estas diferencias fueron estadísticamente significativas ( $P < 0.05$ ). Los valores de  $DQO_{\text{soluble}}$  y CE disminuyen a medida que la profundidad es mayor siendo mayor la remoción de ambos parámetros a la profundidad de 10 cm para el reactor con planta resaltando la importancia de la zona radicular de la planta en la eficiencia de remoción del sistema (Guido y Durán-de-Bazúa, 2008).

Por otro lado, en la División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez se realizó el diseño hidráulico de un humedal artificial a nivel laboratorio, con el fin de estudiar su comportamiento, considerando el régimen de flujo en un medio poroso establecido en la Ley de Darcy. Asimismo, se analizó el efecto potencial del sistema como fuente de tratamiento de bajo consumo de energía y bajo costo, utilizando plantas de *Gossypium herbaceum* y diferentes sustratos de piedra pómez y grava. Para la determinación del comportamiento del humedal se utilizó como trazador el  $KMnO_4$  a diferentes caudales para cada uno de los sustratos. El comportamiento del sistema que se presentó en el caudal más bajo fue de flujo pistón (FPI) en los otros dos caudales se presentó una mezcla de FPI y tanque agitado (TAC). (Pérez, *et al.* No encontré el año).

La ley de Darcy, describe el régimen de flujo en un medio poroso que es lo generalmente aceptado para el diseño de humedales de flujo subsuperficial (FSS) usando suelo y arena como medio del lecho. El mayor nivel de turbulencia en el flujo ocurre en lechos que usan piedra muy gruesa. Este asume condiciones de flujo laminar, pero el flujo turbulento puede darse con gravas muy gruesas cuando el diseño usa un gradiente hidráulico alto. La ley de Darcy también asume que el flujo en el sistema es constante y uniforme, pero en la realidad puede variar por la precipitación, evaporación y filtración; así como por los cortocircuitos en el flujo que pueden llegar a presentarse por una desigual porosidad o mala construcción.

Un humedal artificial a escala piloto de flujo subsuperficial horizontal fue construido y operado por tres años. El propósito de este estudio fue examinar el rendimiento de este tipo de humedales artificiales y de evaluar los diferentes efectos de regímenes de alimentación de las aguas residuales detalladas en el rendimiento del sistema.

El experimento se parte de un experimento más grande con cinco unidades de los humedales similares, presentados por Akrotos y Tsihrintzis (2007) en la Universidad Demócrito de Tracia, Xanthi, Grecia (Laboratorio de Ingeniería Ecológica y Tecnología, Departamento de Ingeniería Ambiental, Escuela de Ingeniería).

El humedal, con el nombre en clave de CO-R, tenía una sección transversal rectangular, con dimensiones de 3 m de longitud, 0.75 m de ancho y 1 m de profundidad, operado continuamente desde enero del 2004 hasta febrero del 2007. La unidad contiene cantos rodados obtenidos de un río, ( $D_{50} = 90$  mm, rango de 30-180 mm) con un total espesor de 45 cm, fue plantada de caña común (*Phragmites australis*). Introduciendo a la unidad Agua residual sintética, durante los dos primeros años de funcionamiento (período A) un punto de entrada fue utilizado en el extremo superior de la unidad. Durante el tercer año de funcionamiento (período B), fue alimentada por aguas residuales. Estas aguas residuales se introdujeron a la unidad a través de tres puntos de entrada: una en el extremo superior de la unidad de longitud y los otros dos a 1/3 y 2/3 de la unidad de longitud.

Dos programas de alimentación de aguas residuales fueron examinados durante el segundo período de trabajo: 33:33:33 y 60:25:15. Tres TRH (días 6, 8 y 14) se aplicaron, las temperaturas de las aguas residuales variada 6.0 a 25.0 °C. En general, la adopción de paso a la alimentación en un HA FSSH puede ser positiva si un sistema apropiado es seleccionado. De hecho, la remoción de materia orgánica ( $DBO_5$  y DQO), nitrógeno (NTK y amoníaco) y fósforo (fósforo total y orto-fosfato) se mejoro en la etapa de alimentación. Plan 60:25:15, mientras que el otro esquema 33:33:33 afectó negativamente el desempeño de los humedales (Stefanakis, *et al.* 2011).

En Cataluña (España), una variedad de sistemas diferentes se han construido para el tratamiento de residuos líquidos, de las comunidades pequeñas. Algunas de estas plantas

de tratamiento de aguas residuales incluyen humedales artificiales con flujo subsuperficial horizontal (HA FSSH) como tratamiento secundario. El presente estudio describe y caracteriza el comportamiento de los sistemas secundarios de humedales artificiales FSSH después de un período de funcionamiento inicial de 8 años. Las concentraciones de los efluentes de la Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ), Sólidos Suspendidos Totales (SST), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) se analizaron estadísticamente, y las eficiencias de remoción de las aguas residuales en todas las fases del tratamiento se calcularon. Las funciones de probabilidad acumulada de estos parámetros se evaluaron para determinar la influencia de dos tipos diferentes de unidades de pulido en el rendimiento global: (a) sólo los sistemas laguna y (b) sistemas de lagunas con FSSH.

El análisis estadístico indica que el buen desempeño de  $DBO_5$  y SST. En el primer caso, las concentraciones medidas por debajo de 25 mg / L se encontró en 9 de las 11 plantas analizadas y eficiencias de remoción entre el 78 y el 96% se observaron. En el segundo caso, las concentraciones medidas por debajo de 35 mg / L se encontraron en 8 de las 11 plantas, y eficiencias de remoción fueron entre el 65 y el 88%. Para los nutrientes, la eficiencia de remoción de NT y PT se encontraba en el rango de 48-66% y 39-58%, respectivamente (Vera, *et al.* 2011).

En la universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Fue teóricamente optimizado un humedal de flujo subsuperficial, la hipótesis basada en los procesos, incorpora dos diferentes modificaciones. La primera sugiere un mejor desempeño al generar tres zonas diferentes: óxica, anóxica y anaerobia con el objetivo de enriquecer las reacciones dentro de la zona de tratamiento que permite la transformación de los contaminantes mientras que la segunda consistió en la incorporación arcilla montmorillonita para así utilizar su alta capacidad de intercambio iónico en la retención de metales pesados. Evaluándose la remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo, comparándose el desempeño del humedal optimizado frente a los resultados del humedal clásico.

De esta forma el diseño optimizado buscaba configuraciones de diseño (cambios en la altura del medio) así como combinaciones de materiales que enriquecen las reacciones dentro del medio (medio poroso, macrófitas y medio de soporte de impermeabilización).

La estructura de los humedales se construyó en lámina de hierro y vidrio templado con el objetivo de observar el crecimiento de las raíces de las macrófitas y la población asociada al medio.

El primer humedal con un diseño clásico, tuvo una relación largo ancho 3:1 y 0.6 m de profundidad; utilizó como base arcilla caolinita, con una baja capacidad de intercambio iónico (3 a 5 meq/100 g) para impermeabilizar y material en el medio de soporte con una porosidad de 0.7 y un diámetro medio de 5 cm. La planta usada en este sistema fue Junco (*Juncus effusus-scirpus*).



Figura 1.12. Humedal clásico. Vegetación Junco (Angarita, 2005).

El segundo con un diseño optimizado, tuvo una relación largo ancho 3:1 y diferentes profundidades escalonadas construidas con arcilla montmorillonita como material impermeabilizante de gran capacidad de intercambio iónico (80-200 meq/100 g); la distribución de la arcilla de la entrada a la salida fue 0.40, 0.30, 0.20, 0.10 m. El material del medio de soporte fue grava de río con una porosidad promedio de 0.5 y diámetro medio de 2.5 cms y se usaron tres plantas Botoncillo (*Bidens labeis*), Barbasco del pantano (*Polygonum hydropiperoides*), y Junco simultáneamente.



Figura 1.13. Humedal Optimizado diferentes profundidades del lecho. En la entrada Barbasco del pantano, en la zona del centro se encuentra el Botoncillo y a la salida está el Junco (Angarita, 2005).

Ambos humedales fueron sometidos a las mismas condiciones climáticas y de agua residual.

Cada prototipo fue alimentado semanalmente con un litro de agua con una concentración de 50 ppm de níquel, y 5 kg de fertilizante. El agua residual sintética buscaba representar el agua residual urbana, para lo cual se utilizaron diferentes elementos como agua destilada, 50 mg/L leche en polvo, 200 mg/L de cáscaras de fruta, 100 mg/L de urea y de fenol. De esta manera se obtuvo la caracterización de la siguiente Tabla 1.6.

Tabla 1.9. Composición del agua residual sintética (Angarita, 2007).

Características agua residual sintética	
Indicador	Concentración mg/L
DQO	300
SST	94
P como Fosfatos	27.5
NTK	92
Fenol	0.5

De esta forma el análisis de los resultados se realizó de forma comparativa, mostrando que la eficiencia para todos los procesos fue mayor en el humedal optimizado. Se estudió separadamente el comportamiento de tres macrófitas típicas de la sabana de Bogotá y el de la arcilla montmorillonita en la retención de metales pesados (Angarita, 2007).

Estos son algunos artículos de humedales artificiales de flujo subsuperficial Horizontal que se han realizado a nivel mundial y que utilizamos en esta investigación.

## CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA.

---

### 2.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL A ESCALA BANCO DE LABORATORIO.

El diseño hidráulico de un humedal es crítico para obtener buenos rendimientos en la eficiencia de depuración. En los modelos de diseño se asume un flujo en condiciones uniformes y de tipo pistón.

Para llegar a poder intentar acercarse al modelo ideal (flujo pistón) es muy importante realizar un cuidadoso diseño hidráulico y los métodos constructivos apropiados.

El flujo del agua en el interior del humedal debe romper las resistencias creadas por la vegetación, capa de sedimentos, raíces y sólidos acumulados en los humedales.

La energía para romper esta resistencia está dada por la pérdida de carga entre el ingreso y salida del humedal, para dar esta energía se le asigna al fondo del humedal una pendiente con una salida de altura variable (Mena, 2010).

Para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial en general se debe tomar en cuenta que:

1. Se consideran reactores biológicos.
2. Se considera que el flujo a través del medio poroso es flujo pistón y en forma uniforme, por lo que puede ser descrito mediante la ley de Darcy (Delgadillo, *et al.* 2010).

A continuación se describe la metodología que se siguió para diseñar, construir y arrancar los humedales artificiales a escala banco de laboratorio.

### 2.1.1. CÁLCULO DEL ÁREA SUPERFICIAL.

El cálculo del área superficial se realiza en función al parámetro contaminante que se desea disminuir o remover como sugiere la metodología de la Agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 1993). Para este trabajo, el constituyente de importancia fue la materia orgánica soluble, medida como Demanda Química de Oxígeno (DQO).

$$As = L \times W = \frac{\ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right) \times Q}{K_t \times \eta \times d} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

$\eta$  = Porosidad efectiva del medio (%)

L = Longitud del humedal (m)

W = Ancho del humedal (m)

$C_e$  = Concentración en el efluente (mg/L)

$C_o$  = Concentración en el afluente (mg/L)

$K_t$  = Constante a la temperatura del agua residual (días<sup>-1</sup>)

t = Tiempo hidráulico de retención (días)

d = Profundidad del agua (m)

Q = Caudal de diseño (m<sup>3</sup>/día)

### 2.1.2. PROFUNDIDAD DEL HUMEDAL.

La profundidad de un humedal artificial generalmente varía de 0.3 a 1 m, pero el valor más empleado es de 0.6 m (EPA, 1993, Arias, 2004, Llagas y Guadalupe 2006, Delgadillo, *et al.* 2010, Pedescoll, *et al.* 2011).

