

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**“METODOLOGIA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE CAMPOS DE HUMEDALES DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL CONSTRUIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES”**

REALIZADO POR:

Br.Carolina Abalos Morante

Br.Ronald Alexander Agostini Morales

ASESOR

---

Prof. Ana Ghanem

Barcelona, Mayo de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**“METODOLOGIA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE CAMPOS DE  
HUMEDALES DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL CONSTRUIDOS PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES”**

JURADO CALIFICADOR:

El Jurado hace constar que asignó a esta Tesis la calificación de:

Prof. Ana Ghanem

Asesor Académico

Prof. Hilda Morales

Prof. Jesus Moreno

Jurado Principal

Jurado Principal

Barcelona, Mayo de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**“METODOLOGIA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE CAMPOS DE  
HUMEDALES DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL CONSTRUIDOS PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES”**

Realizado por:

CAROLINA ABALOS MORANTE

RONALD ALEXANDER AGOSTINI MORALES

Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como

Requisito Parcial para optar al Título de

INGENIERO CIVIL

Barcelona, Mayo de 2010

## **RESOLUCION**

De acuerdo al Artículo N 41 del reglamento de trabajo de Grado

“Para la Aprobación Definitiva de los Cursos Especiales de Grado como Modalidad de Trabajo de Grado, será Requisito Parcial la Entrega, a un Jurado Calificado de una Monografía en la cual se profundice en uno o más Temas Relacionados con el Área de Concentración”.

## RESUMEN

La presente monografía tiene como objetivo principal elaborar una metodología para el dimensionamiento de campos de humedales de flujo sub-superficial, como sistema de tratamiento natural de aguas residuales; basada en la investigación y selección de diferentes métodos de cálculo existentes para el diseño. Estos fueron sometidos a un proceso de comparación tomando en cuenta los parámetros de diseños utilizados para cada método, obteniendo así apreciaciones sistemáticas y un tipo de información bastante clara sobre el tema propuesto. La elección de la metodológica más apropiada estuvo fundamentada en la cantidad de superficie de terreno necesaria para el tratamiento requerido por cada uno, así como también la cantidad de variables que son tomadas en cuenta para el diseño. Con el objeto de simplificar el dimensionamiento de humedales artificiales de flujo sub-superficial, fue elaborada una hoja de cálculo en Microsoft Excel, la cual con tan solo una revisión del ejemplo de cálculo propuesto, observando el diagrama de flujo elaborado según la metodología seleccionada y la introducción correcta de los datos permite tener un dimensionamiento óptimo de los mismos.

## ÍNDICE GENERAL

RESOLUCION.....	iv
RESUMEN .....	v
ÍNDICE GENERAL .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
CAPITULO I .....	12
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.2 OBJETIVO .....	13
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
CAPITULO II .....	14
MARCO TEORICO.....	14
2. 1 ANTECEDENTES.....	14
2.2 HUMEDALES ARTIFICIALES.....	15
2.3 COMPONENTES DEL HUMEDAL .....	16
2.3.1 El agua .....	16
2.3.2 Substratos, sedimentos y restos de vegetación .....	17

2.3.3 Vegetación .....	18
2.3.4 Microorganismos .....	20
2.3.5 Animales.....	21
2.3.6 Realce de la estética y paisaje .....	22
2.4 FUNCIONES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES .....	22
2.4.1 Proceso de remoción físico .....	22
2.4.2 Proceso de remoción biológico .....	23
2.4.3 Proceso de remoción químico .....	25
2.5 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES .....	26
2.6 APLICABILIDAD DE LOS HUMEDALES DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL.....	28
2.7. VENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE SISTEMAS DE HUMEDALES DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL.....	29
2.8 DESVENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE SISTEMAS DE HUMEDALES DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL.....	30
2.9 CLASES DE TRATAMIENTO QUE PUEDEN PRECEDER A UN SISTEMA DE HUMEDAL CON FLUJO SUB-SUPERFICIAL .....	31
2.9.1 Tratamiento precedente de laguna:.....	31
2.9.2 Tratamiento precedente del tanque séptico: .....	31
2.10 DESEMPEÑO DE HUMEDAL DE FLUJO SUB SUPERFICIAL	33

2.11 RENDIMIENTOS ESPERADOS EN UN SISTEMA DE HUMEDAL CON FLUJO SUB-SUPERFICIAL.....	35
2.11.1 Remoción de DBO .....	36
2.11.2 Remoción de sólidos suspendidos .....	36
2.11.3 Remoción del nitrógeno.....	36
2.11.4 Remoción de fósforo .....	37
2.11.5 Remoción de metales.....	38
2.11.6 Remoción de coliformes fecales.....	38
2.12 MODELOS GENERALES DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE HUMEDALES CON FLUJO SUB-SUPERFICIAL.....	38
2.12.1 Método sugerido por Reed. {9}.....	39
2.12.2 Método de la Environmental Protection Agency (EPA) {12} .....	64
CAPITULO III .....	72
MARCO METODOLOGICO .....	72
3.1 TIPO DE INVESTIGACION:.....	72
3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACION .....	72
3.3 ETAPAS DE LA INVESTIGACION .....	73
3.4 EJEMPLO DE CÁLCULO .....	74

3.4.1 Resolución del problema, mediante la aplicación del método sugerido por Reed. {9}.....	76
3.4.2 Resolución del problema, mediante la aplicación del método sugerido por EPA (Environmental Protection Agency) {12}.....	82
CAPITULO IV .....	91
DISCUSION DE RESULTADOS .....	91
4.1 HOJA DE CÁLCULO .....	94
CAPITULO V .....	95
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	95
5.1 CONCLUSIONES .....	95
5.2 RECOMENDACIONES .....	97
BIBLIOGRAFÍA .....	98

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N 1. ESPECIES EMERGENTES MÁS UTILIZADAS EN DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.....	19
TABLA N 2. DATOS USUALES DE CONCENTRACIÓN DE CONSTITUYENTES ESPERADOS EN EFLUENTES DE TANQUES SÉPTICOS RESIDENCIALES, SIN CÁMARA DE FILTRACIÓN.....	32
TABLA N 3. DATOS USUALES DE CONCENTRACIÓN DE CONSTITUYENTES ESPERADOS EN EFLUENTES DE TANQUES SÉPTICOS RESIDENCIALES, CON CÁMARA DE FILTRACIÓN.....	32
TABLA N 4. CONCENTRACIONES “NATURALES” EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL.....	34
TABLA N 5. TASAS TÍPICAS DE CARGA SUPERFICIAL PARA HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL .....	34
TABLA N 6. RESUMEN DEL DESEMPEÑO DE 14 SISTEMAS DE HUMEDALES DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL.....	35
TABLA N 7. PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA.....	44
TABLA N 8. CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE LOS MEDIO PARA HUMEDALES DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL.....	45
TABLA N 9. CALOR ESPECIFICO DEL AGUA LIMPIA ENTRE 0 C Y 100 C.....	48
TABLA N 9. CALOR ESPECIFICO DEL AGUA LIMPIA ENTRE 0 C Y 100 C.....	49
TABLA N 10. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS COMPONENTES DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL.....	51
Tabla N 11. Valores recomendados para el diseño de humedal de flujo sub-superficial	70
TABLA N 12. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS SUGERIDOS POR SHERWOOD REED Y LA EPA.... (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY) .....	92 93



# **CAPITULO I**

## **EL PROBLEMA**

### **1.1 Planteamiento Del Problema**

La disponibilidad del agua es un problema actual y complejo en el que intervienen una serie de factores que van más allá del incremento poblacional que demanda cada vez más este recurso para uso del consumo humano, así como para llevar a cabo actividades económicas. Actualmente, existen problemas de abastecimiento de agua potable en muchas ciudades, poblaciones y barriadas del país, es por esto que es importante impulsar el manejo de sistemas alternativos (pequeños) de tratamientos de aguas residuales ya que estos permiten la reutilización de las mismas en una gran variedad de aplicaciones, como por ejemplo, recarga de acuíferos, riego agrícola, riego de campos, recarga de sanitarios, almacenamiento de agua en tiempos de escases, entre otros; y de esta manera minimizar la demanda de agua potable, aminorar los costos de recuperación del agua y construcción de plantas centralizadas.

## **1.2 Objetivo**

### **1.2.1 Objetivo General**

Elaborar una metodología para el dimensionamiento de campos de humedales basada en la selección del método de cálculo más adecuado entre los sugeridos en las diferentes fuentes bibliográficas.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

1. Investigar acerca de los diferentes métodos de cálculos existentes en la literatura para el diseño de campos de humedales.
2. Comparar cada una de las metodologías encontradas en base a ejemplos de cálculo y análisis de resultados.
3. Seleccionar la metodología de cálculo más adecuada.
4. Elaborar un diagrama de flujo y una hoja de cálculo en formato Excel para el dimensionamiento de campos de humedales en base a la metodología seleccionada

## CAPITULO II

### MARCO TEORICO

#### 2. 1 Antecedentes

La primera conferencia internacional sobre control biológico de aguas residuales, fue en la Universidad de Pensylvania en 1976. Allí fueron establecidos los primeros conceptos en el uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. Se presentaron entonces los primeros trabajos realizados con *Eichhornia crassipes*, en los Laboratorios Nacionales de Tecnología Espacial (National Space Technology Laboratories, (NSTL)) de la NASA. El rápido desarrollo de esta tecnología llevó a la realización de la conferencia en sistemas acuáticos para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de Davis, California, en septiembre de 1979. Fue allí que se introdujeron propiamente los sistemas acuáticos al mundo de la ingeniería como una nueva herramienta para el tratamiento de las aguas de desecho. Desde esta conferencia, muchos han sido los trabajos reportados en el tema. La NASA ha sido un líder en la investigación sistemática y el desarrollo de los sistemas acuáticos con plantas debido a la importancia de los mismos para los llamados Sistemas de apoyo de vida ecológica (Controlled Ecological Life Support System (CELSS)) y su aplicación en la tecnología espacial para hacer posible la reutilización de las aguas residuales en las estaciones espaciales.

El primer sistema operativo de tratamiento de aguas residuales domésticas con esta especie fue instalado en los Laboratorio de Tecnología

y de Sistemas de Navegación (Navigation Systems & Technology Laboratory (NSTL)) en 1976. El primer sistema operativo para el tratamiento de aguas residuales de laboratorios fotográficos y químicos fue en 1975, también en los Laboratorio de Tecnología y de Sistemas de navegación (Navigation Systems & Technology Laboratory (NSTL)). Este último funcionó muy bien por 11 años y luego fue extendido con un filtro rocoso con plantas arraigadas (*Phragmites communis* Trin. y *Typha latifolia* L.). En 1979, un proyecto conjunto entre los Laboratorio de Tecnología y de Sistemas de navegación (Navigation Systems & Technology Laboratory (NSTL)), Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (Environmental Protection Agency (EPA)) y el Distrito de mejora de Coral Springs en Florida (Coral Springs Improvement District), dio lugar a una planta de tratamiento para aguas domésticas de Disney World en Orlando, Florida, Estados Unidos. El sistema más ambicioso que se tenga noticia es el implantado en San Diego, California. Fue instalado en 1984 para la obtención de agua potable a partir de aguas residuales urbanas.

## **2.2 Humedales Artificiales**

El hombre para sus diferentes actividades, requiere del recurso hídrico. Las aguas que utiliza son evacuadas con elementos orgánicos, inorgánicos y/o bacteriológicos, que hacen indispensable su tratamiento para minimizar su impacto en el suelo, aguas superficiales y subterráneas o para reutilizarlas en riego u otros usos alternativos.

Consientes de lo anterior, se pensó en una alternativa de tratamiento biológico natural de aguas residuales por medio de humedales artificiales, siendo objeto de motivación la eficiencia de remoción, fácil operación,

funcionamiento hidráulico, requerimiento de pequeñas áreas, aspecto que disminuye cantidad de obra, posibilita la utilización de materiales de la región minimizando costos de construcción y operación, no requiere de energía convencional, reduce el impacto sobre ambientes acuáticos por exceso de sustancias nutrientes, reduce impactos visuales en áreas afectadas por vertimientos líquidos de caudales residuales, destacando así su efectividad y limpieza en el tratamiento.

Los humedales naturales son áreas que se encuentran saturadas con aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia tales, que sean suficientes para mantener condiciones saturadas. Suelen tener aguas con profundidades inferiores a los 60 cm, con plantas emergentes como espadañas, carrizos y juncos (véase Figura 1). La vegetación proporciona superficie para la formación de películas bacterianas, facilitan la filtración y la absorción 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 la luz.

### **2.3 Componentes Del Humedal**

Los humedales construidos consisten en el diseño correcto de un estanque, que contiene agua, sustrato y plantas emergentes. Estos componentes [pueden manipularse construyendo un humedal. Otros componentes importantes de los humedales se desarrollan naturalmente como las comunidades de microorganismos y los invertebrados acuáticos.

#### **2.3.1 El agua**

Es probable que se formen humedales en donde se acumulen una pequeña capa de agua sobre la superficie del terreno y donde exista una capa del subsuelo relativamente impermeable que prevenga la filtración del agua en el subsuelo. Estas condiciones pueden crearse para construir un humedal casi en cualquier parte, modificando la superficie del terreno para que pueda recolectar agua y sellando el estanque para retener la misma.

1. La hidrología es uno de los factores más importantes en un humedal construido, ya que reúne todas las funciones y es el responsable del éxito o fracaso de un humedal. Mientras que la hidrología en un humedal es muy similar a la de cualquier otra agua superficial o cercanas a superficies.

### **2.3.2 Substratos, sedimentos y restos de vegetación**

Los substratos en los humedales construidos incluyen suelo, arena, grava, roca y materiales orgánicos como compost. Sedimentos y restos de vegetación se acumulan en el humedal debido a la baja velocidad del agua y a la alta productividad típica de estos sistemas. El substrato, sedimentos y los restos de vegetación son importantes por varias razones:

1. Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
2. La permeabilidad del substrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
3. El substrato proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.

4. La acumulación de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La cual, da lugar a la fijación de microorganismos, y es una fuente de carbono, que es la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas dentro del humedal.
5. Muchas transformaciones químicas y biológicas sobre todo microbianas tiene lugar dentro del sustrato.

