



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA

---

---

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN HUMEDAL  
ARTIFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL (HAFH) PARA EL  
TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE PROVENIENTE DE DOS  
EDIFICIOS DEL COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES  
PLANTEL SUR (CCH-SUR) DE LA UNAM

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

LUIS FERNANDO GARCÍA POBLANO



CIUDAD DE MÉXICO

2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## **Jurado asignado**

**PRESIDENTE:** Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa  
**VOCAL:** Landy Irene Ramírez Burgos  
**SECRETARIO:** M. en C. Rolando Salvador García Gómez  
**1er SUPLENTE** Dr. José Agustín García Reynoso  
**2do SUPLENTE** Dra. Marisela Bernal González

### **SITIO DONDE SE REALIZÓ EL TEMA:**

Laboratorios 301, 302, 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental.  
Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM. Ciudad  
Universitaria  
Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur, Sistema de Laboratorios para el  
Desarrollo y la Innovación (SILADIN), UNAM

### **ASESORA DEL TEMA:**

Profa. Dr.-Ing. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa \_\_\_\_\_

### **SUPERVISORA TÉCNICA:**

Dra. en Ing. Marisela Bernal González \_\_\_\_\_

### **SUSTENTANTE:**

Luis Fernando García Poblano \_\_\_\_\_

## **DECLARATORIA**

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o con referencia a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante recursos editoriales convencionales

---

LUIS FERNANDO GARCÍA POBLANO

## **RECONOCIMIENTOS**

A la máxima casa de estudios del país la UNAM por hacerme un mejor individuo para la sociedad

A la Facultad de Química por darme todos los conocimientos técnicos para ser un profesionista

Al Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur por permitirme realizar esta tesis empleando el humedal que tienen la FQ y el CCH Sur en sus instalaciones recolectando muestras para analizarlas en los laboratorios de la FQ

A la doctora María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa por permitirme la oportunidad de ser parte de sus laboratorios y apoyarme durante todos los contratiempos que surgieron durante el proyecto

A la Doctora Marisela Bernal González por toda la asesoría técnica y la paciencia que tuvo conmigo durante mi estancia en los laboratorios

### **Otros reconocimientos institucionales**

El humedal artificial objeto de esta investigación fue construido con el apoyo conjunto de los proyectos INFOCAB, Iniciativa para Fortalecer la Carrera Académica en el Bachillerato de la UNAM, a cargo del Prof. Q. Agustín Arreguín Rojas, un profesor y maestro en toda la acepción de la palabra, quien con gran empuje y dedicación dirigió los dos proyectos claves SB201608 “Instalación de un humedal con estrategias dinámicas de apoyo a los programas de Biología y Química del Bachillerato de la UNAM” y PB201312 “Desarrollo de actividades didácticas, ecológicas y técnicas del humedal artificial del CCH Sur de apoyo a las asignaturas de Biología, Química y Opciones Técnicas del bachillerato UNAM” que permitieron alcanzar esta magna obra y el decidido apoyo de las autoridades del Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur, el Director del Plantel el Lic. Jaime Flores Suaste y ahora el Maestro Luis Aguilar Almazán, los responsables del Sistema de Laboratorios para el Desarrollo y la Innovación, SILADIN, Biol. Sabel René Reyes Gómez y ahora el Ing. José Marín González y el siempre bienvenido apoyo del Maestro en Ciencias y Biol. Narciso José Ruiz Cárdenas, otro maestro en toda la acepción de la palabra

A la Dirección General de Obras y Conservación, en particular la Dirección de Obras Externas a cargo del M. en Ing. Xavier Palomas Molina, a quien se reconoce su valioso e incansable apoyo para llevar a cabo una parte importante de la construcción del humedal en substitución del humedal artificial de flujo vertical que se encontraba en las instalaciones ahora ocupadas por los edificios del Posgrado de la UNAM

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM. Los reactivos, consumibles y materiales empleados en esta investigación fueron adquiridos con el apoyo financiero parcial del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) dentro del proyecto con clave IN11811 con título “Identificación de bacterias metanogénicas y sulfatorreductoras en tres reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) operando a 45, 55 y 65°C” y los proyectos del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza, PAPIIME, “Apoyo a la enseñanza experimental de los laboratorios terminales de las carreras que se imparten en la Facultad de Química de la UNAM”, “Apoyo a la enseñanza experimental de las asignaturas terminales de las carreras que se imparten en la Facultad de Química de la UNAM” y “Desarrollo de material didáctico para las asignaturas ingeniería ambiental y estancia académica de la carrera de ingeniería química con base en estudios de caso” Claves EN103704, PE101709 y PE-100514, respectivamente

Las empresas Tecnología Intercontinental, TICSA, INVENTEC, S.A. de C.V. y CONDIMARQ, S.A. de C.V. apoyaron altruistamente en especie, servicios técnicos especializados y donativos de equipos y materiales allanando el camino para la construcción, instalación, arranque y operación del humedal. El Prof. Dr. Salvador Alejandro Sánchez Tovar fue el principal apoyo para este decidido apoyo empresarial por su gran dedicación y entrega a la docencia en el bachillerato y del Programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado de la Facultad de Química de la UNAM, PAIP, Clave 50009067. Su apoyo en esta investigación fue invaluable

# ÍNDICE

	Página
Glosario	10
Resumen	13
Capítulo 1. Problemática	14
1.1. Introducción	14
1.2. Justificación	15
1.3. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo general	17
1.3.2. Objetivos específicos	17
Capítulo 2. Fundamentos	18
2.1. Humedales artificiales o construidos	18
2.2. Tipos de humedales artificiales	18
2.3. Efecto del tiempo de residencia hidráulico (TRH) en los parámetros físicoquímicos y microbiológicos del agua	19
2.4. Normativa aplicable a la reutilización (reuso, reúso <sup>1</sup> ) del agua	20
Capítulo 3. Metodología	21
3.1. Ubicación del HAFH en estudio	21
3.2. Descripción del proceso	23
3.3. Identificación de las variables de operación que pueden afectar el funcionamiento del humedal y las características del efluente tratado	24
3.3.1. Agua a tratar	24
3.3.2. Material de soporte	24
3.3.3. Plantas	25
3.3.4. Microorganismos	25
3.4. Normativa aplicable: NOM-003-SEMARNAT-1997	25
3.5. Análisis estadístico	27
Capítulo 4. Resultados y discusión	28
4.1. Implementación en el laboratorio de algunas de las normas mexicanas NMX referenciadas en la NOM-003-SEMARNAT-1997	28
4.1.1. Demanda química de oxígeno	28
4.1.2. Determinación de nitratos	29
4.1.3. Determinación de sulfatos	29

---

<sup>1</sup> La palabra reúso, en todo caso reuso para romper el diptongo, no existe y, aunque se encuentra en las normas oficiales mexicanas, en este documento se empleará la palabra reutilización

	Página
4.1.4. Determinación de fósforo	30
4.1.5. Determinación de huevos de helminto	31
4.1.6. Determinación de sulfuros	31
4.1.7. Determinación de sólidos suspendidos totales, fijos y volátiles	31
4.1.8. Determinación de parámetros <i>in situ</i>	31
4.1.9. Demanda bioquímica de oxígeno, DBO	31
4.2. Resultados preliminares de la caracterización del agua	32
4.3. Resultados de la caracterización puntual del agua	33
4.4. Remoción de contaminantes en un HAFH (Kadlec y Knight, 1996)	35
4.4.1. Sólidos suspendidos totales	35
4.4.2. Demanda bioquímica de oxígeno, DBO	36
4.4.3. Nitrógeno (Kadlec y Knight, 1996; Orduña-Bustamante, 2012)	37
4.4.4. Fósforo (Reyes-Luz, 2006)	38
4.4.5. Remoción de patógenos	39
4.5. Discusión final de los resultados obtenidos	39
5. Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	42
5.1. Conclusiones	42
5.2. Recomendaciones	43
Anexos	44
A.1. Norma oficial mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997	44
A.2. Acervo fotográfico	53
A.3. Manual de operación y mantenimiento de la planta piloto prototipo ubicada al interior del Siladin (CCH Sur, UNAM)	57
A.3.1. Tratamiento primario o físico	57
A.3.1.1. Fosa séptica (FS-101) y tanque de sedimentación (TS-101)	57
A.3.1.1a. Mantenimiento	58
A.3.1.2. Bomba sumergible (BS-01)	58
A.3.1.3. Tanque dosificador (TC-101)	59
A.3.1.3a. Mantenimiento	59
A.3.2. Tratamiento bioquímico	59
A.3.2.1. Filtro percolador (FP-101)	59
A.3.2.1a. Mantenimiento	59
A.3.2.2. Distribuidor hidráulico (DH-101)	60
A.3.2.2a. Mantenimiento	60
A.3.3. Humedad artificial	60
A.3.3.1. Lecho rocoso	60
A.3.3.2. Geomembrana	60
A.3.3.3. Vegetación del humedal	61
A.3.3.4. Cárcamo de salida	61
A.3.3.5. Mantenimiento del sistema completo del humedal artificial	61



	Página
A.3.3.6. Fosa de almacenamiento y desinfección TD-101	62
A.3.3.6a. Mantenimiento	62
A.3.3.7. Bomba extractora de lodos (BS-02)	62
A.4. Disposición de los residuos producidos en la planta piloto y las pruebas de laboratorio	63
 Bibliografía	 64

## Índice de figuras y tablas

	Página
Figura 1.1. Humedal subsuperficial de flujo horizontal (Delgadillo y col., 2010)	14
Figura 1.2. Regiones hidrológico-administrativas (RHA) (Conagua, 2016)	16
Figura 3.1. Localización del humedal artificial (CCH-Sur, 2014)	21
Figura 3.2. Diagrama esquemático de ubicación del humedal artificial (Sánchez-Tovar, 2012)	22
Figura 3.3. Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal ubicado en las instalaciones del CCH Sur de la UNAM (Arreguín-Rojas y col., 2013)	22
Figura 3.4. Esquema de las operaciones unitarias en el humedal artificial (Arreguín-Rojas y col., 2013)	23
Figura 3.5. Ejemplo de cómo funciona un humedal artificial: Medio de soporte de diferentes granulometrías, zona radicular de la hidrofita con microorganismos -bacterias, protozoarios, micrometazoarios, metazoarios, rotíferos, nemátodos, etc.- (Amábilis-Sosa et al., 2018)	25
Figura 4.1. Curva de calibración para la determinación de la DQO	28
Figura 4.2. Curva de calibración para la determinación de nitratos	29
Figura 4.3. Curva de calibración para la determinación de sulfatos	30
Figura 4.4. Curva de calibración para la determinación de fósforo	30
Figura 4.5. Equipo multiparamétrico HI 9828 Hanna instruments	32
Figura 4.6. Ciclo del nitrógeno en un humedal (Kadlec y Knight, 1996)	37
 Foto A.2.1. Estructura básica del humedal artificial antes de colocar las plantas	 53
Foto A.2.2. Primeros dos meses de las plantas septiembre del 2010	53
Fotos A.2.3 y A.2.4. Estado de las plantas del humedal ubicado en el Siladin (Sep. 2014), que no han recibido la poda semestral que requieren	53
Foto A.2.5. Fosa séptica (FS-01) ubicada frente al humedal artificial	54

	Página	
Foto A.2.6.	Diagrama del interior de la fosa séptica FS-01	54
Foto A.2.7.	Tanque de nivelación (TC-101)	54
Foto A.2.8.	Filtro percolador (FP-101)	54
Foto A.2.9.	Tablero de control de bombas (arrancadores, relevadores, guardamotors, botoneras arranque o paro)	55
Foto A.2.10.	Camión tipo “vactor” realizando el desazolve de los lodos de la fosa séptica FS-01	56
Figura A.3.1.	Diagrama de flujo de proceso para el humedal artificial de la UNAM (Siladin-CCH-Sur/FQ)	57
Tabla 1.1.	Grado de presión sobre el recurso hídrico en las Regiones hidrológico-administrativas, RHA, 2014 (Conagua, 2016)	16
Tabla 2.1.	Valores de $k_{20}$ usados comúnmente en el cálculo de humedales (tomado de Sánchez-Tovar, 2012)	20
Tabla 2.2.	Efecto del aumento del tiempo de residencia hidráulico, TRH, en los parámetros de un humedal artificial prototipo (Rodríguez y Varela, 2003)	20
Tabla 3.1.	Nombre y etiqueta de las operaciones unitarias en el proceso (Arreguín-Rojas y col., 2013)	23
Tabla 3.2.	Límites máximos permisibles de contaminantes, NOM-003-SEMANART-1997 (mejorada de DOF, 1997)	26
Tabla 3.3.	Parámetro, norma y método	26
Tabla 4.1.	Curva de calibración de la DQO	28
Tabla 4.2.	Curva de calibración de nitratos	29
Tabla 4.3.	Curva de calibración de sulfatos	29
Tabla 4.4.	Curva de calibración para fósforo	30
Tabla 4.5a.	Resultados obtenidos con muestras de ensayo	32
Tabla 4.5b.	Resultados obtenidos con muestras de ensayo, HH	32
Tabla 4.6.	Toma de muestras y puntos muestreados	33
Tabla 4.7.	Resultados obtenidos con la muestra 1	33
Tabla 4.8.	Resultados obtenidos con la muestra 2	34
Tabla 4.9.	Resultados obtenidos con la muestra 3	34
Tabla 4.10.	Resultados obtenidos con la muestra 4	35
Tabla 4.11.	Muestras de salida contra valores de la NOM-003-SEMARNAT-1997	39
TABLA A.1.	Límites máximos permisibles de contaminantes (DOF, 1997)	47

## Glosario

%	Porcentaje
°C	Grados Celsius
μS	Microsiemens
A	Área del humedal, $l \times w$ (ecuación 2-2)
A	Volumen de solución de lodo en $\text{cm}^3$ (ecuación 4-1)
B	Normalidad de la solución de lodo (ecuación 4-1)
BS	Bomba sumergible/ centrifuga (figura A.3.1)
C	Carbono
$C_{\text{sulf}}$	Concentración de sulfuro en mg/L (ecuación 5)
C	Volumen de solución de tiosulfato de sodio en $\text{cm}^3$ (ecuación 4-1)
CCH-Sur	Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur
CE	Conductividad eléctrica
$C_e$	Concentración de contaminante en el efluente
$\text{C}_8\text{H}_6\text{KO}_4$	Biftalato de potasio
$C_i$	Concentración del contaminante en el influente
cm	Centímetros
Colmatar	Del fr. <i>colmater</i> . 1. tr. Geol. Rellenar una hondonada o depresión del terreno mediante sedimentación de materiales transportados por el agua. 2. tr. Rellenar una hondonada mediante procedimientos artificiales ( <a href="https://dle.rae.es/?id=9of8mrY">https://dle.rae.es/?id=9of8mrY</a> )
Conagua	Comisión Nacional del Agua de México
CS	Cárcamo de salida (figura A.3.1)
D	Normalidad de la solución de tiosulfato de sodio
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
$\text{DBO}_5$	Demanda bioquímica de oxígeno en cinco días
$\text{DBO}_U$	Demanda bioquímica de oxígeno última
DH	Distribuidor hidráulico
DOF	Diario oficial de la federación
FP	Filtro percolador
FS	Fosa séptica
h	Profundidad del humedal
$\text{hm}^3$	hectómetro cúbico
HH	Huevos de helminto
$\text{H}_2\text{O}$	Agua
HA	Humedal artificial
HAFH	Humedal artificial de flujo horizontal
HC	Humedal construido

HFS	Humedales de flujo superficial
HFSS	Humedal de flujo horizontal sub-superficial
HFV	Humedal de flujo vertical
k	Constante de reacción de primer orden dependiente de temperatura (ecuación 2-1)
$k_{20}$	Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura ( $d^{-1}$ ) a 20°C (Tabla 2-1)
$K_s$	Conductividad hidráulica
$KH_2PO_4$	Monofosfato de potasio (aunque en la etiqueta tenga el nombre erróneo ya que no hay potasoso y potásico)
/	Largo del humedal, m
L	Litros
Lapso	Tiempo entre dos límites ( <a href="https://dle.rae.es/?id=Mvd5sTV MvecrrA">https://dle.rae.es/?id=Mvd5sTV MvecrrA</a> )
m	Metros
$m^3/s$	Metros cúbicos por segundo
mg	Miligramos
mg/L	Miligramos por litro
mL	Mililitros
n	Porosidad o espacio disponible
N	Nitrógeno
$Na_2SO_4$	Sulfato de sodio
NMP	Número más probable
$NO_3^-$	Nitrato
$O_2$	Oxígeno
P	Fósforo
pH	Potencial de hidrógeno
ppm	Partes por millón
PVC	Poli(cloruro de vinilo) por sus siglas en inglés, material muy usado en instalaciones sanitarias. Es un material termoplástico obtenido del cloruro de vinilo, cuyo residuo presenta problemas de contaminación
Q	Caudal promedio
RHA	Regiones hidrológico-administrativas (Conagua, 2016)
SH	Sistemas de humedales híbridos
Siladin	Sistema de Laboratorios para el Desarrollo y la Innovación
$SO_4^{2-}$	Sulfatos
SDT	Sólidos disueltos totales
SST	Sólidos suspendidos totales
ST	Sólidos totales

SVT	Sólidos volátiles totales
T	Temperatura
TC	Tanque cisterna
TCD	Tanque de nivelación o dosificación
TD	Tanque de desinfección
TS	Tanque de sedimentación
TRH	Tiempo de residencia hidráulico
w	Ancho del humedal, m

**Nota:**

**En esta investigación se usa el punto decimal (DOF, 2009)**

## Resumen

Los humedales artificiales son un sistema para el tratamiento de aguas residuales, una tecnología reconocida debido a que además de limpiar el agua, también son benéficos y compatibles con el ambiente, así como económicos y sustentables. El agua como recurso natural vital para todos los organismos e indispensable para el desarrollo de las actividades humanas, es un tema de especial atención en el valle de México ya que se tiene una fuerte presión sobre el recurso en la región. En este documento analizaremos el comportamiento de un humedal artificial de flujo horizontal (HAFH) ubicado en el Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur, CCH Sur, de la UNAM, usando como parámetros de respuesta algunas propiedades del agua en el efluente determinando si cumplen con las principales características especificadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 para su uso en el riego de áreas verdes. Los datos experimentales muestran que el efluente del humedal no cumple con los parámetros requeridos en la Norma, se registraron hasta 2 huevos de helminto por litro, el doble de lo que permitido, una DBO de 175mg/L también por encima de la norma y sólidos suspendidos totales de 4110mg/L muy por encima de la concentración permitida. Debido a las condiciones del humedal no fue posible observar su operación a régimen permanente que es la condición de interés para realizar cálculos y análisis del proceso de tratamiento del agua. En esta situación se considera un nuevo objetivo, definir la estrategia de rehabilitación y mantenimiento del sistema. Se recomienda capacitación del personal técnico para la correcta operación del humedal, realizar mantenimiento preventivo desazolando la fosa séptica y los tanques de sedimentación cada seis meses. Las bombas deben ser revisadas según la recomendación del fabricante. Las plantas del humedal deben ser podadas regularmente tratando de mantener una altura mínima de 1m por encima del nivel del sustrato, la recolección periódica de los restos vegetales como varas y hojas muertas, debe realizarse cada quince días en el verano, cada semana en el otoño y una vez al mes en el invierno para evitar que afecten el flujo del agua en el humedal. Finalmente, se debe renovar el sustrato de piedra volcánica que sirve de soporte para las plantas, en periodos de 15 a 25 años dependiendo de las condiciones de operación.