La profundidad del agua por tratarse de humedales de flujo subsuperficial debe ser aproximadamente del 95% de la profundidad del medio de soporte (EPA, 1993).

### 2.1.3. PENDIENTE.

Se sugiere una pendiente de 0.1 a 1%, siendo el valor usual de 0.5% (Delgadillo, *et al.* 2010, Arias, 2004).

#### 2.1.4. SUSTRATO.

Antes del inicio del diseño se recomienda realizar pruebas de conductividad y porosidad del sustrato, esto para definir exactamente el tipo de material a emplearse. Asimismo, se recomienda multiplicar el valor de la conductividad por 1/3 o bien por 0.1 (10%) para evitar problemas de atascamiento por acumulación de lodos, raíces y otros (Delgadillo, *et al.* 2010).

El uso de material pequeño como lo es la grava fina, tiene algunas ventajas ya que hay mayor área para el tratamiento y los vacíos de menor tamaño son más adecuados para el desarrollo de las raíces de las plantas, a si como asegura el flujo laminar (Navarro 2000).

##### 2.1.4.1. DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD DEL MEDIO DE SOPORTE.

La determinación de la porosidad de cada medio de soporte se llevó a cabo mediante el método propuesto por Kadlec y Knighth en 1996, el cual consiste en llenar una probeta graduada de 1000 mL con el medio de interés y posteriormente agregar agua, midiendo el volumen gastado. Con los datos obtenidos se emplea la ecuación 2.

Cálculo de la porosidad del medio de soporte

$$\eta = \frac{V}{V_T} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

$\eta$  = porosidad

V = volumen gastado (ml)

$V_T$  = Volumen total (ml)

#### 2.1.5. RELACIÓN LARGO - ANCHO.

La relación largo-ancho del humedal tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del agua. En teoría, grandes relaciones largo-ancho (10:1 o mayores) asegurarían un flujo pistón, pero tienen el inconveniente de que cuanto mayor es la relación largo-ancho, menor es el área transversal al flujo y, por lo tanto, es más susceptible de colmatarse (Mena, 2010).

Los sistemas de flujo subsuperficial se diseñan con el objeto de proporcionar tratamiento secundario o avanzado, y requieren condiciones de flujo uniformes para alcanzar los

rendimientos esperados. Esto se logra en sistemas de tamaño pequeño a moderado con tuberías de recolección perforadas que se extienden a lo ancho de todo el humedal, tanto para la entrada como para la salida. Para garantizar el flujo subsuperficial los sistemas se encuentran rellenos de material granular, en donde el nivel de agua se mantiene debajo de la superficie de esta.

La forma del sistema debe asegurar que el agua circule a baja velocidad y hacer efectivo el tiempo de residencia y maximizar la superficie de contacto de la lámina de agua y el aire para favorecer la entrada de oxígeno.

### 2.1.6. TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO.

El tiempo de retención hidráulico a su vez, se puede calcular a partir de la Ecuación 3:

$$t = \frac{\eta \times L \times W \times d}{Q} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

$\eta$  = Porosidad efectiva del medio (%)

L = Longitud del humedal (m)

W = Ancho del humedal (m)

d = Profundidad del agua (m)

Q = Caudal de diseño (m<sup>3</sup>/día)

### 2.1.7. TEMPERATURA DEL AGUA

Según la EPA (2000), en sistemas con un tiempo hidráulico de retención mayor a 10 días, la temperatura del agua se acerca a la temperatura del aire, excepto cuando se tienen temperaturas bajo cero, para tiempos de retención más cortos es necesario calcular esta temperatura.

### 2.1.8. VEGETACIÓN

Existen tres categorías de plantas útiles en procesos de purificación: flotantes, emergentes y sumergidas. Las plantas flotantes tienen su parte fotosintética sobre la superficie del

agua con sus raíces extendidas bajo ella, la penetración de la luz solar en el agua es reducida y la transferencia de gas entre agua y atmósfera es limitada.

Las plantas emergentes están enraizadas en los sedimentos y se desarrollan sobrepasando la superficie, éstas también reducen la penetración de la luz disminuyendo la presencia de algas y la transferencia de aire pero en menor grado de las flotantes, generando un sistema parcialmente aerobio. Las plantas sumergidas incluyendo las algas, pueden ser suspendidas en el agua o enraizadas en el sustrato y durante las horas de sol oxigenan el agua (Navarro, 2000).

Debido a la existencia de un medio poroso y a que el nivel del agua se encuentra por debajo de este medio, los humedales de flujo subsuperficial a diferencia de los humedales de flujo libre superficial, no pueden utilizar plantas flotantes ni sumergidas, por tal razón solo deben emplearse plantas emergentes.

Las raíces de estas plantas son las encargadas de proporcionar un hábitat adecuado para los microorganismos, de forma tal, que estas absorben y metabolizan los azúcares y aminoácidos que estos producen debido al consumo de minerales y otros químicos que contiene el agua y al mismo tiempo les proporcionan oxígeno y nutrientes (Navarro, 2000).

Un factor muy importante en el momento de seleccionar las plantas, tiene que ver con la profundidad de las raíces, ya que estas no pueden superar la profundidad del medio.

Las plantas que se pueden utilizar en los humedales es muy variada, el criterio general es utilizar plantas ornamentales o estéticas que requieran de humedad para su desarrollo.

Generalmente se les puede localizar entre las conocidas como plantas acuáticas. Tal es el caso de plantas ornamentales como el alcatraz, ave de paraíso, lirio amarillo, cuna de moisés, platanillo, entre otras. Entre las plantas estéticas acuáticas de ribera o palustres pueden utilizarse colomos, papiro de Egipto, oreja de elefante, entre otras.

Al final el humedal tendrá una apariencia estética sin causar molestia de malos olores y generando, un espacio decorativo armonizando el entorno (de Anda, 2007).

## 2.1.8. 1. SELECCIÓN DE VEGETACIÓN

La selección de la vegetación que se va a usar en un sistema de humedales debe tener las siguientes recomendaciones:

1. Las especies deben ser colonizadoras activas, con eficaz extensión del sistema de rizomas.
2. Deben ser especies que alcancen una biomasa considerable por unidad de superficie para conseguir la máxima asimilación de nutrientes.

3. La biomasa subterránea debe poseer una gran superficie específica para potenciar el crecimiento de la biopelícula.
4. Deben disponer de un sistema eficaz de transporte de oxígeno hacia las partes subterráneas para promover la degradación aerobia y la nitrificación.
5. Se debe tratar de especies que puedan crecer fácilmente en las condiciones ambientales del sistema proyectado.
6. Debe tratarse de especies con una elevada productividad.
7. Las especies deben tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales.

## 2.2. ARRANQUE DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

Los humedales se colocaron en el laboratorio de Ingeniería Ambiental del Centro Tecnológico de la FES Aragón. Una vez instalados, se inició el arranque de los mismos, el cual consistió en tres etapas:

- Fase de adaptación.
- Primer período de arranque.
- Segundo período de arranque.

### 2.2.1. FASE DE ADAPTACIÓN.

El afluente a los humedales consiste únicamente en agua potable para lograr que la vegetación recién trasplantada se adapte a sus nuevas condiciones ambientales.

Se observa que las plantas no sufran alguna modificación adversa como muerte de hojas y flores, decoloración del follaje, etc.

### 2.2.2. PRIMER PERÍODO DE ARRANQUE.

Una vez adaptados, se alimentan con agua residual sintética la cual se prepara diariamente disolviendo 1g de leche en polvo y 2g de fertilizante en un contenedor con 10L de agua de la llave (figura 2.1).

La composición del fertilizante es la siguiente: 11% de nitrógeno amoniacal, 10% de fósforo como  $P_2O_5$  y 12% de potasio como  $K_2O$ .

Durante este tiempo, se realizan análisis fisicoquímicos de los efluentes y del afluente, para verificar que el sistema remueva el contaminante de interés y que se establezca poco a poco, es decir, que la calidad de los efluentes no presente fuertes variaciones a lo largo del tiempo.



(a)

(b)

Figura 2.1 peso de la leche en polvo (a) y el fertilizante (b)

### 2.2.3. SEGUNDO PERÍODO DE ARRANQUE.

Posteriormente se eleva la concentración de los constituyentes del agua residual sintética hasta que se obtenga una DQO similar a la de una agua residual doméstica de fuerza media o bien a la calidad de un efluente primario de tratamiento, y se observa que la vegetación siga conservando sus características.

Se realizan los análisis fisicoquímicos pertinentes para determinar que los sistemas se han estabilizado y poder estimar las eficiencias de remoción de cada humedal.

### 2.3. ANÁLISIS DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS.

Los análisis de laboratorio de cada uno de los parámetros de interés se llevaron a cabo de acuerdo a los Métodos Estandarizado (AWWA, 1982), y que se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros determinados al agua residual de la FES Aragón.

PARÁMETRO	TÉCNICA ANALÍTICA	EQUIPO
Conductividad Eléctrica	Potenciométrico	Oxímetro YSI 85
DQO total	Colorimétrico	Colorímetro DR/890 marca HACH
Materia flotante	Tamizado	
Nitrógeno Amoniacal	Colorimétrica	Colorímetro DR/890 marca HACH
Nitritos	Colorimétrica	Colorímetro DR/890 marca HACH
Nitratos	Colorimétrica	Colorímetro DR/890 marca HACH
Oxígeno disuelto	Potenciométrica	Oxímetro YSI 85

Tabla 2.1. Parámetros determinados al agua residual de la FES Aragón. Cont.

PARÁMETRO	TÉCNICA ANALÍTICA	EQUIPO
pH	Potenciométrica	OAKTON Modelo 510 S
Fosfatos	Colorimétrica	Colorímetro DR/890 marca HACH
Sulfatos	Colorimétrica	
Temperatura		Oxímetro YSI 85
Turbidez	Nefelométrica	Turbidímetro ELE PAQUALAB Modelo 198.

Para cada parámetro se hacen tres réplicas de cada punto de muestreo.

## CAPÍTULO 3 RESULTADOS.

---

### 3.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS HUMEDALES A ESCALA BANCO DE LABORATORIO.

Con base en la remoción de DQO soluble, se diseñaron 3 humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial a escala banco de laboratorio, los cuales se rellenaron con 3 distintos sustratos: piedra de río (R), tezontle (T) y piedra pómez (P) con el fin de evaluar la influencia del sustrato en la remoción de este constituyente.

El afluente a los 3 humedales se suministra por medio de una caja distribuidora de 20 cm de ancho por 60 cm de largo con una profundidad de 20cm, colocada en un nivel superior a los mismos, de la cual salen tres tuberías de plástico con un diámetro de 3 mm de diámetro. El flujo puede regularse mediante una pequeña válvula. (Figura 3.1)



Figura 3.1. Caja distribuidora del afluente a los humedales.

De igual modo, el efluente de cada humedal se recolectó en recipientes independientes para cada uno como se muestra en la figura 3.2. , con las siguientes características: 20 cm x 20 cm x 20 cm, pegados con silicón comercial. El nivel de agua se controló usando unas mangueras flexibles de látex puestas a 2 cm abajo del nivel superior del material de soporte, manteniendo inundado el sistema.