### **2.3.3 Vegetación**

El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en los sistemas (los tallos y raíces) permite la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporta el oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión.

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

1. Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
2. Dan lugar a velocidades de agua bajas, permitiendo que los materiales suspendidos se depositen.
3. Toman el carbono, nutrientes y elementos de trazas y los incorporan a los tejidos de las plantas.
4. Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.

5. El escape de oxígeno desde las estructuras sub-superficiales de las plantas, oxigenan otros espacios del sustrato.
6. El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.
7. Cuando se mueren y se deterioran dan lugar a restos de vegetación.

Las plantas emergentes que comúnmente se encuentran en los humedales para el tratamiento de aguas residuales incluyen:

*Typha* (*Typha laxmannii*), *Vetiver* (*Vetiveria zizanioides* L), *Junco* redondo (*Scirpus lacustris*), *Carrizo* (*Phragmites australis*), *Junco* fino (*Juncus effusus*), *Platanillo* (*Heliconia bihai*)

Tabla N 1. Especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales

Familia	Nombre latino	Nombres comunes	Temperatura ° C		Máxima salinidad	Rango efectivo
			De	Germinal		

		más usuales	seable	ción de las semillas	tolerable , ppt	de pH
Ciperáceas	C <i>arex sp.</i>		14			5
	E <i>leocharis sp.</i>		- 32			- 7.5
	S <i>cirpus lacustris L. (*)</i>	Junc o de laguna	18 - 27		20	4 - 9
Gramínea	G <i>lyceria fluitans (L.) R. Br.</i>	Hierb a del mana	12 - 23	10 - 30		2 - 8
	P <i>hragmites australis (Cav) Trin. ex Steudel (*)</i>	Carri zo			45	
Iridáceas	Ir <i>is pseudacorus L.</i>	Lirio amarillo, espadaña fina				
Juncáceas	J <i>uncus sp.</i>	Junc os	16 - 26		20	5 - 7.5
Tifáceas	T <i>hypha sp (*)</i>	Enea s, aneas, espadañas.	10 - 30	12 - 24	30	4 - 10

### 2.3.4 Microorganismos

Una característica fundamental de los humedales es que sus funciones son principalmente reguladas por los microorganismos y su metabolismo. Los microorganismos incluyen bacterias, levaduras, hongos, y

protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes.

La actividad microbiana:

1. Transforma un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles.
2. Altera las condiciones de potencial del substrato y así afecta la capacidad de proceso del humedal.
3. Está involucrada en el reciclaje de nutrientes.

### **2.3.5 Animales**

Los humedales construidos proveen un hábitat para una rica diversidad de invertebrados y vertebrados.

Los animales invertebrados, como insectos y gusanos, contribuyen al proceso de tratamiento fragmentando el detritus consumiendo 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 construidos también atraen a una gran variedad de anfibios, tortugas, pájaros, y mamíferos.

Los humedales construidos atraen variedad de pájaros, incluso patos silvestres.

### **2.3.6 Realce de la estética y paisaje**

Aunque los humedales son principalmente sistemas de tratamiento, proporcionan beneficios intangibles aumentando la estética del sitio y reforzando el paisaje. Visualmente, los humedales son ambientes extraordinariamente ricos. Introduciendo el elemento agua al paisaje, el humedal construido, tanto como el natural, agregan diversidad al paisaje. Pueden construirse humedales artificiales siguiendo las formas que tienen los contornos naturales del sitio, hasta el punto de que algunos humedales para el tratamiento de agua son indistinguibles, a simple vista, de los humedales naturales.

## **2.4 Funciones De Los Humedales Artificiales**

Las actividades humanas han dado y siguen dando origen a varios tipos de humedales de interés para algunas especies vegetales y animales. Las graveras y otro tipo de excavaciones abandonadas, restauradas o poco alteradas, albergan distintos tipos de hábitats.

### **2.4.1 Proceso de remoción físico**

Los humedales son capaces de proporcionar una alta eficiencia física en la remoción de contaminantes asociado con material particulado. El agua superficial se mueve muy lentamente a través de los humedales, debido al flujo laminar característico y la resistencia proporcionada por las raíces y las plantas flotantes. La sedimentación de los sólidos suspendidos se promueve

por la baja velocidad de flujo y por el hecho de que el flujo es con frecuencia laminar. Las esteras de plantas pueden servir como trampas de sedimentos, pero su rol primario es la remoción de sólidos suspendidos para limitar la suspensión 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 suspensión de sedimento puede resultar en la exportación de sólidos suspendidos y reducir algo más bajo la eficiencia de remoción. Algo de suspensión podría ocurrir durante periodos de velocidad de flujo alta.

#### **2.4.2 Proceso de remoción biológico**

La remoción biológica es quizá el camino más importante para la remoción de contaminantes en los humedales. Los contaminantes que son también formas de nutrientes esenciales para las plantas, tales como nitrato, amonio y fosfato, son tomados fácilmente por las plantas del humedal. Sin embargo, muchas especies de plantas son capaces de captar, e incluso acumular significativamente metales tóxicos, como cadmio y plomo. La velocidad de remoción de contaminante por las plantas varía extensamente, dependiendo de la velocidad de crecimiento de la planta y de la concentración del contaminante en tejido de planta. Las plantas leñosas, es decir, árboles y arbustos, proporcionan un almacenamiento a largo plazo de contaminantes, comparado con las plantas herbáceas. Sin embargo, la velocidad de captación del contaminante por unidad de área de tierra es, a menudo, mucho más alta para las plantas herbáceas. Las algas pueden

también proporcionar una cantidad significativa de nutrientes captados, pero son más susceptibles a los efectos tóxicos de metales pesados. El almacenaje de alimentos en algas es relativamente a corto plazo, debido al corto ciclo de vida. Las bacterias y otros microorganismos en el suelo también proveen, captan y almacenan nutrientes a corto plazo, y algunos otros contaminantes.

En los humedales, el material de las plantas muertas, conocido como detritus o basura, se acumula en la superficie del suelo. Algunos de los nutrientes, metales u otros elementos eliminados previamente del agua por captación de la planta son pérdidas del detritus de la planta por la lixiviación y descomposición, y reciclados nuevamente dentro del agua y del suelo. La lixiviación de contaminantes solubles en agua puede ocurrir rápidamente en la muerte de la planta o del tejido de la planta, mientras que una pérdida más gradual de contaminantes ocurre durante la descomposición del detritus por las bacterias y otros organismos.

En la mayoría de los humedales, hay una acumulación significativa del detritus de la planta, porque la velocidad de descomposición disminuye substancialmente bajo condiciones anaerobias que prevalecen, generalmente, en el suelo del humedal. Si, sobre un período extenso de tiempo, la velocidad de descomposición de la materia orgánica es más baja que la velocidad de deposición de la materia orgánica en el suelo, la formación de turba ocurre en el humedal. De esta manera, algunos de los contaminantes captados originalmente por las plantas se pueden atrapar y almacenar como turba. La turba se puede acumular a grandes profundidades en los humedales, y puede proporcionar el almacenamiento de larga duración para los contaminantes. Sin embargo, la turba es también susceptible a la descomposición si el humedal se drena. Cuando sucede eso,

los contaminantes incorporados en la turba se pueden liberar y/o reciclar o limpiar con un chorro de agua del humedal. Aunque los microorganismos pueden proporcionar una cantidad medible de contaminante captado y almacenado en sus procesos metabólicos, que 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 ( $\text{CO}_2$ ) o metano ( $\text{CH}_4$ ).

### **2.4.3 Proceso de remoción químico**

El proceso químico más importante de la remoción de suelos del humedal es la absorción, que da lugar a la retención a corto plazo o a la inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes. La absorción es un término ampliamente definido para la transferencia de los iones (moléculas con cargas positivas o negativas) a partir de la fase de la solución (agua) a la fase sólida (suelo). La absorción describe realmente un grupo de procesos, que incluye reacciones de adsorción y de precipitación. La adsorción se refiere a la unión de iones a las partículas del suelo, por intercambio catiónico o absorción química. El intercambio catiónico implica la unión física de los cationes (iones positivamente cargados) a las superficies de las partículas de la arcilla y de la materia orgánica en el suelo. Esto es una unión mucho más débil que la unión química, por lo tanto, los cationes no se inmovilizan permanentemente en el suelo. Muchos componentes de las aguas residuales y de escurrimiento existen como cationes, incluyendo el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y la mayoría de trazas de metales, tales como cobre ( $\text{Cu}^{+2}$ ) La

capacidad de los suelos para la retención de cationes, expresada como capacidad de intercambio catiónico, aumenta generalmente con el aumento de contenido de la arcilla y de la materia orgánica. La absorción química representa una forma más fuerte y más permanente de vinculación que el intercambio catiónico. Un número de metales y de compuestos orgánicos se puede inmovilizar en el suelo vía la absorción química de las arcillas, y los óxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al), y materia orgánica. El fosfato también puede unirse con la arcilla y los óxidos de Fe y Al a través de la absorción química. El fosfato puede también precipitarse con los óxidos de hierro y aluminio para formar un nuevo mineral compuesto (fosfatos de Fe y Al), que son potencialmente muy estables en el suelo, produciendo el almacenamiento de fósforo a largo plazo. Otra reacción importante de precipitación que ocurre en los suelos del humedal es la formación de sulfuros de metales. Tales compuestos son altamente insolubles y representan los medios eficaces para inmovilizar muchos metales tóxicos en humedales. La volatilización, que implica la difusión de un compuesto disuelto desde el agua en la atmósfera, es otro mecanismo potencial de la remoción del contaminante en los humedales. La volatilización del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) puede dar lugar a la remoción significativa de nitrógeno, si el pH del agua es alto (mayor que 8,5).

## **2.5 Tipos De Humedales Artificiales**

Existen dos tipos de sistemas de humedales artificiales, desarrollados para el tratamiento del agua residual (véase Figura 9):

Sistema a Flujo Libre (FWS). (free water surface wetlands)

Sistema de Flujo Sub-superficial (FS). (subsurface flow wetlands)

### Sistema a Flujo Libre (FWS):

Consisten normalmente de una o más cuencas o canales de poca profundidad (0.1 a 0.6 m) que tienen un recubrimiento de fondo para prevenir la percolación al agua freática susceptible a contaminación, y una capa sumergida de suelo para las raíces de la vegetación emergente seleccionada. Cada sistema tiene estructuras adecuadas de entrada y descarga para asegurar una distribución uniforme del agua residual aplicada y su recolección. En donde el agua está expuesta a la atmosfera (véase figura 10)

El tamaño de los sistemas de humedales a flujo libre va desde pequeñas unidades para tratamiento en el sitio de efluentes de tanques sépticos hasta grandes unidades de más de 16,888 hectáreas (40,000 acres). Tienen un rango de menos de 3,785 litros por día (1,000 galones por día) hasta más de 75,708 m<sup>3</sup>/d (20 millones de galones por día).

### Sistema de Flujo Sub-superficial (FS).

Los sistemas de flujo sub- superficial se diseñan con el objeto de proporcionar un tratamiento secundario o avanzado.

Los humedales de flujo sub-superficial normalmente incluyen una o más cuencas o canales de poca profundidad de fondo recubierto para prevenir la percolación a la capa freática susceptible a la contaminación. Estos canales son rellenados de material granular, generalmente grava en donde el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie de grava. (Véase Figura 11). Este medio granular debe ser de piedras limpias, duras y duraderas, con capacidad de retener su forma y la permeabilidad del lecho del humedal a largo plazo. En un extremo del canal existe un instrumento afluente que

introduce las aguas residuales en forma distribuida, y en el extremo opuesto existe otro para recoger y descargar el efluente tratado del canal o lecho.

Se pueden utilizar piedras estratificadas o vegetación en forma de plantas, colocadas estratégicamente en la superficie del lecho de piedra, los microbios se adhieren a la estructura de piedra y si se utilizan plantas al sistema al sistema de raíces de las mismas. Estos microbios son útiles ya que al sintetizar la materia orgánica presente en el agua residual las están tratando. la materia orgánica es sintetizada por los microbios, para proporcionar crecimiento celular. Se cree que algo de oxígeno es proporcionado a través del sistema de raíces de las plantas, pero hasta el momento no se sabe a ciencia cierta la cantidad de oxígeno que estas proveen.

## **2.6 Aplicabilidad De Los Humedales De Flujo Sub-Superficial**

Los humedales de flujo sub-superficial están mejor adaptados para aplicaciones de tamaño pequeño y mediano ( $\leq 227,100$  l/d o  $\leq 60,000$  galones/día).

Las poblaciones óptimas recomendadas para llevar a cabo este tratamiento biológico corresponden a un máximo de 2000 habitantes, siendo beneficiadas pequeñas comunidades y otras entidades relativamente pequeñas que buscan un tratamiento de aguas residuales relativamente sencillo, costo-eficiente y con rendimiento energético. Pudiendo aplicarse entonces a lugares como:

1. Institucionales: colegios escuelas, universidades, casas de

rehabilitación plazas de mercado, batallones, cárceles ubicadas en áreas suburbanas y rurales.

2. Actividad agropecuaria: sector agroindustrial, granjas avícolas, fincas ganaderas y cafeteras.
3. Turística y recreacional: parcelaciones, clubes campestres, zonas de camping, entre otras.

De igual forma pueden ser utilizados en situaciones donde se tiene un potencial significativo de contacto con el público, mosquitos o generación de olores. Su uso en sistemas de tratamiento en el punto de origen proporciona un efluente de alta calidad para la aplicación al terreno.

## **2.7. Ventajas De La Utilización De Sistemas De Humedales De Flujo Sub-Superficial**

1. Los humedales de flujo sub-superficial proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores calificados.
2. Los humedales de flujo sub-superficial pueden ser menos costosos de construir, y usualmente también son menos costosos para operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento diseñados para un nivel equivalente de calidad de efluente.
3. La operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año con excepción de los climas más fríos.

4. La operación a nivel de tratamiento terciario avanzado es posible durante todo el año en climas cálidos o semicálidos.

## **2.8 Desventajas De La Utilización De Sistemas De Humedales De Flujo Sub-Superficial**

1. Un humedal de flujo sub-superficial requiere un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales de tratamiento.
2. La remoción de DBO, DQO y nitrógeno en los humedales de flujo sub-superficial es un proceso continuo renovable. El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
3. En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO,  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_3$ . Un aumento en el tiempo de retención puede compensar por la disminución de las tasas pero el incremento en el tamaño de los humedales en climas extremadamente fríos puede no ser factible desde el punto de vista económico o técnico.