Palabras clave: Operación y mantenimiento, humedal artificial de flujo horizontal (HAFH), tratamiento de aguas, aguas residuales, plantel educativo, Calidad del agua

# CAPÍTULO 1

## PROBLEMÁTICA

### 1.1. Introducción

El humedal artificial es un sistema de tratamiento de aguas residuales basado en los principios de los reactores de flujo pistón. Consta de un material de soporte (grava, arena o escoria volcánica) o empaque, plantas (plantas vasculares) y microorganismos (bacterias y hongos, principalmente). Para separar el sistema del entorno circundante (suelos adyacentes) se coloca una membrana impermeable (Fig. 1.1) o se usan materiales naturales como las arcillas para hacer impermeable el sistema. Al ponerse en contacto los elementos principales plantas-microorganismos-material de soporte tienen una interacción para así remover los contaminantes del agua residual mediante procesos físicos, químicos y biológicos (Guido-Zarate, 2006).

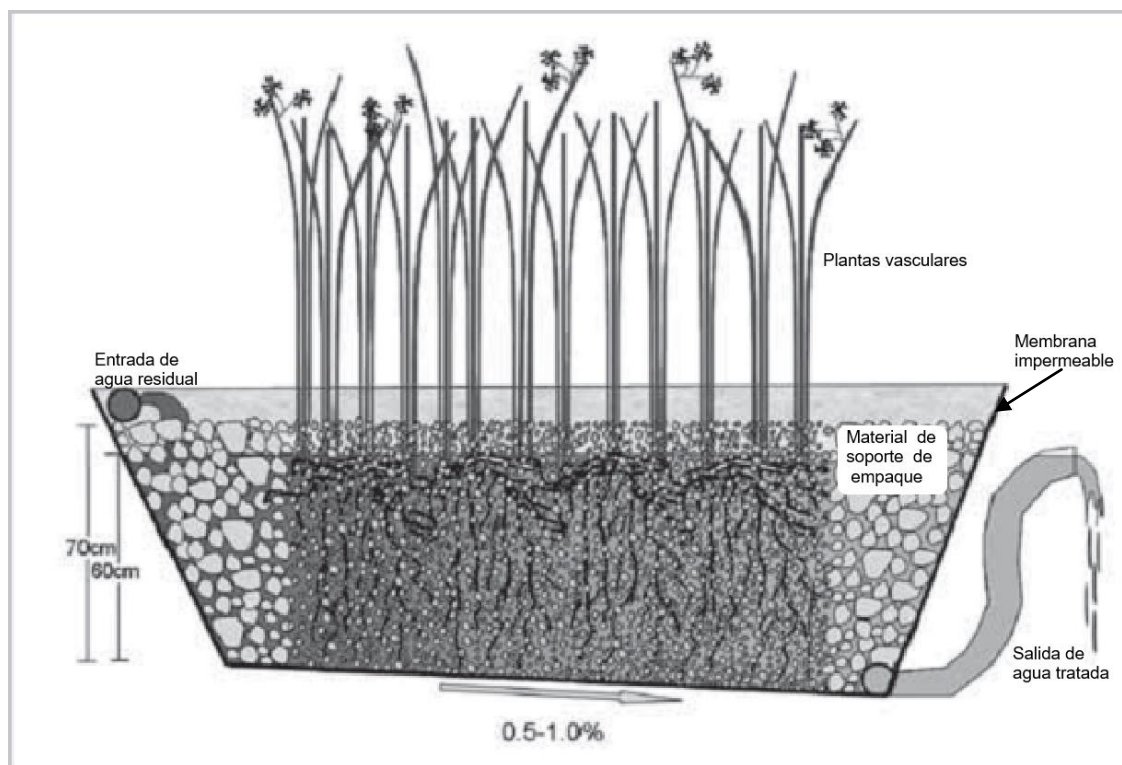


Fig. 1.1. Humedal subsuperficial de flujo horizontal (Delgadillo y col., 2010)

Estos sistemas, conocidos como humedales artificiales (HA) o humedales construidos (HC) han estado siendo estudiados en los últimos ochenta años para evaluar su eficacia en la depuración de aguas residuales, al ser considerados por la literatura como una tecnología de bajo costo y porque requieren bajo esfuerzo en su construcción y operación y en el mantenimiento, sin dejar de ser eficientes para la remoción de los contaminantes. Son también reconocidos debido a que son de las

pocas tecnologías que, además de limpiar el agua, también son benéficas y compatibles con el ambiente, debido a que generan gran cantidad de biomasa vegetal gracias a la transformación de los contaminantes en biomasa de plantas acuáticas y a que ésta puede llegar a usarse como generador de energía (Ciria y col., 2005; Delgadillo y Col., 2010, y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2015; Secundino-Sánchez y col., 2015).

## **1.2. Justificación de la investigación**

El agua es un líquido vital para todos los organismos y necesario para el desarrollo de las actividades humanas. El 28 de julio de 2010, a través de la Resolución A/RES/64/292, 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció explícitamente el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que un agua potable limpia y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos. El acceso al líquido vital se ve cada vez más amenazado por el crecimiento de la población y el cambio climático. El aprovechamiento racional y sustentable del recurso hídrico hace indispensable desarrollar métodos de tratamiento de bajo costo accesibles para todas las regiones del país.

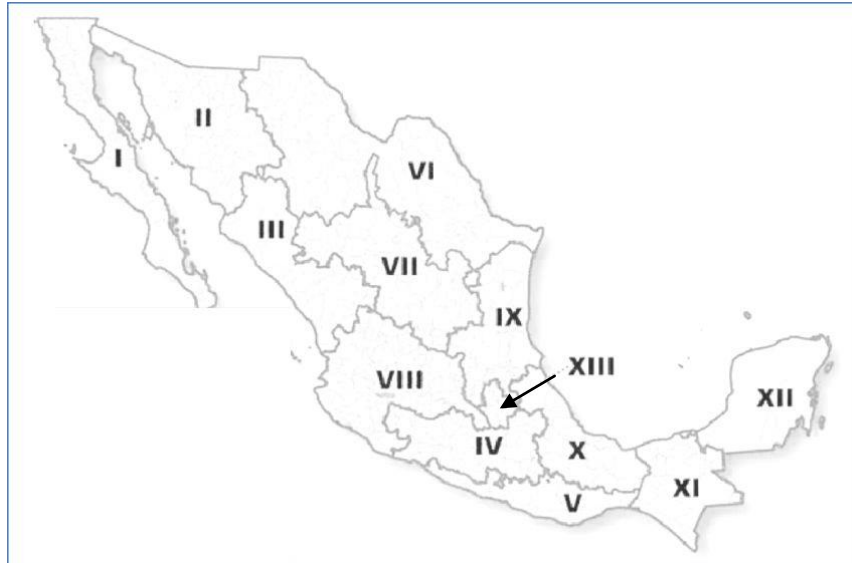
En México existe una gran variedad de climas. La zona noroeste y centro del país, que cubre dos terceras partes del territorio, se considera árida o semiárida, con precipitaciones anuales menores a los 500 milímetros. En contraste, el sureste es húmedo con precipitaciones promedio que superan los 2000 milímetros por año. Esta disparidad pluvial hace que en la región norte y centro del país, el agua sea un factor que podría limitar el desarrollo de todas sus actividades productivas (Conagua, 2018).

Para gestionar los recursos hídricos la Conagua ha dividido el país en trece regiones hidrológico-administrativas (RHA) formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas como las unidades básicas para la gestión de recursos hídricos (Figura 1.2). En cada región se analiza la presión sobre el recurso hídrico relacionando el volumen total de agua concesionado al año con el agua renovable disponible en la región en el mismo periodo (Tabla 1.1). De esta relación se obtiene un porcentaje que si supera el 40% se dice que la región tiene una fuerte presión del recurso (Conagua, 2018).

A nivel nacional la presión promedio del recurso hídrico es de 19%, mientras que la región con más presión es la XIII Aguas del valle de México con un 141.4% (Conagua, 2018).

En la Tabla 1.1 puede verse que la mayor parte de las RHA tienen una fuerte presión y solamente las regiones del Golfo y Sureste tienen una baja presión sobre el recurso hídrico. Esto da una idea de lo difícil de la situación y de lo necesario que es reutilizar el agua sobre todo en las cuencas que se encuentran en el valle de México.





**Figura 1.2. Regiones hidrológico-administrativas(RHA) (Conagua, 2018)**

**Tabla 1.1. Grado de presión sobre el recurso hídrico en las Regiones hidrológico-administrativas, RHA, 2017 (Conagua, 2018)**

Clave	RHA	Volumen total de agua concesionado 2014 (hm <sup>3</sup> )	Agua renovable 2014 (hm <sup>3</sup> /año)	Grado de presión (%)
I	Península Baja California	3951	4858	81.3
II	Noroeste	7007	8274	84.7
III	Pacífico Norte	10811	26747	40.4
IV	Balsas	10874	21668	50.2
V	Pacífico Sur	1579	30836	5.1
VI	Río Bravo	9680	12844	75.4
VII	Cuencas Centrales del Norte	3824	8024	47.7
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	15845	35071	45.2
IX	Golfo Norte	6055	28655	21.1
X	Golfo Centro	6069	94363	6.4
XI	Frontera Sur	2547	147195	1.7
XII	Península de Yucatán	4793	29647	16.2
XIII	Aguas del Valle de México	4808	3401	141.4
	Total	87842	451585	19.5

Durante el año 2017, las 2 526 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación a lo largo del país procesaron 135.6 m<sup>3</sup>/s, es decir, el 63% de los 215.2 m<sup>3</sup>/s recolectados a través de los sistemas de alcantarillado (Conagua, 2018).

Eso da la posibilidad de utilizar la tecnología de los humedales artificiales para tratar la fracción que aún no tiene tratamiento para su posterior reutilización, que por su bajo costo y sus beneficios al ambiente son muy convenientes.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar la operación de un humedal artificial de flujo horizontal (HAFH) ejemplificado con el ubicado en el Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur, CCH Sur, de la UNAM, usando como parámetros de respuesta algunas propiedades del agua en el efluente determinando si cumplen con las principales características especificadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1997) para su uso en el riego de áreas verdes aledañas.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Evaluar la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días.
- Evaluar el contenido de sólidos suspendidos totales.
- Evaluar el contenido de huevos de helminto.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTOS

#### 2.1. Humedales artificiales o construidos

Se definen como humedales artificiales a los sistemas diseñados por el hombre. Estos están conformados por un medio de soporte saturado, vegetación emergente y/o subemergente, organismos vivos y agua. Estos elementos simulan un sistema de humedal natural el cual tiene un fin determinado.

Los humedales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales; estas son:

1. Fijar físicamente los contaminantes sobre la superficie del soporte y la materia orgánica.
2. Utilizar y transformar los elementos y compuestos contaminantes presentes por intermedio de los microorganismos que se encuentran en el interior del humedal artificial.
3. Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento (Arias-I. y Brix, 2003)

#### 2.2. Tipos de humedales artificiales

Son muy diversas las clasificaciones que existen en la identificación de los humedales artificiales o construidos, por lo que se presenta una clasificación de acuerdo con las características del o los materiales con los que sean construidos, esta clasificación es la siguiente:

- a) Sistemas de flujo libre o humedales de flujo superficial, HFS: El agua se vierte en superficie en un extremo del lecho, el flujo es lento y de forma horizontal, para que esto facilite la evacuación en el extremo opuesto del lecho.
- b) Sistemas con flujo horizontal subsuperficial, HFSS: El agua se distribuye en un extremo del lecho, se infiltra y al final en el fondo del lecho el agua se recoge y se evacua por medio de tuberías o vertederos.
- c) Sistemas con flujo vertical (HFV): Son combinaciones de los humedales descritos con anterioridad y pueden estar compuestos de diferentes lechos y/o zonas donde el flujo es superficial o vertical, dependiendo del tratamiento que se requiera.
- d) Sistemas híbridos (SH): El agua fluye de manera descendente y percola en el humedal. El agua se vierte verticalmente y se distribuye en toda la superficie del lecho y se combina con una siguiente cámara o celda de flujo horizontal.

### 2.3. Efecto del tiempo de residencia hidráulico (TRH) en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua

Los humedales artificiales son considerados como reactores biológicos, que operan como reactores tipo pistón perfectamente mezclados y con una cinética de primer orden. Por lo tanto se ajustan a la ecuación 2-1 (Sánchez-Tovar, 2012):

$$\frac{C_e}{C_i} = e^{-kt} \quad (2-1)$$

donde:

$C_e$  = concentración de contaminante en el efluente (mg/L)

$C_i$  = concentración del contaminante en el influente (mg/L)

$k$  = constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura ( $d^{-1}$ )

$t$  = tiempo de residencia hidráulico (TRH)

Puede definirse el tiempo de residencia hidráulico, TRH, con la ecuación 2-2 (Sánchez-Tovar, 2012):

$$TRH = \frac{l \cdot w \cdot h \cdot n}{Q} \quad (2-2)$$

donde:

TRH= Tiempo de residencia hidráulico (día)

$l$  = largo del humedal (m)

$w$  = ancho del humedal (m)

$h$  = profundidad del humedal (m)

$n$  = fracción de porosidad o espacio disponible para el flujo de agua (%/100)

$Q$  = Caudal promedio ( $m^3/d$ )

Combinando las ecuaciones 2-1 y 2-2 se puede llegar a una expresión para estimar el área superficial "A" del humedal, que es la ecuación 2-3 (Sánchez-Tovar, 2012):

$$A = \frac{Q}{k \cdot h \cdot n} \cdot \ln \frac{C_e}{C_i} \quad (2-3)$$

El valor de  $k$  depende del contaminante que se quiere eliminar. En caso de no contarse con valores de la literatura puede aplicarse la ecuación 2-4 (Sánchez-Tovar, 2012):

$$k = k_{20}(1.1)^{(T-20)} \quad (2-4)$$

En la Tabla 2.1 se muestran los valores de  $k_{20}$  más utilizados en el cálculo de humedales en función del material de soporte utilizado (Arreguín-Rojas y col., 2013).

Para optimizar los parámetros de operación del humedal se necesita cambiar el tiempo de residencia hidráulico (TRH) y así lograr un efecto positivo en la disminución de los contaminantes presentes en el agua tratada que sale del humedal y así mejorar la calidad del agua tratada. A continuación en la Tabla 2.2 se presenta la influencia que se tiene al aumentar el TRH en algunos parámetros del efluente.

**Tabla 2.1. Valores de  $k_{20}$  usados comúnmente en el cálculo de humedales (tomado de Sánchez-Tovar, 2012)**

Material	Diámetro medio (mm)	Porosidad %	Conductividad hidráulica $k_s(m^3/m^2*d)$	$k_{20}$
Arena mediana	3.2	36-40	10,000-50,000	1.84
Arena gruesa	5-7	28-32	1000-10000	1.35
Grava	8	30-55	500-5000	0.6
Tezontle	20-30	40-50	20000-25000	2.1

**Tabla 2.2. Efecto del aumento del tiempo de residencia hidráulico, TRH, en los parámetros de un humedal artificial prototipo (Rodríguez y Varela, 2003)**

Parámetro	Efecto
Demanda química de oxígeno	Disminuye
Patógenos	Disminuye
Valor de pH	No se afecta
Temperatura	No se afecta
Sólidos disueltos totales	No se afecta
Oxígeno disuelto	Aumenta

## 2.4. Normatividad aplicable a la reutilización (reuso, reúso)<sup>2</sup> del agua

En el Anexo A.1 se presenta la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reutilicen en servicios al público (DOF, 1997).