Figura 3.2. Captación de efluentes de los humedales.

### 3.1.1. CÁLCULO DEL ÁREA SUPERFICIAL.

Los humedales se construyeron en vidrio de 60 cm de largo por 40 cm de profundidad y 20 cm de ancho (piedra de Río y Tezontle), (Guido y Durán de Bazúa, 2008). De 58 cm de largo por 40 cm de altura y 20 cm de ancho, (piedra Pómez). Éste último debido a algunos accidentes al cortarlo se perdieron 2 cm en el largo. Dada la escases de material no pudo construirse uno nuevo. Todos se reforzaron con ángulo de aluminio.



Figura 3.3. Humedales Artificiales.

Con base en la ecuación 1 se determinó el área superficial de los humedales

$$As = L \times W = 0.60m(0.20m) = 0.120 m^2 \quad \text{Para T y R.}$$

$$As = 0.58m(0.20m) = 0.116 m^2 \quad \text{Para P}$$

### 3.1.2. PROFUNDIDAD DEL HUMEDAL.

Los humedales construidos a escala banco de laboratorio tuvieron una profundidad promedio del sustrato de 0.3 m. (Guido y Durán de Bazúa, 2008).



Figura 3.4. Profundidad del sustrato en el humedal con soporte de piedra de río.

### 3.1.3. PENDIENTE.

La pendiente utilizada fue ligeramente mayor al 1%, es decir, 1.3% hecha a base de arcilla.

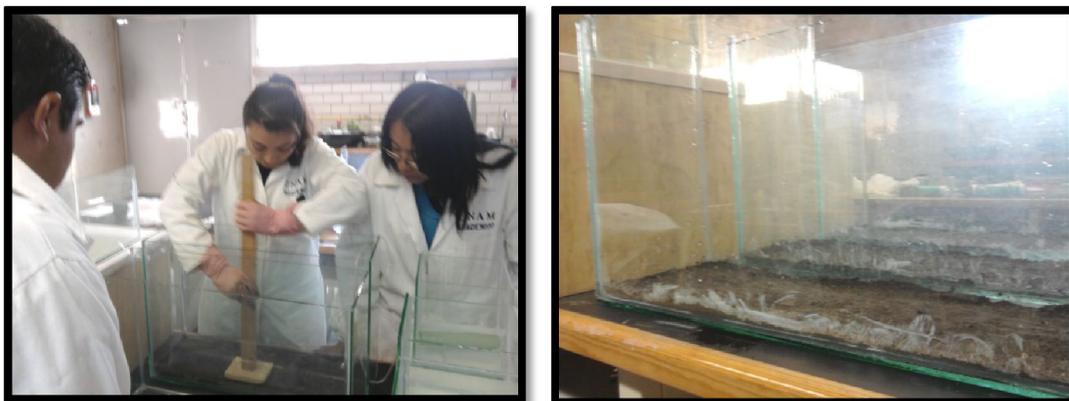


Figura 3.5. Pendiente del 1.3% con material arcilloso.

### 3.1.4. SUSTRATO.

Como se mencionó anteriormente, se utilizaron tres sustratos distintos: piedra de río, tezontle y piedra pómez. Antes de colocar el material en cada humedal, se le dio un breve lavado con agua para disminuir la cantidad de tierra y polvo presentes (figura 3.6).



(a)

(b)



(c)

Figura 3.6. Materiales pétreos de soporte para cada humedal: (a) tezontle, (b) piedra de río y (c) piedra pómez.

También, fue necesario reducir el tamaño de la piedra pómez a 3/4", ya que su tamaño original era mayor, como se observa en la figura 3.6 c.

#### 3.1.4.1. DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD DEL MEDIO DE SOPORTE.

Como ya se mencionó en el capítulo 2 La determinación de la porosidad de cada medio de soporte se llevó a cabo mediante el método propuesto por Kadlec y Knighth en 1996.

Se llenó una probeta graduada de 1000 mL con el medio de interés y posteriormente se le agregó agua, midiendo el volumen gastado. Obteniendo los siguientes resultados:

Piedra de Río:  $V = \text{volumen gastado (mL)} = 520 \text{ mL}$

Tezontle:  $V = \text{volumen gastado (mL)} = 655 \text{ mL}$

Piedra Pómez:  $V = \text{volumen gastado (mL)} = 640 \text{ mL}$

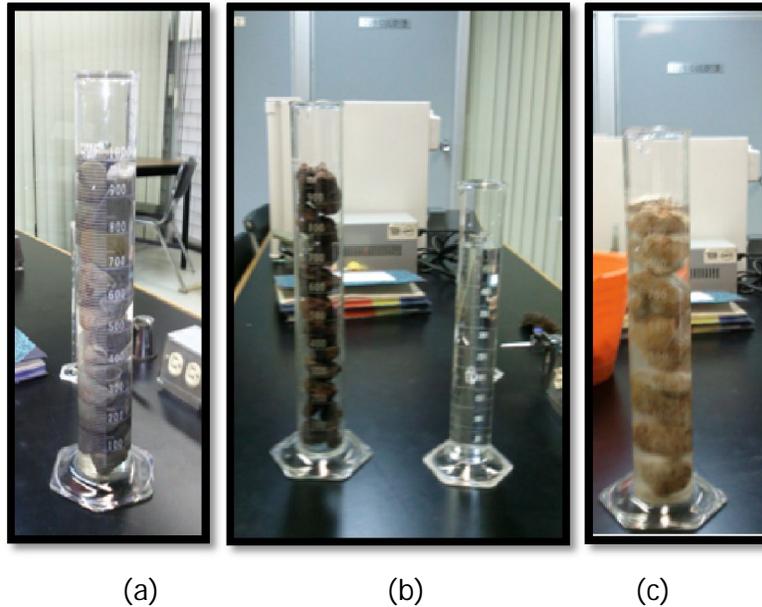


Figura 3.7. Determinación de la porosidad para cada humedal: (a) piedra de río, (b) tezontle y (c) piedra pómez.

Con los datos obtenidos se emplea la ecuación 2.

Cálculo de la porosidad del medio de soporte

$$\eta_{P.Rio} = \frac{520\text{mL}}{1000\text{mL}} = 0.52$$

$$\eta_{Tezontle} = \frac{655\text{mL}}{1000\text{mL}} = 0.655$$

$$\eta_{P.pomex} = \frac{640\text{mL}}{1000\text{mL}} = 0.64$$

### 3.1.5. RELACIÓN LARGO - ANCHO.

La relación L:W que se manejó en los modelos a escala banco de laboratorio fue de 3:1, es decir, el largo es tres veces el ancho.



Figura 3.8. largo – ancho del humedal.

### 3.1.6. TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

El tiempo de retención hidráulico calculado a partir de la Ecuación 3 para cada humedal se presenta en la tabla 3.1

Tabla 3.1. Tiempos de retención hidráulica para cada humedal.

Humedal	L (m)	W (m)	d (m)	Q(m <sup>3</sup> /d)	$\eta$	t (d)
P. de Río	0.60	0.2	0.28	0.006	0.52	3.0
Tezontle	0.60	0.2	0.28	0.009	0.66	2.5
P. Pómez	0.58	0.2	0.28	0.006	0.64	3.4

El gasto, empleado para este cálculo fue el promedio del afluente y efluente para cada uno de los humedales.

### 3.1.7. TEMPERATURA DEL AGUA

Para las condiciones locales de la ciudad de México se estima una Temperatura promedio del agua dentro del humedal igual a la temperatura de la ciudad es decir, 20 °C; este dato de comprobó realizando mediciones periódicas de la temperatura durante la fase de arranque como se muestra en la gráfica 3.7.

Cabe señalar que debido a que los humedales se encuentran dentro de una instalación (Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Centro Tecnológico Aragón), no sufren fuertes cambios de temperatura.

### 3.1.8. VEGETACIÓN.

La especie elegida para este trabajo, debido a las características que a continuación se exponen, fue la *Spathiphyllum wallisii*, también conocida como cuna de Moisés, la cual se adecua a las condiciones de operación de de los humedales.

Pertenece a la familia de las aráceas y es originaria de Venezuela, es un planta perenne rizomatosa, con las hojas oval lanceoladas, lisas, acorazonadas y de color verde franco de hasta 30 cm de largo, con pecíolos envainantes, sus flores sobresalen de entre las hojas, están formadas por un espádice color crema rodeada por una espata (Botánica. Bráctea grande, petaloidea, a veces coloreada que envuelve a una inflorescencia) blanca, es de porte alto, llega a medir hasta los 60 cm de altura. Se multiplican por medio de división de matas, rizomas, hojas y raicillas.

Es sensible a las heladas, soporta temperaturas 15-16° C., debe mantenerse en media sombra, necesita de lugares luminosos, sin el sol directo, soporta la calefacción en invierno (Centro de Investigación de Landscape México, S.A. de C.V.).

Se colocaron en cada humedal dos plantas con una separación de 10 cm cada una.



Figura 3.9. Vegetación de los humedales (cuna de Moisés).

### 3.1.9. RECUPERACIÓN DEL EFLUENTE TRATADO

El efluente de cada humedal se recolecta por medio de una tubería de PVC de una pulgada con perforaciones a tresbolillo, el cual está conectado a otra tubería de plástico por la parte central superior. Ésta última tiene como función trasladar el efluente hacia el recipiente de colecta y mantener el nivel del agua dentro del humedal.



(a)

(b)

Figura 3.10. (a) Tubería de colecta del efluente, (b) Manguera reguladora

## 3.2. ARRANQUE DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO.

### 3.2.1. FASE DE ADAPTACIÓN.

Una vez construidos los humedales, se alimentaron durante 4 semanas con 10 L de agua de la llave, esto se hizo para permitir que las plantas se adaptaran a sus nuevas condiciones de luz, temperatura, nutrientes y sustrato.

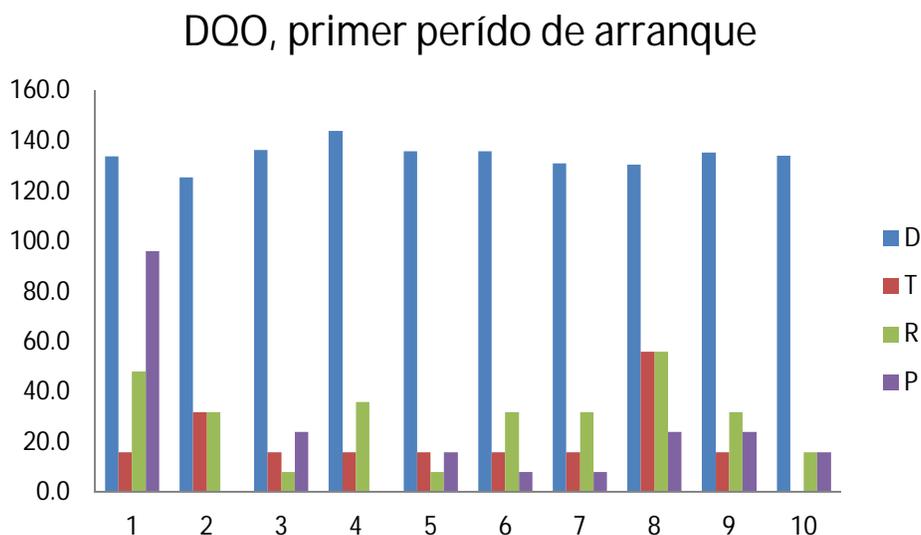


Figura 3.11. Adaptación del sistema con agua de la llave.