## **2.9 Clases De Tratamiento Que Pueden Preceder A Un Sistema De Humedal Con Flujo Sub-Superficial**

### **2.9.1 Tratamiento precedente de laguna:**

En un sistema de laguna que precede a un humedal con flujo sub-superficial, los trabajos de tratamiento en la laguna deben diseñarse y construirse para lograr un grado máximo de tratamiento factible, de acuerdo con los criterios aceptables para los sistemas de lagunas. Se recomienda que se organicen trabajos efluentes para minimizar las descargas de materiales sólidos de la laguna al humedal y que se consulten las fuentes de información apropiadas para diseño de sistemas de lagunas a través de las agencias estatales correspondientes.

### **2.9.2 Tratamiento precedente del tanque séptico:**

Se pueden utilizar los tanques sépticos como un sistema de tratamiento precedente o preliminar. Se deben tomar las dimensiones de los tanques para llevar al máximo el grado de remoción de materiales sólidos que se asientan, revisándolos a intervalos adecuados para mantener la eficiencia de la eliminación. Se recomienda consultar que se consulten las fuentes de información apropiadas para diseño de tanques sépticos a través de las agencias estatales correspondientes. Por lo general la concentración de materia orgánica de los efluentes de los tanques sépticos es mucho mayor que en los efluentes de los sistemas de laguna. Entre más alta sea la concentración en los efluentes de los tanques sépticos, se necesitara mayores periodos de retención en el humedal, para lograr la calidad deseada de los efluentes.

Tabla N 2. Datos usuales de concentración de constituyentes esperados en efluentes de tanques sépticos residenciales, sin cámara de filtración

Constituyente	Concentración afluente (mg/L)	Efluente sin filtrar		
		Intervalo	Sin triturador De basura	Con triturador De basura
DBO <sub>5</sub>	450	150- 250	180	190
DQO	1050	250- 500	345	400
SST	503	40- 140	80	85
NH <sub>3</sub> como N	41.2	30- 50	40	44
N.org como N	29.1	20- 40	28	31
NTK como N	70.4	50- 90	68	75
P org como P	6.5	4-8	6	6
P inorg como P	10.8	8-12	10	10
P total como P	17.3	12- 20	16	16
Grasas y aceites	164	20- 50	25	30

Referencia

Tabla N 3. Datos usuales de concentración de constituyentes esperados en efluentes de tanques sépticos residenciales, con cámara de filtración

Constituyente	Concentración afluente (mg/L)	Efluente filtrado		
		Intervalo	Sin triturador De basura	Con triturador De basura
DBO <sub>5</sub>	450	100-140	130	140
DQO	1050	160-300	250	300
SST	503	20-55	30	30
NH <sub>3</sub> como N	41.2	30-50	40	44
N.org como N	29.1	20-40	28	31
NTK como N	70.4	50-90	68	75
P org como P	6.5	4-8	6	6
P inorg como P	10.8	8-12	10	10
P total como P	17.3	12-20	16	16
Grasas y aceites	164	10-20	15	20

Referencia

## 2.10 Desempeño De Humedal De Flujo Sub Superficial

Un humedal con una carga moderada puede lograr los niveles de efluente “naturales” que se presentan en la Tabla N 4. En general, los humedales se diseñan para producir una calidad dada de efluente, la Tabla N 5 puede utilizarse para calcular en forma preliminar el tamaño requerido del humedal para producir una calidad de efluente deseada. Los modelos de diseño en las publicaciones referenciadas proveen estimaciones más precisas del área de tratamiento requerida. La Tabla N 6 resume el desempeño real de 14 sistemas de humedales incluidos en la Evaluación de Tecnología de la U.S. EPA {15}.

Tabla N 4. Concentraciones “naturales” en humedales de flujo sub superficial

Constituyente	Unidades	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/100 mL	50 a 500

Referencia

Tabla N 5. Tasas típicas de carga superficial para humedales de flujo sub superficial

Constituyente	Concentración típica del afluente (mg/L)	Meta de tratamiento del efluente (mg/L)	Tasa de carga contaminante (libras/acres-día)
DBO <sub>5</sub>	30 a 175	10 a 30	60 a 140
SST	30 a 150	10 a 30	40 a 150
Nitrógeno como NH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub>	2 a 35	1 a 10	1 a 10
Nitrógeno como NO <sub>3</sub>	2 a 10	1 a 10	3 a 12
Nitrógeno total	2 a 40	1 a 10	3 a 11
Fósforo total	1 a 10	0.5 a 3	1 a 4

Tabla N 6. Resumen del desempeño de 14 sistemas de humedales de flujo sub-superficial

Constituyente	Promedio en el afluente (mg/L)	Promedio en el efluente (mg/L)
DBO <sub>5</sub>	28** (5 a 51)***	8** (1 a 15)***
SST	60 (23 a 118)	10 (3 a 23)
Nitrógeno como NTK	15 (5 a 22)	9 (2 a 18)
Nitrógeno como NH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub>	5 (1 a 10)	5 (2 a 10)
Nitrógeno como NO <sub>3</sub>	9 (1 a 18)	3 (0.1 a 13)
Nitrógeno total	20 (9 a 48)	9 (7 a 12)
Fósforo total	4 (2 a 6)	2 (0.2 a 3)
Coliformes fecales (#/100 mL)	270,000 (1,200 a 1,380,000)	57,000 (10 a 330,000)

### 2.11 Rendimientos Esperados En Un Sistema De Humedal Con Flujo Sub-Superficial

Los humedales pueden tratar con efectividad altos rendimientos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), sólidos suspendidos (SST) y nitrógeno, así como también niveles significativos de metales, compuestos orgánicos trazas y patógenos. La remoción del fósforo es mínima debido a las limitadas oportunidades de contacto del agua residual del suelo. Los mecanismos básicos de tratamiento incluyen la sedimentación, precipitación química, absorción e interacción biológica con la DBO<sub>5</sub> y el nitrógeno así como la captación por parte de la vegetación.

### **2.11.1 Remoción de DBO**

En los sistemas de humedales con flujo sub-superficial, la remoción de materia orgánica es muy rápida por la deposición y filtración, donde cerca del 50% de la DBO<sub>5</sub> aplicada es removida en los primeros metros del humedal. Esta materia orgánica sedimentable es descompuesta aeróbica o anaeróbicamente, dependiendo del oxígeno disponible.

### **2.11.2 Remoción de sólidos suspendidos**

La remoción de sólidos suspendidos es muy efectiva en este tipo de humedal, produciendo efluentes con concentraciones inferiores a los 20 mg/L, que es el valor de referencia.

Los sólidos son eliminados del sistema de manera más o menos rápida, y se estima que cerca del 12 al 20% se realiza en el área inicial.

### **2.11.3 Remoción del nitrógeno**

La remoción del nitrógeno es muy efectiva en los humedales artificiales y los mecanismos de eliminación son similares para ambos tipos de humedales. Aunque ocurre la asimilación del nitrógeno por parte de las

plantas, solo una pequeña fracción del nitrógeno total puede ser eliminado por esta vía. Experiencias en Norteamérica demuestran que solamente entre el 10 y el 15% del nitrógeno eliminado se retira del sistema usando la poda de la plantas. La remoción del nitrógeno en humedales artificiales puede alcanzar valores por encima del 80%.

Puede medirse el nitrógeno que entra al sistema de humedales como nitrógeno orgánico y amoniacal (la combinación de ambas se presenta como nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)), nitritos y nitratos.

En los sistemas de humedales, el potencial de remoción del nitrógeno puede tomar varios años en desarrollarse; por lo menos se requieren dos o tres etapas del crecimiento de las plantas, sistemas de raíces, capa de residuos, para alcanzar el equilibrio.

#### **2.11.4 Remoción de fósforo**

La remoción de fosforo en la mayoría de los sistemas de humedales artificiales no es muy eficaz, debido a las pocas oportunidades de contacto entre el agua residual y el terreno. Se han realizado trabajos experimentales usando arcilla expandida y adición de óxidos de hierro y aluminio; algunos de estos tratamientos pueden ser prometedores, pero las expectativas a largo plazo no se han definido aun. Algunos sistemas en Europa usan arena en vez de grava para aumentar la capacidad de retención de fosforo, pero este medio requiere instalaciones muy grandes, debido a la reducida conductividad hidráulica de la arena comparada con la grava. Si es requisito del proyecto una importante remoción de fósforo se necesitara entonces un área demasiado muy grande o métodos de tratamiento alternativos.

### **2.11.5 Remoción de metales**

Los mecanismos de eliminación de metales en humedales artificiales son similares a los descritos anteriormente para el fósforo, incluyendo asimilación por parte de las plantas, adsorción, y precipitación. Como los sedimentos orgánicos e inorgánicos están aumentando continuamente (a una velocidad lenta) en los humedales, la disponibilidad de sitios de adsorción fresco también está aumentando. Los dos tipos de humedales artificiales tienen la misma capacidad potencial de remoción de metales y esta capacidad se mantiene durante todo el periodo de funcionamiento del sistema.

### **2.11.6 Remoción de coliformes fecales**

Los humedales artificiales son, en general, capaces de una reducción de coliformes fecales de entre 1 a 2 logaritmos con tiempos de retención hidráulica de 3 a 7 días que en muchos casos no es suficiente para satisfacer los requisitos de vertido que a menudo especifican  $\leq 1000$  NMP/100 ml. Este valor puede variar de acuerdo al país. Serían necesarios tiempos de retención superiores a 14 días para lograr reducciones de 3 a 4 logaritmos.

## **2.12 Modelos Generales De Diseño Para Sistemas De Humedales Con Flujo Sub-Superficial**

### 2.12.1 Método sugerido por Reed. {9}

Este método es utilizado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), se basa en que los sistemas de humedales artificiales pueden ser considerados como reactores biológicos, y su rendimiento puede ser estimado mediante una cinética del primer orden de flujo a pistón para la remoción de la DBO y nitrógeno. En los siguientes puntos se tratará sobre modelos de diseño para la remoción de la DBO, sólidos suspendidos, nitrógeno y fosforo para los sistemas de humedales de flujo sub-superficial, así como las consideraciones hidráulicas y térmicas.

La siguiente es la ecuación básica de los reactores de flujo a pistón

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t}$$

Donde:

$C_e$ : Concentración de contaminante (DBO<sub>5</sub>, SST, NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub>, fosforo, etc.) en el efluente, mg/L

$C_o$ : Concentración de contaminante en el afluente, mg/L

$K_T$ : Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d<sup>-1</sup>

$TRH$  : Tiempo de retención hidráulica (TRH), d

Este tiempo de retención hidráulica (TRH) en el humedal puede ser calculado por la siguiente expresión:

$$TRH = \frac{LWyn}{Q}$$

Donde:

$L$  : Largo de la celda del humedal, m

$W$ : Ancho del humedal, m

$y$ : Profundidad de la celda del humedal, m

$n$ : Porosidad o espacio disponible para el flujo de agua a través del humedal, el medio, las raíces y otros sólidos ocupan espacio en el humedal. La porosidad es un porcentaje expresado como decimal.

$Q$ : Caudal medio a través del humedal, m<sup>3</sup>/d

$$Q = \frac{Q_e + Q_o}{2}$$

Donde:

$Q_e$ : Caudal de salida, m<sup>3</sup>/d

$Q_o$ : Caudal de entrada, m<sup>3</sup>/d

Puede ser necesario calcular el caudal medio por la expresión anterior, para compensar las pérdidas o ganancias de agua causadas por filtración. Un diseño conservador debe asumir que no existan pérdidas por filtración y adoptar unas pérdidas razonables para las pérdidas por evapotranspiración y ganancias por lluvia de los registros históricos del lugar, para cada mes de la operación. Esto requiere una primera suposición del

área superficial del humedal para poder calcular el agua extra que entra o sale. Es usualmente razonable para un diseño preliminar suponer que los caudales de entrada y de salida son iguales.

Es entonces posible determinar el área superficial del humedal combinando las ecuaciones (1) y (2). Siendo  $A_s = LW$ , Entonces

$$A_s = \frac{Q \ln(C_0/C_e)}{K_T y n}$$

Donde:

$A_s$ : Área superficial del humedal, m<sup>2</sup>

El valor de  $K_T$  para las ecuaciones (1) y (4), depende del contaminante que se quiera eliminar y de la temperatura.

Como las reacciones biológicas del tratamiento dependen de la temperatura, es necesario para un buen diseño estimar la temperatura del agua del humedal.

El diseño hidráulico de un humedal es tan importante como el de los modelos que calcular la remoción de contaminantes, ya que estos modelos están basados en que se asume un flujo a pistón con un flujo uniforme a través de la sección del humedal y con mínimos flujos preferenciales. Muchos sistemas existentes fueron diseños sin tener la suficiente consideración a los requerimientos hidráulicos lo que llevo a obtener condiciones no esperadas del flujo, incluyendo caminos preferenciales y consecuencias adversos sobre el rendimiento esperado.

### 2.12.1.1 Diseño hidráulico

El diseño hidráulico de un humedal es crítico para el éxito de su rendimiento. Todos los modelos de diseño que se usan actualmente asumen condiciones uniformes de flujo a pistón y que además no existen restricciones para el contacto entre los constituyentes el agua residual y los organismos responsables del tratamiento.

En un humedal de flujo sub-superficial este concepto es necesario para asegurar que las condiciones del flujo sub-superficial se mantengan en circunstancias normales durante todo el periodo de mantenimiento del sistema. Esto solo es posible a través de un cuidadoso diseño hidráulico y unos métodos constructivos apropiados.

$$W = \frac{1}{y} \left[ \frac{QA_s}{mK_S} \right]^{0.5}$$

El área superficial del humedal  $A_s$ , se determina en primer lugar, usando el modelo de diseño limitante para la remoción de contaminantes. La ecuación (6) permite determinar directamente el ancho mínimo absoluto aceptable de una celda del humedal compatible con el gradiente hidráulico seleccionado. Otras combinaciones de ancho-gradiente hidráulico pueden ser posibles a fin de ajustar el diseño a las condiciones topográficas existentes en el sitio propuesto. El valor de  $m$  propuesto en la ecuación (6)

generalmente se encuentra entre 5 y 20% de la pérdida de carga potencial. En este caso se aplica la misma recomendación de la no selección de la máxima pérdida de carga disponible. Es realmente recomendable que  $m$  no sea mayor de 20% para tener un factor de seguridad suficiente contra potenciales atascamientos, efectos de la viscosidad y otras contingencias que pueden llegar a ser desconocidas en el momento del diseño.