Dado que el agua que salga del sistema de humedales artificiales construido en los terrenos del Sistema de Laboratorios de Docencia e Investigación, Siladin, del Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur de la UNAM, podría ser usada para el riego de las áreas verdes o para ser vertida a los cuerpos receptores es importante que cumpla con esta normativa.

En esta fase de la investigación sólo se estudiarán tres de las variables que solicita dicha norma (ver Tabla 3.4 del capítulo 3). Estas son: huevos de helminto, demanda bioquímica de oxígeno en cinco días y sólidos suspendidos totales.

<sup>2</sup> La palabra reuso, en todo caso reúso para romper el diptongo, no existe y, aunque se encuentra en las normas oficiales mexicanas, en este documento se empleará la palabra reutilización como ya se mencionó en el índice

# CAPÍTULO 3

## METODOLOGÍA

### 3.1. Ubicación del HAFH en estudio

El humedal en el cual se realiza el proyecto se encuentra ubicado en el Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur (conocido como CCH-Sur) de la UNAM en la zona que se indica en la Figura 3.1.

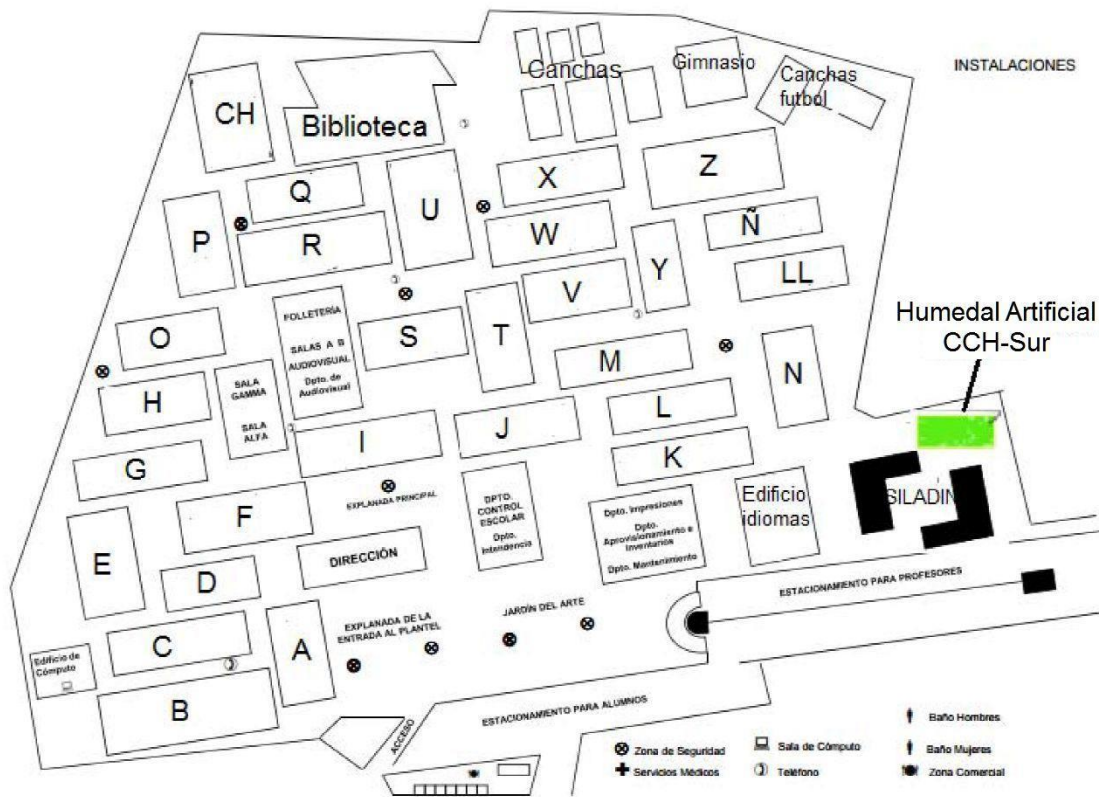


Figura 3.1. Localización del humedal artificial (CCH-Sur, 2014)

El agua residual que llega al humedal proviene de los edificios del Sistema de Laboratorios para el Desarrollo y la Innovación (SILADIN) y del llamado Edificio de Idiomas (Figura 3.2).

El humedal artificial se encuentra al aire libre y está delimitado por una barda de mampostería en arreglo piramidal como se puede ver en la fotografía (Figura 3.3).

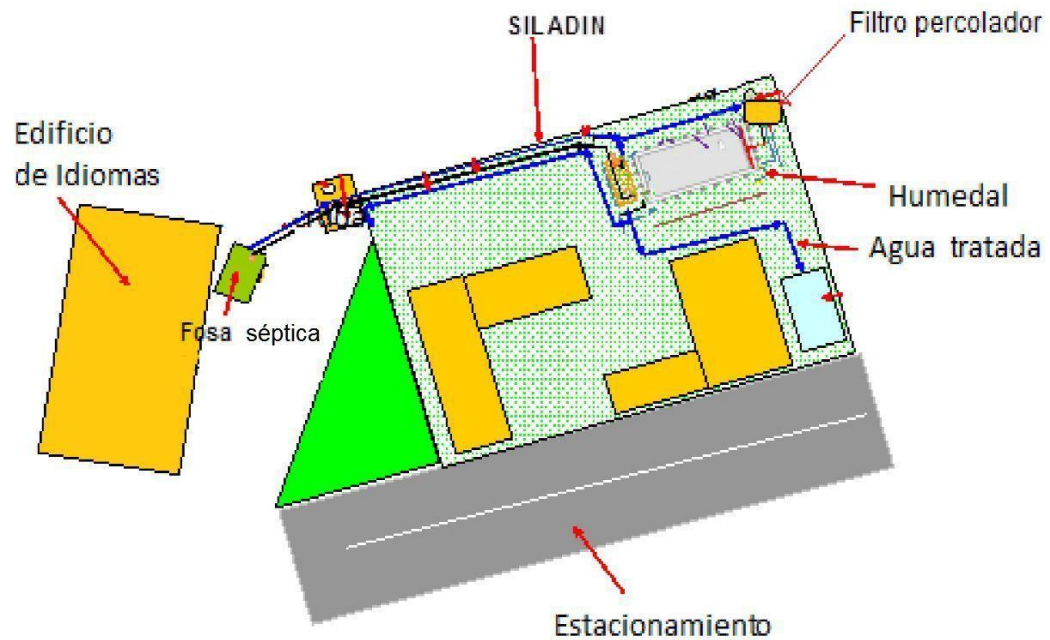


Figura 3.2. Diagrama esquemático de ubicación del humedal artificial (Sánchez-Tovar, 2012)



Figura 3.3. Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal ubicado en las instalaciones del CCH Sur de la UNAM (Arreguín-Rojas y col., 2013)

## 3.2. Descripción del proceso

A continuación se describe el proceso (Arreguín-Rojas y col., 2013) proceso de tratamiento de las aguas residuales recibidas por el sistema está compuesto por diferentes unidades (Figura 3.4, Tabla 3.1):

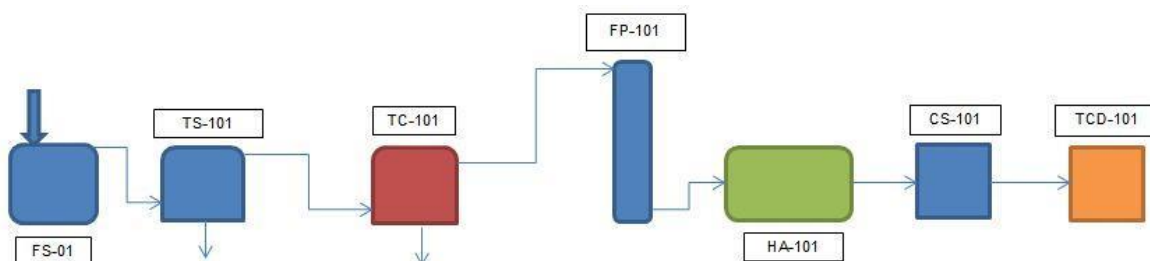


Figura 3.4. Esquema de las operaciones unitarias en el humedal artificial (Arreguín-Rojas y col., 2013)

**Tabla 3.1. Nombre y etiqueta de las operaciones unitarias en el proceso (Arreguín-Rojas y col., 2013)**

Equipo	Etiqueta de referencia
Fosa de sedimentación	FS-01
Tanque sedimentador	TS-101
Tanque cisterna de igualación, nivelación o dosificación	TC-101
Filtro percolador	FP-101
Humedal artificial (HAFH)	HA-101
Cárcamo de salida	CS-101
Tanque de desinfección	TCD-101

La primera consiste en la recolección del agua proveniente de los Edificios de Idiomas y del Siladin en la fosa de sedimentación (FS-01) y en el tanque de sedimentación (TS-101) mediante una bomba para estabilizar y homogeneizar el agua, así como permitir una primera etapa de sedimentación y separación de sólidos.

En el fondo de ambos sistemas se acumulan los denominados lodos primarios que deben ser recolectados mediante un tanque de vacío (camión tipo “vector”) al menos cada 6 meses, ya que el sistema no cuenta con una salida para recolectarlos y estabilizarlos.

El agua pasa a un tanque cisterna (TC-101), el cual ayuda a homogeneizar el agua residual para igualar los parámetros antes de entrar al filtro percolador (FP-101). Este cuenta con un distribuidor de agua en forma de cruz para que el agua percole (del latín *percolāre*, filtrar, colar; 1. intr. Dicho de un líquido: Moverse a través de un medio poroso, tomado del Diccionario de la lengua española) a través de la cama o lecho de un empaque de roca volcánica -tezontle- (del náhuatl *tetl*=piedra y



*tzontli*=cabellos, piedra ligera como los cabellos, por su gran porosidad y baja densidad, tomado del diccionario de Cabrera, 2002), que permite la formación de una biopelícula. En esta cama o lecho se remueve también parte de la materia orgánica coloidal y/o disuelta presente en el agua por ab- y adsorción.

El efluente del filtro es descargado por una tubería en la parte inferior que alimenta al humedal artificial (HA-101) a todo lo ancho del mismo. El efluente del humedal se descarga por gravedad desde el cárcamo de salida (CS-101), hasta la fosa de almacenaje y desinfección (TCD-101), desde donde se podrá descargar al subsuelo o bien utilizarse para riego (Arreguín-Rojas y col., 2013).

### **3.3. Identificación de las variables de operación que pueden afectar el funcionamiento del humedal y las características del efluente tratado (Arreguín-Rojas y col., 2013)**

#### **3.3.1. Agua a tratar**

El agua que llega a este humedal proviene, como ya se mencionó antes, de los sistemas sanitarios del Edificio de Idiomas y del Siladin (sanitarios y laboratorios), siendo la descarga de estos edificios de tipo doméstico y algo de sustancias químicas de los laboratorios. Se considera que el humedal puede remover los contaminantes principales que se presentan en el agua de descarga. Los microorganismos que viven naturalmente en el humedal son los que serán necesario remover del agua tratada, empleando algún método de desinfección (Borrego-Saráchaga, 2015). La toma de muestras fue de acuerdo la normativa mencionada en el punto 2.2 (DOF, 1980) del capítulo anterior.

#### **3.3.2. Material de soporte**

El humedal está construido en concreto y con acabado arquitectónico piramidal en basalto. Está recubierto de una geomembrana de polietileno de alta densidad de 1.5 mm de espesor para dar la resistencia adecuada a la masa que debe soportar y aislar el sistema del entorno impidiendo que contamine el agua residual en tratamiento el subsuelo. Sobre la geomembrana se colocó una cama de tezontle<sup>3</sup> de diferentes granulometrías (10.0 cm en el fondo, 0.3 cm en la parte media y 1.0-3.0 cm en la parte superior y a una altura no mayor a 15.0 cm (Durán-Domínguez-de-Bazúa y Luna-Pabello, 1998) (Figura 3.5).

Nunca se debe colocar sobre la geomembrana la piedra grande para evitar perforaciones (Figura 3.2).

---

<sup>3</sup> Tezontle es una palabra de origen náhuatl, que significa piedra ligera como los cabellos, de *tetl* = piedra y *tzontli* = cabellera (Cabrera, 2002), como ya se mencionó en el texto previamente

### 3.3.3. Plantas

Las macrofitas de tipo acuático o hidrófitas colocadas en el humedal artificial en el estudio son tules (*Typha latifolia*), carrizos (*Phragmites australis*), zacatules (*Scirpus* sp.), papiros (*Cyperus papyrus*) y alcatraces (*Zantedeschia aethiopica*) (Figura 3.2). El predominio de estas especies dependerá de su adaptabilidad a las condiciones ambientales del humedal en estudio. La proporción de plantas por metro cuadrado de humedal es de 8 a 10 (Arreguín-Rojas *et al.*, 2013).

### 3.3.4. Microorganismos

Los microorganismos son muy importantes ya que son los responsables de llevar a cabo la degradación biológica de la materia orgánica. Estos aprovechan los elementos orgánicos como el C, N y P disueltos en el agua y parte de estos nutrientes se integran a la biopelícula al producir nuevos organismos y otra parte se mineraliza o transforma. Los microorganismos presentes en un HA incluyen bacterias, hongos, protozoos, etc. (Guido-Zárate, 2006) (Figura 3.5).

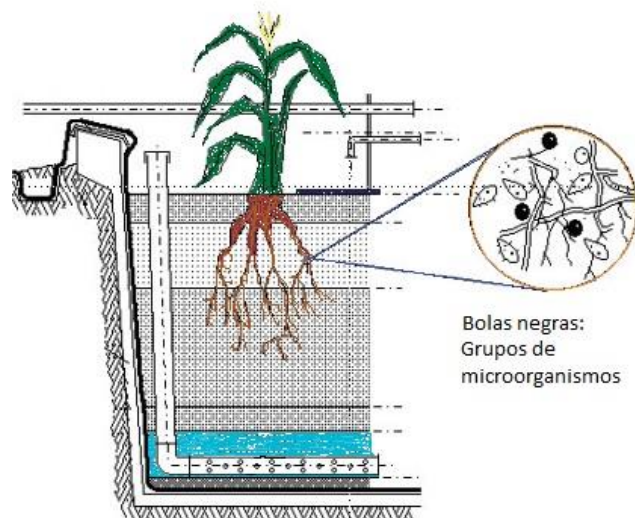


Figura 3.5. Ejemplo de cómo funciona un humedal artificial: Medio de soporte de diferentes granulometrías, zona radicular de la hidrófita con microorganismos - bacterias, protozoarios, micrometazoarios, metazoarios, rotíferos, nemátodos, etc.- (Amábilis-Sosa *et al.*, 2018)

## 3.4. Normativa aplicable: NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1997)

La Norma Oficial Mexicana vigente, especifica los valores máximos de los parámetros de contaminantes que pueden estar presentes en el agua según el uso que se pretenda dar a esta agua (Tabla 3.2). Para una aplicación más certera de la

ley se divide la reutilización (llamada “reúso” en la normativa, pero esta palabra no existe en el diccionario de la lengua española ni es de uso común) del agua en dos tipos: servicio al público con contacto directo y servicio al público con contacto indirecto.

**Tabla 3.2. Límites máximos permisibles de contaminantes, NOM-003-SEMANART-1997 (mejorada de DOF, 1997)**

Tipo de reutilización	Promedio mensual				
	Coliformes fecales NMP/100 mL	Huevos de helminto (HH/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	SST (mg/L)	Grasa y aceites (mg/L)
Servicio al público con contacto directo	240	1	20	20	15
Servicio al público con contacto directo u ocasional	1,000	5	30	30	15

NMP: número más probable; mL: mililitros; H: huevos, mg: miligramos; L: litros; DBO<sub>5</sub>: demanda bioquímica de oxígeno en cinco días; SST: sólidos suspendidos totales

Se refiere a contacto directo a las actividades en las que usuario esté expuesto directamente (piel, órganos internos, etc.). Se consideran los siguientes usos para el agua tratada: llenado de lagos y canales artificiales con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines, uso en retretes<sup>4</sup>, entre otros.

Se refiere a contacto indirecto cuando el usuario esté expuesto indirectamente y a que su acceso es restringido. Se consideran los siguientes usos para esta calidad del agua tratada: riego de jardines en camellones y autopistas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones.

Las pruebas que se realizaron durante el desarrollo del proyecto y las normas que se usaron para llevar a cabo el método de la prueba se presentan en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3. Parámetro, norma y método**

Parámetro	Norma NMX	Método
DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	NMX-AA-028-SCFI-2001 (DOF, 2001b)	Incubación por diluciones
DQO <sub>total</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	NMX-AA-030-SCFI-2001 (DOF, 2001c)	Reflujo cerrado
SDT (mg/L)	NMX-AA-034-SCFI-2000 (DOF, 2000a)	Gravimétrico
Huevos de helmintos	NMX-AA-113-SCFI-1999 (DOF, 2000d)	Conteo de huevos por centrifugación

<sup>4</sup> Retrete: Aposento dotado de las instalaciones necesarias para orinar y evacuar el vientre. Conocido en México como excusado o escusado (Diccionario de la lengua española, 2014)

<b>Parámetro</b>	<b>Norma NMX</b>	<b>Método</b>
Coliformes totales y fecales (NMP)	NMX-AA-042-1987 (DOF, 1987)	Número más probable de coliformes totales y fecales
Sulfatos (mg/L)	NMX-AA-074-SCFI-2014 (DOF, 1981)	Medición de ion sulfato
Sulfuros (mg/L)	NMX-AA-084-1982 (DOF, 1982)	Método iodométrico
Nitratos (mg/L)	NMX-AA-082-1986 (DOF, 2001e)	Espectrofotométrico ultravioleta
Fósforo (ppm)	NMX-AA-029-SCFI-2001 (DOF, 2001d)	Determinación de fósforo total
Valor de pH	NMX- AA-008-SCFI-2000 (DOF, 2011)	Potenciométrico ( <i>in situ</i> )
T (°C)	NMX-AA-007-SCFI-2000 (DOF, 2000b)	Termométrico ( <i>in situ</i> )
CE (µS/cm)	NMX-AA-093-SCFI-2000 (DOF 2000c)	Potenciométrico ( <i>in situ</i> )
O <sub>2</sub> (mg/L)	NMX-AA-012-SCFI-2001 (DOF, 2001a)	Oxímetro ( <i>in situ</i> )

### 3.5. Análisis estadístico

A los datos experimentales obtenidos se les aplicaron análisis estadísticos para confiabilidad, exactitud y precisión.