### 3.2.2. PRIMER PERÍODO.

Una vez adaptadas las plantas con agua potable, se alimentó a los humedales con el agua residual sintética a la mitad de la concentración final, es decir con 1 g de de leche en polvo y 2 g de fertilizante en 10 L de agua, cuya DQO promedio fue de 134.3 mg/L a lo largo de 2 meses.

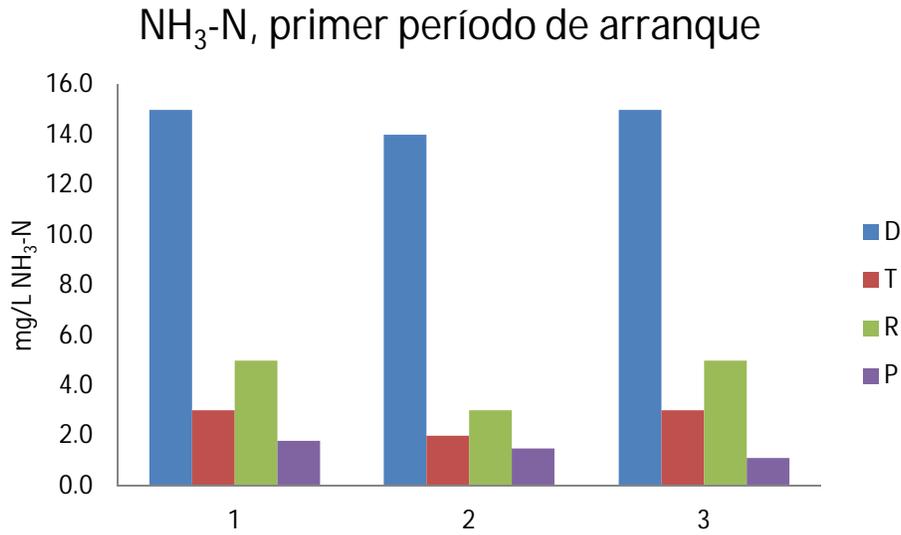
En la gráfica 3.1, se presenta la fluctuación de la DQO en el primer período de arranque en cada humedal, trabajando con agua residual sintética durante un lapso de 10 días.



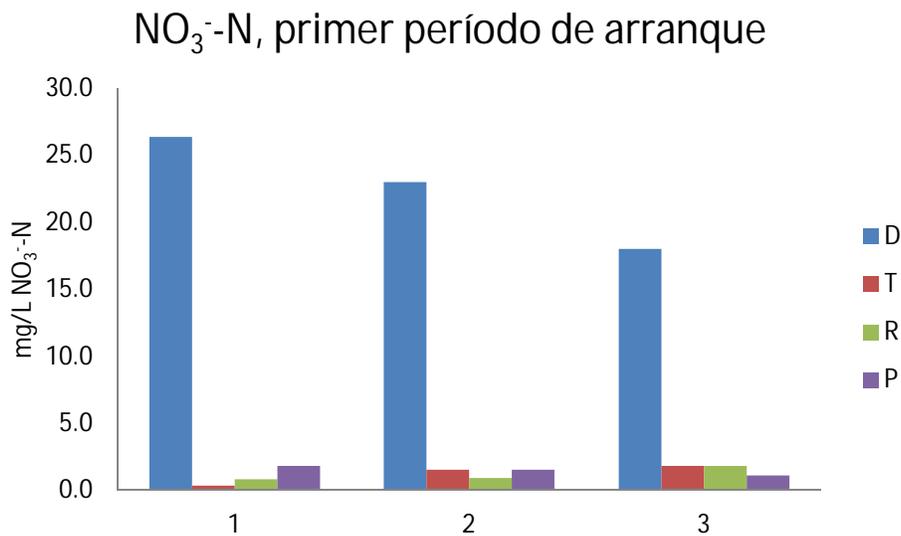
Gráfica 3.1. Concentraciones de DQO en cada humedal artificial durante el primer período de arranque.

Debido a la disponibilidad de los recursos, no fue posible monitorear diariamente a través de análisis fisicoquímicos, a los sistemas de tratamiento. Sin embargo, durante este tiempo, se observó que las plantas no sufrieran alteraciones significativas, es decir, que no se marchitaran y que las características organolépticas (color, turbidez, olor) tanto del afluente como de los efluentes no mostraran indicios de alteración.

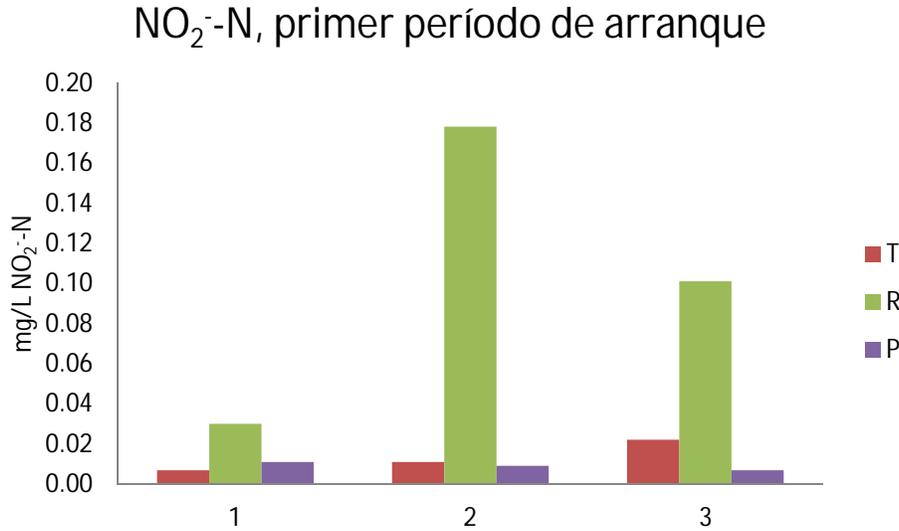
Además de la DQO, se midieron compuestos nitrogenados, fosfatos y sulfatos, por 3 días únicamente, de los cuales se muestran a continuación su comportamiento.



Gráfica 3.2. Concentraciones de nitrógeno amoniacal en cada humedal artificial durante el primer período de arranque.

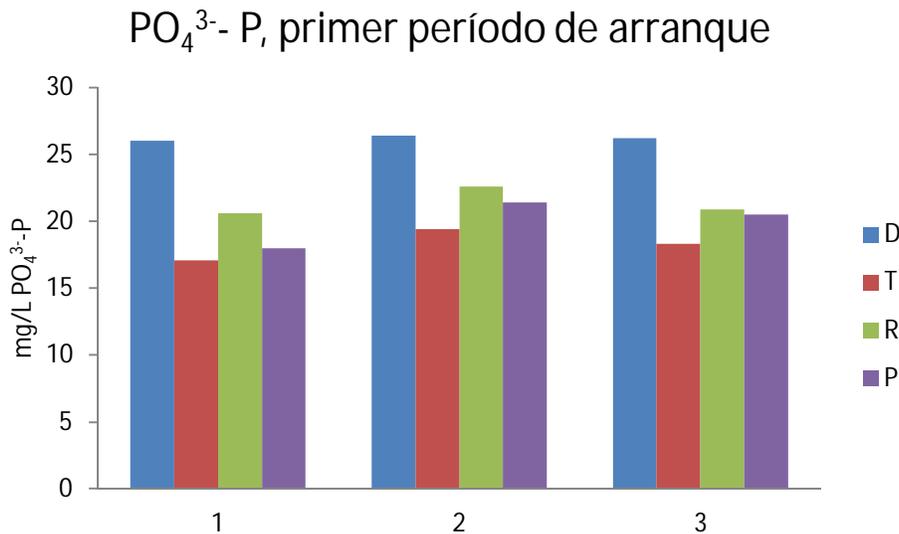


Gráfica 3.3. Concentraciones de nitrato en cada humedal artificial durante el primer período de arranque.

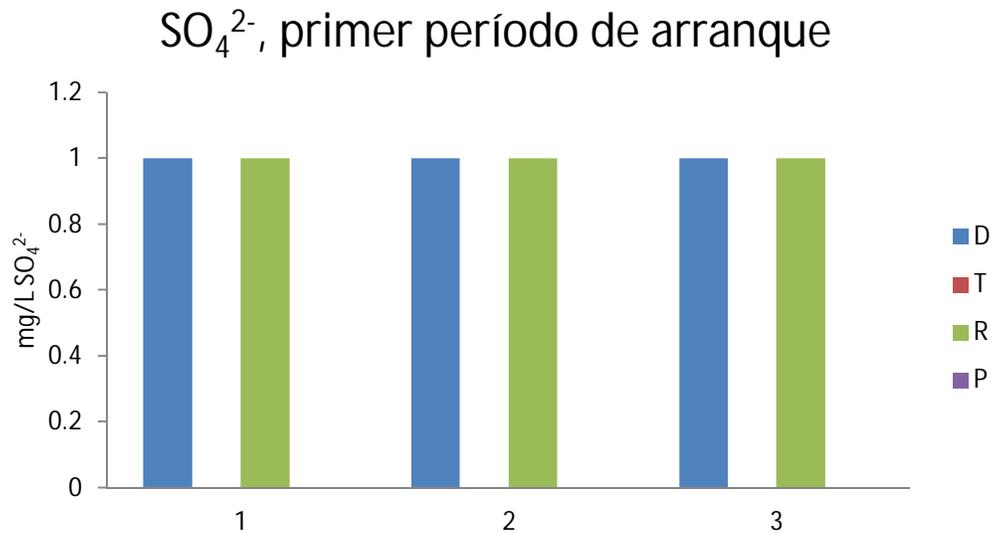


Gráfica 3.4. Concentraciones de nitrito en cada humedal artificial durante el primer período de arranque.

La concentración promedio de nitrito en el afluente fue de 4.8 mg/L, la cual no se graficó para que pudiese apreciarse el comportamiento de los humedales, pues como se ve, las concentraciones de los efluentes están muy por debajo del promedio del afluente.



Gráfica 3.5. Concentraciones de fosfatos en cada humedal artificial durante el primer período de arranque.



Gráfica 3.6. Concentraciones de sulfatos en cada humedal artificial durante el primer período de arranque.

### 3.2.3. SEGUNDO PERÍODO.

Cómo se comentó en la metodología, en una segunda etapa del arranque se incrementó la cantidad de componentes del agua sintética al doble, obteniéndose una DQO promedio de 266.3 mg/L, es decir un agua residual doméstica de carga media como la clasifica Metcalff & Eddy, 2004 (figura 3.12). En esta ocasión, sólo fue posible un monitoreo continuo de 7 días. Sin embargo, se cuantificaron otros parámetros más, que en el primer período no se habían considerado.



Figura 3.12. Afluente de agua residual sintética de carga media.

