



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**INSTALACIÓN Y EVALUACIÓN DEL ARRANQUE OPERATIVO DE UN  
HUMEDAL ARTIFICIAL MODULAR PILOTO PARA TRATAMIENTO  
DE AGUAS GRISES MEZCLADAS CON ORINA**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**ANDRÉS CICERÓN MONROY**



**CIUDAD DE MÉXICO**

**2019**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**           **Profesor: VICTOR MANUEL LUNA PABELLO**  
**VOCAL:**               **Profesor: MARIA RAFAELA GUTIERREZ LARA**  
**SECRETARIO:**       **Profesor: SERGIO ADRIAN GARCIA GONZALEZ**  
**1er. SUPLENTE:**     **Profesor: GEMA LUZ ANDRACA AYALA**  
**2° SUPLENTE:**       **Profesor: ALEJANDRA MENDOZA CAMPOS**

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

**LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA EXPERIMENTAL. DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA.  
FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM. AV. UNIVERSIDAD 3000 UNAM CU CP. 04510  
COYOACÁN, CIUDAD DE MÉXICO.**

### **ASESOR DEL TEMA:**

**Dr. Víctor Manuel Luna Pabello** \_\_\_\_\_

### **SUPERVISOR TÉCNICO:**

**M. en I. Mónica L. Rodríguez Estrada** \_\_\_\_\_

### **SUSTENTANTE:**

**Andrés Cicerón Monroy** \_\_\_\_\_

## Contenido

<b>Resumen</b> .....	2
<b>1. Introducción</b> .....	4
1.1 Objetivo general.....	6
1.2 Objetivos específicos.....	6
1.3 Estrategia de trabajo .....	6
<b>2 Antecedentes del proyecto</b> .....	7
<b>3 Marco Teórico</b> .....	10
3.1 Tratamiento de agua residual en México.....	10
3.2 Marco jurídico .....	10
3.2.1 Normas Oficiales Mexicanas .....	12
3.3 Humedales artificiales .....	13
3.3.1 Humedal artificial de flujo superficial (HAFS).....	13
3.3.2 Humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSS) .....	14
3.3.2.1 Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH) .....	14
3.3.2.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical (HAFSSV).....	15
3.4 Vegetación.....	16
3.5 Aguas residuales.....	18
3.5.1 Aguas grises.....	18
3.5.2 Aguas amarillas.....	19
3.5.3 Aguas cafés.....	19
<b>4 Materiales y Métodos</b> .....	19
4.1 Aguas por tratar .....	19
4.2 Plan de muestreo y análisis de calidad de agua.....	19
4.3 Parámetros de calidad del agua .....	20
4.4 Determinación de biodegradabilidad por respirometría .....	21
4.5 Métodos de análisis de calidad del agua.....	21
4.5.1 Análisis <i>in situ</i> .....	21
4.5.2 Análisis en laboratorio.....	21
4.5.2.1 Cuenta de coliformes .....	21
4.5.2.2 Método colorimétrico para determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	21
4.5.2.3 Espectrofotometría ultravioleta para determinación de nitratos .....	21

4.5.2.4	Diazotización simple para determinación nitritos .....	21
4.5.2.5	Determinación de fosfatos .....	22
4.6	Materiales usados para la instalación del HAM .....	22
4.7	Construcción, pruebas hidráulicas y proyecto paisaje del HAM .....	23
4.8	Arranque del HAM .....	25
<b>5</b>	<b>Análisis y discusión de resultados</b> .....	<b>28</b>
5.1	Biodegradabilidad .....	28
5.2	Construcción, pruebas hidráulicas y proyecto paisaje del HAM .....	30
5.3	Arranque del sistema .....	40
5.3.1	Análisis de parámetros <i>in situ</i> .....	40
5.3.2	Análisis de parámetros en laboratorio .....	43
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>Recomendaciones</b> .....	<b>50</b>
<b>8</b>	<b>Bibliografía</b> .....	<b>51</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>55</b>
<b>9.1</b>	<b>Sistema construido y descripción de módulos</b> .....	<b>55</b>
<b>9.2</b>	<b>Metodología de pruebas analíticas</b> .....	<b>59</b>
<b>9.3</b>	<b>Manual del Respirómetro BI-2000</b> .....	<b>62</b>
<b>9.4</b>	<b>Cédulas de campo y etiquetas para muestreo</b> .....	<b>67</b>
<b>9.5</b>	<b>Propagación de plantas terrestres</b> .....	<b>69</b>
<b>9.6</b>	<b>Tablas de resultados de parámetros in situ</b> .....	<b>73</b>
<b>9.7</b>	<b>Tablas de resultados de parámetros de laboratorio</b> .....	<b>74</b>