A continuación, en el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos y su discusión.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Implementación en el laboratorio de algunas de las normas mexicanas NMX referenciadas en la NOM-003-SEMARNAT-1997

##### 4.1.1. Demanda química de oxígeno, DQO

Como se mencionó en el capítulo anterior, para evaluar esta variable se siguió el procedimiento de la norma NMX-AA-030-SCFI-2012 (DOF, 2001c), para lo que se construyó una curva de calibración por duplicado por medio de una solución patrón de biftalato de potasio. Se muestran en la Tabla 4.1 los resultados para elaborar esa curva de calibración. De esta curva, por medio de regresión lineal, se obtiene la ecuación para calcular la concentración en las muestras (Figura 4.1).

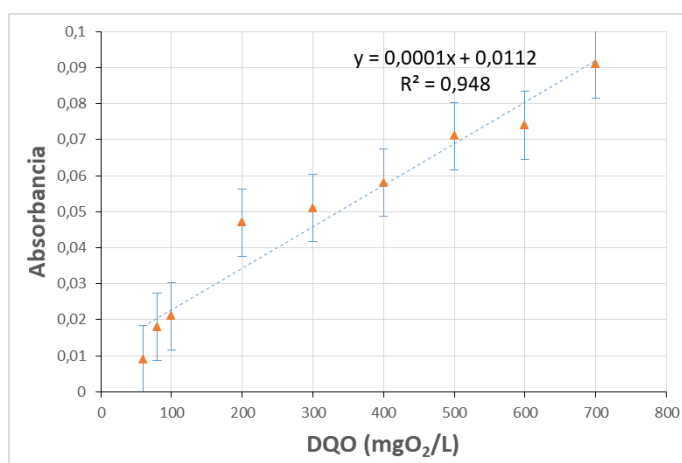


Figura 4.1. Curva de calibración para la determinación de la DQO

Tabla 4.1. Curva de calibración de la DQO

mgO <sub>2</sub> /L	C <sub>8</sub> H <sub>5</sub> KO <sub>4</sub> (mL)	H <sub>2</sub> O (mL)	Absorbancia
Blanco	0	5	0
60	0.375	4.625	0.009
80	0.5	4.5	0.018
100	0.625	4.375	0.021
200	1.25	3.75	0.047
300	1.875	3.125	0.051
400	2.5	2.5	0.058
500	3.125	1.875	0.071
600	3.75	1.25	0.074
700	4.375	0.625	0.091

#### 4.1.2. Determinación de nitratos

Para la obtención de los nitratos, como se mencionó se usó la norma NMX-AA-082-1986 (DOF, 2001e) y, nuevamente, se construyó la curva de calibración empleando una solución patrón de nitrato de potasio (Tabla 4.2 y Figura 4.2).

**Tabla 4.2. Curva de calibración de nitratos**

$\mu\text{g/L}$	$\text{NO}_3$ (mL)	$\text{H}_2\text{O}$ (mL)	Absorbancia
<b>Blanco</b>	0	5	0
<b>0.2</b>	0.1	4.9	0.063
<b>0.6</b>	0.3	4.7	0.146
<b>1.4</b>	0.7	4.3	0.357
<b>2</b>	1	4	0.485
<b>3</b>	1.5	3.5	0.734
<b>4</b>	2	3	0.998
<b>6</b>	3	2	1.25
<b>7</b>	3.5	1.5	1.42

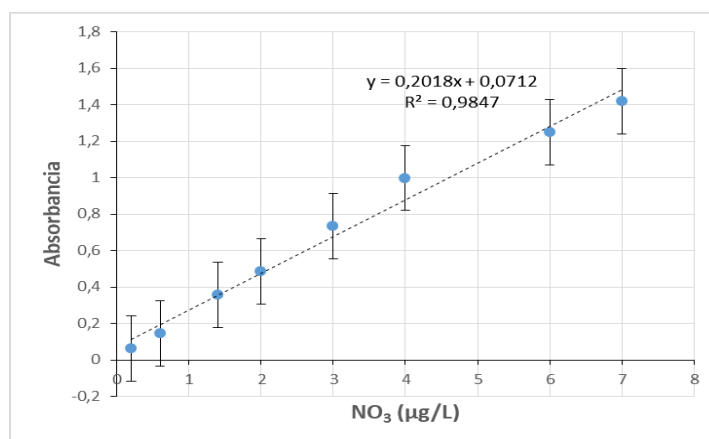


Figura 4.2. Curva de calibración para la determinación de nitratos

#### 4.1.3. Determinación de sulfatos

La curva de calibración siguió el procedimiento de la norma NMX-AA-074-SCFI-2014 (DOF, 1981), usando una solución patrón de sulfato de sodio (Tabla 4.3). A partir de la curva obtenida, se emplea una regresión lineal, de la cual se obtiene la ecuación para calcular la concentración en las muestras (Fig. 4.3).

**Tabla 4.3. Curva de calibración de sulfatos**

$\text{mgSO}_4^{2-}/\text{L}$	$\text{Na}_2\text{SO}_4$ (mL)	$\text{H}_2\text{O}$ (mL)	Absorbancia
<b>Blanco</b>	0	5	0
<b>5</b>	0.25	4.75	0.004
<b>10</b>	0.5	4.5	0.009
<b>15</b>	0.75	4.25	0.016
<b>20</b>	1	4	0.02
<b>25</b>	1.25	3.75	0.038
<b>30</b>	1.5	3.5	0.041

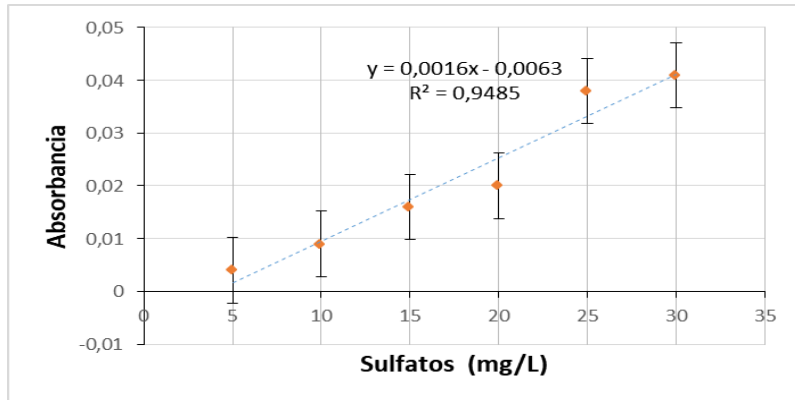


Figura 4.3. Curva de calibración para la determinación de sulfatos

#### 4.1.4. Determinación de fósforo

Para esta determinación, con la norma NMX-AA-029-SCFI-2001 (DOF, 2001d), se obtuvieron de la curva de calibración (Tabla 4.4, Figura 4.4) las concentraciones en las muestras.

**Tabla 4.4. Curva de calibración para fósforo**

mg/L	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (mL)	V H <sub>2</sub> O (mL)	Absorbancia
<b>Blanco</b>	0	5	0
<b>0.5</b>	0.05	4.95	0.023
<b>1</b>	0.1	4.9	0.042
<b>1.5</b>	0.15	4.85	0.062
<b>2</b>	0.2	4.8	0.08
<b>2.5</b>	0.25	4.75	0.101
<b>3</b>	0.3	4.7	0.128
<b>3.5</b>	0.35	4.65	0.141
<b>4</b>	0.4	4.6	0.163
<b>4.5</b>	0.45	4.55	0.189
<b>5</b>	0.5	4.5	0.209

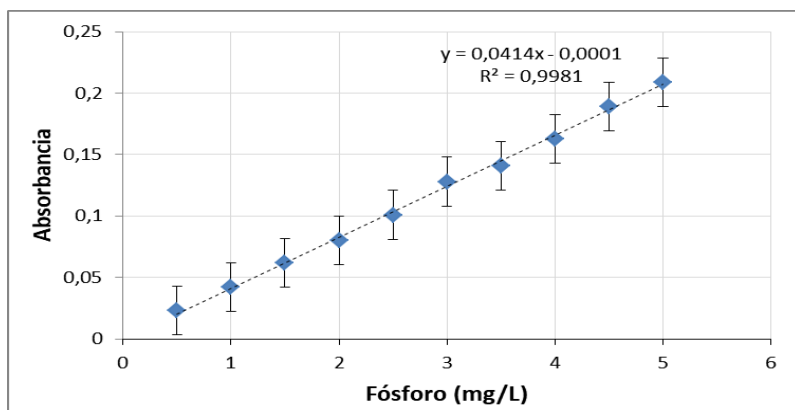


Figura 4.4. Curva de calibración para la determinación de fósforo

#### 4.1.5. Determinación de huevos de helminto

De acuerdo con la norma NMX-AA-113-SCFI-1999 (DOF, 2000d), las muestras se deben sedimentar por gravedad durante 24 horas y después emplear una centrifuga (400g) a temperatura ambiente para la separación de los huevos. Este método está sujeto a la sensibilidad visual del observador ya que los huevos se cuentan por medio de la observación de la muestra a través de un microscopio.

#### 4.1.6. Determinación de sulfuros

Siguiendo la norma NMX-AA-084-1982 (DOF, 1982), la concentración de sulfuros se obtiene por medio de la ecuación 5.

$$\text{mg/L} = [(A \times B) - (C \times D)] \times 16000 / \text{cm}^3 \text{ de muestra} \quad (4-1)$$

donde:

A= volumen de solución de lodo en  $\text{cm}^3$

B= Normalidad de la solución de lodo

C= volumen de solución de tiosulfato de sodio en  $\text{cm}^3$

D= Normalidad de la solución de tiosulfato de sodio

#### 4.1.7. Determinación de sólidos suspendidos totales, fijos y volátiles

Las muestras se secan en la estufa o con mechero, se pesan ya secas y se introducen a una mufla donde se calcinan los sólidos volátiles presentes, las cenizas o “sólidos fijos” se pesa y la diferencia con el resultado inicial son los sólidos suspendidos volátiles presentes.

#### 4.1.8. Determinación de parámetros *in situ*

Para la determinación de parámetros *in situ* se usó un equipo que mide distintos parámetros simultáneamente, modelo HI 9828, de Hanna Instruments (Figura 4.5). Para su calibración en cada uso se emplean las soluciones de calibración incluidas con el equipo. Los valores de pH, temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y oxígeno disuelto ( $\text{mg}/\text{L}$ ) obtenidos se muestran más abajo.

#### 4.1.9. Demanda bioquímica de oxígeno, DBO

De acuerdo con la norma NMX-AA-028-SCFI-2001 (DOF, 2001b), las muestras fueron adicionadas con una solución amortiguadora (*buffer* en inglés) para mantener el pH constante durante la prueba, agregando los nutrientes necesarios y dejándolas en una parrilla de agitación por 5 días.





Figura 4.5. Equipo multiparamétrico HI 9828 Hanna instruments

## 4.2. Resultados preliminares de la caracterización del agua

Se efectuaron las pruebas con muestras preliminares para ensayar los procedimientos de las normas. Estas muestras provenían del humedal pero ya habían superado su tiempo de caducidad. Los resultados se obtuvieron mediante lecturas de absorbancia y aplicando la ecuación obtenida por medio de cada regresión lineal de las curvas de calibración. Se presentan en las Tablas 4.5a,b.

**Tabla 4.5a. Resultados obtenidos con muestras de ensayo**

	Lugar del humedal	Absorbancia	Concentración (mg/L)
DQO	Entrada	1.07	4.95
	Filtro	0.28	1.01
	Salida	>2.0	N.A
Nitratos	Entrada	1.07	4.95
	Filtro	0.28	1.01
	Salida	>2.0	N.A
Sulfatos	Entrada	0.52	330.81
	Filtro	0.47	299.56
	Salida	0.25	162.69
Fósforo	Entrada	0.52	19.80
	Filtro	0.47	22.07
	Salida	0.25	1.91

**Tabla 4.5b. Resultados obtenidos con muestras de ensayo, HH**

	Lugar del humedal	(huevos de helminto/L)
Huevos de helminto	Entrada	0
	Filtro	0
	Salida	0

### 4.3. Resultados de la caracterización puntual del agua

A partir de la séptima semana se tomaron muestras del humedal a las que se les hicieron las pruebas necesarias para comprobar que la operación del humedal fuera acorde con lo esperado. La toma de muestra y el volumen recolectado de cada punto se presentan en la Tabla 4.6. A partir de la segunda muestra, la disponibilidad de flujo de entrada fue insuficiente para tomar muestras por motivos que se describen en el apartado de comentarios sobre el avance. Los resultados obtenidos de un solo análisis con tres réplicas de las muestras frescas se presentan en las Tablas 4.7 a 4.10.

**Tabla 4.6. Toma de muestras y puntos muestreados**

Número	1	2	3	4
Puntos muestreados y volumen tomado	Entrada 10L Filtro 10L Salida 10L	Entrada 1L Filtro 10L Salida 10L	Filtro 10L Salida 10L	Filtro 10L Salida 10L

**Tabla 4.7. Resultados obtenidos con la muestra 1**

Parámetro	Entrada	Filtro	Salida
DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	2240	175	175
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	3758	118	0
Fósforo (mgP/L)	19.81	22.08	1.91
Nitratos (mgNO <sub>3</sub> /L)	2.34	1.61	7.18
Sulfatos (mgSO <sub>4</sub> /L)	388.31	337.06	497.69
Sulfuros (mgS/L)	0	0	0
ST (mg/L)	2640	710	1320
SVT (mg/L)	1480	250	510
SDT (mg/L)	2540	700	1300
SST (mg/L)	100	10	20
SSV (mg/L)	4120	4410	4110
pH	7.36	8.13	6.99
T (°C)	21.82	22.02	22.6
CE (µS/cm)	2467	1735	1036
O <sub>2</sub> (mg/L)	2.88	4.82	5.28
Huevos de helminto (HH/L)	1	1	1

Con base en los resultados que se obtuvieron en las tablas mostradas arriba quedó claro que había problemas técnicos en el sistema. Los resultados no eran los que el sistema presentaba hacía un tiempo (Borrego-Saráchaga, 2015).

Con base en ello, esta tesis se dirigió a un nuevo objetivo: Definir la estrategia para rehabilitar el sistema. En esta estrategia se darán propuestas de solución que puedan ser adoptadas por las autoridades de quienes depende directamente la

correcta operación del sistema para que vuelva a funcionar como planta prototipo demostrativa de la bondad de esta metodología de depuración de aguas residuales.

**Tabla 4.8. Resultados obtenidos con la muestra 2**

<b>Parámetro</b>	<b>Entrada</b>	<b>Filtro</b>	<b>Salida</b>
DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	192.5	385	0
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	480	0	8
Fósforo (mgP/L)	9.28	6.96	0.56
Nitratos (mgNO <sub>3</sub> /L)	7.03	6.3370	N.A.
Sulfatos (mgSO <sub>4</sub> /L)	257.69	296.44	427.69
Sulfuros (mgS/L)	0	0	0
ST (mg/L)	910	680	1090
SVT (mg/L)	4550	4480	4920
SDT (mg/L)	810	670	1070
SST (mg/L)	100	10	20
SSV (mg/L)	4120	4410	4110
pH	8.07	8.19	7.61
T (°C)	18.82	19.19	18.52
CE (µS/cm)	1525	1795	1118
O <sub>2</sub> (mg/L)	6.78	3.39	6.24
Huevos de helminto (HH/L)	1	2	2

N.A., no analizada

**Tabla 4.9. Resultados obtenidos con la muestra 3**

<b>Parámetro</b>	<b>Filtro</b>	<b>Salida</b>
DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	0	0
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	188	278
Fósforo (mgP/L)	19.6159	3.3357
Nitratos (mgNO <sub>3</sub> /L)	1.0644	1.3072
Sulfatos (mgSO <sub>4</sub> /L)	572.6875	607.6875
Sulfuros (mgS/L)	1.2414	0.5517
ST (mg/L)	490	2850
SVT (mg/L)	120	240
SDT (mg/L)	490	2850
SST (mg/L)	0	0
SSV (mg/L)	0	0
pH	7.53	8.04
T (°C)	16.49	16.09
CE (µS/cm)	2064	1812
O <sub>2</sub> (mg/L)	6.85	7.95
Huevos de helminto (HH/L)	2	1

**Tabla 4.10. Resultados obtenidos con la muestra 4**

<b>Parámetro</b>	<b>Filtro</b>	<b>Salida</b>
DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	70	0
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	78	18
Fósforo (mgP/L)	2.61	2.56
Nitratos (mgNO <sub>3</sub> /L)	0.69	0.84
Sulfatos (mgSO <sub>4</sub> /L)	562.69	667.69
Sulfuros (mgS/L)	0.83	0
ST (mg/L)	620	1410
SVT (mg/L)	160	410
SDT (mg/L)	600	1370
SST (mg/L)	20	40
SSV (mg/L)	0	0
pH	8.10	7.47
T (°C)	16.92	17.03
CE (μS/cm)	1854	2340
O <sub>2</sub> (mg/L)	4.39	6.13
Huevos de helminto (HH/L)	1	0

#### **4.4. Remoción de contaminantes en un HAFH**

##### **4.4.1. Sólidos suspendidos totales**

Una de las funciones de un humedal artificial es la remoción de material coloidal en el agua que pasa a través del mismo. Sin embargo, no es deseable que material en suspensión sea dejado llegar al humedal artificial porque reduce considerablemente su eficiencia depurativa y baja su vida útil. Por ello es que deben ser eliminados en sedimentadores primarios. Las velocidades bajas de flujo junto con la presencia de material de soporte, promueve la sedimentación y captación de los materiales sólidos de tamaño coloidal. Muchos contaminantes están asociados con la materia suspendida, como metales y compuestos orgánicos. En un HAFH la materia suspendida entrante es removida principalmente por mecanismos de captación y asentamiento. Como resultado, la materia suspendida tiende a acumularse en el lecho del humedal (Kadlec y Knight, 1996).