Debido a que se le estaban generando algas en los humedales que las daba la luz (Piedra Pómez Y Piedra de Rio), (Figura 3.13) se les cubrió con cartoncillo negro para evitar esta formación. Figura 3.14



(a)



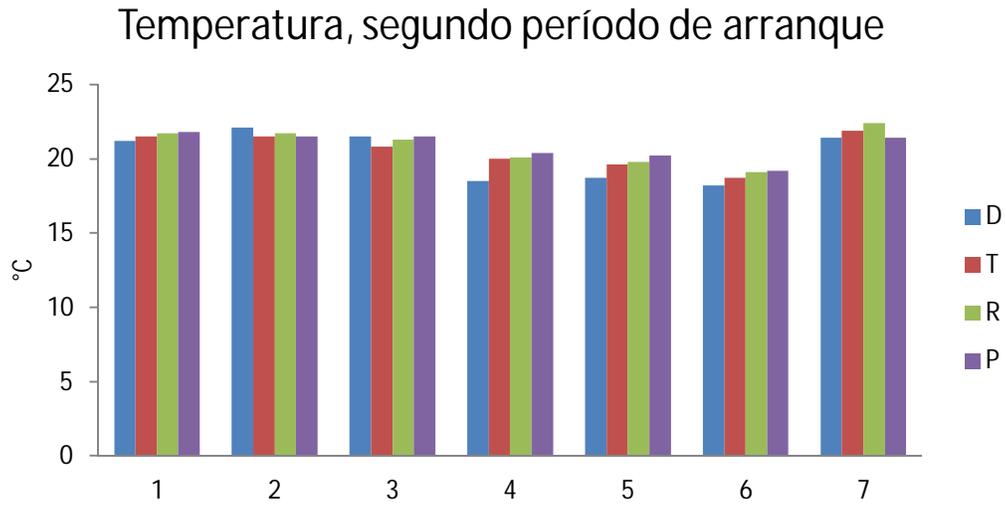
(b)

Figura 3.13 vista lateral de los humedales Piedra Pómez (a) Y Piedra de Rio (b).

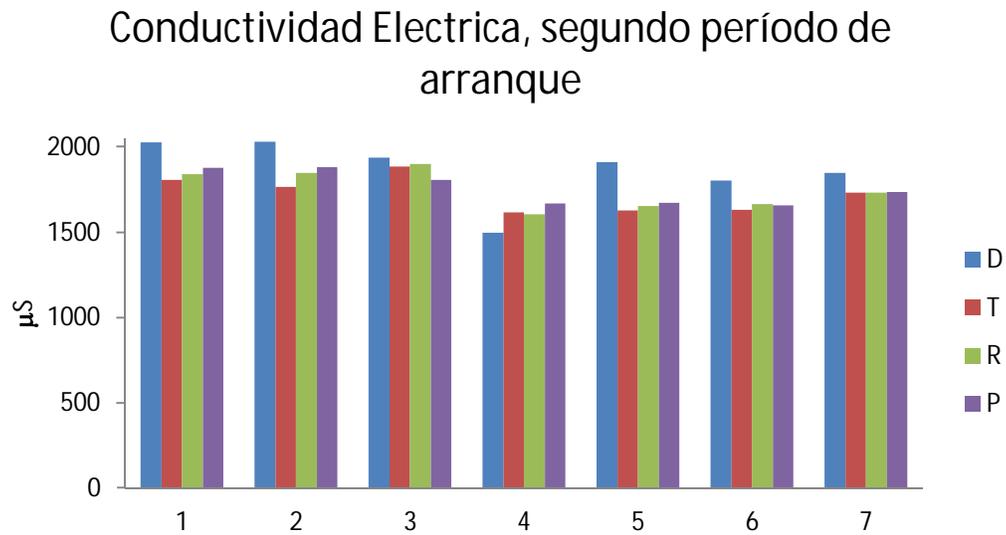


Figura 3.14 vista lateral del humedal cubierto con el cartoncillo negro.

A continuación se presentan las gráficas para cada parámetro analizado durante el segundo período de arranque, las primeras 5 correspondientes a temperatura, conductividad eléctrica, salinidad. pH y turbidez, son los parámetros que sólo se monitorearon en este período.

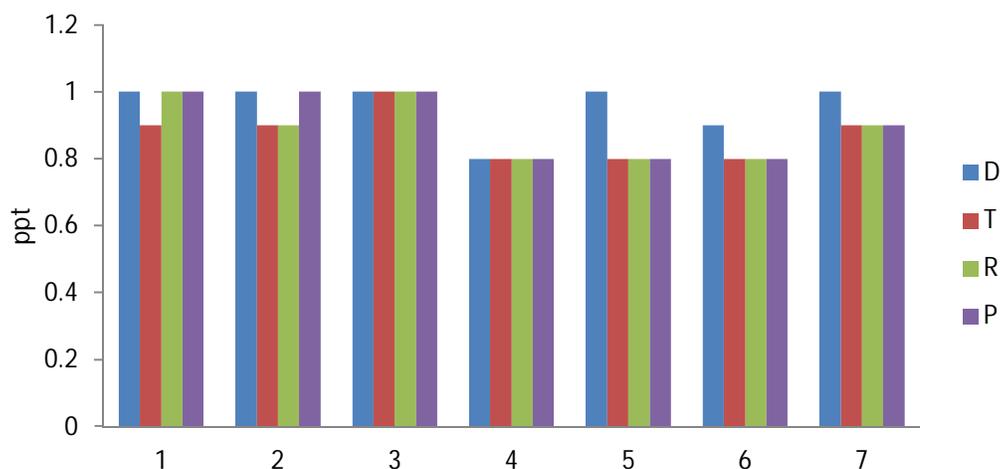


Gráfica 3.7. Temperatura en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque.



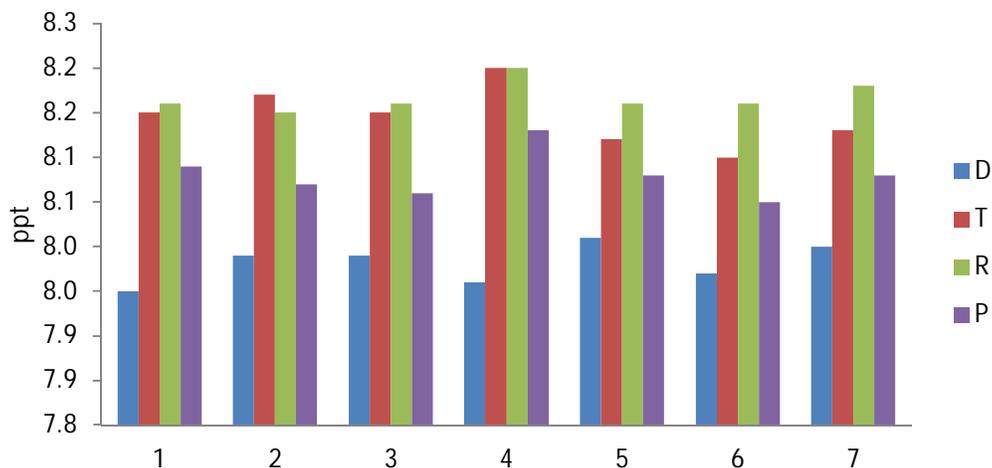
Gráfica 3.8. Conductividad eléctrica en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque.

### Salinidad, segundo período de arranque



Gráfica 3.9. Salinidad en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque.

### pH, segundo período de arranque



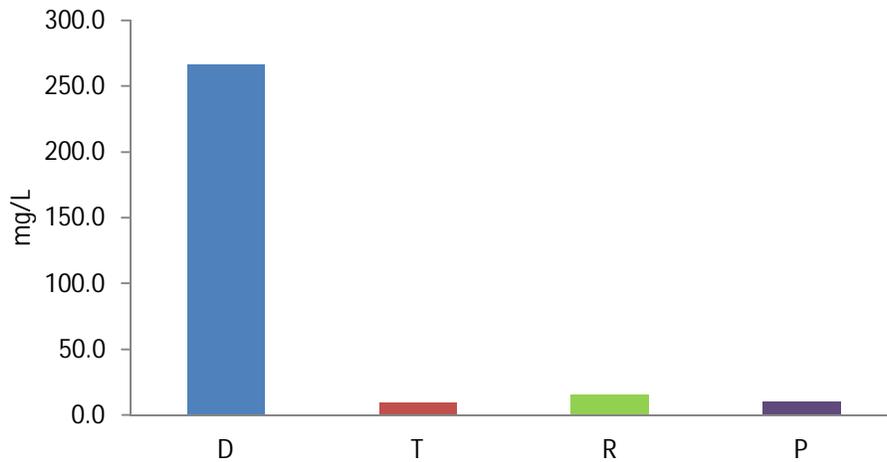
Gráfica 3.10. pH en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque.

Como se observa el pH se incrementa ligeramente en el efluente de cada humedal. Lo anterior podría atribuirse al contacto de agua con el material de soporte, y a la transformación del nitrógeno amoniacal en nitratos y nitritos. Que afectan la alcalinidad del agua. Sin embargo, las transformaciones anteriores no afectan la salinidad de las muestras significativamente, solo se observa un ligero descenso en los efluentes con respecto al

afluente, lo anterior se ve verificado por los valores de conductividad eléctrica mostrados en la gráfica 3.8.

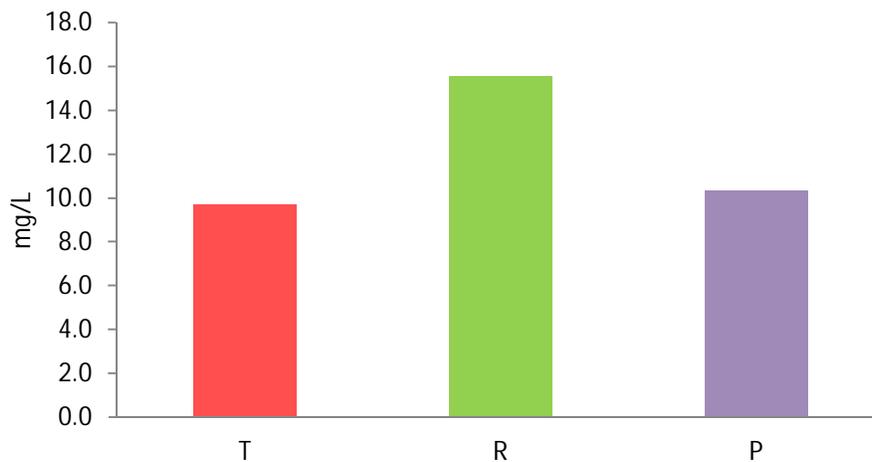
Las siguientes gráficas están construidas con el valor promedio de cada parámetro para facilitar su discusión. Para apreciar los resultados, en las gráficas donde por la escala no se observa fácilmente la concentración del efluente de cada humedal, se realizaron dos gráficas, una donde se incluye el afluente a los humedales y otra sin él.

### DQO, segundo período de arranque

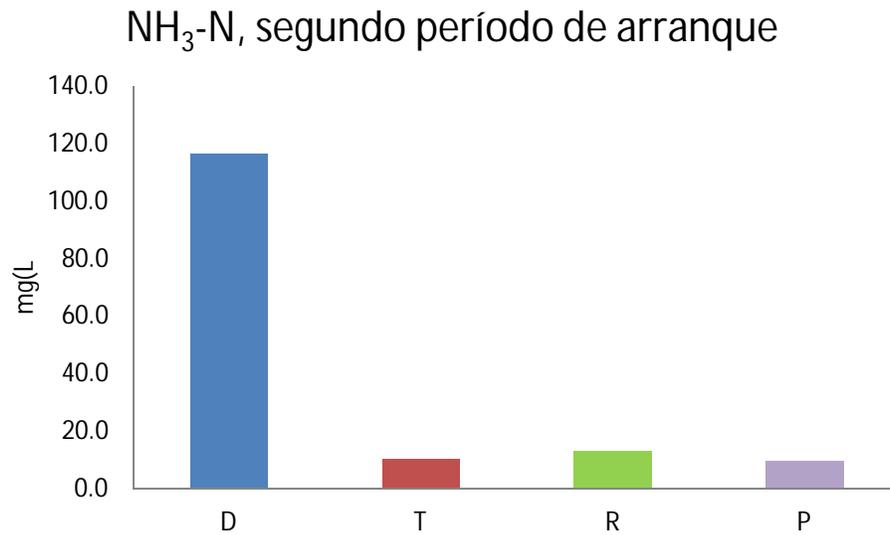


Gráfica 3.11. Demanda Química de Oxígeno en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque.