Las ecuaciones (5) y (6) son válidas cuando el flujo es laminar a lo largo de los espacios vacíos del medio, es decir cuando el número de Reynolds ( $N_R$ ) es menor que 10. El número de Reynolds ( $N_R$ ) en función de la velocidad del flujo, del tamaño de los espacios vacíos y de la viscosidad cinemática del agua como se muestra en la ecuación (7). En muchos casos el  $N_R$  será mucho menor a 1 en cuyo caso el flujo laminar impera y la ley de Darcy es válida. Si el flujo es turbulento, entonces la conductividad hidráulica efectiva será significativamente menor que la predicha por la ley de Darcy

$$N_R = \frac{vD}{\nu}$$

Donde:

$N_R$ : Número de Reynolds, adimensional

$v$ : Velocidad de Darcy, m/s. Calculado mediante la ecuación (5)

$D$ : Diámetro de los vacíos del medio, tomarlo igual al tamaño medio del medio, m

$\nu$ : Viscosidad cinemática del agua,  $m^2/s$  (ver tabla N° 7)

La conductividad hidráulica  $K_S$  en las ecuaciones (5) y (6) varía directamente con la viscosidad del agua, que a su vez es función de la temperatura del agua:

$$\frac{K_S}{K_{d\ 20}} = \frac{\mu_{20}}{\mu_T}$$

Donde:

$K_S$ : Conductividad hidráulica a una temperatura  $T = 20^\circ\text{C}$

$\mu$ : Viscosidad del agua a una temperatura  $T = 20^\circ\text{C}$  (ver tabla N° 7)

$\mu_T$ : Viscosidad del agua a una temperatura  $T$

Tabla N° 7. Propiedades físicas del agua

Temperatura ( C )	Densidad ( kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad dinámica X 10 <sup>3</sup> ( N*s/m <sup>2</sup> )	Viscosidad cinemática X10 <sup>6</sup> ( m <sup>2</sup> /s )
0	999.8	1.781	1.785
5	1000	1.518	1.519
10	999.7	1.307	1.306
15	999.1	1.139	1.139
20	998.2	1.102	1.003
25	997	0.890	0.893
30	995.7	0.708	0.800
40	992.2	0.653	0.658
50	988	0.547	0.553
60	983.2	0.466	0.474

70	977.8	0.404	0.413
80	971.8	0.354	0.364
90	965.3	0.315	0.326
100	958.4	0.282	0.294

Referencia

La conductividad hidráulica  $K_s$  en las ecuaciones (5) y (6) también varía con el número y tamaño de vacíos en el medio usado en el humedal. La tabla N° 8 presenta órdenes de magnitud estimados para un rango de materiales granulares que podrían ser usados en sistemas de humedales con flujo sub-superficial. Es recomendable que la conductividad hidráulica se mida en el terreno o en laboratorio antes del diseño final.

Tabla N 8. Características típicas de los medio para humedales de flujo sub-superficial

Tipo de material	Tamaño efectivo $D_{10}$	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica $K_s$ ( $m^3/m^2/d$ )
Arena gruesa	2	28 - 32	100 - 1000
Arena gravosa	8	30 - 35	500 - 5000
Grava fina	16	35 - 38	1000 - 10000
Grava gruesa	32	36 - 40	10000 - 50000
Roca gruesa	128	38 - 45	50000 - 250000

Referencia

### 2.12.1.2 Aspectos térmicos

Las condiciones de temperatura en el humedal afectan tanto a las actividades físicas como a las biológicas en el sistema. Las condiciones de bajas temperaturas sostenidas y la formación de hielo resultante, podría llevar en caso extremo, a la falla física del humedal. Es conocido que las reacciones biológicas responsables de la reacción de la DBO, nitrificación y desnitrificación también dependen de la temperatura.

Las constantes dependientes de la temperatura para los modelos de remoción de la DBO<sub>5</sub> y nitrógeno, que se presentan más adelante, son necesarias para proporcionar un método fiable de estimación de la temperatura del agua en el humedal para un uso correcto y efectivo de los modelos biológicos del diseño. En esta sección se presentan las técnicas para calcular la temperatura del agua en los humedales de flujo sub-superficial.

Conocer el estado termal del lecho de un humedal en un momento dado puede ser complicado. Allí puede haber pérdidas o ganancias de calor del suelo subyacente, del agua residual fluyendo a través del sistema y de la atmosfera. Los mecanismos térmicos básicos involucrados incluyen conducción de o hacia el terreno, conducción de o hacia el agua residual, conducción o convección de o hacia la atmosfera y la radiación de o hacia a ella. Las ganancias del calor desde el terreno pueden llegar a ser significativas pero suelen no ser tomadas en cuenta para un diseño más conservador. Ignorar el calor ganado por radiación solar es también conservador, lo cual es apropiado durante los meses de invierno en los lugares más al norte, donde las condiciones son más críticas. Por el contrario, en lugares calurosos, en donde este factor puede llegar a ser

significativo durante los meses de verano, debe incluirse en el diseño. Las pérdidas por convección debidas a la acción del viento sobre las superficies abiertas de agua, pueden ser significativas, pero esto no debería ser el caso para mucho de los humedales con flujo sub-superficial con una buena densidad de vegetación, una capa de restos de vegetación y la presencia de una capa superior con grava relativamente seca. Estos efectos se ven mitigados por la capa de agua subyacente en el humedal, que tiene como resultado que las pérdidas por convección serán relativamente menores y puedan ser ignoradas en el modelo térmico. El modelo significativo que se presenta más adelante está basado solamente en las pérdidas por conducción a la atmósfera y es conservador.

La energía ganada por el flujo del agua a través del humedal viene dada por:

$$q_G = C_p \delta A_s y n$$

Donde:

$q_G$ : Energía ganada por el humedal, J/ °C

$C_p$ : Capacidad de calor específico del agua, J/Kg °C (Ver Tabla N°8)

$\delta$ : Densidad del agua, Kg/m<sup>3</sup>

$A_s$ : Área superficial del humedal, m<sup>2</sup>

$y$ : Profundidad del agua en el humedal, m

$n$ : Porosidad del humedal, (ver tabla N° 8)

El calor específico ( $C_p$ ) puede ser obtenido mediante la siguiente tabla, tomando en cuenta que para las aguas residuales, los valores presentados se deben aumentar entre un 10% -15%.

Tabla N 9. Calor específico del agua limpia entre 0 °C y 100 °C

Temperatura C	Calor específico (J/Kg °C)	Temperatura C	Calor específico (J/Kg °C)
0 (Hielo)	1960	51	4181
1	4213	52	4182
2	4210	53	4182
3	4207	54	4182
4	4205	55	4183
5	4202	56	4183
6	4200	57	4183
7	4198	58	4184
8	4196	59	4184
9	4194	60	4185
10	4192	61	4185
11	4191	62	4186
12	4189	63	4186
13	4188	64	4187
14	4187	65	4187
15	4186	66	4188
16	4185	67	4188
17	4184	68	4189
18	4183	69	4189
19	4183	70	4190
20	4182	71	4190
21	4181	72	4191
22	4181	73	4192
23	4180	74	4192
24	4180	75	4193
25	4180	76	4194
26	4179	77	4194
27	4179	78	4195
28	4179	79	4196
29	4179	80	4196

Referencia

Tabla N 9. Calor específico del agua limpia entre 0 °C y 100 °C.

Temperatura C	Calor específico (J/Kg °C)	Temperatura C	Calor específico (J/Kg °C)
30	4178	81	4197
31	4178	82	4198
32	4178	83	4199
33	4178	84	4200
34	4178	85	4200
35	4178	86	4201
37	4178	88	4203
38	4178	89	4204
39	4179	90	4205
40	4179	91	4206
41	4179	92	4207
42	4179	93	4208
43	4179	94	4209
44	4179	95	4210
45	4180	96	4211
46	4180	97	4212
47	4180	98	4213
48	4180	99	4214
49	4181	100	4216
50	4181	100 (Gas)	2080

Referencia

El calor perdido por el humedal de flujo sub-superficial entero puede ser definido por la siguiente ecuación:

$$q_L = (T_D - T_a)(U)(\sigma)(A_S)(t)$$

Donde:

$q_L$ : Energía perdida vía conducción a la atmosfera, J

$T_o$ : Temperatura del agua en la entrada del humedal, °C

$T_a$ : Temperatura promedio del aire durante el periodo considerado

$U$ : Coeficiente de transferencia de calor a la superficie del lecho del humedal, W/m<sup>2</sup>

$\sigma$ : Factor de conversión, 86400 s/d

$A_s$ : Área superficial del humedal, m<sup>2</sup>

$TRH$ : Tiempo de residencia hidráulica en el humedal, d

El valor de  $T_a$  en la ecuación (10), se obtendrá en los registros locales de meteorología, o de la estación meteorológica más cercano al sitio propuesto. Es aconsejable usar una temperatura del aire promedio, para un periodo de tiempo igual al tiempo de retención hidráulica del humedal.

El cálculo del valor del coeficiente de transferencia del calor  $U$  para la ecuación (10) viene dado por:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{y_1}{k_1}\right)\left(\frac{y_2}{k_2}\right)\left(\frac{y_3}{k_3}\right)\left(\frac{y_4}{k_4}\right)} \quad ($$

Donde:

$k_{n-1}$ : Conductividad de las capas desde la  $N-1$  hasta  $n$  capas, W/m  
 $^{\circ}C$

$y_{n-1}$ : Espesor de las capas desde la  $N-1$  hasta  $N$  Capas, m

La tabla N<sup>o</sup> 10 presenta los valores de conductividad para materiales que están presentes típicamente en un humedal de flujo sub-superficial.

Los valores de conductividad de todos los materiales, excepto el de la capa con restos de vegetación del humedal, han sido viene establecidos y pueden encontrarse en diferentes literaturas. El valor para esta capa de restos de vegetación se cree conservador, debe ser usado con cautela hasta que esta posible una futura verificación.

Tabla N<sup>o</sup> 10. Conductividad térmica de los componentes de un humedal de flujo sub-superficial.

Material	K (W/m <sup>2</sup> C)
Aire (sin convección)	0.024
Nieve (nueva o suelta)	0.08
Nieve (de largo tiempo)	0.23
Hielo a 0 <sup>o</sup> C	2.21
Agua a 0 <sup>o</sup> C	0.58
Capa de restos de vegetación	0.05
Grava seca (25% de humedad)	1.5
Grava saturada	2.0
Suelo seco	0.8

Referencia

El cambio de temperatura  $T_c$  provenientes de las pérdidas y ganancias definidas en las ecuaciones (9) y (10), pueden ser combinándolas:

$$T_c = \frac{q_L}{q_C}$$

Donde:

$T_c$ : Cambio de temperatura en el humedal, °C

Entonces la temperatura del efluente será:

$$T_e = T_o - T_c$$

La temperatura promedio del agua en el humedal  $T_w$  en el humedal con flujo sub-superficial será:

$$T_w = \frac{T_o + T_e}{2}$$

Esta temperatura se compara con el valor asumido, cuando el tamaño y el tiempo de retención hidráulica del humedal para cualquiera de los modelos de remoción, ya sea DBO<sub>5</sub> o nitrógeno. Si estas dos temperaturas no son cercanas, se realizan nuevas iteraciones en los cálculos hasta que converjan.

### 2.12.1.3 Modelo de diseño para la remoción de DBO<sub>5</sub>

Todos los sistemas de humedales artificiales pueden ser considerados como reactores biológicos y su rendimiento se puede aproximar al descrito por la cinética de primer orden de un reactor de flujo pistón.

En los cuales el valor de las constantes de temperatura  $K_T$  se puede determinar de acuerdo a lo siguiente:

$$K_T = K_{20} (1.06)^{T-20}$$

$$K_{20} = 1.104d^{-1}$$

Donde:

$K_T$ : Constante de temperatura, proveniente de la ecuación (15)

La DBO<sub>5</sub> final del efluente se ve influenciada por la producción de DBO<sub>5</sub> residual en el sistema, producto de la descomposición del detritus de las plantas y de otras sustancias orgánicas presentes natural. Esta DBO<sub>5</sub> residual esta típicamente entre 2 y 7 mg/L como resultado, la DBO<sub>5</sub> del efluente de un humedal de este tipo proviene de estas fuentes y no del agua residual. Por lo tanto las ecuaciones (1) y (4) no pueden ser usados para diseñar sistemas con una DBO<sub>5</sub> en el efluente final por debajo de los 5 mg/L.

El lecho de los humedales de flujo sub-superficial tiene una profundidad típica de alrededor de 0.6 m del medio seleccionado. Este, algunas veces, tiene encima una capa de grava fina de 76 a 150 mm de espesor. Esta grava fina sirve para el enrizamiento inicial de la vegetación y se mantiene seca en condiciones normales de operación. Si se selecciona una grava relativamente pequeña, menor a 20 mm para la capa principal donde se realiza el tratamiento, la capa fina superior probablemente no será necesaria, pero entonces la profundidad total deberá incrementarse ligeramente para asegurar que se tenga una zona seca en la parte superior del lecho.

#### **2.12.1.4 Modelo de diseño para remoción de nitrógeno**

El diseño para remoción de nitrógeno para los sistemas de flujo sub-superficial, es un proceso complicado, porque el nitrógeno puede estar presente en una variedad de formas y requiere una serie de condiciones químicas y ambientales para su remoción. El nitrógeno amoniacal es la forma de nitrógeno más frecuentemente regulada en efluente, ya que el amoniaco no ionizado puede ser tóxico para los peces en pequeñas concentraciones y la oxidación del amoniaco en el cauce receptor puede reducir el nivel de oxígeno disuelto.