Esto tiene profundas consecuencias en la conductividad hidráulica y el desempeño del sistema. Por ello, los SST que entran a un sistema donde el reactor biológico es un humedal artificial deben ser removidos previamente.

Debido al problema de que los sedimentadores primarios no fueron desazolados como debiera haber sido, la bomba sumergible de alimentación se descompuso y el reactor no recibió la alimentación como debiera y por ello es que no hay flujo continuo del agua. Se aperció a las altas autoridades del Colegio para que

solicitaran formalmente este servicio periódico e incluso se habló con el personal a cargo de esta labor estando en la mejor disposición de hacerlo en cuanto recibieran la solicitud oficial de la dependencia universitaria (CCH Sur, UNAM).

#### **4.4.2. Demanda bioquímica de oxígeno, DBO**

Cuando las aguas que fluyen por el humedal contienen concentraciones moderadas o moderadamente altas de DBO dependiendo de la época del año, siendo una institución educativa que tiene períodos vacacionales y fines de semana, una disminución en la concentración hasta valores cercanos a cero es comúnmente observada. Las curvas de la DBO de las muestras del humedal artificial en estudio presentan un agudo decremento hasta un punto considerado de “fondo”. Si la DBO que entra está por debajo de la DBO de fondo entonces la concentración de salida aumentará al pasar por el humedal ya que el agua arrastrará materiales provenientes de los microorganismos muertos y detritus de las hidrofitas. Por ello es que la DBO es un parámetro que integra la degradación de una mezcla de componentes. Cada componente se degrada a una velocidad diferente. Así, la DBO muestra una distribución de velocidades para cada fracción de la mezcla. Esto quiere decir que la composición de la muestra varía a su paso por el humedal, siendo las fracciones más volátiles las primeras en desaparecer y las más persistentes quedan hasta el final.

Para el caso de los resultados obtenidos en el humedal, la prueba de DBO refleja solamente una fracción de la mezcla de carbono, porque es determinada antes de que todos los compuestos se oxiden. La prueba de  $DBO_5$  registra alrededor de dos tercios de la llamada  $DBO_U$ , por última, ya que es independiente del tiempo de realización de la prueba. Existen factores que afectan la remoción de DBO en el humedal artificial, los cuales se describen a continuación:

**Temperatura:** La temperatura es un factor que tiene poca importancia en la remoción de DBO, siempre y cuando esté en el intervalo donde los microorganismos proliferan adecuadamente. Solamente en los días más calurosos del año durante el verano o en los más fríos durante el invierno se afecta negativamente a la remoción de DBO en el humedal.

**Suministro de oxígeno:** la cantidad de oxígeno presente en el agua de tratamiento durante su paso por el humedal debe ser suficiente para cumplir con la DBO de entrada, de no ser así el tratamiento no es el óptimo. Las raíces de las plantas proveen de oxígeno al sistema, así como el flujo de agua por el material poroso.

**Profundidad del humedal:** la profundidad también demuestra ser importante siendo los humedales más superficiales mejores para remover DBO. Para ser efectivos los humedales de flujo horizontal no deben sobrepasar una profundidad de 60cm.

**Vegetación:** El número de plantas sembradas así como el tipo de planta son importantes para la remoción de DBO. A mayor número de plantas mejor remoción,

las mejores variedades para remover DBO estudiadas por el momento son *Phragmites* y *Schoenoplectus*, aunque esto depende de las condiciones climatológicas regionales.

#### 4.4.3. Nitrógeno (Kadlec y Knight, 1996; Orduña-Bustamante, 2012)

Los compuestos de nitrógeno se encuentran entre los componentes de primer interés en las aguas de desecho por su rol en la eutrofización, su efecto en el contenido de oxígeno de las aguas y su toxicidad para los organismos acuáticos. Por otro lado, estos compuestos también aumentan el crecimiento de las plantas, que estimula los ciclos biogeoquímicos del humedal. El nitrógeno se encuentra presente en un humedal de varias formas (Figura 4.6). Las formas inorgánicas son amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y nitrógeno molecular ( $\text{N}_2$ ). Sus formas orgánicas son principalmente aminoácidos ( $\text{R-NH}_2$ ), urea ( $\text{CNH}_4\text{O}$ ) y ácido úrico ( $\text{C}_4\text{N}_4\text{H}_4\text{O}_3$ ) (Orduña-Bustamante, 2012).

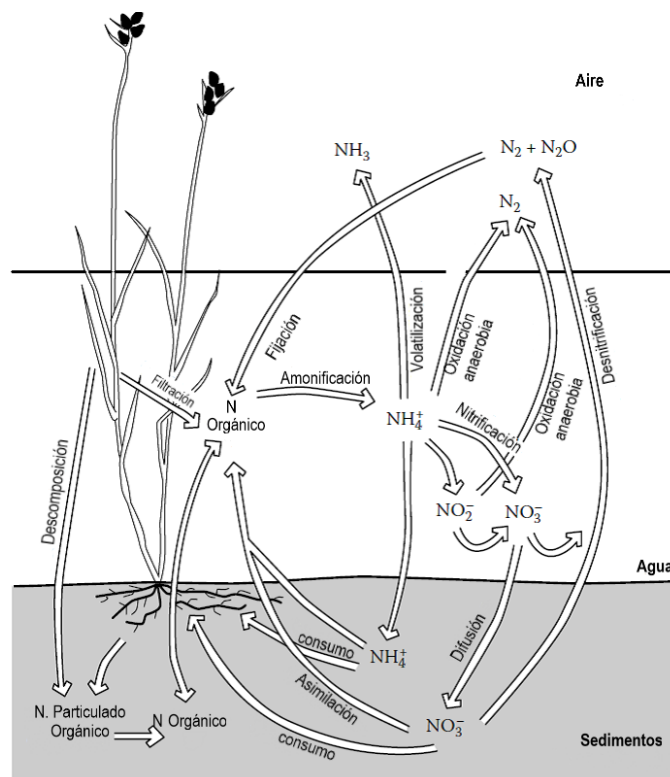


Figura 4.6. Ciclo del nitrógeno en un humedal (Kadlec y Knight, 1996)

En el humedal se dan transformaciones de las diferentes formas de nitrógeno. Algunas de estas transformaciones requieren energía mientras que otras liberan energía. La mayoría de los cambios químicos son controlados con la producción de enzimas por los organismos vivos que se benefician con ello. Un número de procesos transfieren componentes de un punto a otro del humedal sin tener una

transformación molecular. Estos procesos incluyen: sedimentación y resuspensión de partículas, difusión de formas solubles, translocación de plantas, caída de hojas, volatilización de amoníaco y adsorción de nitrógeno soluble en el sustrato. En conjunto con la transferencia física de nitrógeno, hay procesos que transforman químicamente las formas de nitrógeno en un humedal: amonificación (mineralización), nitrificación, desnitrificación, asimilación y descomposición. La Figura 4.6 ilustra estos procesos con mayor detalle (Kadlec y Knight, 1996).

En un humedal artificial típico se tiene un influente de nitratos relativamente bajo. El nitrógeno orgánico es mineralizado a amoníaco y el amoníaco es oxidado a nitratos. El nitrógeno oxidado es reducido a  $N_2$  o  $N_2O$  que es expelido del sistema. Es bien sabido que un HAFH está limitado en su capacidad de desnitrificar si no tiene una carga suficiente de DBO y biomasa como suministro de carbono. Igualmente, es muy necesario tener un sistema bien oxigenado para promover la nitrificación y su conversión a nitrógeno molecular (Orduña-Bustamante, 2012).

Esto es lo que se buscaba en este sistema durante los experimentos realizados en el marco de la tesis original para obtener el título profesional. Desafortunadamente, los resultados obtenidos se vieron afectados por estos problemas técnicos encontrados que impidieron el desempeño adecuado de los microorganismos, de las hidrofítas y del soporte pétreo.

#### **4.4.4. Fósforo (Reyes-Luz, 2006)**

El fósforo es un nutriente requerido para el crecimiento de las plantas y es un factor limitante para la producción vegetal. Una medida de los requerimientos relativos de un ecosistema es una proporción entre los nutrientes en la biomasa, la cual está representada por la proporción molar C:N:P=106:16:1. Las aguas de tratamiento rara vez tienen esta proporción y casi siempre hay un exceso de fósforo en las aguas provenientes de uso doméstico. El más mínimo cambio en el fosfato, que es su forma biodisponible, puede tener un gran impacto sobre el desempeño de un humedal artificial. Para adaptarse a las condiciones de entrada, el humedal requiere de cierto tiempo después del cual se llega a un estado maduro donde se observa bastante estabilidad de largo plazo aún con variaciones en la entrada de este componente al sistema.

Las formas más reactivas de fósforo son los fosfatos disueltos que cambian su hidratación en respuesta al pH. Las especies más comunes son el fosfato mono- y dibásico que dominan en el pH típico de un humedal ( $4 < \text{pH} < 9$ ). El fósforo también se encuentra en el humedal como parte de la biomasa o compuestos orgánicos. Eventualmente el fósforo puede sedimentarse en forma de minerales, de los cuales son de importancia en el humedal apatita ( $\text{Ca}_5(\text{Cl},\text{F})(\text{PO}_4)_3$ ) e hidroxiapatita ( $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ ).

La remoción de fósforo en un humedal artificial se debe a su fijación en la biomasa, el cual tiene un límite en la cantidad de fósforo que se puede remover. La adsorción

también es un factor importante de la retención de fósforo en un humedal artificial, siendo diferente el desempeño de cada tipo de soporte para retener el fósforo. La capacidad de adsorción de fósforo en el soporte es finita y al saturar la superficie del soporte la adsorción se detendrá, lo que produce que el tiempo de vida promedio de un soporte ideado para retener fósforo sea de 15 años.

Debido a la falta de mantenimiento no hubo los resultados esperados.

#### 4.4.5. Remoción de patógenos (Padrón-López, 2005)

Los patógenos de interés en un humedal artificial son parásitos, bacterias y virus. Estos son removidos por mecanismos tales como predación por otros microorganismos, sedimentación, adsorción y muerte de los patógenos por condiciones desfavorables para su desarrollo. La remoción de coliformes fecales en los humedales depende del tiempo de residencia y de la temperatura. A mayor tiempo de residencia mejor remoción, mientras que a mayor temperatura menor remoción de coliformes. Los huevos de helminto se remueven principalmente por sedimentación y captación por el sustrato. Por ello es que el tiempo de residencia y la porosidad del soporte en el humedal son los factores que intervienen principalmente en la remoción. En esta investigación se consideraron, de los organismos indicadores señalados por la normativa vigente en México, los huevos de helminto. Los resultados obtenidos no son coincidentes con el estudio antecedente (Borrego-Saráchaga, 2015).

#### 4.5. Discusión final de los resultados obtenidos

Considerando los datos de salida con los planteados en la norma (Tabla 4.11) queda claro que el sistema presentaba problemas técnicos.

**Tabla 4.11. Muestras de salida contra valores de la NOM-003-SEMARNAT-1997**

Tipo de reutilización	Promedio mensual		
	Huevos de helminto (h/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	SST (mg/L)
Servicio al público con contacto directo	1	20	20
Servicio al público con contacto directo u ocasional	5	30	30
Muestra de salida			
1	1	<b>175</b>	<b>4110</b>
2	<b>2</b>	ND	<b>4110</b>
3	1	ND	ND
4	1	ND	ND

mL: mililitros; h: huevos, mg: miligramos; L: litros; DBO<sub>5</sub>: demanda bioquímica de oxígeno en cinco días; SST: sólidos suspendidos totales, ND: no determinados (ya que no había efluente)



Para continuar con la comparación entre los resultados obtenidos y los valores que se pide cumplir en la norma NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1997) se debe aclarar que el humedal artificial en estudio no pudo alcanzar el estado estacionario de operación durante la toma de las muestras, debido a que la bomba sumergible que debía dosificar o alimentar el agua residual de los sedimentadores primarios (fosas sépticas) al tanque de estabilización dejó de funcionar por falta de mantenimiento preventivo como se menciona brevemente en el Anexo 3 de este documento.

Los resultados de salida, en consecuencia, no son representativos de la operación normal del humedal y, por ello, no se pudo alcanzar el objetivo inicial de este proyecto.

No se sabe en qué momento falló la bomba, ya que la libreta de bitácora del sistema que estaba bajo el resguardo del Q. Agustín Arreguín-Rojas, profesor de carrera de tiempo completo del CCH Sur pero quien obtuvo una licencia de disfrute de su año sabático de julio de 2014 a julio de 2015 y, posteriormente, se jubiló por alcanzar la edad de 70 años, no se pudo localizar. El personal del Siladin indicó que se repararía pero en el lapso de esta tesis no ocurrió.

Consecuentemente, se inició una libreta de bitácora a partir de esta estancia académica en el CCH Sur que sirvió para escribir esta tesis, y se tienen dos juegos, uno en manos del personal técnico-académico a cargo del sistema en el CCH Sur y una réplica exacta en manos de la Facultad de Química, ya que aunque el sistema está construido en la primera dependencia fue construido allí para sustituir el que la Facultad de Química tenía en la Zona Cultural y que tuvo que ser trasladado porque se iban a construir las instalaciones del Posgrado de la UNAM.

Por ello, ambas dependencias son las responsables de su operación, pero las solicitudes administrativas deben ser hechas por el titular del CCH Sur y no por la Facultad de Química. Se verá que a la brevedad posible se subsane esta problemática para beneficio de ambas dependencias universitarias y, sobre todo, para el ambiente ya que actualmente se están vertiendo sin tratar los efluentes de ambas instalaciones, el Edificio de Idiomas y el Siladin a una grieta, contaminando el subsuelo.

En lo que respecta a los resultados obtenidos para el efluente puede hacerse la comparación con los requerimientos de la norma: Se observa que los SST en las dos primeras muestras no cumplen con lo que pide la norma, por lo que no cumple con las especificaciones para ser reutilizada ni para contacto directo o indirecto. La tercera muestra cumple con los valores que pide la norma para contacto directo e indirecto, pero con un sistema inestable es dudoso pensar que realmente cumple con los valores estipulados y la cuarta muestra teóricamente también cumple con los requisitos de la norma para contacto directo e indirecto aunque con lo comentado hasta aquí es poco probable que realmente cumpla con la norma en su totalidad.

Con respecto a la descripción de la operación del humedal por medio de los parámetros analizados, a continuación se analizan los datos del pH en los efluentes del humedal artificial en estudio.

Los valores de pH de los efluentes del humedal fueron superiores a 7 en todas las muestras lo que indica un comportamiento básico del humedal. Este comportamiento básico indicaría que los nitratos, que casi siempre aumentan su valor al salir del humedal, podría ser un factor a considerar. Con esto se podría suponer que el agua alimentada o dosificada a la entrada del humedal tiene amoníaco y su oxidación provocaría un aumento en la cantidad de nitratos y en el valor de pH de los efluentes.

La cantidad reducida de sulfuros en el efluente también podrían hacer concluir que hay una oxigenación adecuada dentro del humedal y los procesos anaerobios no son dominantes aún cuando el agua del humedal está estancada desde que se descompuso la bomba.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. Conclusiones**

De acuerdo con el objetivo original fijado para esta investigación que era el de evaluar la operación de un humedal artificial de flujo horizontal (HAFH) ejemplificado con el sistema ubicado en el Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur, CCH Sur de la UNAM, usando como parámetros de respuesta algunas propiedades del agua en el efluente para determinar si cumplen con las principales características especificadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1997), puede concluirse lo siguiente:

Los datos experimentales en el reactor de flujo pistón, que es como está conceptualizado el humedal artificial de flujo horizontal (HAFH) ejemplificado con el ubicado en el Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur, CCH Sur, de la UNAM, indican que no cumple con ellas.

Se tuvo la excelente oportunidad de realizar una investigación experimental en un sistema prototipo (no en uno de laboratorio o de banco) y poder constatar la necesidad de realizar trabajos de mantenimiento preventivo, como los que se llevaban a cabo en los sistemas prototipo de la Zona Cultural y el Vivero Forestal de Coyoacán (Rodríguez y Varela, 2003).

No se pudo ver la operación a régimen permanente.

En el Anexo 3 se presenta el Manual propuesto para operar y darle mantenimiento al sistema completo.

Asimismo, en el Anexo 4 se indica, de acuerdo con la investigación realizada por Gaitán-Zamora (2007), cómo deben disponerse los residuos producidos en la operación del sistema de tratamiento basado en el humedal artificial.