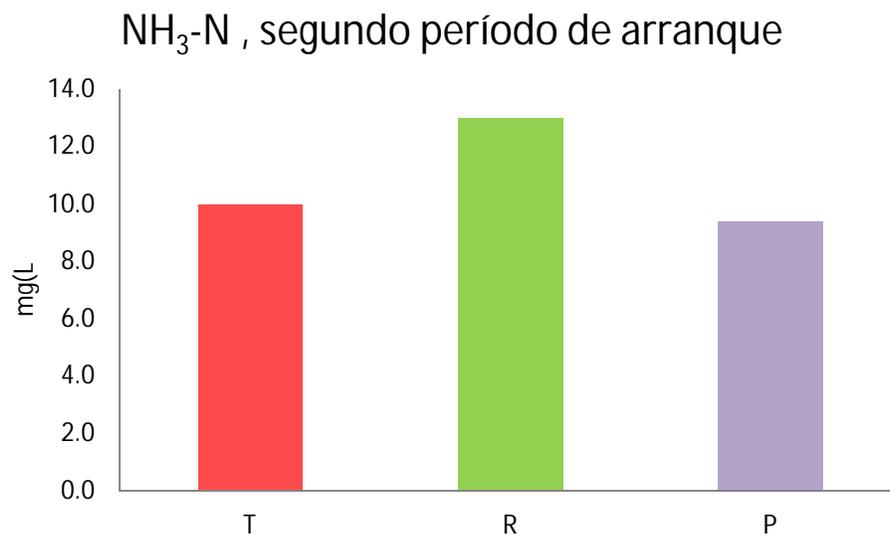
### DQO, segundo período de arranque



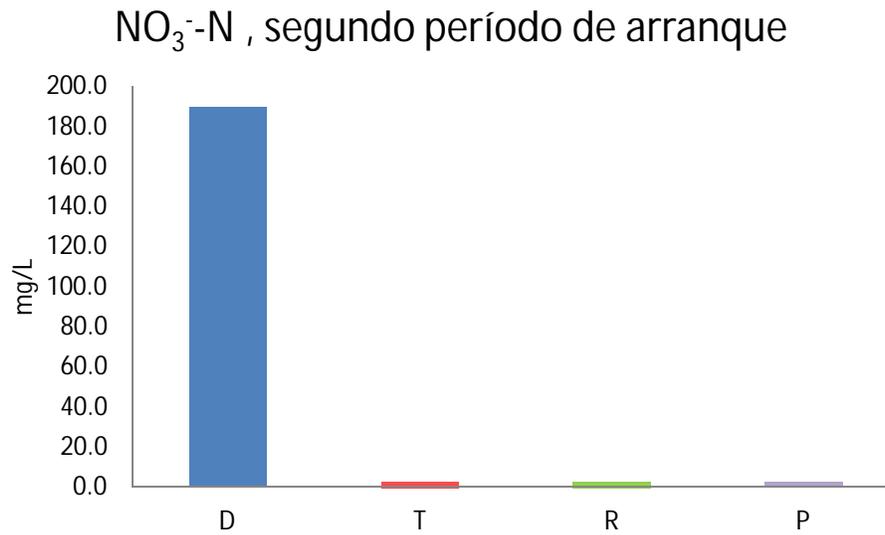
Gráfica 3.12. Demanda Química de Oxígeno en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque (sin graficar el afluente).



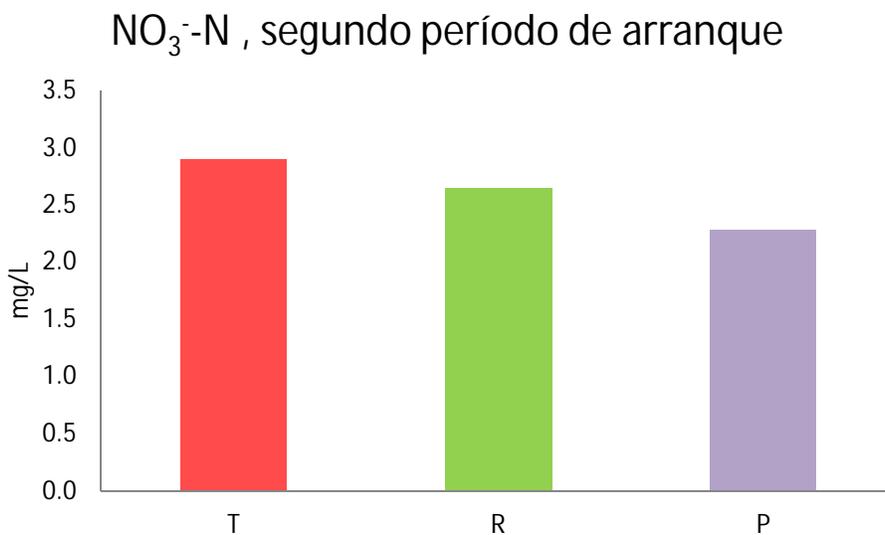
Gráfica 3.13. Concentración de Nitrógeno Amoniacal en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque.



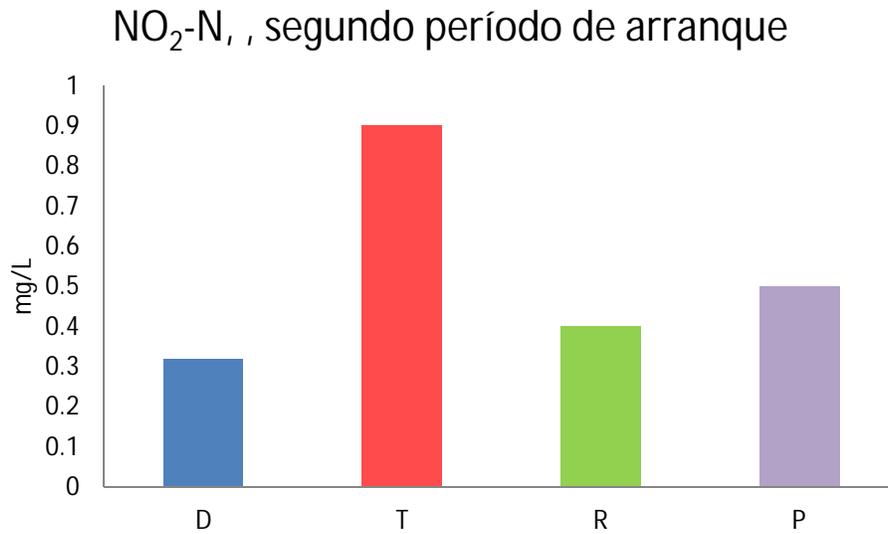
Gráfica 3.14. Concentración de Nitrógeno Amoniacal en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque (sin graficar el afluente).



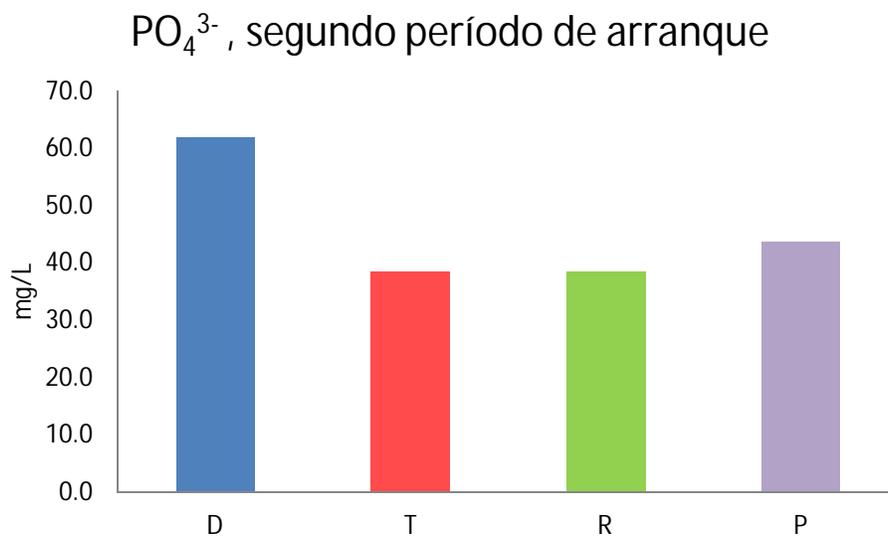
Gráfica 3.15. Concentración de Nitrato en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque.



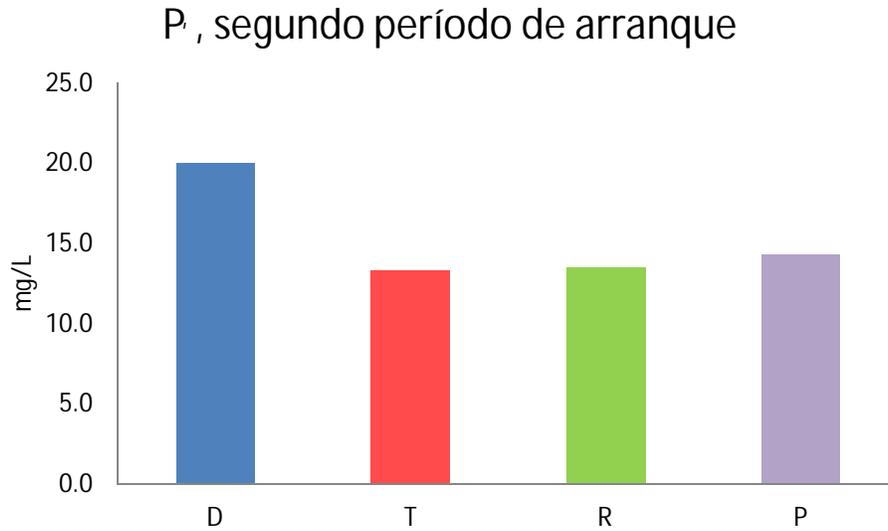
Gráfica 3.16. Concentración de Nitrato en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque (sin graficar el afluente).



Gráfica 3.17. Concentraciones de nitrito en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque.



Gráfica 3.18. Concentraciones de fosfatos en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque.



Gráfica 3.19. Concentraciones de fósforo en cada humedal artificial durante el segundo período de arranque.

Como se observa en las gráficas 3.11 y 3.12 los humedales son altamente eficientes en la remoción de materia orgánica (DQO), ya que el humedal con soporte de tezontle presentó un 96.4% de remoción, con soporte de piedra pómez 96.1% y el de piedra de río de 94.2%. Lo anterior también puede verse en la figura 3.15, ya que la turbidez que presenta el agua, en su mayoría, es debida a la leche en polvo que se agrega y como se ve en la figura, los efluentes carecen de dicha turbidez a simple vista.



Figura 3.15 Muestras de agua provenientes del afluente y efluentes de cada humedal.

En cuanto a las especies nitrogenadas, es evidente que se lleva a cabo el proceso de nitrificación, es decir, la transformación del nitrógeno amoniacal a nitratos. En la gráfica 3.13, se lee un valor promedio de nitrógeno amoniacal en el afluente de 116.7 mg/L y en los efluentes valores alrededor de los 10 mg/L.