La remoción de nitrógeno es usualmente el parámetro de diseño limitante cuando se tienen límites estrictos de vertido, tanto de nitrógeno amoniacal como de total. En climas fríos, con largos periodos de bajas temperaturas, los requerimientos para la eliminación de nitrógeno pueden ser limitantes para la factibilidad de las operaciones invernales. En este caso, el almacenamiento del agua residual durante el invierno y la operación durante

el verano será la configuración a adoptar. El dimensionamiento del humedal para la remoción de nitrógeno que se describe a continuación, debe estar acompañado de los cálculos termales.

Cuando el diseño del sistema requiere la remoción de nitrógeno, es aconsejable asumir que todo el nitrógeno Kjeldahl (NTK) que entra al sistema se convierte en amoníaco. Una pequeña fracción del nitrógeno orgánico entrante queda permanentemente fijado al fondo, pero este podría ser omitido para un diseño más conservador. Durante el primer o segundo año de operación, la remoción del nitrógeno puede exceder las expectativas. Esto se debe a que la adsorción del suelo y la asimilación por parte de las plantas generan un rápido crecimiento de la cubierta vegetal. Cerca del final del segundo periodo de crecimiento el ecosistema puede estar aproximándose al equilibrio y la remoción de amoníaco se estabilizara. Los procedimientos de diseño de esta sección están pensados para los rendimientos esperados a largo plazo.

Dado que el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio en los humedales de sistemas flujo sub-superficial, la reaireación atmosférica es probable que sea significativamente menos a la de los sistemas de flujo libre. Las raíces y rizomas de la vegetación son capaces de proporcionar micrositios aerobios en sus superficies, así que el agua residual que fluye a través del lecho tiene numerosas oportunidades de contacto con estos lugares aerobios dentro de un medio que por el contrario es anaerobio. Como resultado, en el mismo reactor se tienen condiciones para hacer posible la nitrificación y la desnitrificación. Los dos tipos de reacciones biológicas, nitrificación y desnitrificación, son dependientes de la temperatura, y la velocidad de transferencia de oxígeno a las raíces de las plantas que puede variar con la estación.

La mayor fuente de carbono para posibilitar la desnitrificación es la muerte y descomposición de las raíces y rizomas, los demás detritus orgánicos y la  $\text{DBO}_5$  del agua residual. Estas fuentes de carbono probablemente estén más limitadas durante la operación inicial en este tipo de sistemas de humedales de flujo sub-superficial respecto a los sistemas de flujo libre, dado que los restos de vegetación se acumulan sobre la parte superior del lecho. Transcurridos varios años, esta capa de desechos ha aumentado y a medida que lo hace comienza a descomponerse, de forma que ambos tipos de humedales artificiales pueden tener fuentes comparables de carbono para hacer posible la desnitrificación.

Dado que la principal fuente de oxígeno de este tipo de humedales son las raíces de las plantas, es absolutamente esencial asegurar que el sistema de raíces penetra hasta la totalidad de la profundidad de diseño del lecho. Cualquier agua que fluya por debajo de las raíces estará en un ambiente totalmente anaerobio, y la nitrificación no ocurrirá excepto por difusión en los niveles superiores.

Son necesarios métodos operativos que aseguren la penetración de las raíces, dado que las plantas pueden encontrar toda la mezcla necesaria y los nutrientes en una parte relativamente poco profunda. En algunos sistemas europeos, el nivel del agua es disminuido gradualmente al término de cada año para inducir la penetración de las raíces. Esto hace necesarios tres periodos de crecimiento para lograr una penetración total de las raíces de las plantas tipo carrizo, que fueron utilizadas, usando este método. Otra aproximación, esta vez para climas fríos donde se requieren grandes aéreas para el invierno, es construir el lecho dividido en tres celdas paralelas, de forma que en verano se operan solamente dos de ellas a la vez durante un mes y así mientras dure el periodo cálido. Las raíces en la celda inactiva

deben penetrar en busca de los nutrientes hasta que el agua es consumida. En climas cálidos, donde la congelación no es un riesgo, es posible limitar la profundidad del lecho a  $\beta = 0,3$  m, así se podrá alcanzar una rápida y completa penetración. El volumen de grava requerida no varía, pero la superficie de terreno necesaria se incrementa a medida que disminuye la profundidad.

- *Nitrificación*

No existe un consenso sobre cuanto oxígeno es transferido a zona de las raíces por cada tipo de planta y, por tanto, no se sabe a ciencia cierta cuanto oxígeno está disponible en la superficie de las raíces para la actividad biológica. Algunas publicaciones estiman un rango de 5 a 45 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>\*día de área superficial de humedal. La demanda de oxígeno de la DBO<sub>5</sub> del agua residual y otras materias orgánicas presentes en el agua pueden utilizar gran parte de este oxígeno disponible.

El oxígeno disponible para nitrificación por unidad de área superficial va de 2,1 a 5,7 g/m<sup>2</sup>\*día por que la profundidad de penetración de las raíces varía en cada una de las plantas. Este valor de oxígeno está cerca del valor más bajo de 5 a 45 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>\*día. Sin embargo, el oxígeno disponible cuando se expresa en función del volumen en la zona de las raíces, es casi el mismo para las diversas plantas. Así que la nitrificación depende de la profundidad de penetración de las raíces presentes en el hecho del humedal de flujo sub-superficial. La ecuación (19) define esta relación:

$$K_{NH} = 0,01854 + 0,3922(rz)^{2,6077} \quad ($$

Donde:

$K_{NH}$ : Constante de nitrificación a 20°C,  $d^{-1}$

rz: Porcentaje de la profundidad del lecho del humedal de sistemas de flujo sub-superficial ocupado por la zona de las raíces, como fracción decimal. (0 a 1).

El valor de  $K_{NH}$  es 0,4007 con una zona de raíces totalmente desarrollada y 0,01854 si el lecho no tiene vegetación. Estos valores son concordantes con los resultados observados en muchos humedales de flujo sub-superficial evaluados por la EPA. Este modelo toma la misma forma de la ecuación (1) con una constante a 20°C de 0,107  $d^{-1}$  para un lecho de gravas en el que la zona de las raíces ocupa entre un 50 y un 60% de la profundidad del lecho.

Una vez definida la constante básica  $K_{NH}$  es posible determinar la remoción de amoníaco, vía nitrificación, en un humedal de flujo sub-superficial usando ecuaciones (1) y (4)

En las cuales para este caso la constante dependiente de la temperatura  $K_T$  es como sigue:

$$K_0 = 0 \text{ d}^{-1}, \text{ a } 0^\circ \text{ C}$$

$$K_T = K_{10} (1,15)^{(T-10)} \text{ d}^{-1}, \text{ de } 1-10^\circ \text{ C}$$

$$K_T = K_{NH} (1,048)^{(T-20)} \text{ d}^{-1}, \text{ +10}^\circ \text{ C}$$

Para las temperaturas por debajo de 10° C es necesario resolver las ecuaciones (19) y (22) para determinar el valor de  $K_{10}$ . Para obtener los valores para temperaturas entre 0 y 1° C se usaran interpolación.

No es aceptable asumir que la zona de raíces ocupada automáticamente la totalidad del lecho, excepto si este es muy poco profundo ( $\beta = 0,3$  m), o si usa grava muy pequeña ( $\beta = 20$  mm). Profundidades del lecho de 0,6 m requieren las medidas especiales tratadas anteriormente para inducir y mantener una penetración total. Si estas medidas no van a ser utilizadas es conservador asumir que la zona de las raíces no ocupara más del 50% de la profundidad del lecho, a menos que las mediciones indiquen otra cosa. Esta recomendación está basada en la experiencia con numerosos sistemas en operación.

La ecuación (21) requerirá normalmente un tiempo de retención hidráulico de entre 6 y 8 días para alcanzar límites exigentes en la remoción de amoníaco en condiciones de verano, con una zona de raíces completamente desarrollada e incluso un largo periodo de bajas temperaturas en invierno.

- *Desnitrificación*

Las ecuaciones (19) a (22) tienen en cuenta solamente la conversión de amoníaco a nitrato, y permiten calcular el área requerida para lograr la conversión deseada. Cuando el proyecto requiere eliminación de nitrógeno, se hace necesario considerar los requerimientos para la desnitrificación y dimensionar el humedal teniéndolos en cuenta. En general, mucha de la producción de nitrato del humedal de flujo sub-superficial puede desnitrificarse y ser removida dentro del área prevista para la nitrificación y

sin necesidad de proporcionar ninguna fuente de carbono adicional. Puede que los humedales de flujo libre sean más efectivos en la remoción de nitratos que los de flujo sub-superficial, ya que tienen una mayor disponibilidad de carbono de los detritus de las plantas, por lo menos en los primeros años de operación. Aunque los humedales de flujo sub-superficial tienen más área superficial para la actividad biológica, es posible que la limitación en la disponibilidad de carbono afecte la desnitrificación y, por tanto, la comparación de los rendimientos. El modelo de diseño recomendado para estimar la remoción de nitratos vía desnitrificación corresponde a las ecuaciones (1) y (4)

Para este caso los valores de la constante de temperatura  $K_T$  viene dado por:

$$K_T: 0 \text{ d}^{-1} (0^\circ\text{C})$$

$$K_T : 1,00(1,15)^{(T-20)}, \text{ d}^{-1} \quad (> \text{ de } 1^\circ\text{C})$$

La constante de desnitrificación entre  $0^\circ\text{C}$  y  $1^\circ\text{C}$  puede determinarse mediante interpolación ( $K_T=0,023$  a  $1^\circ\text{C}$ ). Para efectos prácticos la desnitrificación es insignificante a estas temperaturas.

La concentración de nitratos en el afluente ( $C_o$ ) usada en las ecuaciones (1) y (4) es la diferencia entre las concentraciones de entrada y salida determinadas con la ecuación (1). Como la ecuación (1) determina el amoníaco que queda en el sistema después de la nitrificación en el humedal, sería conservador asumir que la diferencia ( $C_e-C_o$ ) está disponible como

nitrate. Si bien no sobra recordar que las ecuaciones (1) y (4) solo son aplicables para el nitrato que está presente en el humedal.

Los humedales de flujo sub-superficial son en general anóxicos, pero también tienen parte aerobia en la superficie de las raíces y rizomas, por lo que es posible obtener la nitrificación y la desnitrificación en el mismo volumen de reactor. La ecuación (4) nos da el área superficial requerida para la desnitrificación. Esta área de desnitrificación no se adiciona a la calculada para nitrificar y que se determinó igualmente con la ecuación (4) y podría ser menor o igual a esta, dependiendo de las concentraciones de nitratos a la entrada del agua residual antes del tratamiento así como de la temperatura del agua.

- *Nitrógeno total*

Cuando se requiere la desnitrificación, es generalmente por que se tiene un límite de descarga para el nitrógeno total (NT). El nitrógeno total en el efluente del sistema es la suma de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la ecuación (1), tanto para la nitrificación, como para la desnitrificación. La determinación del área requerida para alcanzar el nivel específico de NT en el efluente es un procedimiento iterativo usando las ecuaciones (1) y (4):

1. Se asume un valor para el amoníaco residual ( $C_e$ ) y se resuelve la ecuación (4) para obtener el área requerida para nitrificar, determinándose así el TRH para el sistema.
2. Tomar  $(C_o - C_e)$  como el nitrato producido por la nitrificación y usar este valor como el del afluente en la ecuación (1).

Determinar la concentración de nitratos en el efluente con la ecuación (1).

3. La concentración de NT en el efluente es la suma de los valores de  $C_e$  obtenidos en las ecuación (1) tanto para la nitrificación como para la desnitrificación. Si no se alcanza la exigencia de NT e necesita otra iteración de los cálculos.

#### **2.12.1.5 Modelo de diseño para remoción de fósforo**

Durante el primer año de operación los rendimientos suelen ser excelentes, debido a la absorción del fondo del humedal. La remoción de fósforo a largo plazo, sin embargo, puede ocurrir solo a través de la acumulación de sedimentos. La disposición de estos sedimentos ocurre principalmente vía sedimentación particulada y precipitación química. Estos sedimentos se acumulan como turba encima del lecho. El fósforo es retenido en esos sedimentos como precipitados de hierro, aluminio o calcio.

Normalmente el fósforo está presente en las aguas residuales en concentraciones de entre 4 y 15 mg/L. dependiendo del caudal y de la carga hidráulica asociada, es posible remover entre un 30 y un 60% del fosforo presente en el efluente.

Si los límites de descarga son exigentes en cuanto a la remoción de fósforo ( $< 1$  mg/L), se debe considerar una remoción en una laguna anterior o posterior para evitar que el área del humedal sea demasiado grande.

Como la deposición de sedimentos es la principal vía de eliminación del fósforo, la masa removida es función del área superficial del humedal y de la concentración de fósforo en el agua residual.

Basándose en el análisis de los datos de la *North American Data Base*, Kadlec se ha propuesto una constante de primer orden igual a 10 m/año para estimar la remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales. Los 10 m/año son equivalentes a un promedio diario de 2,74 cm/día que es lo que se usa en la ecuación (29).

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-\frac{K_p}{CH}} \quad ($$

Donde:

$C_e$ : Concentración de fósforo en el efluente, mg/L.

$C_o$ : Concentración de fósforo en el afluente, mg/L.

$K_p$ : 2,74cm/día.

CH: Carga hidráulica promedio anual, cm/día.

$$A_S = \frac{(b)(Q)\ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_p} \quad ($$

Donde:

$A_S$ : Área superficial del humedal, m<sup>2</sup>.

b: Factor de conversión 100cm/m.

Q: caudal promedio del humedal, m<sup>3</sup>/día.

Aunque el modelo fue desarrollado en un principio a partir de datos de humedales de flujo libre, podría ser válido para predecir el comportamiento

de fósforo removido por cualquiera de los sistemas, (flujo libre “o” flujo sub-superficial) ya que depende del área superficial y no de las reacciones biológicas ocurridas en el área superficial específica del medio o detritus de plantas dentro de la zona del humedal.

### **2.12.2 Método de la Environmental Protection Agency (EPA) {12}**

Este método de diseño tiene dos suposiciones básicas, primero el VSB (la capacidad de remoción de contaminantes de la vegetación sumergida) total tiene cuatro zonas (véase figura N° 14) una zona de entrada, una de salida; el medio en estas zonas debe de estar entre 40 y 80 mm de diámetro para reducir al mínimo la obstrucción y debe extenderse desde la parte superior hasta el fondo del sistema.