Considerando el nuevo objetivo, de definir la estrategia para rehabilitar el sistema, a continuación en las recomendaciones y después en el Anexo 3 se dan las propuestas de solución que puedan ser adoptadas por las autoridades de quienes depende directamente la correcta operación del sistema para que vuelva a funcionar como planta prototipo demostrativa de la bondad de esta metodología de depuración de aguas residuales.

## 5.2. Recomendaciones

Se recomienda entrenar al personal técnico responsable de las instalaciones del sistema de tratamiento de las aguas residuales producidas en el Colegio de Ciencias y Humanidades para que tengan la posibilidad de dar los servicios de mantenimiento preventivo y operativo con objeto de lograr el objetivo último de que el sistema completo incluido el reactor operen de manera adecuada y que sirva como un prototipo para que personas del propio Colegio, de otras entidades universitarias, de la Ciudad de México e incluso de todo el país conozcan el sistema ya que es una ecotecnología fácil de construir, arrancar, operar y mantener cuando se conocen sus principios de operación.

Lo primero es realizar cambios sustantivos en la fosa séptica a donde se dirigen las aguas residuales del edificio de “idiomas”, destacando el del retiro de los sólidos sedimentados y flotantes en forma periódica y su estabilización mediante un reactor anaerobio de lodos.

Como estos efluentes son el influente del sistema cuya operación unitaria clave es el humedal artificial es muy importante “lavarlo” con agua a presión para que los lodos que lo tienen azolvado sean retirados. Esta agua de lavado debe ser recirculada a una de las dos fosas sépticas ya limpias, ya sea la del edificio de “idiomas” o la que se encuentra frente al humedal para que sean recolectados los lodos y dispuestos como se mencionó en el párrafo de arriba.

Una vez que el sistema alcance la estabilidad, de acuerdo con los parámetros considerados debe determinarse si es necesaria alguna operación unitaria adicional para cumplir con la NOM-003-SEMARNAT-1997 (DOF, 1997).

Toda información diaria, semanal, mensual y anual recopilada para el mantenimiento y operación consuetudinaria del humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial debe llevarse en dos libretas de bitácora idénticas para saber con precisión el estado del sistema: HAFH, equipos y accesorios. Pueden ser en papel o electrónicas.

# ANEXOS

## ANEXO A.1. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997

### SECRETARÍA<sup>5</sup> DE MEDIO AMBIENTE, RECURSOS NATURALES Y PESCA

**NORMA Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se “reusen” en servicios al público.**

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-003-SEMARNAT-1997, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS QUE SE “REUSEN” EN SERVICIOS AL PÚBLICO.

JULIA CARABIAS LILLO, Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, con fundamento en lo dispuesto en los artículos 32 Bis fracciones I, IV y V de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 5o. fracciones V y XI, 6o., 36, 37, 37 Bis, 117, 118 fracción I, 119, 121, 126, 171 y 173 la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 118 fracción III y 122 de la Ley General de Salud; 38 fracción II, 40 fracción X, 41, 45, 46 y 47 fracciones III y IV de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, y

#### CONSIDERANDO

Que en cumplimiento a lo dispuesto en la fracción I del artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, el Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se “reusen” en servicios al público, se publicó en el **Diario Oficial de la Federación** el 14 de enero de 1998, a fin de que los interesados, en un plazo de 60 días naturales, presentaran sus comentarios al Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental, sito en avenida Revolución 1425, mezzanine planta alta, colonia Tlacopac, Delegación Alvaro Obregón, código postal 01040, de esta ciudad.

Que durante el plazo a que se refiere el considerando anterior y de conformidad con lo dispuesto en el artículo 45 del ordenamiento legal citado, estuvieron a disposición del público los documentos a que se refiere dicho precepto.

Que de acuerdo con lo que disponen las fracciones II y III del artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, los comentarios presentados por los interesados fueron analizados en el seno del citado Comité, realizándose las modificaciones procedentes a dicha Norma; las respuestas a los comentarios de referencia fueron publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 14 de agosto de 1998.

Que habiéndose cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización para la elaboración de normas oficiales mexicanas, el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental, en sesión de fecha 22 de abril de 1998, aprobó la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se “reusen” en servicios al público, por lo que he tenido a bien expedir la siguiente

**NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-003-SEMARNAT-1997, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS QUE SE “REUSEN” EN SERVICIOS AL PÚBLICO**

#### ÍNDICE

1. Objetivo y campo de aplicación
2. Referencias
3. Definiciones
4. Especificaciones
5. Muestreo

---

<sup>5</sup> Se han puesto acentos ortográficos donde procede siguiendo las reglas de gramática y se han entrecomillado las palabras que no están registradas en el diccionario de la lengua española y se ha puesto la abreviatura correcta del país estados unidos

6. Métodos de prueba
7. Grado de concordancia con normas y recomendaciones internacionales y con las normas mexicanas tomadas como base para su elaboración
8. Bibliografía
9. Observancia de esta Norma

### 1. Objetivo y campo de aplicación

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se “reusen” en servicios al público, con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud de la población, y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y “reuso”.

En el caso de que el servicio al público se realice por terceros, éstos serán responsables del cumplimiento de la presente Norma, desde la producción del agua tratada hasta su “reuso” o entrega, incluyendo la conducción o transporte de la misma.

### 2. Referencias

Norma Mexicana NMX-AA-003	Aguas residuales-Muestreo, publicada en el <b>Diario Oficial de la Federación</b> el 25 de marzo de 1980.
Norma Mexicana NMX-AA-005	Aguas-Determinación de grasas y aceites-Método de extracción Solhlet, publicada en el <b>Diario Oficial de la Federación</b> el 8 de agosto de 1980.
Norma Mexicana NMX-AA-006	Aguas-Determinación de materia flotante-Método visual con malla específica, publicada en el <b>Diario Oficial de la Federación</b> el 5 de diciembre de 1973.
Norma Mexicana NMX-AA-028	Aguas-Determinación de demanda bioquímica de oxígeno.- Método de incubación por diluciones, publicada en <b>Diario Oficial de la Federación</b> el 6 de julio de 1981.
Norma Mexicana NMX-AA-034	Aguas-Determinación de sólidos en agua.- Método gravimétrico, publicada en el <b>Diario Oficial de la Federación</b> el 3 de julio de 1981.
Norma Mexicana NMX-AA-42	Aguas-Determinación del número más probable de coliformes totales y fecales.- Método de tubos múltiples de fermentación, publicada en el <b>Diario Oficial de la Federación</b> el 22 de junio de 1987.
Norma Mexicana NMX-AA-102-1987	Calidad del Agua-Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y <i>Escherichia coli</i> presuntiva.- Método de filtración en membrana, publicada en el <b>Diario Oficial de la Federación</b> el 28 de agosto de 1987.
Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, publicada en el <b>Diario Oficial de la Federación</b> el 6 de enero de 1997 y su aclaración, publicada en el citado órgano informativo el 30 de abril de 1997.

### 3. Definiciones

#### 3.1 Aguas residuales

Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

#### 3.2 Aguas crudas

Son las aguas residuales sin tratamiento.

#### 3.3 Aguas residuales tratadas

Son aquellas que mediante procesos individuales o combinados de tipo físicos, químicos, biológicos u otros, se han adecuado para hacerlas aptas para su "reuso" en servicios al público.

### **3.4 Contaminantes básicos**

Son aquellos compuestos o parámetros que pueden ser removidos o estabilizados mediante procesos convencionales. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los siguientes: grasas y aceites, materia flotante, demanda bioquímica de oxígeno<sub>5</sub> y sólidos suspendidos totales.

### **3.5 Contaminantes patógenos y parasitarios**

Son los microorganismos, quistes y huevos de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo a la salud humana, flora o fauna. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los coliformes fecales medidos como NMP o UFC/100 ml (número más probable o unidades formadoras de colonias por cada 100 mililitros) y los huevos de helminto medidos como h/l (huevos por litro).

### **3.6 Entidad pública**

Los gobiernos de los estados, del Distrito Federal, y de los municipios, por sí o a través de sus organismos públicos que administren el agua.

### **3.7 Lago artificial recreativo**

Es el vaso de formación artificial alimentado con aguas residuales tratadas con acceso al público para paseos en lancha, prácticas de remo y canotaje donde el usuario tenga contacto directo con el agua.

### **3.8 Lago artificial no recreativo**

Es el vaso de formación artificial alimentado con aguas residuales tratadas que sirve únicamente de ornato, como lagos en campos de golf y parques a los que no tiene acceso el público.

### **3.9 Límite máximo permisible**

Valor o rango asignado a un parámetro, que no debe ser excedido por el responsable del suministro de agua residual tratada.

### **3.10 Promedio mensual (P.M.)**

Es el valor que resulta del promedio de los resultados de los análisis practicados a por lo menos dos muestras simples en un mes.

Para los coliformes fecales es la media geométrica; y para los huevos de helminto, demanda bioquímica de oxígeno<sub>5</sub>, sólidos suspendidos totales, metales pesados y cianuros y grasas y aceites, es la media aritmética.

### **3.11 "Reuso" en servicios al público con contacto directo**

Es el que se destina a actividades donde el público usuario esté expuesto directamente o en contacto físico. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana se consideran los siguientes "reusos": llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines.

### **3.12 "Reuso" en servicios al público con contacto indirecto u ocasional**

Es el que se destina a actividades donde el público en general esté expuesto indirectamente o en contacto físico incidental y que su acceso es restringido, ya sea por barreras físicas o personal de vigilancia. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana se consideran los siguientes "reusos": riego de jardines y camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones.

## **4. Especificaciones**

**4.1** Los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas son los establecidos en la Tabla 1 de esta Norma Oficial Mexicana.

**TABLA A.1 LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES**

TIPO DE “REUSO”	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de helminto (h/l)	Grasas y aceites mg/l	DBO <sub>5</sub> mg/l	SST mg/l
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	≤ 1	15	20	20
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1,000	≤ 5	15	30	30

**4.2** La materia flotante debe estar ausente en el agua residual tratada, de acuerdo al método de prueba establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-006, referida en el punto 2 de esta Norma Oficial Mexicana.

**4.3** El agua residual tratada reusada en servicios al público, no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos en la columna que corresponde a embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola de la Tabla 3 de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, referida en el punto 2 de esta Norma.

**4.4** Las entidades públicas responsables del tratamiento de las aguas residuales que “reusen” en servicios al público, tienen la obligación de realizar el monitoreo de las aguas tratadas en los términos de la presente Norma Oficial Mexicana y de conservar al menos durante los últimos tres años los registros de la información resultante del muestreo y análisis, al momento en que la información sea requerida por la autoridad competente.

### **5. Muestreo**

Los responsables del tratamiento y “reuso” de las aguas residuales tratadas, tienen la obligación de realizar los muestreos como se establece en la Norma Mexicana NMX-AA-003, referida en el punto 2 de esta Norma Oficial Mexicana. La periodicidad y número de muestras será:

**5.1** Para los coliformes fecales, materia flotante, demanda bioquímica de oxígeno<sub>5</sub>, sólidos suspendidos totales y grasa y aceites, al menos 4 (cuatro) muestras simples tomadas en días representativos mensualmente.

**5.2** Para los huevos de helminto, al menos 2 (dos) muestras compuestas tomadas en días representativos mensualmente.

**5.3** Para los metales pesados y cianuros, al menos 2 (dos) muestras simples tomadas en días representativos anualmente.

### **6. Métodos de prueba**

Para determinar los valores y concentraciones de los parámetros establecidos en esta Norma Oficial Mexicana, se deben aplicar los métodos de prueba indicados en las normas mexicanas a que se refiere el punto 2 de esta Norma. Para coliformes fecales, el responsable del tratamiento y “reuso” del agua residual, podrá realizar los análisis de laboratorio de acuerdo con la NMX-AA-102-1987, siempre y cuando demuestre a la autoridad competente que los resultados de las pruebas guardan una estrecha correlación o son equivalentes a los obtenidos mediante el método de tubos múltiples que se establece en la NMX-AA-42-1987. El responsable del tratamiento y “reuso” del agua residual, puede solicitar a la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, la aprobación de métodos de prueba alternos. En caso de aprobarse, éstos pueden ser aplicados por otros responsables en situaciones similares. Para la determinación de huevos de helminto se deben aplicar las técnicas de análisis que se señalan en el anexo 1 de esta Norma.

### **7. Grado de concordancia con normas y lineamientos internacionales y con las normas mexicanas tomadas como base para su elaboración**

**7.1** No hay normas equivalentes, las disposiciones de carácter interno que existen en otros países no reúnen los elementos y preceptos de orden técnico y jurídico que en esta Norma Oficial Mexicana se integran y



complementan de manera coherente, con base en los fundamentos técnicos y científicos reconocidos internacionalmente; tampoco existen normas mexicanas que hayan servido de base para su elaboración.

## 8. Bibliografía

**8.1** APHA, AWWA, WPCF, 1994. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 19th Edition. U.S.A. (Métodos normalizados para el análisis del agua y aguas residuales 19a. Edición. E.E.U.U.).

**8.2** Code of Federal Regulations 40. Protection of Environmental 1992. (Código de Normas Federales 40. Protección al Ambiente) E.E.U.U.

**8.3** Ingeniería sanitaria y de aguas residuales, 1988. Gordon M. Fair, John Ch. Gerey, Limusa, México.

**8.4** Manual de agua, 1989. Frank N. Kemmer, John McCallion, Ed. McGraw-Hill. Volúmenes 1 al 3. México.

**8.5** Development Document for Effluent Limitation Guidelines and New Source Performance Standard for the 1974. (Documento de desarrollo de la U.S.E.P.A. para guías de límites de efluentes y estándares de evaluación de nuevas fuentes para 1974).

**8.6** Water Treatment Handbook, 1991. Degremont, 6th Edition, Vols. I y II. U.S.A. (Manual de tratamiento de agua 1991) 6a. Edición Vols. I y II. E.E.U.U.

**8.7** Wastewater Engineering Treatment. Disposal and Reuse, 1991. 3rd. Edition. U.S.A. (Ingeniería en el tratamiento de aguas residuales. Disposición y "reuso") Metcalf and Eddy. McGraw-Hill International Editions. 3a. Edición. E.E.U.U.

**8.8** Municipal Wastewater Reuse-Selected Readings on Water Reuse-United States Environmental Protection Agency-EPA 430/09-91-022 September, 1991. ("Reuso" de aguas residuales municipales-lecturas selectivas sobre el "reuso" del agua-Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos EPA 430/09-91-022 septiembre 1991).

## 9. Observancia de esta Norma

**9.1** La vigilancia del cumplimiento de esta Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, a través de la Comisión Nacional del Agua, y a la Secretaría de Salud, en el ámbito de sus respectivas atribuciones, cuyo personal realizará los trabajos de inspección y vigilancia que sean necesarios. Las violaciones a la misma se sancionarán en los términos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley General de Salud y demás ordenamientos jurídicos aplicables.

**9.2** La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el **Diario Oficial de la Federación**. Las plantas de tratamiento de aguas residuales referidas en esta Norma que antes de su entrada en vigor ya estuvieran en servicio y que no cumplan con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en ella, tendrán un plazo de un año para cumplir con los lineamientos establecidos en la presente Norma.

México, Distrito Federal, a los diecisiete días del mes de julio de mil novecientos noventa y ocho.- La Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, **Julia Carabias Lillo**.- Rúbrica.

## ANEXO 1

### TÉCNICA PARA LA DETERMINACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE HUEVOS DE HELMINTO

#### 1. Objetivo

Determinar y cuantificar huevos de helminto en lodos, influentes y efluentes tratados.

#### 2. Campo de aplicación

Es aplicable para la cuantificación de huevos de helminto en muestras de lodos, influentes y efluentes de plantas de tratamiento.

#### 3. Definiciones

**3.1** Helminto: término designado a un amplio grupo de organismos que incluye a todos los gusanos parásitos (de humanos, animales y vegetales) y de vida libre, con formas y tamaños variados.

**3.2** Platyhelminetos: gusano dorsoventralmente aplanado, algunos de interés médico son: *Taenia solium*, *Hymenolepis nana* e *H. diminuta*, entre otros.

**3.3** Nematelmintos: gusanos de cuerpo alargado y forma cilíndrica. Algunas especies enteroparásitas de

humanos y animales son: *Ascaris lumbricoides*, *Toxocara canis*, *Enterobius vermicularis* y *Trichuris trichuria*, entre otros.

**3.4 Método difásico:** técnica de concentración que utiliza la combinación de dos reactivos no miscibles y donde las partículas (huevos, detritus), se orientan en función de su balance hidrofílico-lipofílico.

**3.5 Método de flotación:** técnica de concentración donde las partículas de interés permanecen en la superficie de soluciones cuya densidad es mayor. Por ejemplo, la densidad de huevos de helminto se encuentra entre 1.05 a 1.18, mientras que los líquidos de flotación se sitúan entre 1.1 a 1.4.

#### **4. Fundamento**

Utiliza la combinación de los principios del método difásico y del método de flotación, obteniendo un rendimiento de un 90%, a partir de muestras artificiales contaminadas con huevos de helminto de ascaris.

#### **5. Equipo**

Centrífuga: con intervalos de operación de 1,000 a 2,500 revoluciones por minuto

Periodos de operación de 1 a 3 minutos

Temperatura de operación 20 a 28 °C

Bomba de vacío: adaptada para control de velocidad de succión 1/3 hp

Microscopio óptico: con iluminación Köhler

Aumentos de 10 a 100X; platina móvil; sistema de microfotografía

Agitador de tubos: automático, adaptable con control de velocidad

Parrilla eléctrica: con agitación

Hidrómetro: con intervalo de medición de 1.1 a 1.4 g/cm<sup>3</sup>

Temperatura de operación: 0 a 4°C

#### **6. Reactivos**

- Sulfato de zinc heptahidratado
- Ácido sulfúrico
- Éter etílico
- Etanol
- Agua destilada
- Formaldehído

##### **6.1 Solución de sulfato de zinc, gravedad específica de 1.3**

- Fórmula
- Sulfato de zinc 800 g
- Agua destilada 1,000 ml

#### **PREPARACIÓN**

Disolver 800 g de sulfato de zinc en 1,000 ml de agua destilada y agitar en la parrilla eléctrica hasta homogeneizar, medir la densidad con hidrómetro. Para lograr la densidad deseada agregar reactivo o agua, según sea el caso.