El nitrógeno que es transformado a nitrato, está siendo aprovechado por las plantas de los humedales, ya que aún considerando que la concentración del mismo en el agua residual sintética está alrededor de 190 mg/L, más la cantidad de amoníaco que es nitrificado, se están obteniendo concentraciones muy cercanas a los 3 mg/L en los efluentes .

Como es sabido, la especie química intermedia de la nitrificación son los nitritos, los cuales tienen una concentración inicial menor en el afluente que en los efluentes (gráfica 3.15), lo anterior se debe a los procesos de nitrificación. La mayor concentración se muestra en el efluente del humedal con soporte de tezontle, indicando que la nitrificación se realiza de forma más intensa que en el resto.

La concentración promedio de nitrógeno total para el humedal con soporte de tezontle es de 13.8 mg/L y para el que posee soporte de piedra pómez de 12.2 mg/L, las cuales se encuentran por debajo de límite máximo más estricto de la NOM-001-SEMARNAT-1996 del promedio mensual que es de 15 mg/L para uso público urbano, protección a la vida acuática y zonas costeras. El humedal con soporte de río sobrepasa ligeramente este límite, ya que su concentración promedio fue de 16.1 mg/L, sin embargo, con un tiempo de retención mayor se alcanzaría esta calidad. Sin embargo, no debe perderse de vista que el diseño se basó en la remoción de la DQO y no de compuestos nitrogenados, por lo que los resultados siguen siendo muy satisfactorios.

En cuanto al fósforo, las gráficas 3.18 y 3.19 dan evidencia de que los humedales son poco eficientes en la remoción del mismo, teniéndose eficiencia del 28.8% al 33.8%, siendo mejor el humedal con soporte de tezontle.

El sulfato se monitoreó únicamente en el primer período de arranque, no obstante, se observó que la cantidad en el efluente no era mucha, pero solo era removida por los humedales con soporte poroso (tezontle y pómez), mientras que con la piedra de río, prácticamente la misma cantidad de sulfato que ingresó se tuvo en el efluente.

# CAPÍTULO 4

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

---

### 4.1. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se tienen las siguientes conclusiones:

- Dentro del periodo de arranque, el humedal que consiguió estabilizarse más rápidamente fue aquel con soporte de tezontle.
- Las plantas si están consumiendo los nutrientes nitrogenados que se les proporciona, en especial los nitratos como se aprecia en la figura 3.12.
- En la eficiencia de remoción del sistema, existió una influencia importante del sustrato utilizado, ya que la capacidad de retención de los materiales orgánicos, medidos como DQO (Demanda Química de Oxígeno), demostraron que el tezontle es ligeramente más eficiente que la piedra pómez y mayor a la piedra de rio, debido a que el tezontle tiene una amplia superficie de contacto (estructura altamente porosa), por lo que los microorganismos se asocian en mayor medida a este material y tienen mayor actividad para la degradación de la materia orgánica que se encuentra en el agua residual.
- Los resultados demostraron que el sistema es una opción altamente eficiente para la remoción de la materia orgánica, así como en el primero y el segundo periodo de arranque removiendo más del 90% (gráficas 3.1, 3.11 y 3.12) cumpliendo ampliamente con los límites establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997.
- La vegetación elegida para este trabajo fue la adecuada, ya que ella se adaptó durante las tres etapas de experimentación, observándose que no sufrió alteraciones en su composición (hojas y flores).

- La temperatura de operación de los humedales se mantuvo constante, debido a que se encuentran dentro de una instalación (Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Centro Tecnológico Aragón), por lo que este parámetro no tuvo una influencia significativa en el tratamiento.
- De acuerdo la NOM-001-SEMARNAT-1996. La concentración promedio mensual de nitrógeno es de 15 mg/L para uso público urbano, el humedal con soporte de tezontle y el de soporte de piedra pómez se encuentran por debajo de límite máximo más estricto de acuerdo a esta norma.
- Los humedales resultaron poco eficientes en la remoción de fósforo, siendo el mejor en remover el de soporte de tezontle (gráficas 3.18 y 3.19).
- Con base en la grafica 3.6 el sulfato solo fue removido por los humedales con soporte poroso (tezontle y pómez), mientras que con la piedra de río, prácticamente la misma cantidad de sulfato que ingresó fue la que salió.
- Se deduce que el humedal con mejor desempeño es el de soporte con tezontle.
- Es indudable que los humedales artificiales son ecotecnologías que pueden ser utilizados para el tratamiento de aguas residuales de una manera segura, confiable, estética y económica.
- Los humedales pueden ocuparse para realizar prácticas de laboratorio por los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil o para fines de investigación.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- Es recomendable que para conocer con mayor precisión los procesos que ocurren en el sistema de tratamiento, se evalúen a detalle el módulo con sustrato de tezontle.
- Aumentar la concentración en el agua de la materia orgánica, para ver el efecto de remoción por las plantas y si no sufren alteraciones en su composición además de evaluar su eficiencia.
- Triturar el fertilizante para obtener una composición más homogénea del agua residual sintética.
- Realizar análisis bacteriológicos
- Llevar a cabo una cloración.
- Colocar una cubierta vegetal para ver si se obtiene un cambio en el proceso.

- Llevar a un tratamiento terciario los efluentes para ver cuánto mejora la calidad, se propone un filtro de carbón activado.
- Dar mantenimiento periódico tanto a las tuberías del afluente como del efluente para evitar taponamientos de las mismas.
- Determinar la constante cinética de reacción en cada uno de los humedales a partir de la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) estándar.
- Incrementar los períodos de exposición a la luz para evaluar si ésta tiene incidencia en la eficiencia de remoción.

## CAPÍTULO 5

# REFERENCIAS.

---

Akvopedia. (2011). Humedal Artificial de Flujo Vertical. Documento en línea: [www.akvo.org/wiki/.../Humedal\\_Artificial\\_de\\_Flujo\\_Vertical](http://www.akvo.org/wiki/.../Humedal_Artificial_de_Flujo_Vertical)

Angarita, S. M., Rodríguez M. S. (2005). Hipótesis de optimización en humedales de flujo subsuperficial en el tratamiento de agua residual urbana – énfasis en la retención de metales. S. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Documento en línea: <http://dspace.uniandes.edu.co>

APHA-AWWA-WPCF (1982). *Métodos Normalizados para análisis de aguas potables y residuales*. Decimo séptima edición España. Ediciones Díaz de santos.

Arias, C. A. y Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá Colombia. 013, pp.17-24.

Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. (2008). Macrófitas. Documento en línea: [www.cricyt.edu.ar](http://www.cricyt.edu.ar)

Cole, S. (1998). The emergence of treatment wetlands. Environ. Sci. Technol. USEPA Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plants Systems for Municipal Wastewater Treatment.

De Anda, J. (2007). Tecnología innovadora que permite tratar aguas grises y generar un jardín o producir flores de ornato. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C. Unidad de Tecnologías Ambientales.

Delgadillo, O.; Camacho, A.; Pérez, L. F. y Andrade M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. Universidad Mayor de San Simón (Facultad de Agronomía) Cochabamba, Bolivia.

EPA. (2000). (United States Environmental Protection Agency). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales (Humedales de flujo subsuperficial). Office of Water Washington, D.C. 832-F-00-023.

EPA. (2000). (United States Environmental Protection Agency). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales (Humedales de flujo libre superficial). Office of Water Washington, D.C. 832-F-00-024.

Fernández, J. (2006). La fitodepuración mediante humedales artificiales. (E.T.S.I. Agrónomos). Documento en línea: <http://www.madrimasd.org/informacionidi/noticias>

Fernández, J.; De Miguel E.; De Miguel, J.; Curt, M. D. (2001). Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación. Universidad Politécnica de Madrid. pp. 31-39.

Guido, A. y Durán de Bazúa, C. (2008). Remoción de contaminantes en un sistema de modelo de humedales artificiales a escala de laboratorio. Tecnología, Ciencia, Educación. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos (IMIQ) Distrito federal México. ISSN (Versión impresa): 0186-6036. pp. 15-22.

Hencha, K.; Bissonnette, G.; Sexstone, A.; Coleman, J.; Garbutt, K. (2003). Fate of physical, chemical, and microbial contaminants in domestic wastewater following treatment by small constructed wetlands. (Destino físico, químico y microbiológico en contaminantes de aguas residuales domésticas de pequeños humedales construidos). *Water Research* 37, 921–927.

Kivaisi, A. K. (2001). The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. (Potencial de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales y su reutilización en los países en desarrollo). *Ecological Engineering*. University of Dar es Salaam, Botany Department, Applied Microbiology Unit, P.O. Box 35060. 545–560.

Lara, J. A. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

Lindig C. R. Y Zedler J. B. Instituto Nacional de Ecología. (2004). Laboratorio de Ecología de Restauración, Facultad de Biología, UMSNH, Morelia, Michoacán. Documento en línea: <http://www.memo.com.co/ecologia/humedal.html>

Llagas, A. y Guadalupe, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigaciones (FIGMMG Vol. 15, N° 17, 85-96)*.

Luna, V. M. y Ramírez, H. F. (2003). Medios de soporte alternativos para la remoción de fósforo en humedales artificiales. Departamento de Biología Facultad de Química, UNAM.

Mena S. J. (2008). Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. Institución: Alquimia Soluciones Ambientales.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicada en el diario oficial de la federación el 24 de junio de 1996.

Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en

servicios al público. Publicada en el diario oficial de la federación el 23 de abril de 2003.

Pérez, G.; Enciso, S.; Cid del Prado M.; Castañón J. H. Diseño hidráulico de un humedal artificial a nivel laboratorio. División de estudios de posgrado e investigación, Instituto de Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Documento en línea: [www.uaemex.mx/Red\\_Ambientales/docs/memorias/](http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/)

Rodríguez, C. T. y Ospina, I. M. (2005). Humedales artificiales de flujo vertical para mejorar la calidad del agua del río Bogotá. Universidad Militar Nueva Granada Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C.

Romero, J. A. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. 3 ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería. 2008. p. 17- 899. ISBN: 958-8060-13-3.

Romero, M.; Colín, A.; Sánchez E. y Ortiz, Ma. L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: Evaluación de la remoción de la carga orgánica. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 25 (3) 157-167.

Sánchez, F. D. , Miralles, E. N. (2010). Depuración de aguas residuales de una población mediante humedales artificiales. Universitat Politècnica de Catalunya. Química.

Sánchez, R. J. Introducción a los Modelos. Copyright © 1989, 1990 by American Association for the Advancement of Science. (AAAS). Documento en línea: <http://www.project2061.org/esp/publications/sfaa/online/chap11.htm>

Stefanakis A.; Akratos, C.; Tsihrintzis V. (2011). Effect of wastewater step-feeding on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*. 37, 431–443.

Vera, I.; García, J.; Sáez, K.; Moragas, L.; Vidal, G. (2011). Performance evaluation of eight years experience of constructed wetland systems in Catalonia as alternative treatment for small communities. *Ecological Engineering* 37, 364–371.

Von Münch, E. (2009) Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas grises y aguas residuales domésticas en países en desarrollo. Agencia de la Cooperación Técnica Alemana (GTZ), Saneamiento sostenible- programa ecosan. Documento en línea: <http://www.gtz.de/en/themen/umweltinfrastruktur/wasser/9397.htm>

Vymazal, J. 2005. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering* 25:478-490.