La zona de entrada debe ser de 2 metros de largo y la zona de salida debe ser aproximadamente 1 m de largo. Estas zonas con grandes medio ayudarán a distribuir o recoger, el flujo sin obstrucciones. El uso de gaviones para contener el medio más grande simplifica la construcción. Estos también pueden hacer que sea más fácil de quitar y limpiar la zona de entrada del medio si se atasca. Las otras dos zonas restantes se denominan zona 1 (zona inicial del tratamiento), ocupa alrededor del 30% del área total, realiza la mayoría del tratamiento y tiene una fuerte disminución de la conductividad hidráulica ( $k = 1$  el uso % de  $k$  limpia). Y la zona 2 (zona final del tratamiento) que ocupará el 70% restante de la zona y tiene poco cambio en la conductividad hidráulica ( $k = 10\%$  el uso de  $k$  limpia).

La segunda suposición básica es que la segunda Ley Darcy, aunque no es exacto, es lo suficientemente bueno para fines de diseño. El dimensionamiento de las zonas de tratamiento inicial y final sigue estos pasos:

1. Determinar el área superficial, usando las recomendaciones de ALR (tasa de carga por área). Esta área superficial debe ser calculada tanto para la remoción de DBO<sub>5</sub> Y SST.

$$A_s = \frac{QC_0}{ALR}$$

Donde:

$A_s$ : Área superficial del humedal, m

$Q$ : Caudal máximo mensual, m<sup>3</sup>/d

$C_0$ : Influyente máximo mensual, mg/l

$ALR$ : Tasa de cargar por area, g/m<sup>2</sup>-d

- El área superficial para la zona inicial del tratamiento ( $A_{si}$ ) = 30% del área mayor
- El área superficial para la zona final de tratamiento ( $A_{sf}$ ) = 70% del área mayor.

2. Determinar el ancho del humedal, utilizando la Ley de Darcy.

3. Determinar la longitud y la pérdida de carga, de la zona de tratamiento inicial, usando la Ley de Darcy.

Este es el largo requerido para que la pérdida de carga  $dh_i$  sea igual a la asumida en los parámetros de diseño. El diseñador debe utilizar un largo igual o superior a este ( $L_i$ ) para asegurar que esta pérdida de carga sea menor o igual al parámetro recomendado.

Para determinar la pérdida de carga en la zona inicial del tratamiento se utiliza la siguiente ecuación.

4. determinar la longitud y la pérdida de carga, de la zona final del tratamiento, usando la Ley de Darcy

Este es el largo en donde el total del área del sistema será exactamente igual al valor establecido por ALR. El diseñador debe utilizar igual o superior a esta  $L_f$  para asegurarse de que la superficie sea igual o mayor que el valor recomendado.

Para determinar la pérdida de carga en la zona final del tratamiento se utiliza la siguiente ecuación.

5. Determinar la elevación del fondo

$E_{be}$  = Elevación de fondo en la salida = 0 (punto de referencia para todas las elevaciones).

Se determina la elevación del fondo al comienzo de la zona final de tratamiento mediante la siguiente ecuación:

Seguidamente se calcula la elevación del fondo en la entrada, con la ecuación que se muestra a continuación:

6. Determinar la elevación de la superficie del agua.

Se determina la elevación de la superficie del agua al comienzo de zona final de tratamiento

Se calcula la elevación de la superficie de agua en la salida a través de la siguiente ecuación.

Seguidamente se calcula la elevación de la superficie de agua en la entrada a través de la siguiente ecuación:

7. Determinar la profundidad del agua.

Se calcula la profundidad del agua en la entrada, mediante la siguiente ecuación:

$D_{we}$ : Profundidad de agua en la salida, m

$E_{we}$ : Elevación de la superficie de agua en la salida, m

$E_{be}$  = Elevación de fondo en la salida = 0 (punto de referencia para todas las elevaciones).

#### 8. Determinar la profundidad del medio

- a. Si el nivel de la superficie es el deseado, la profundidad del medio debe ser mayor que la elevación más alta del agua, un valor aceptable para esta profundidad, sería incrementar la elevación más alta del agua en un 10% .Entonces la profundidad del medio siguiente resultara:

Luego se procede a calcular la profundidad del medio en la salida ( la ecuación que se presenta continuación:

Una vez obtenida la profundidad del medio en la salida se calcula ( profundidad del agua en la entrada:

Se calcula la profundidad del agua al comienzo de la zona final ( tratamiento que viene dada por la siguiente ecuación:

Por último se calcula la profundidad de agua en la salida mediante:

Si se desea que la profundidad del agua sea constante en todo el sistema de VSB (por ejemplo: 0.1m), la profundidad del medio podrá ser calculada del siguiente modo:

Se calcula la elevación de la superficie del medio en la entrada a partir de la siguiente ecuación:

Seguidamente se calcula la elevación de la superficie del medio comienzo de la zona final de tratamiento mediante la siguiente ecuación:

Una vez obtenida la elevación de la superficie del medio en al comienzo de la zona final de tratamiento se calcula la elevación de la superficie del medio en la salida mediante:

Luego se calcula la profundidad del medio tanto en la entrada, al comienzo de la zona final de tratamiento y en la salida a través de las siguientes ecuaciones respectivamente:

9. Determinar el número de celdas del sistema VSB (la capacidad de remoción de contaminantes de la vegetación sumergida).

Se recomienda que al menos dos sistemas de VSB se utilicen en paralelo en todos menos en los sistemas pequeños. Para que uno de los VSB puede

ser tomado fuera de servicio por mantenimiento o reparaciones sin que causan graves violaciones en la calidad del agua.

La tabla N° 11 muestra los valores recomendados para el diseño de un humedal de flujo sub-superficial, en Venezuela. Adaptado de la referencia {12}, según las normas venezolanas {3}

Tabla N 11. Valores recomendados para el diseño de humedal de flujo sub-superficial

Descripción	Valores recomendados
SST	Concentración máxima en el efluente $\leq 80$ mg/L (a)
DBO <sub>5</sub>	Concentración máxima en el efluente $\leq 60$ mg/L (b)
Carga Org. Superficial para concentraciones máximas de DBO de 60mg/L	12 g/m <sup>2</sup> -d
Carga Org. Superficial para concentraciones máximas	53.33 g/m <sup>2</sup> -d

de SST de 80mg/L	
Profundidad medio filtrante (valor típico)	0.5 a 0.6 m
Profundidad del agua(valor típico)	0.4 a 0.5 m
Pendiente longitudinal del fondo	0.5 a 1%
Pendiente de la superficie	Nivelada o cerca de 0%
Conductividad hidráulica (k), primeros 30% de longitud	1% de K del agua limpia (K= 100000m/d)
Conductividad hidráulica (k), ultimo 70% de longitud	10% de K del agua limpia (K= 100000m/d)
<u>Medio filtrante:</u>	Deberá ser lavado para estar limpio y libre de partículas de suelo, ser lo mas redondeado y uniforme posible para garantizar el mayor volumen de vacios posible y de un material resistente a la rotura.
Zona de entrada	40 a 80 mm de diámetro
Zona de tratamiento	15 a 30 mm de diámetro
Zona de salida	40 a 80 mm de diámetro

## **CAPITULO III**

### **MARCO METODOLOGICO**

#### **3.1 Tipo De Investigacion:**

El estudio de humedales artificiales es un tema de amplio espectro que requería gran cantidad de tiempo tan solo para la revisión bibliográfica, ya que esta es muy amplia y se encuentra en gran parte en el idioma inglés, por ser una técnica relativamente nueva y que no ha sido muy utilizada en Venezuela, a pesar de ser una excelente opción para el tratamiento de aguas residuales. Sumándole a esto la inexistencia de parámetros y criterios de diseño en las normas Venezolanas, lo que dificulta aun mas su desarrollo. Es por esto que el alcance de este trabajo esta basado únicamente en el dimensionamiento de humedales de flujo sub-superficial; encontrándonos así en un tipo de investigación exploratoria, ya que permitirá caracterizarlos, con el fin de establecer su estructura, comportamiento y por ultimo llegar a un dimensionamiento del mismo.

#### **3.2 Diseño De La Investigacion**

Esta investigación se apoya en un diseño documental ya que la información requerida se obtendrá través de apoyo a nivel teórico basado en material recolectado y análisis de datos provenientes de materiales impresos u otros tipos de documentos.

### 3.3 Etapas De La Investigacion

#### a) Recopilación de información:

a.1 Revisión bibliográfica: investigación en publicaciones científicas, libros, manuales entre otros.

a.2 Búsqueda y lectura de trabajos anteriores: revisión de antecedentes o trabajos de la misma índole.

a.3 Visitas y búsquedas de organismos pertenecientes a la universidad: Centro de Estudios Ambientales UDO, Biblioteca, Sala de de lectura de Ingeniería Civil.

a.4 Traducción de textos: libros, documentos, manuales pertenecientes a la investigación en otros

#### b) Técnicas de procesamiento y análisis de información

La información bibliográfica recopilada fue clasificada de acuerdo a los tipos de humedales en base a la circulación del agua, es decir si es subterránea o superficial. Quedando así seleccionada solo la información de humedales de flujo sub-superficial necesaria para el desarrollo del tema. Existen diversos métodos para el cálculo de sistemas humedales construidos, pero debido a la falta de consenso mundial sobre la mejor aproximación al diseño y con el objeto de comprarlos, en este trabajo solo fueron seleccionados dos de ellos, basado en que los mismo toman en cuenta la mayor cantidad de variables posibles, por lo que pueden ser considerados más completos y acordes a los objetivos. Encontrando así los criterios básicos de selección para la remoción de las concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), sólidos suspendidos totales (SST) y

nitrógeno .Logrando de esta manera un análisis de contenido que permitirá hacer comparaciones y estudiar a profundidad los diversos métodos encontrados, ya que gracias a la aplicación de esta técnica se pueden hacer apreciaciones sistemáticas, encontrar discrepancias y en general obtener un tipo de información bastante clara en temas que de por si no son muy fáciles de interpretar

### 3.4 Ejemplo De Cálculo

Se escogieron datos comunes para la comparación de los dos métodos seleccionados a fin de establecer un análisis de los resultados y decidir sobre el método de cálculo más conveniente para su aplicación. A continuación se presenta el problema:

Se desea tratar un agua residual proveniente de un tanque séptico sin cámara de filtración, a través de un humedal artificial de flujo sub-superficial. El agua residual posee las siguientes características a la entrada y salida del humedal:

- DBO<sub>5</sub> entrada: 130 mg/L
- DBO<sub>5</sub> salida: 20 mg/L
- SST entrada: 130 mg/L
- Concentración de amoníaco (NH<sub>3</sub>-N) en el afluente: 30 mg/L. Extraído de la tabla N° 3.
- Concentración de amoníaco (NH<sub>3</sub>-N) en el efluente: 3 mg/L. Extraído de la tabla N° 5.
- Concentración de fósforo (P) en el Afluente: 12 mg/L. Extraído de la tabla N° 3.

- Concentración de fósforo (P) en el efluente: 9 mg/L. Extraído de la Gaceta Oficial N° 502. {3}
- Caudal (Q): 1000 m<sup>3</sup>/d

- Medio {
  - Granulometría del medio filtrante 16 mm
  - Porosidad (n) 0.38
  - Conductividad hidráulica (k<sub>s</sub>) 10000 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-d

- Pendiente del fondo (S) 0.5%.

**Nota:** Aunque el método sugerido por Reed, aconseja que el valor de la pendiente del fondo esté comprendida entre 5% - 10% de la pérdida de carga potencial. Para efectos de este ejemplo se asumió una pendiente del fondo 0.5%, siendo este valor recomendado por el método de la EPA (Environmental Protection Agency) y de esta manera lograr un parámetro común necesario para la comparación.

- Profundidad del humedal: 0.6 m
- Temperatura de diseño del agua: 25 °C
- Temperatura con que entra el agua: 28 °C (valor inicial asumido)
- Temperatura promedio del aire: 20 °C.
- Penetración de las raíces 100%.

**Nota:** Según la literatura revisada, las plantas que generalmente se utilizan en este tipo de tratamiento de aguas residuales (Vetiver, Typha, Juncos etc.) sus rizomas llegan a alcanzar grandes tamaños

por lo que se puede considerar que consiguen penetrar un 100% en la profundidad del humedal.

A continuación se presentan dos tablas con concentraciones típicas de efluentes de aguas residuales domésticas provenientes de tanques sépticos con y sin cámara de filtración, las cuales servirán de apoyo para la resolución del problema. Los demás valores que no están contemplados en las mismas, fueron extraídos de la Gaceta Oficial N° 5021, (Véase anexo B). {3}

### 3.4.1 Resolución del problema, mediante la aplicación del método sugerido por Reed. {9}

1. Se hace el ajuste de temperatura, según la. Ec. (15):

$$K_T = 1.104(1.06)^{25-20} = 1.477 \text{ d}^{-1}$$

2. Se determina el área superficial: Para la remoción de DBO, según la. Ec. (4):

$$A_s = \frac{1000 \text{ m}^3/\text{d} \times \ln \left( \frac{130 \text{ mg/L}}{20 \text{ mg/L}} \right)}{1.48 \text{ d}^{-1} \times 0.6 \text{ m} \times 0.38} = 5558.33 \text{ m}^2$$

3. Se calcula el tiempo de retención hidráulico para la remoción de DBO, según la. Ec. (2):

$$THR = \frac{5558.33 \text{ m}^2 \times 0.6 \text{ m} \times 0.38}{1000 \text{ m}^3/\text{d}} = 1.27 \text{ d}$$

4. Se calcula la temperatura promedio anual

Asumiendo que existe una capa grava gruesa que cubre el humedal de 0.08m, y una capa de residuo de vegetación de (0.15 m), se aplica la. Ec. (11) para obtener el coeficiente de calor:

Los valores de  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  se obtienen de la tabla N° 10

$$U = \frac{1}{\left(\frac{0.15 \text{ m}}{0.05 \text{ w/m}^\circ\text{C}}\right) \left(\frac{0.08\text{m}}{1.5 \text{ w/m}^\circ\text{C}}\right) \left(\frac{0.60 \text{ m}}{2 \text{ w/m}^\circ\text{C}}\right)} = 0.30$$

La temperatura se determina a partir de la. Ec. (12):

$$T_c = \frac{(28^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \times 0.30 \times 86400 \times 1.27 \text{ d}}{4596.9 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}^\circ\text{C} \times 1000 \text{ mg/L} \times 0.60 \text{ m} \times 0.38} = 0.25^\circ\text{C}$$

El valor del calor específico del agua limpia se obtiene de la tabla N° 9, recordando que para aguas residuales los valores deben ser aumentados en un 10% al 15%, según la. Ec. (13):

$$T_e = 28^\circ\text{C} - 0.25^\circ\text{C} = 27.75^\circ\text{C}$$

Luego se aplica la. Ec. (14) para obtener la temperatura promedio del agua en el humedal:

$$T_W = \frac{28^\circ\text{C} + 27.75^\circ\text{C}}{2} = 27.88^\circ\text{C}$$

Como la temperatura  $T_W$  calculada es aproximadamente igual a la temperatura asumida en el diseño, se puede decir que es aceptable, por lo que no es necesario hacer ajustes en la temperatura.