##### **6.2 Solución de alcohol-ácido**

- Fórmula
- Ácido sulfúrico 0.1 N 650 ml
- Etanol 350 ml

#### **PREPARACIÓN**

Homogeneizar 650 ml del ácido sulfúrico al 0.1 N, con 350 ml del etanol para obtener un litro de la solución alcohol-ácida. Almacenarla en recipiente hermético.

#### **7. Material**

- Garrafones de 8 litros
- Tamiz de 160 mm (micras) de poro
- Probetas graduadas (1 litro y 50 ml)
- Gradillas para tubos de centrífuga de 50 ml
- Pipetas de 10 ml de plástico
- Aplicadores de madera
- Recipientes de plástico de 2 litros
- Guantes de plástico
- Vasos de precipitado de 1 litro
- Bulbo de goma
- Magneto
- Cámara de conteo Doncaster
- Celda Sedgwich-Rafter

### **8. Condiciones de la muestra**

- 1 Se transportarán al laboratorio en hieleras con bolsas refrigerantes o bolsas de hielo.
- 2 Los tiempos de conservación en refrigeración y transporte deben reducirse al mínimo.
- 3 Si no es posible refrigerar la muestra líquida, debe fijarse con 10 ml de formaldehído al 4% o procesarse dentro de las 48 horas de su toma.
- 4 Una muestra sólida debe refrigerarse y procesarse en el menor tiempo posible.

### **9. Interferencias**

La sobreposición de estructuras y/o del detritus no eliminado en el sedimento, puede dificultar su lectura, en especial cuando se trata de muestras de lodo. En tal caso, es importante dividir el volumen en las alícuotas que se consideren adecuadas.

### **10. Precauciones**

- 1 Durante el procesado de la muestra, el analista debe utilizar guantes de plástico para evitar riesgo de infección.
- 2 Lavar y desinfectar el área de trabajo, así como el material utilizado por el analista.

### **11. Procedimiento**

- 1 Muestreo
  - a) Preparar recipientes de 8 litros, desinfectándolos con cloro, enjuagándolos con agua potable a chorro y con agua destilada.
  - b) Tomar 5 litros de la muestra (ya sea del influente o efluente).
  - c) En el caso de que la muestra se trate de lodo, preparar en las mismas condiciones recipientes de plástico de 1 litro con boca ancha.
  - d) Tomar X gramos de materia fresca (húmeda) que corresponda a 10 g de materia seca.
- 2 Concentrado y centrifugado de la muestra
  - a) La muestra se deja sedimentar durante 3 horas o toda la noche.
  - b) El sobrenadante se aspira por vacío sin agitar el sedimento.
  - c) Filtrar el sedimento sobre un tamiz de 160 mm (micras), enjuagando también el recipiente donde se encontraba originalmente la muestra y lavar enseguida con 5 litros de agua (potable o destilada).
  - d) Recibir el filtrado en los mismos recipientes de 8 litros.
  - e) En caso de tratarse de lodos, la muestra se filtrará y enjuagará en las mismas condiciones iniciando a partir del inciso c.

- f) Dejar sedimentar durante 3 horas o toda la noche.
  - g) Aspirar el sobrenadante al máximo y depositar el sedimento en una botella de centrifuga de 250 ml, incluyendo de 2 a 3 enjuagues del recipiente de 8 litros.
  - h) Centrifugar a 400 g por 3 minutos (1,400-2,000 rpm por 3 minutos, según la centrifuga).
  - i) Decantar el sobrenadante por vacío (asegurarse de que exista la pastilla) y resuspender la pastilla en 150 ml de ZnSO<sub>4</sub> con una densidad de 1.3.
  - j) Homogeneizar la pastilla con el agitador automático o aplicador de madera.
  - k) Centrifugar a 400 g por 3 minutos (1,400-2,000 rpm por 3 minutos).
  - l) Recuperar el sobrenadante virtiéndolo en un frasco de 2 litros y diluir cuando menos en un litro de agua destilada.
  - m) Dejar sedimentar 3 horas o toda la noche.
  - n) Aspirar al máximo el sobrenadante por vacío y resuspender el sedimento agitando, verter el líquido resultante en 2 tubos de centrifuga de 50 ml y lavar de 2 a 3 veces con agua destilada el recipiente de 2 litros.
  - o) Centrifugar a 480 g por 3 minutos (2,000-2,500 rpm por 3 minutos, según la centrifuga).
  - p) Reagrupar las pastillas en un tubo de 50 ml y centrifugar a 480 g por minutos (2,000-2,500 rpm por 3 minutos).
  - q) Resuspender la pastilla en 15 ml de solución de alcohol-ácido (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1 N) + C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH a 33-35% y adicionar 10 ml de éter etílico.
  - r) Agitar suavemente y abrir de vez en cuando los tubos para dejar escapar el gas (considerar que el éter es sumamente inflamable y tóxico). Preferentemente en una campana de laboratorio.
  - s) Centrifugar a 660 g por 3 minutos (2,500-3,000 rpm por 3 minutos, según la centrifuga).
  - t) Aspirar al máximo el sobrenadante para dejar menos de 1 ml de líquido, homogeneizar la pastilla y proceder a cuantificar.
- 3 Identificar y cuantificar de la muestra
- a) Distribuir todo el sedimento en una celda de Sedgwich-Rafter o bien en una cámara de conteo de Doncaster.
  - b) Realizar un barrido total al microscopio.

## 12. Cálculos

- 1 Para determinar los rpm de la centrifuga utilizada, la fórmula es:

$$rpm = \sqrt{\frac{Kg}{r}} \quad (A-1)$$

Donde:

- g: fuerza relativa de centrifugación
- K: constante cuyo valor es 89,456
- r: radio de la centrifuga (spindle to the centre of the bracker) en cm

La fórmula para calcular g es:

$$g = \frac{r(rpm)^2}{K} \quad (A-2)$$

- 2 Para expresar los resultados en número de huevecillos por litro, es importante tomar en cuenta el volumen y tipo de la muestra analizada.

### **13. Formato**

No aplica.

### **14. Bibliografía**

- 1 APHA, AWWA, WPCF, 1992 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19a. ed., Washington. (Métodos normalizados para el análisis del agua y aguas residuales, 19a. Edición E.E.U.U)
- 2 CETESB, São Paulo, 1989 Helminhos e Protozoários Patogénicos Contagem de Ovos e Cistos em Amostras Ambientais.
- 3 Schwartzbrod, J., 1996 Traitement des Eaux Usees de Mexico en Vue d'une Reutilisation a des Fins Agricoles. Reunión de Expertos para el Análisis del Proyecto de Saneamiento del Valle de México. Instituto de Ingeniería UNAM, 86 p.

## ANEXO A.2. Acervo fotográfico



**Foto A.2.1. Estructura básica antes de colocar las plantas**



**Foto A.2.2. Primeros dos meses de las plantas septiembre del 2010**



**Fotos A.2.3 y A.2.4. Estado de las plantas del humedal ubicado en el Siladin (Sep. 2014), que no han recibido la poda semestral que requieren**



Foto A.2.5. Fosa séptica (FS-01) ubicada frente al humedal artificial

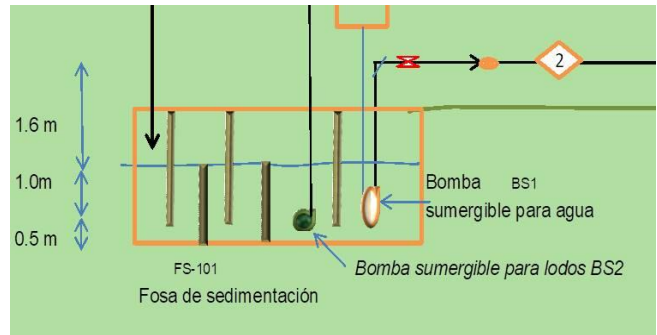


Foto A.2.6. Diagrama del interior de la fosa séptica FS-01



Foto A.2.7. Tanque cisterna de igualación, nivelación o dosificación (TC-101)



Foto A.2.8. Filtro percolador (FP-101)



**Foto A.2.9. Tablero de control de bombas (Arrancadores, relevadores, guardamotors, botoneras arranque o paro)**





**Fotos A.2.10. Camión tipo “vactor” realizando el desazolve de los lodos de la fosa séptica FS-101**

## ANEXO A.3. Manual de operación y mantenimiento de la planta piloto prototipo ubicada al interior del Siladin (CCH Sur, UNAM)

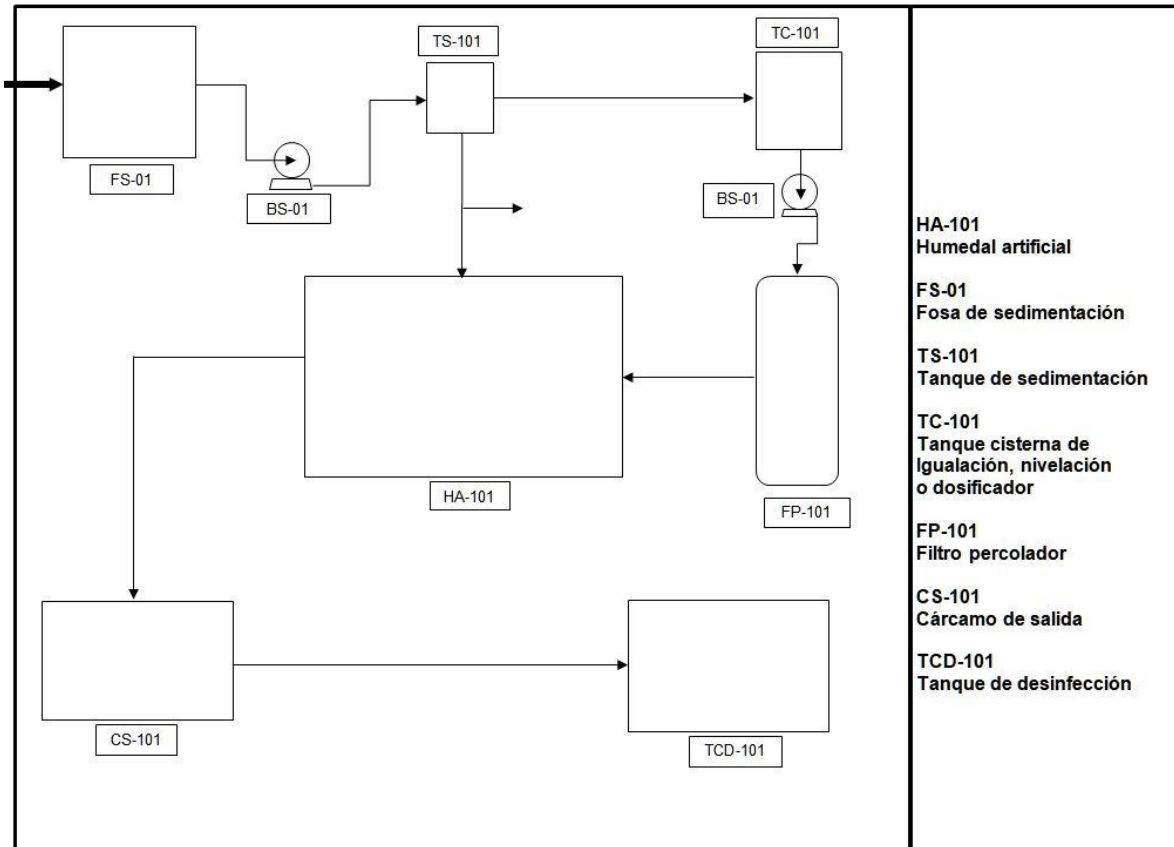


Figura A.3.1. Diagrama de flujo de proceso para el humedal artificial de la UNAM (Siladin-CCH-Sur/FQ)

### A.3.1. Tratamiento primario o físico

En esta parte del proceso se remueven los sólidos en suspensión que acompañan al agua residual.

#### A.3.1.1. Fosa séptica (FS-101) y tanque de sedimentación (TS-101)

El agua residual pretratada proveniente del edificio conocido como de “idiomas” del Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur se descarga por gravedad a la fosa séptica FS-101.

Aquí es importante mencionar que, durante la construcción del humedal artificial se construyó paralelamente el edificio denominado de “Idiomas” al cual se le construyó

una fosa séptica. A pesar de que los responsable del proyecto por parte de la Facultad de Química y del Siladin les explicaron a las personas dependientes de la dirección general de obras de la UNAM que era muy importante dimensionar esta fosa séptica para los usuarios esperados de los servicios sanitarios y que, además, a la luz del mal diseño de la fosa séptica existente en el Siladin, era importante diseñar correctamente la separación de los sólidos en esa fosa séptica para que pudieran ser extraídos de manera periódica y estabilizados antes de su disposición controlada (Gaitán-Zamora, 2007).

Desafortunadamente, nada de esto se hizo y la fosa séptica instalada está subdimensionada y, además, no hay forma de extraerle los sólidos a menos que se traiga un vehículo **ad hoc** para ello, conocido coloquialmente como “vactor” (ver Foto A.2.10 del Anexo A.2 en las páginas anteriores).

Su mantenimiento debe hacerse considerando el flujo de agua residual que recibe. De acuerdo con estimaciones preliminares la extracción de lodos debe hacerse cada 30 días.

Este efluente de la fosa séptica del edificio de “Idiomas” es el inicio de la primera separación de los sólidos sedimentables más “gruesos” del “agua cruda”. El agua es impulsada a la siguiente etapa por medio de la bomba sumergible (BS-01). En el tanque de sedimentación alcanza a llegar una fracción de sólidos que se depositan en el fondo del tanque. A esta fosa debe dársele mantenimiento periódico ya que, en realidad, es un sedimentador primario porque el volumen tan grande de aguas residuales que recibe para el tamaño tan pequeño de la fosa impide que los componentes disueltos puedan degradarse. De acuerdo con análisis preliminares se considera que deben sustraerse los sólidos cada 30 días por medio de un camión conocido como “vactor”, ya que tampoco tiene habilitado un sistema de salida de lodos para que éstos sean estabilizados (Gaitán-Zamora, 2007).

#### **A.3.1.1a. Mantenimiento**

El retiro de los lodos sedimentados en la segunda fosa ubicada frente al humedal artificial se debe realizar cada 6 meses por medio del camión “vactor” ya mencionado que, por medio de una bomba de vacío, succiona los lodos del fondo de los sedimentadores (ver fotografía en el siguiente anexo). Los tanques también tienen que ser purgados para remover los sedimentos cada 6 meses. De no ser removidos los sedimentos oportunamente se corre el riesgo de que alcancen el humedal y vayan azolvándolo poco a poco impidiendo el flujo de agua por el lecho del humedal.

#### **A.3.1.2. Bomba sumergible (BS-01)**

Localizada dentro de la fosa en el último compartimento bombea el agua a los tanques sedimentadores TS-101. Las especificaciones de la bomba BS-101 son las siguientes: Es una bomba sumergible, marca Impel, modelo CV-M2-51-M, es de tipo centrífuga, especial para alto contenido de sólidos suspendidos en aguas residuales.

Está construida en acero inoxidable 316, protegida electroquímicamente de la oxidación, su motor es de 0.5 HP, 110 VAC-1F-60 Hz. Cuenta con un flotador tipo “switch” -perilla- que una vez que queda completamente vertical (90°) y apenas flotando sobre la superficie del agua, paralelo a la bomba, manda la señal de arranque al tablero de control y éste al motor de la bomba. El bombeo sigue hasta que el flotador ha caído completamente y no vuelve a activarse hasta que el flotador está de nuevo completamente erguido. Si la bomba recibe sólidos tendrá problemas por lo que esto debe evitarse y tener una bomba de repuesto para que, en caso de que ocurra un mal funcionamiento, sea reemplazada y enviada a reparación.

### **A.3.1.3. Tanque dosificador (TC-101)**

Este tanque tiene la función de homogeneizar las aguas negras, evitando variaciones repentinas dañinas para el sistema del humedal. Es la última fase de sedimentación de sólidos suspendidos y tiene una capacidad de 3024 L. El agua es impulsada al próximo equipo por medio de la bomba BS-03.

#### **A.3.1.3a. Mantenimiento**

En su parte inferior se localiza una válvula de bola para drenar los lodos pesados que se vayan formando ya que el agua contiene microorganismos y estos se “alimentan” de los componentes disueltos en el agua clarificada. Se recomienda drenar cada seis meses junto con la fosa y los tanques de sedimentación.

## **A.3.2. Tratamiento bioquímico**

En esta fase se transforman los compuestos disueltos o en forma coloidal en nueva biomasa y biogases.

### **A.3.2.1. Filtro percolador (FP-101)**

Este filtro cuenta con un distribuidor de agua para que el agua percole a través de la cama o lecho de un empaque de polietileno que permite la formación de una biopelícula que remueve parte de la materia orgánica presente en el agua. Al salir de este equipo el agua ha pasado por un pretratamiento para ingresar con características adecuadas al humedal (HA-101).