### Índice de Figuras

Figura 1.	Sistema de tratamiento HAM .....	8
Figura 2.	Vista Superior de los módulos del HAM .....	8
Figura 3.	Número de PTAR en la CDMX 2014-2015 (SEDEMA, 2018) .....	10
Figura 4.	Esquema de un HFS modificado de Kadlec y Wallace, 2009 .....	13
Figura 5.	Esquema de un HAFSSH modificado de Kadlec y Wallace, 2009 .....	15
Figura 6.	Arreglo típico de un HAFSSV modificado de Kadlec y Wallace, 2009 .....	15
Figura 7.	Proyecto paisaje (GMI, 2019) .....	24
Figura 8.	Puntos de Muestreo para análisis .....	25
Figura 9.	Arranque del HAM .....	26
Figura 10.	Diagrama del sistema (Tomado de Rodríguez Estrada et al., 2019) .....	27
Figura 11.	Respirometría .....	30

Figura 12. Área para instalación del HAM.....	30
Figura 13. Vista panorámica de ubicación del HAM. ....	31
Figura 14. Preparación de sitio.....	31
Figura 15. Colocación de Tanques.....	32
Figura 16. Aplanado del área de instalación. ....	32
Figura 17. Acomodo de bases de módulos del HAM. ....	33
Figura 18. Medidas específicas por módulo.....	33
Figura 19. Marcado de geomembrana.....	34
Figura 20. Doblado de geomembrana.....	34
Figura 21. Ingreso de geomembrana. ....	35
Figura 22. Doblado en submódulo. ....	35
Figura 23. Obra para conexión de tubería. ....	36
Figura 24. Conexión entre tanques. ....	36
Figura 25. Tubería de entrada de agua residual a tratar en el HAM.....	37
Figura 26. Montado completo de tubería de distribución de agua a tratar. ....	37
Figura 27. Colocación de maya en el módulo 1. ....	38
Figura 28. Preparación de sitio para colocación de la vegetación. ....	38
Figura 29. Planta preparada y remojada con solución enraizaste. ....	39
Figura 30. Plantación de material vegetal.....	39
Figura 31. Vista general del HAM.....	40
Figura 32. Oxígeno Disuelto del HAM ....	41
Figura 33. Evolución del pH en el HAM.....	42
Figura 34. Temperatura del HAM.....	42
Figura 35. Turbidez de entrada y salida en el HAM ....	43
Figura 36. Coliformes fecales del HAM ....	44
Figura 37. Remoción de amonio en el HAM.....	46
Figura 38. Transformación de nitritos en el HAM.....	46
Figura 39. Evolución de nitratos en el HAM.....	47
Figura 40. Nitrógeno total en el HAM ....	47
Figura 41. Fosfatos en el HAM ....	49
Figura 42. Sistema de nivele módulo 1. ....	55
Figura 43. Reductor de turbulencia en Tanque 1.....	56
Figura 44. HAFSS.....	56
Figura 45. Distribución de vegetación HAM.....	57
Figura 46 Corte de bolsa. ....	70
Figura 47. Limpieza de raíz.....	70
Figura 48. Lavado con agua.....	71
Figura 49. Bulbos de papiro.....	71
Figura 50. Bulbo separado.....	72

## Índice de Tablas

Tabla 1. Escuelas de la Ciudad de México nivel básico 2017-2018.....	5
Tabla 2. Calidad de agua a tratar para cumplir lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997.....	9
Tabla 3. Normas Oficiales Mexicanas (SEMARNAT, 2018).....	12
Tabla 4. Tabla comparativa de especies vegetales más usadas en HA modificada (Delgadillo et al., 2010) .....	17
Tabla 5. Plan de muestreo y análisis. ....	20
Tabla 6. Materiales usados.....	22
Tabla 7. Vegetación en el HAM .....	23
Tabla 8. Caracterización del agua a tratar.....	28
Tabla 9. Reactores del respirómetro y contenido.....	29
Tabla 10. Parámetros y métodos de medición .....	44
Tabla 11. DQO y DBO <sub>5</sub> supuesta.....	48

## **Reconocimientos**

Se agradece y reconoce al Grupo Multidisciplinario Integral GMI S.C. por la beca recibida a través del proyecto SECITI/082/2017, realizado con la Secretaria de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECITI)

Se reconoce el apoyo recibido de PAIP 5000 – 9111 Facultad de Química, UNAM, 2017-2018, para la obtención de materiales y reactivos empleados en este trabajo.