5. Asumiendo que se utilizaran dos celdas de un área cada una de  $2779.17 \text{ m}^2$ , y tomando en cuenta que el caudal de cada celda será de  $500 \text{ m}^3/\text{d}$ , se aplica la. Ec. (6):

El valor de  $K_s$  se obtuvo de la tabla N° 8, para determinar el ancho del humedal:

$$W = \frac{1}{0.6 \text{ m}} \left[ \frac{500 \text{ m}^3/\text{d} \times 2779.17 \text{ m}^2}{0.005 \times 10000 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}} \right]^{0.5} = 277.85 \text{ m}$$

El largo se determina mediante la. Ec. (5b):

$$L = \frac{2779.17 \text{ m}^2}{278 \text{ m}} = 9.98 \text{ m} \cong 10 \text{ m}$$

6. Estimación de la remoción de sólidos suspendidos totales, aplicando la. Ec. (18):

$$CH = \frac{500 \text{ m}^3/\text{d}}{5558.33 \text{ m}^2} \times 100 = 17.99 \text{ cm/d}$$

Luego se aplica la. Ec. (17):

$$C_e = 130 \text{ mg/L} (0.1058 + 0.0014(17.99 \text{ cm/d})) = 17.03 \text{ mg/L}$$

El % de sólidos removidos es:

$$\% = \frac{130 - 17.03}{130} \times 100 = 85 \%$$

Como se dijo anteriormente esto es solo una estimación, dado que no es un factor limitante en el diseño.

7. Área superficial para la remoción de nitrógeno, según la. Ec. (4):

$$K_{NH} (100\% \text{ rz}) = 0,01854 + 0,3922(1.0)^{2,6077} = 0.4107 \text{ d}^{-1}$$

- Se calcula  $A_S$  con un 100% de rz y THR, según las. Ecs. (4) y (2) respectivamente:

$$A_S = \frac{1000 \text{ m}^3/\text{d} \times \ln \left( \frac{30 \text{ mg/L}}{3 \text{ mg/L}} \right)}{0.4107 \text{ d}^{-1} \times 0.6 \text{ m} \times 0.38} = 24589.86 \text{ m}^2$$

$$THR = \frac{24589.86 \text{ m}^2 \times 0.6 \text{ m} \times 0.38}{1000 \text{ m}^3/\text{d}} = 5.6 \text{ d}$$

#### 8. Concentración de nitratos en el efluente

$$\text{Nitratos del humedal} = 30 \text{ mg/L} - 3 \text{ mg/L} = 27 \text{ mg/L}$$

Asumiendo los límites de iteración, mediante la utilización de las ecuaciones (21) y (1) respectivamente:

$$- rz = 100\% < 0.13 \text{ mg/L}$$

$$K_T = 1.00(1.15)^{25-20} = 2.01 \text{ d}^{-1}$$

$$C_e = 30 \text{ mg/L} \times e^{-2.01 \text{ d}^{-1} \times 5.6 \text{ d}} < 0.13 \text{ mg/L}$$

#### 9. Nitrógeno total en el efluente del humedal

$$- (rz=100\%): \text{NT} = 3 \text{ mg/L} + 0.13 \text{ mg/L} = 3.13 \text{ mg/L} \longrightarrow 3 \text{ mg/L}$$

Muy alto

10. El área y el THR son muy pequeñas en el caso del 100% de penetración de las raíces para una desnitrificación suficiente. Se necesita otra iteración, entonces se asume una concentración de

amoníaco de 2 mg/L y límite de iteración de 0.05 mg/L. Aplicando la Ec. (4), se tiene un área superficial de:

$$A_s = \frac{1000 \text{ m}^3/\text{d} \times \ln \left( \frac{30 \text{ mg/L}}{2 \text{ mg/L}} \right)}{0.4107 \text{ d}^{-1} \times 0.6 \text{ m} \times 0.38} = 28919.92 \text{ m}^2$$

Y el tiempo de retención hidráulica sería entonces según la Ec. (2):

$$THR = \frac{24589.86 \text{ m}^2 \times 0.6 \text{ m} \times 0.38}{1000 \text{ m}^3/\text{d}} = 5.6 \text{ d}$$

$$C_e = \frac{28 \text{ mg}}{L} \times e^{-2.01 \text{ d}^{-1} \times 5.6 \text{ d}} < 0.05 \text{ mg/L}$$

$$NT = 2 \text{ mg/L} + 0.05 \text{ mg/L} = 2.05 \text{ mg/L} < 3 \text{ mg/L} \rightarrow \text{Aceptable}$$

11. Carga hidráulica para eliminación de fósforo, según la Ec. (18):

$$CH = \frac{1000 \text{ m}^3/\text{d}}{24589.86 \text{ m}^2} \times 100 = 4.07 \text{ cm/d}$$

12. Concentración de fósforo en el efluente

Aplicando la Ec. (24) el área superficial viene dada por:

$$A_5 = \frac{100 \text{ cm/m} \times 1000 \text{ m}^3/\text{d} \times \ln \left( \frac{12 \text{ mg/L}}{9 \text{ mg/L}} \right)}{2.74 \text{ cm/d}} = 10499.35 \text{ m}^2$$

Y el ancho del humedal según la. Ec. (6):

$$W = \frac{1}{0.6 \text{ m}} \left[ \frac{500 \text{ m}^3/\text{d} \times 5249.67 \text{ m}^2}{0.005 \times 10000 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}} \right]^{0.5} = 1207.58 \text{ m}$$

Luego se calcula la longitud según la. Ec. (5b):

$$L = \frac{10499.35 \text{ m}^2}{1207.58 \text{ m}} = 8.69 \text{ m}$$

### 3.4.2 Resolución del problema, mediante la aplicación del método sugerido por EPA (Environmental Protection Agency) {12}

Datos adicionales: (según tabla N° 11).

- Carga orgánica superficial para la DBO (ALR), para una concentración de DBO en el efluente de 20 mg/L = 4 g/m<sup>2</sup> – d
- Carga orgánica superficial para los SST (ALR), para una concentración de SST en el efluente de 20 mg/L = 13.33 g/m<sup>2</sup> – d
- Conductividad hidráulica en la zona inicial de tratamiento (k<sub>i</sub>) = 1% del K del agua limpia, donde K = 100.000 m/d
- Conductividad hidráulica en la zona final de tratamiento (k<sub>f</sub>) = 10% del K del agua limpia, donde K = 100.000.

- Pérdida de carga máxima en la zona inicial del tratamiento ( $dh_i$ ) = 10% de la profundidad del humedal = 0,06 m
- Profundidad del agua en la entrada ( $D_{w0}$ ) = 0.4 m
- Profundidad del agua al comienzo de la zona final de tratamiento ( $D_{wf}$ ) = 0.4 m.
- Granulometría del medio filtrante en la zona inicial de tratamiento = 60 mm
- Granulometría del medio filtrante en la zona final del tratamiento = 60 mm

**Procedimiento de cálculo:**

1. Se determina el área superficial, usando las recomendaciones de ALR (carga orgánica superficial):

- Para la DBO, según la. Ec. (25):

$$A_s = \frac{1000 \text{ m}^3/\text{d} \times 130 \text{ g}/\text{m}^3}{4 \text{ g}/\text{m}^2\text{d}} = 32500 \text{ m}^2$$

- Para los SST, según la. Ec. (25):

$$A_s = \frac{1000 \text{ m}^3/\text{d} \times 130 \text{ g}/\text{m}^3}{13.33 \text{ g}/\text{m}^2\text{d}} = 9752.44 \text{ m}^2$$

Se toma la mayor área, en este caso para la DBO, obteniendo un  $A_s = 32500 \text{ m}^2$

- Área superficial para la zona inicial del tratamiento ( $A_{si}$ )

$$A_{si} = 30\% (32500 \text{ m}^2) = 9750 \text{ m}^2$$

- Área superficial para la zona final de tratamiento ( $A_{sf}$ )

$$A_{sf} = 70\% (32500 \text{ m}^2) = 22750 \text{ m}^2$$

2. Se determina el ancho del humedal, utilizando la Ley de Darcy, utilizando la Ec. (27):

$$W^2 = \frac{1000 \text{ m}^3/d \times 9750 \text{ m}^2}{1000 \text{ m/d} \times 0.06 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}} = 637.38 \text{ m}$$

3. Se determina el largo y la pérdida de carga en la zona inicial de tratamiento mediante la Ec. (28):

$$L_i = \frac{9750 \text{ m}^2}{637.38 \text{ m}} = 15.30 \text{ m}$$

Para determinar la pérdida de carga en la zona inicial de tratamiento, se aplica la. Ec. (29):

$$dh_i = \frac{1000 \text{ m}^3/d \times 15.30 \text{ m}}{1000 \text{ m/d} \times 637.38 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}} = 0.06 \text{ m}$$

Como el valor de la pérdida de carga en la zona inicial de tratamiento ( $dh_i$ ) calculado, es igual o cercano al valor establecido para el diseño, entonces es aceptable.

4. Se determina el largo y la pérdida de carga, de la zona final del tratamiento, según la. Ec. (30):

$$L_f = \frac{22750 \text{ m}^2}{637.38 \text{ m}} = 35.69 \text{ m}$$

Para determinar la pérdida de carga en la zona final de tratamiento, se utiliza la. Ec. (31):

$$dh_f = \frac{1000 \text{ m}^3/d \times 35.69 \text{ m}}{10000 \text{ m/d} \times 637.38 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}} = 0.01 \text{ m}$$

5. Se determina la elevación del fondo:

$E_{be}$  = Elevación de fondo en la salida = 0 (punto de referencia para todas las elevaciones).

Se determina la elevación del fondo al comienzo de la zona final de tratamiento mediante la. Ec. (32):

$$E_{bf} = 0.005 \times 35.69 \text{ m} = 0.18 \text{ m}$$

Seguidamente se calcula la elevación del fondo en la entrada, con la. Ec. (33):

$$E_{bo} = 0.005(15.30 \text{ m} + 35.69 \text{ m}) = 0.25 \text{ m}$$

6. Se determina la elevación de la superficie del agua

Primero se calcula la elevación de la superficie del agua al comienzo de la zona final de tratamiento, aplicando la. Ec. (34):

$$E_{wf} = 0,18 \text{ m} + 0.4 \text{ m} = 0.58 \text{ m}$$

Se calcula la elevación de la superficie de agua en la salida a través de la. Ec. (35):

$$E_{we} = 0.58 \text{ m} - 0.01 \text{ m} = 0.57 \text{ m}$$

Seguidamente se calcula la elevación de la superficie de agua en la entrada a través de la. Ec. (36):

$$E_{wo} = 0.58 \text{ m} + 0.06 \text{ m} = 0.64 \text{ m}$$

7. Se determina la profundidad del agua.

Se calcula la profundidad del agua en la entrada mediante. Ec. (37):

$$D_{wo} = 0.64 \text{ m} - 0.25 \text{ m} = 0.39 \text{ m}$$

Como el valor de la profundidad del agua en la entrada  $D_{wo}$  calculado es igual a la asumida en el diseño, entonces es aceptable

Se calcula la profundidad del agua en el comienzo de la zona final de tratamiento a través de la. Ec. (38):

$$D_{wf} = 0.58 \text{ m} - 0.18 \text{ m} = 0.40 \text{ m}$$

Como el valor de la profundidad del agua al comienzo de la zona final de tratamiento  $D_{wf}$  calculado es igual a la asumida en el diseño, entonces es aceptable.

Seguidamente se calcula la profundidad de agua en la salida a través de la. Ec. (39):

$$D_{we} = 0.57 \text{ m} - 0 = 0.57 \text{ m}$$

#### 8. Se determina la profundidad del medio

Como el nivel de la superficie es el deseado, la profundidad del medio debe ser mayor que la elevación más alta del agua.

Como la elevación de agua más alta es la correspondiente a la entrada  $E_{wo} = 0.65\text{m}$ , una elevación del medio de 0.75 sería razonable y la profundidad del medio, viene dada por la. Ec. (40):

$$D_{mo} = 0.75 \text{ m} - 0.25 \text{ m} = 0.50 \text{ m}$$

Seguidamente se calcula la profundidad del medio en el comienzo de la zona final de tratamiento mediante la Ec. (41):

$$D_{mf} = 0.75 \text{ m} - 0.18 \text{ m} = 0.57 \text{ m}$$

Luego se procede a calcular la profundidad del medio en la salida con. Ec. (42):

$$D_{me} = 0.75 \text{ m} - 0 = 0.75 \text{ m}$$

Una vez obtenida la profundidad del medio se calcula la profundidad del agua en la entrada mediante Ec. (43):

:

$$D_{tw0} = 0.75 \text{ m} - 0.64 \text{ m} = 0.11 \text{ m}$$

Se calcula la profundidad del agua al comienzo de la zona final de tratamiento que viene dada por la. Ec. (44):

:

$$D_{twf} = 0.75 \text{ m} - 0.58 \text{ m} = 0.17 \text{ m}$$

Por último se calcula la profundidad de agua en la salida mediante.

Ec. (45):

$$D_{twe} = 0.75 \text{ m} - 0.57 \text{ m} = 0.18 \text{ m}$$

- Determinar el número de celdas del sistema VSB (la capacidad de remoción de contaminantes de la vegetación sumergida).