#### **A.3.2.1a. Mantenimiento**

El filtro percolador cuenta con una purga hecha con tubo de PVC de 2.0” en la parte inferior para purgar los lodos, se debe realizar la purga cada mes para evitar que entren al humedal. Puede formarse una sustancia gelatinosa que tapa los tubos. Esta sustancia gelatinosa es una película de microorganismos que se puede remover con un escobillón y ácido muriático. Esta limpieza se debe realizar cada seis meses.

El empaque interior donde se forma la biopelícula se debe cambiar cada diez años y su disposición debe ser controlada ya que es un residuo problemático como todos los plásticos sintéticos.

### **A.3.2.2. Distribuidor hidráulico (DH-101)**

Se trata de una T de tubo de plástico semi-flexible de polietileno de alta densidad de 6" de diámetro interno. Con perforaciones paralelas al fondo de un solo diámetro, este tubo va dentro de la cama de piedra del humedal, sirve para distribuir uniformemente el agua que proviene del filtro percolador (FP-101) a todo lo ancho del humedal y evitar los caminos preferenciales. El distribuidor puede ir sobre la superficie pero se ha demostrado que es mejor sumergirlo apenas 10 cm en una cama de piedra volcánica, como en el caso del humedal del Siladin. Este distribuidor debe cambiarse cada 5 años (tiempo de duración del material plástico) y su disposición al igual que la del empaque y las tuberías de PVC debe ser controlada.

#### **A.3.2.2a. Mantenimiento**

Para limpiar el distribuidor DH-101 es necesario aflojar la tuerca de unión al final del codo de alimentación para separarlo, luego se le quita la piedra y se separa del humedal. Se puede tallar con un cepillo tubular para eliminar la lama de los orificios y luego semi-llenarse y mojarse con una solución de ácido muriático (HCl grado industrial al 35%), dejándolo reposar una noche y al otro día lavarlo con manguera de agua a presión, para después acoplarlo en su sitio.

### **A.3.3. Humedad artificial**

Siendo la parte más importante del sistema de tratamiento se debe tener especial cuidado en su mantenimiento para asegurar su óptimo funcionamiento así como prolongar su vida útil esperada, de 25 años, si no llegan sólidos en suspensión que lo colmaten (cosa que ya ocurrió en este sistema) casi 20 años antes de lo esperado.

#### **A.3.3.1. Lecho rocoso**

El agua residual pretratada en el filtro percolador fluye del distribuidor hidráulico DH-101 a un lecho de piedra volcánica de 50 cm de ancho x 30 cm de altura, que los distribuye uniformemente través del lecho de humedal artificial que es de tezontle de diferentes granulometrías (10.0 cm en el fondo, 0.3 cm en la parte media y 1.0-3.0 cm en la parte superior).

#### **A.3.3.2. Geomembrana**

El humedal, construido en concreto y acabado arquitectónico piramidal en basalto, está recubierto de una geomembrana de polietileno de alta densidad de 1.5 mm de espesor para dar la resistencia adecuada. Sobre la geomembrana se colocó una

cama de gravilla o tezontle fino de 1.0 cm de diámetro promedio y altura no mayor a 15.0 cm. Nunca se debe colocar sobre o directamente la piedra grande para evitar perforaciones. Nunca debe perforarse una membrana con tornillos o clavos, ya que estos iniciarán un punto de ruptura. Los silicones, pegamentos y resinas epóxicas son incompatibles con la misma y, por lo tanto, no producen sello.

#### **A.3.3.3. Vegetación del humedal**

Está conformada por tules, carrizos, zacatules, algunos papiros y alcatraces. El predominio de estas especies dependerá de su adaptabilidad a las condiciones ambientales del humedal. La proporción de plantas por metro cuadrado de humedal es de 8 a 10.

#### **A.3.3.4. Cárcamo de salida (CS-101)**

El efluente del humedal se descarga por gravedad desde el cárcamo de salida, CS-101, hasta la fosa de almacenaje y desinfección TD-101, desde donde podrá descargarse al subsuelo o bien utilizarse para riego si cumple con las condiciones establecidas en la NOM-003-SEMARNAT-1997.

#### **A.3.3.5. Mantenimiento del sistema completo del humedal artificial**

Aunque pareciera que el humedal trabaja por sí mismo, requiere un mínimo de mantenimiento empezando por la recolección periódica de los restos vegetales como varas y hojas muertas, operación que debe practicarse cada quince días en el verano, cada semana en el otoño y una vez al mes en el invierno. De no hacerse lo anterior, los sólidos en pudrición podrían contribuir al azolvamiento del mismo. Con lo que respecta a la densidad de las plantas esta será según la especie. Para el caso de los carrizos (*Phragmites* spp.), se deberán mantener de 8 a 10 plantas /m<sup>2</sup>. Para las espadañas o tules (*Typha* spp.), debe haber de 10 a 12 plantas. Para los juncos (zacatules), deben tenerse de 8 a 10 plantas /m<sup>2</sup>. La sobrepoblación de plantas puede llevar a que las raíces aprieten el medio y tapen los poros de las piedras. Cuando se realice la poda las plantas deben mantener una altura de al menos un metro sobre el nivel del humedal. Las podas deben hacerse semestralmente.

La cama de piedra volcánica se va saturando poco a poco de sedimentos, según las condiciones del humedal. Para mantener la calidad de la remoción de contaminantes se debe cambiar cada 15-25 años dependiendo del clima y la carga orgánica que lleve el agua residual.

El desfogue de las tuberías es fundamental para evitar inundaciones y filtraciones. Durante el verano se recomienda realizarlo cada 15 días y cada mes durante el invierno.

Finalmente, debe darse mantenimiento periódico a las bombas de acuerdo con sus manuales de usuario si es que el sistema no opera a gravedad.

#### **A.3.3.6. Fosa de almacenamiento y desinfección TCD-101**

La fosa de almacenaje y desinfección TCD-101, desde donde podrá descargarse al subsuelo o bien utilizarse para riego se encuentra en la parte frontal del humedal. Para su desinfección pueden usarse pastillas de cloro o lámparas ultravioleta para llevar a cabo la desinfección. La concentración de cloro no deberá ser mayor a 1 ppm (1 pastilla de "Cloralex" de 100 g por cisterna cada semana).

##### **A.3.3.6a. Mantenimiento**

Cada semana deben retirarse hojas y varas que puedan caer en la fosa de almacenamiento para evitar que se tapen las tuberías.

#### **A.3.3.7. Bomba extractora de lodos (BS-02)**

Esta bomba se usa para las purgas periódicas de lodo de la fosa, ya sea para su compostaje o para la digestión o degradación anaerobia. Este tipo de bombas están diseñadas exclusivamente para la purga de lodos y que resistan sus impulsores la abrasión.

## **ANEXO A.4. Disposición de los residuos producidos en la planta piloto y las pruebas de laboratorio**

Durante la realización de este proyecto se generaron tres tipos de residuos:

- Residuo 1. En las pruebas de fósforo, nitratos, sulfuros y sulfatos, SST

Los desechos de estas pruebas se neutralizaron para después desecharse en la tarja ya que provenían del humedal y durante los análisis no se les agregó ninguna sustancia que pudiera producir contaminación peligrosa.

- Residuo 2. Demanda química de oxígeno

Los productos de la digestión de las muestras con dicromato de potasio y sulfatos de mercurio y plata en ácido sulfúrico se consideran peligrosos y se envían a la unidad de gestión ambiental, UGA, de la Facultad de Química para su disposición controlada.

- Residuo 3. Demanda bioquímica de oxígeno

Durante las pruebas de DBO solamente se incubó el agua que estaba en el humedal, por lo que no tiene contaminantes peligrosos y se puede desechar en la tarja después de ser neutralizado. El hidróxido de litio usado para absorber el dióxido de carbono se regenera al calentarlo en la estufa para usarlo nuevamente.



## Bibliografía

- Amábilis-Sosa, L.E., Bernal-González, M., Cano-Rodríguez, M.I., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C., Espinosa-Aquino, B.<sup>4</sup>, García-Gómez, R.S., Kappelmeyer, U., Navarro-Frómata, A.E., Ruiz-Cárdenas, N.J., Ramírez-Burgos, L.I., Salinas-Juárez, M.G., Salgado-Bernal, I., Sánchez-Tovar, S.A., Solís-Fuentes, J.A. 2018. Una experiencia sobre las tecnologías que nos ayudan a mejorar el uso del agua ya ensuciada para proteger los acuíferos: Humedales artificiales o construídos. Agua-Mex. Número 2. Conacyt: Red Temática Gestión de la Calidad y disponibilidad del agua. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. P. 6. Ciudad de México, México.
- Arias-I., C.A., Brix, H. 2003. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Ciencia e Ingeniería Neogranadina (Universidad Militar Nueva Granada). Núm. 013, Julio, pp. 17-24. Bogotá, Colombia.
- Arreguín-Rojas, A., Durán-Domínguez, M.C., Bernal-González, M., González-Sandoval, M.R., Sánchez-Tovar, S.A. 2013. Manual de Operación y mantenimiento del humedal artificial del CCH Plantel Sur, con actividades didácticas para el BACHILLERATO UNAM. ISBN 978-607-7807-12-4. Pub. CCH-Sur (Proyectos INFOCAB SB201608 y PB201312), Facultad de Química, UNAM y AMCATH. 46 pags. 10 ejemplares, 1a. Ed. (2010). Libro electrónico (disco compacto), 2a. Ed. (2013). México D.F. México.
- Borrego-Saráchaga, N.G. 2015. Estudio de la calidad del agua en un sistema de humedales artificiales a nivel prototipo que recibe aguas residuales de un plantel educativo. Tesis profesional. Ingeniería química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Agosto 14. México D.F. México.
- Cabrera, L. 2002. **Diccionario de aztequismos**. Revisión y puesta en orden: J. Ignacio Dávila-Garibi. Términos nahuas: Luis Reyes-García. Términos latinos (clasificaciones botánicas y zoológicas): Esteban Inciarte. Ed. Colofón S.A. 5ª edición. ISBN 968-867-038-3. México D.F. México.
- Ciria, M.P., Solano, M.L., Soriano, P. 2005. Role of macrophyte *Typha latifolia* in a constructed wetland for wastewater treatment and assessment of its potential as a biomass fuel. **Biosystems Engineering**. 92(4):535-544.
- CCH-Sur. 2014. Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur. Universidad Nacional Autónoma de México. 28 de mayo de 2015. Dirección electrónica: <http://www.cch.unam.mx/sur>
- Conagua. 2018. *Estadísticas del agua en México*. Comisión Nacional del Agua p.126. [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf)
- Conagua. 2018. *Atlas del agua en México*. Comisión Nacional del Agua p.14, p.100. [https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2019/04/AAM\\_2018.pdf](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2019/04/AAM_2018.pdf)
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L.F., Andrade, M. 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Serie técnica. Edición: Nelson Antequera-Durán. Depósito Legal N°: 2-1-154-10. ISBN: 978-99954-766-2-5. Centro A.G.U.A., UMSS, Universitat de Barcelona, Agència Catalana de Cooperació al Desenvolupament, Generalitat de Catalunya, GovAgua, EuropeAid (Programa Alfa). Cochabamba, Bolivia.

- Diccionario de la lengua española. 2014. Real Academia Española. 23ª edición. Dirección electrónica: <https://dle.rae.es/?id=SXnl0kj>
- DOF. 1980. Muestreo. Norma mexicana NMX-AA-003-1980. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 1981. Análisis de aguas- Determinación del ión sulfato - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-074-1981. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 1982. Análisis de aguas –determinación de sulfuros- método de prueba. Norma Mexicana NMX-AA-AA-084-1982. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 1987. Análisis de aguas –calidad del agua- determinación de número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y *Escheria coli* presuntiva método de prueba. Norma mexicana NMX-AA-042-1987. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 1997. Aguas tratadas. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se “reúsen” en servicios al público. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2000a. Sólidos disueltos totales. Norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2000. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2000b. Análisis de agua –Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- método de prueba. Norma mexicana NMX-AA-007-SCFI-2000. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2000c. Análisis de aguas –Determinación de la conductividad eléctrica- método de prueba. Norma mexicana NMX-AA—093-SCFI-2000. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2000d. Análisis de agua - Determinación de huevos de helminto - Método de prueba. Norma mexicana NMX-AA-113-SCFI-1999. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2001a. Análisis de agua - Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Norma mexicana NMX-AA012-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2001b. Análisis de aguas - Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de Prueba. Norma mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2001c. Análisis de aguas –Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de Prueba. Norma mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.

- DOF. 2001d. Análisis de aguas - Determinación de fósforo en aguas naturales, residuales y residuales tratadas — Método de Prueba. Norma mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2001e. Análisis de aguas - Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de Prueba. Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 2009. Jueves 24 de septiembre de 2009. DIARIO OFICIAL (Primera Sección). Modificación del inciso 0, el encabezado de la Tabla 13, el Último párrafo del Anexo B y el apartado Signo decimal de la Tabla 21 de la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema general de unidades de medida. CUARTO.- Se modifica el encabezado de la tabla 13 para quedar como sigue: Tabla 21 - Reglas para la escritura de los números y su signo decimal. Signo decimal El signo decimal debe ser una coma sobre la línea (,) O un punto sobre la línea (.). Si la magnitud de un número es menor que la unidad, el signo decimal debe ser precedido por un cero. Diario Oficial de la Federación: Jueves 24 de septiembre de 2009. Poder Ejecutivo Federal. México D.F., México.
- DOF. 2011. Análisis de agua –determinación de pH- Método de prueba. Norma mexicana NMX-AA-008-SCFI-2011. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Estados Unidos Mexicanos.
- Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C, Luna-Pabello, V.M. (1998). Humedales artificiales de flujo horizontal o vertical, procedimiento para tratar aguas residuales. Solicitud de Registro: Diciembre 15, 1998. Cesión irrestricta de derechos a la UNAM. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Dirección Divisional de Patentes. México. Patente Núm. 210924. Otorgada el 21 de octubre de 2002. México D.F., México. Terminada su vigencia en 2018.
- Gaitán-Zamora, N.A. 2007. Evaluación ecotoxicológica de "composta" producida con residuos vegetales de humedales artificiales y lodos primarios a escala laboratorio. Tesis de Maestría en Ingeniería (Campo del conocimiento: Ingeniería Ambiental, Campo disciplinario: Sustancias y residuos peligrosos). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. UNAM. Defensa: Enero 26. México D.F. México.
- Guido-Zárate, A. 2006. Estudio de los potenciales de óxido-reducción en reactores biológicos que simulan un humedal artificial. **Tesis de Maestría en Ingeniería**. Campo del conocimiento: Ingeniería Ambiental, Campo disciplinario: Agua. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. UNAM. Defensa: Julio 4. México D.F. México.
- Kadlec, R.H., Knight, R.L. 1996. Treatment wetlands. Lewis Publisher, Boca Raton, FL, EE.UU.
- Orduña-Bustamante, M.Á. 2012. Efecto de la relación nitrógeno:potasio en la eficiencia de remoción de contaminantes carbonosos y nitrogenados en agua en sistemas de laboratorio que simulan humedales artificiales. **Tesis de Doctorado en Ingeniería**. Campo del conocimiento: Ingeniería Ambiental, Campo disciplinario: Agua. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. UNAM. Defensa: Marzo 5. México D.F. México.

- Padrón-López, R.M. 2005. Depuración de aguas residuales domésticas a través de humedales artificiales de flujo vertical en zonas trópico-húmedas. **Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales**. Programa de la División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Defensa: Noviembre 7. Villahermosa, Tabasco, México.
- Resolución A/RES/64/292. 2010, Asamblea General de las Naciones Unidas. Julio 28 de 2010. ONU Nueva York, E.E.U.U. [https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human\\_right\\_to\\_water.shtml](https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml)
- Reyes-Luz, M.I. 2006. Remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio. **Tesis profesional en Ingeniería química**. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Diciembre 07. México D.F. México.
- Rodríguez, A., Varela, E. 2003. Comportamiento dinámico de dos sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo humedal artificial de flujo horizontal y vertical. **Tesis profesional en ingeniería química**. FES Zaragoza, UNAM. Defensa: Septiembre 23. México D.F. México.
- Sánchez-Tovar S.A. 2012. Material audiovisual para la conferencia presentada en la 1a Reunión del Día Internacional de los Humedales 2012. Viernes 3 de febrero del 2012. UNAM, Facultad de Química y Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur, organizadores. Auditorio SILADIN. México D.F. México.
- Secundino-Sánchez, O., Amábilis-Sosa, L. E., González-Flores, E., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2014. Premio a la MEJOR contribución en cartel de la Mesa Redonda de AGUA Y AGUAS RESIDUALES. **Diseño de un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal para el tratamiento de agua residual en Santa María Coatepec El Seco, Puebla, México/ Design of a horizontal subsurface flow artificial wetland for treatment of wastewater in Santa María Coatepec El Seco, Puebla, Mexico**. En VIII Minisimposio Internacional sobre Remoción de Contaminantes de Agua, Atmósfera y Suelo. Junio 25-28, 2014. Villahermosa, Tabasco, México.
- Secundino-Sánchez, O., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2015. **Apoyo académico a comunidades rurales: Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal para el tratamiento de agua residual en Santa María Coatepec, El Seco, Puebla, México / Academic support to rural communities: Subsuperficial horizontal flow artificial wetlands for the treatment of Santa Maria Coatepec El Seco, Puebla, Mexico's wastewaters**. En Sixth International Alumni-Alumnae Seminar Green Engineering in Honor of Dr. Peter Kusch / Sexto Seminario Internacional de Ex-Becarios de Alemania sobre Ingeniería Verde en Honor al Dr. Peter Kusch. Facultad de Química, UNAM. México D.F., México. Junio 05, 2015. Libro-e, pp.39-56.