Vymazal, J. (2009). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. (El uso de humedales artificiales con flujo horizontal debajo de la superficie para los distintos tipos de aguas residuales). *Ecological Engineering* 35, 1–17.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

Centro Tecnológico Aragón

Laboratorio de Ingeniería Ambiental

**ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO DE AGUA**



Solicitud No.1: Fecha: 12/09/2011

Solicitado por: **Lourdes Apolonio Astudillo**

Fecha de Muestreo: 12/09/2011

Recepción: 12/09/2011

Procedencia: **Agua Tratada procedente del efluente de humedales**

Parámetro		D	R	T.	P.				
Temperatura °C		21.2	21.7	21.5	21.8				
pH		7.95	8.16	8.15	8.09				
C. E. µS		2024	1840	1807	1878				
Turbiedad (UTN)									
Color (Pt – Co)									
Verdadero/aparente									
Olor									
Materia Flotante		ausente	ausente	ausente	ausente				
Miligramos por litro	OD								
	DBO <sub>5</sub> Total								
	DBO Soluble.	251	20	9	16				
	DQO								
	Nitrogeno	Amoniaco ( NH <sub>3</sub> -N)	41	8	8	6			
		Nitritos ( NO <sub>2</sub> -N)							
		Nitratos ( NO <sub>3</sub> -N)		2.5	2	2.6			
		Total	41	10.5	10	8.6			
	Fósforo	Reactivo Total							
		Total							
		Reactivo Disuelto							
		Total Disuelto							
	Sulfatos								
	Salinidad ppt		1	0.9	0.9	1			

**OBSERVACIONES**

Descripción de las muestras:

**D:** caja de distribución del afluente **R:** humedal con soporte de piedra de río **T:** humedal con soporte de tezontle

**P:** humedal con soporte de piedra pómez

**ANALIZADO POR: M. en C. Marjorie Márquez V.  
P.I.C. Lourdes Apolonio Astudillo**

**REVISADO POR: M. en C. Sergio Martínez G.**

**FECHA DE REPORTE: 12 de Septiembre de 2011**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**Centro Tecnológico Aragón**

**Laboratorio de Ingeniería Ambiental**

**ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO DE AGUA**



Solicitud No.1:            Fecha: 13/09/2011

Solicitado por: **Lourdes Apolonio Astudillo**

Fecha de Muestreo: 13/09/2011

Recepción: 13/09/2011

Procedencia:            **Agua Tratada procedente del efluente de humedales**

Parámetro		D	R	T.	P.				
Temperatura °C		20	201	20.0	20.4				
pH		7.99	8.15	8.17	8.07				
C. E. µS		2031	1847	1765	1886				
Turbiedad (UTN)									
Color (Pt – Co)									
Verdadero/aparente									
Olor									
Materia Flotante		ausente	ausente	ausente	ausente				
Miligramos por litro	OD								
	DBO <sub>5</sub> Total								
	DBO Soluble.	261	21	14	12				
	DQO								
	Nitrogeno	Amoniaco ( NH <sub>3</sub> -N)	100	13	6	6			
		Nitritos ( NO <sub>2</sub> -N)	0.2	55	55	52			
		Nitratos ( NO <sub>3</sub> -N)	180	3.3	2.7	2.0			
		Total	280.2	71.3	63.7	60			
	Fósforo	Reactivo Total							
		Total							
		Reactivo Disuelto							
		Total Disuelto							
	Sulfatos								
Salinidad ppt		1	0.9	0.8	0.8				

**OBSERVACIONES**

Descripción de las muestras:

**D:** caja de distribución del afluente    **R:** humedal con soporte de piedra de río    **T:** humedal con soporte de tezontle

**P:** humedal con soporte de piedra pómez

**ANALIZADO POR: M. en C. Marjorie Márquez V.**  
**P.I.C. Lourdes Apolonio Astudillo**

**REVISADO POR: M. en C. Sergio Martínez G.**

**FECHA DE REPORTE: 13 Septiembre de 2011**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**Centro Tecnológico Aragón**

**Laboratorio de Ingeniería Ambiental**

**ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO DE AGUA**



Solicitud No.1: Fecha: 14/09/2011

Solicitado por: **Lourdes Apolonio Astudillo**

Fecha de Muestreo: 14/09/2011

Recepción: 14/09/2011

Procedencia: **Agua Tratada procedente del efluente de humedales**

Parámetro		D	R	T.	P.				
Temperatura °C		21.5	21.3	20.8	21.5				
pH		7.99	8.16	8.15	8.06				
C. E. µS		1936	1898	1884	1901				
Turbiedad (UTN)									
Color (Pt – Co)									
Verdadero/aparente									
Olor									
Materia Flotante		ausente	ausente	ausente	ausente				
Miligramos por litro	OD								
	DBO <sub>5</sub> Total								
	DBO Soluble.	289	15	10	13				
	DQO								
	Nitrogeno	Amoniaco ( NH <sub>3</sub> -N)	100	13	9	11			
		Nitritos ( NO <sub>2</sub> -N)	0.2	0.6	0.8	0.6			
		Nitratos ( NO <sub>3</sub> -N)	120	2.7	2.7	2.1			
		Total	220.2	16.3	12.5	13.7			
	Fósforo	Reactivo Total							
		Total							
		Reactivo Disuelto							
		Total Disuelto							
	Sulfatos								
Salinidad ppt		0.9	0.8	0.8	0.8				

**OBSERVACIONES**

Descripción de las muestras:

**D:** caja de distribución del afluente **R:** humedal con soporte de piedra de río **T:** humedal con soporte de tezontle

**P:** humedal con soporte de piedra pómez

**ANALIZADO POR: M. en C. Marjorie Márquez V.  
P.I.C. Lourdes Apolonio Astudillo**

**REVISADO POR: M. en C. Sergio Martínez G.**

**FECHA DE REPORTE: 14 de Septiembre de 2011**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**Centro Tecnológico Aragón**

**Laboratorio de Ingeniería Ambiental**

**ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO DE AGUA**



Solicitud No.1:            Fecha: 19/09/2011

Solicitado por: **Lourdes Apolonio Astudillo**

Fecha de Muestreo: 19/09/2011

Recepción: 19/09/2011

Procedencia:            **Agua Tratada procedente del efluente de humedales**

Parámetro		D	R	T.	P.				
Temperatura °C		18.5	20.1	20	20.4				
pH		7.96	8.2	8.2	8.13				
C. E. µS		1996	1604	1615	1667				
Turbiedad (UTN)									
Color (Pt – Co)									
Verdadero/aparente									
Olor									
Materia Flotante		ausente	ausente	ausente	ausente				
Miligramos por litro	OD								
	DBO <sub>5</sub> Total								
	DBO Soluble.	272	6	8	8				
	DQO								
	Nitrogeno	Amoniaco ( NH <sub>3</sub> -N)	100	12	12	9			
		Nitritos ( NO <sub>2</sub> -N)	0.3	0.2	0.1	0.1			
		Nitratos ( NO <sub>3</sub> -N)	180	2.1	3.3	2.4			
		Total	280.3	14.3	15.4	11.5			
	Fósforo	Reactivo Total							
		Total							
		Reactivo Disuelto							
		Total Disuelto							
	Sulfatos								
Salinidad ppt		0.9	0.9	0.9	0.9				

**OBSERVACIONES**

Descripción de las muestras:

**D:** caja de distribución del afluente    **R:** humedal con soporte de piedra de río    **T:** humedal con soporte de tezontle

**P:** humedal con soporte de piedra pómez

**ANALIZADO POR: M. en C. Marjorie Márquez V.  
P.I.C. Lourdes Apolonio Astudillo**

**REVISADO POR: M. en C. Sergio Martínez G.**

**FECHA DE REPORTE: 19 de Septiembre de 2011**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**Centro Tecnológico Aragón**

**Laboratorio de Ingeniería Ambiental**

**ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO DE AGUA**



Solicitud No.1:            Fecha: 20/09/2011

Solicitado por: **Lourdes Apolonio Astudillo**

Fecha de Muestreo: 20/09/2011

Recepción: 20/09/2011

Parámetro		D	R	T.	P.				
Temperatura °C		21.4	22.4	21.9	22.2				
pH		8.01	8.16	8.12	8.08				
C. E. µS		1877	1732	1731	1735				
Turbiedad (UTN)									
Color (Pt – Co)									
Verdadero/aparente									
Olor									
Materia Flotante		ausente	ausente	ausente	ausente				
Miligramos por litro	OD								
	DBO <sub>5</sub> Total								
	DBO Soluble.	712	1	5	0				
	DQO								
	Nitrógeno	Amoniaco ( NH <sub>3</sub> -N)	100	14	11	9			
		Nitritos ( NO <sub>2</sub> -N)	0.5	5.2	0.6	0.5			
		Nitratos ( NO <sub>3</sub> -N)	200	6.4	5.8	1.4			
		Total	300.5	25.6	17.4	2.8			
	Fósforo	Reactivo Total							
		Total							
		Reactivo Disuelto							
		Total Disuelto							
	Sulfatos								
Salinidad ppt		1	0.9	0.9	0.9				

**OBSERVACIONES**

Descripción de las muestras:

**D:** caja de distribución del afluente    **R:** humedal con soporte de piedra de río    **T:** humedal con soporte de tezontle

**P:** humedal con soporte de piedra pómez

**ANALIZADO POR: M. en C. Marjorie Márquez V.**  
**P.I.C. Lourdes Apolonio Astudillo**

**REVISADO POR: M. en C. Sergio Martínez G.**

**FECHA DE REPORTE: 20 de Septiembre de 2011**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**Centro Tecnológico Aragón**

**Laboratorio de Ingeniería Ambiental**

**ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO DE AGUA**



Solicitud No.1:            Fecha: : 21/09/2011

Solicitado por: **Lourdes Apolonio Astudillo**

Fecha de Muestreo: 21/09/2011

Recepción: 21/09/2011

Parámetro		D	R	T.	P.				
Temperatura °C		21.5	22	21.5	22				
pH		7.97	8.16	8.10	8.05				
C. E. µS		1802	1665	1632	1656				
Turbiedad (UTN)									
Color (Pt – Co) Verdadero/aparente									
Olor									
Materia Flotante		ausente	ausente	ausente	ausente				
Miligramos por litro	OD								
	DBO <sub>5</sub> Total								
	DBO Soluble.	258	30	12	13				
	DQO								
	Nitrogeno	Amoniaco ( NH <sub>3</sub> -N)	40	13	14	10			
		Nitritos ( NO <sub>2</sub> -N)	0.4	2.9	2.1	0.4			
		Nitratos ( NO <sub>3</sub> -N)	270	8.6	7	1			
		Total	310.4	24.5	23.10	11.4			
	Fósforo	Reactivo Total							
		Total							
		Reactivo Disuelto							
		Total Disuelto							
	Sulfatos								
	Salinidad ppt		1	0.9	0.8	0.8			

**OBSERVACIONES**

Descripción de las muestras:

**D:** caja de distribución del afluente    **R:** humedal con soporte de piedra de río    **T:** humedal con soporte de tezontle

**P:** humedal con soporte de piedra pómez

**ANALIZADO POR: M. en C. Marjorie Márquez V.**  
**P.I.C. Lourdes Apolonio Astudillo**

**REVISADO POR: M. en C. Sergio Martínez G.**

**FECHA DE REPORTE: 21 de Septiembre de 2011**