Ancho total (w) = 637.38 m

Longitud total  $L = L_i + L_f$

$$L = 15.30 \text{ m} + 35.69 \text{ m} = 50.99 \text{ m}$$

El tamaño total del sistema es de 637.38 m de ancho y 50.99 m de largo por lo tanto la utilización de 9 celdas cada 71m de ancho y 51 m de largo. Otras combinaciones de largo y ancho pueden ser utilizadas siempre que cumplan con la superficie necesaria y cuando satisfagan las condiciones hidráulicas.

## **CAPITULO IV**

### **DISCUSION DE RESULTADOS**

Los datos relativos a los parámetros físicos, químicos y origen del agua de los métodos de humedales sub-superficiales estudiados son presentados en la tabla N°12, así como también los resultados obtenidos. En general se tratan de ecosistemas de tamaño medio no superior a 50 ha, donde el agua proviene de un proceso primario (tanque séptico, con cámara de filtración). La conductividad hidráulica es un parámetro de diseño en ambos métodos la cual está comprendida en un rango de 1000 m/d – 10000 m/d, diferenciándose en que el método de la EPA (Environmental Protection Agency) asume una capacidad de percolación del agua para cada zona de tratamiento, teniendo así para la zona de entrada una conductividad de 1000 m/d, ya que existe mayor cantidad de sólidos y para la zona de salida de 10000 m/d, lo cual se justifica ya que la cantidad de sólidos es mucho menor. Mientras que el método sugerido por Reed toma una conductividad constante en todo el sistema de 10000 m/d.

Aunque en el método sugerido por Reed, la temperatura como factor de diseño puede ser variable, para efectos de este ejemplo se considero la temperatura de la zona norte del Estado Anzoátegui Venezuela, obtenidas de la estación meteorológica de la zona. Sin embargo la temperatura no es un parámetro de diseño considerado por el método de la EPA (Environmental Protection Agency).

Aunque ambos métodos toman en cuenta gran cantidad de variables para la obtención de un sistema de humedal de mayor eficiencia, un factor determinante en la selección del modelo de diseño más óptimo es el área superficial. obteniendo así un área de 28919.92 m<sup>2</sup> para el método propuesto por Reed y un área superficial de 32500 m<sup>2</sup> para el modelo sugerido por la EPA, siendo este el método escogido debido a que presenta la mayor superficie de terreno. No obstante, ambos modelos fueron diseños para una concentración máxima en el efluente de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 20 mg/L cumpliendo así con los límites establecido en la Gaceta Oficial N° 5021 {3}. Teniendo una mayor área superficial el agua posee mayor tiempo de retención hidráulica dentro del humedal y por ende se obtiene un efluente de mejor calidad sin necesidad de llegar a un sobre diseño. Por otra parte el método seleccionado toma en cuenta una variable de gran importancia a la hora de diseñar sistemas de tratamiento de aguas residuales como lo es la carga orgánica.

Tabla N 12. Comparación de los resultados obtenidos mediante la aplicación de los métodos sugeridos por Sherwood Reed y la EPA

(Environmental Protection Agency)

Parámetros de diseño	Reed (a)	EPA (b)
Concentración de DBO del afluente (mg/L)	130	130
Concentración de DBO del efluente máximo (mg/L)	20	20
Concentración de SST del afluente (mg/L)	130	130
Concentración de SST del efluente máximo (mg/L)	No aplica	20
Concentración de amoníaco en el afluente (mg/L)	30	No aplica
Concentración de amoníaco en el efluente máximo (mg/L)	3	No aplica
Concentración de fósforo en el afluente (mg/L)	12	No aplica
Concentración de fósforo en el efluente (mg/L)	2	No aplica
Caudal Promedio de entrada (m <sup>3</sup> /d)	1000	1000
Porosidad del medio filtrante	0.38	No aplica
Conductividad hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -d)	1000 0	1000 -10000
Conductividad hidráulica en la zona inicial de tratamiento (m/d)	1000 0	1000
Conductividad hidráulica en la zona final de tratamiento (m/d)	1000 0	1000 0
Pendiente del fondo (%)	0.5	0.5
Granulometría del medio filtrante (mm)	16	16
Granulometría del medio filtrante en la zona inicial del tratamiento (mm)	No aplica	60
Granulometría del medio filtrante en la zona final del tratamiento (mm)	No aplica	60
<b>RESULTADOS: Área superficial (m<sup>2</sup>)</b>	<b>2891 9.92</b>	<b>3250 0.00</b>

#### 4.1 Hoja De Cálculo

La hoja de cálculo que se presentan a continuación facilita el dimensionamiento de humedales artificiales de flujo sub superficial, ya que introduciendo correctamente los datos requeridos por el método de la EPA (Environmental Protection Agency); entre los que tenemos:

- DBO<sub>5</sub> afluente
- DBO<sub>5</sub> efluente
- SST afluente
- SST efluente
- Caudal
- Carga orgánica DBO<sub>5</sub>
- Carga orgánica SST
- Conductividad hidráulica
- Conductividad hidráulica a la zona inicial del tratamiento
- Conductividad hidráulica a la zona final del tratamiento
- Temperatura
- Prof. del agua en entrada de diseño
- Prof. del agua en la salida de diseño
- Prof. Media de diseño
- Perdida de carga máxima. de diseño

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Una vez investigado y estudiado con detenimiento todo lo referente a sistemas de humedales de flujo sub-superficial podemos concluir que:

1. Los humedales artificiales son una tecnología viable para la depuración de aguas residuales, especialmente si éstas son de origen urbano, y puede llegar a tener un gran futuro en países en vías de desarrollo que tengan climas tropicales o subtropicales, donde las condiciones económicas de estos proyectos (necesidades de terreno, relativamente menores costes de instalación, operación y mantenimiento), pueden ser determinantes a la hora de emprender o no la depuración de las aguas residuales, si a este punto adicionamos las condiciones climáticas de los pises con climas tropicales o sub tropicales, esto favorecería sus rendimientos y se tendría una interesante posibilidad de solución.
2. El sistema de humedales como alternativa de tratamiento debe considerarse como sostén ecológico, barrera viva y aislamiento para evitar contaminación visual y paisajística.

3. La aplicación de humedales artificiales puede ayudar a resolver el problema de manejo de desechos líquidos domésticos en zonas rurales aisladas de nuestro país, el sistema es atractivo para estas áreas debido a que no se requiere de conocimiento técnico especializado para su mantenimiento.
4. Los climas tropical y subtropical son los más ideales a implantar el sistema debido a que la temperatura afecta la velocidad de las reacciones bioquímicas, la toma de nutrientes será mucho más baja por parte de la biomasa y plantas aplicado el sistema en climas fríos.

Aunque en los humedales artificiales existe una remoción de fósforo esta no es muy eficaz debido a las limitadas oportunidades de contacto del agua residuales con el terreno. En estos sistemas los mecanismos principales para la remoción de fósforo son la captación por parte de las plantas y la retención en el terreno.

5. El método sugerido por la EPA (Environmental Protection Agency), se puede considerar como la metodología más apropiada para el diseño de humedales artificiales de flujo sub superficiales debido a que permite obtener una mayor área para el tratamiento, además considera otros parámetros fundamentales para el dimensionamiento de humedales como: La elevación de fondo y la elevación de la superficie de agua tanto en la entrada como en la salida del humedal.
6. La hoja de cálculo sugerida es una herramienta que facilita el dimensionamiento de los humedales artificiales de flujo sub

superficiales, ya que siguiendo el diagrama de flujo propuesto, e introduciendo los datos requeridos, esta realiza el procesamiento de los mismos logrando así el objetivo planteado que es el dimensionamiento del humedal.

## **5.2 Recomendaciones**

1. Las especies vegetales a implantar en el sistema deben ser en lo posible nativas de la zona, evitando la necesidad de un proceso de adaptación e irrigación permanente reduciendo así los costos de mantenimiento.
2. Las tormentas pueden afectar en parte la eficiencia del tratamiento, la vegetación y estructuras del humedal; para ello deben diseñarse diques y vertederos para que soporten la erosión causada por las diferentes variables climáticas como lluvia y viento.
3. Incluir los humedales construidos en la Norma Venezolana como método de tratamiento para las aguas residuales.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Arcos, R. Y otros. **“Remoción de la materia orgánica mediante la utilización de humedales artificiales en la comunidad de St. María Nativitas Texcoco Edo México”**. Laboratorio de contaminación acuática. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza UNAM. México, (1999).  
Disponible en página web: <http://www.cepis.ops-s.org/cepis/e/cepisacerca.html>.
2. Francia, D. Y otros. **“Análisis de ecuaciones para la predicción de la reducción de la  $dbo_5$  en el tratamiento de aguas residuales mediante pantanos artificiales de flujo subsuperficial”**. Instituto de Ciencias Agrícolas. Universidad de Guanajuato. México, (1993). Disponible en página web: <http://www.cepis.ops-oms.org/cepis/e/cepisacerca.html>
3. MARNR, Gaceta Oficial de la Republica Bolivariana de Venezuela, N . 5021 Extraordinario de fecha 18-12-95, contentivo, **“Normas para la clasificación y control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos”**, Caracas (1995).
4. Monje, L. **“Humedales artificiales”**. Corporación Autónoma Regional CAR. Colombia, (1990). Disponible en página web: <http://www.cepis.ops-oms.org/cepis/e/cepisacerca.html>.

5. Morales, J. **“Infograndin”**. Recuperado Marzo 23, 2010. De <http://www.infogardin.com/>
  
6. Metcalf & Eddy. **“Ingeniera de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización”**. Tercera edición. Editorial McGraw-Hill. (1995).
  
7. Reed, S. Y otros. **“Natural systems for waste management and treatment”**. Segunda edición. Editorial McGraw-Hill. (1995).
  
8. Tchobanoglous, G. Y otros. **“Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse”**. Tercera edición. Metcalf and Eddy Inc., McGrawHill, New York, USA. (1991).

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

<b>TÍTULO</b>	<b>METODOLOGIA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE CAMPOS DE HUMEDALES DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL CONSTRUIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES</b>
<b>SUBTÍTULO</b>	

**AUTOR (ES):**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>
<b>ABALOS MORANTE, CAROLINA</b>	<b>CVLAC: 17.221.444</b> <b>EMAIL: krola_86@hotmail.com</b>
<b>AGOSTINI MORALES, RONALD ALEXANDER</b>	<b>CVLAC:17.535.622</b> <b>EMAIL: Disk_777@hotmail.com</b>
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>

**PALÁBRAS O FRASES CLAVES:**

Humedales artificiales

Tratamiento

Aguas residuales

Proceso de remoción

Nitrificación

Desnitrificación

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ÁREA	SUBÁREA
INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS	INGENIERIA CIVIL

**RESUMEN (ABSTRACT):**

La presente monografía tiene como objetivo principal elaborar una metodología para el dimensionamiento de campos de humedales de flujo sub-superficial, como sistema de tratamiento natural de aguas residuales; basada en la investigación y selección de diferentes métodos de cálculo existentes para el diseño. Estos fueron sometidos a un proceso de comparación tomando en cuenta los parámetros de diseños utilizados para cada método, obteniendo así apreciaciones sistemáticas y un tipo de información bastante clara sobre el tema propuesto. La elección de la metodológica más apropiada estuvo fundamentada en la cantidad de superficie de terreno necesaria para el tratamiento requerido por cada uno, así como también la cantidad de variables que son tomadas en cuenta para el diseño. Con el objeto de simplificar el dimensionamiento de humedales artificiales de flujo sub-superficial, fue elaborada una hoja de cálculo en Microsoft Excel.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****CONTRIBUIDORES:**

<b>APELLIDOS NOMBRES</b>	<b>Y</b>	<b>ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL</b>						
<b>Ghanem, Ana</b>		<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>X</b>	<b>TU</b>	<b>JU</b>	
		<b>CVLAC:</b>	<b>5.396.725</b>					
		<b>E_MAIL</b>	<b>Ana_ghanem@gmail.com</b>					
		<b>E_MAIL</b>						
<b>Morales, Hilda</b>		<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>		<b>TU</b>	<b>JU</b>	<b>X</b>
		<b>CVLAC:</b>	<b>5.189.811</b>					
		<b>E_MAIL</b>	<b>Moraleshc@hotmail.com</b>					
		<b>E_MAIL</b>						
<b>Moreno, Jesús</b>		<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>		<b>TU</b>	<b>JU</b>	<b>X</b>
		<b>CVLAC:</b>	<b>15.416.432</b>					
		<b>E_MAIL</b>						
		<b>E_MAIL</b>						
		<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>		<b>TU</b>	<b>JU</b>	
		<b>CVLAC:</b>						
		<b>E_MAIL</b>						
		<b>E_MAIL</b>						

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

<b>2010</b>	<b>05</b>	<b>21</b>
<b>AÑO</b>	<b>MES</b>	<b>DÍA</b>

**LENGUAJE. SPA****METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
MONOGRAFIA. Metodología para el dimensionamiento	Application/msword
de campos de humedales de flujo sub-superficial.doc	

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H I J K L  
M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1 2 3 4  
5 6 7 8 9.

**ALCANCE****ESPACIAL:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)**TEMPORAL:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

INGENIERO CIVIL \_\_\_\_\_

**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

PREGRADO \_\_\_\_\_

**ÁREA DE ESTUDIO:**

DEPARTAMENTO DE CIVIL \_\_\_\_\_

**INSTITUCIÓN:**

UNIVERSIDAD DE ORIENTE, NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI \_\_\_\_\_

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****DERECHOS****De acuerdo al Artículo N 41 del reglamento de trabajo de Grado**

"Para la Aprobación Definitiva de los Cursos Especiales de Grado como Modalidad de Trabajo de Grado, será Requisito Parcial la Entrega, a un Jurado Calificado de una Monografía en la cual se profundice en uno o más Temas Relacionados con el Área de Concentración".

---

ABALOS M., CAROLINA

**AUTOR**

---

AGOSTINI M., RONALD A.

**AUTOR**

---

ANA GHANEM

**TUTOR**

---

HILDA MORALES

**JURADO**

---

MORENO JESÚS

**JURADO**

**POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS**

---

**YASSER SAAB**