Agradezco a la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de México y a mis maestros por el apoyo brindado para mi desarrollo intelectual y personal.

Al Dr. Víctor Manuel Luna Pabello, por brindarme su apoyo, asesoría y por su paciencia conmigo y mis compañeros.

Agradezco al profesor Luciano Hernández Gómez por el apoyo técnico prestado en el laboratorio.

## Resumen

La presente tesis, se enfoca en la instalación y evaluación del arranque operativo de un Humedal Artificial Modular (HAM) en una escuela de educación básica primaria. El HAM fue diseñado por el Grupo Multidisciplinario Integral S.C. (GMI), para tratar aguas grises mezcladas con orina humana como parte de las actividades comprometidas en el marco del proyecto financiado por la Secretaría de Ciencia y Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECITI) de la Ciudad de México – Clave SECITI/082/2017.

Básicamente el HAM consiste de un contenedor empacado con materiales pétreos sobre los que se siembran plantas vasculares. El agua se introduce mediante un flujo subsuperficial, de forma que el crecimiento de los microorganismos en el medio de soporte, así como la toma de nutrientes y aporte de oxígeno de las raíces de las plantas vasculares, permitan la eliminación de los contaminantes del agua. En este sentido, se hizo necesario realizar la caracterización de la calidad del agua residual a tratar, tomando parámetros *in situ* y muestras para análisis en el laboratorio. Posteriormente, se procedió a la limpieza y adecuación del sitio seleccionado para la instalación del HAM.

Para la construcción de la estructura o contenedor se usó aglomerado de madera y geomembrana. Para la conducción del agua residual se empleó tubo de cloruro de polivinilo (PVC). Los recipientes del agua residual antes y después de tratamiento fueron tinacos de 500 L. El HAM se empacó con materiales pétreos con tamaño de partícula de entre 2 a 5 cm, en diferentes tipos de horizontes. Previo a su arranque operativo se realizaron las pruebas hidráulicas que permitieran determinar la inexistencia de fugas de agua. Posteriormente, se realizó el sembrado de plantas sobre los materiales pétreos, empleando 3 especies de plantas vasculares tipo hidrófitas enraizadas emergentes: *Equisetum arvense*, *Cyperus papyrus* y *Phragmites australis*, cuya distribución se basó en la funcionalidad de cada planta, así como con el diseño de paisaje establecido por el equipo de arquitectos y urbanistas de GMI.

Para la evaluación del periodo de arranque operativo del HAM, se elaboró un plan de muestreo y análisis del agua de entrada y de salida del mismo a lo largo de 10 semanas continuas. Las determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Microbiología Experimental del Departamento de Biología de la Facultad de Química de la UNAM. Los procedimientos empleados en el análisis de la calidad del agua están basados métodos nacional e internacionalmente aceptados.

De acuerdo con la prueba de biodegradabilidad realizada, como parte de la caracterización, se determinó que corresponde a un agua fácilmente biodegradable y no tóxica para los microorganismos depuradores.

Los parámetros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997 de los que fueron obtenidos resultados fueron: pH, coliformes fecales, DBO<sub>5</sub>, fósforo total y nitrógeno total.

Los resultados indican que el agua a la salida tiene un pH con valor promedio de 8.29, una temperatura de entre 16 y 20 °C, valores de coliformes fecales entre 0 y 4 UFC/mL, DQO promedio de 42.83 mg/L, una DBO<sub>5</sub> teórica con valores de entre 0 y 15.33 mg/L con excepción de las semanas 7 y 10, fosfatos con valores mayores a los 10 mg/L permitidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y a partir de la semana 6 mayores a 50 mg/L. Finalmente los valores de Nitrógeno Total se obtuvieron con valores mayores a 37 mg/L.

## 1. Introducción

El continuo crecimiento de población ha inducido un incremento considerable en la demanda de agua en todos los sectores. Por ello, es importante contar con programas de educación ambiental que ayuden a mitigar algunos de los principales problemas ambientales que actualmente se enfrentan.

La educación ambiental, es un proceso de formación que permite la toma de conciencia de la importancia del medio ambiente, promueve en la ciudadanía el desarrollo de valores y nuevas actitudes que contribuyan al uso racional de los recursos naturales y a la solución y prevención de los problemas de contaminación ambientales que enfrenta la Ciudad de México.

Es necesario abordar los principales impactos ambientales que el actual estilo de vida ha ocasionado, de forma que permita elaborar estrategias para sensibilizar a la ciudadanía, todo tipo de edades y grupos, sobre la importancia de su participación, para lograr una solución. Por lo anterior, se considera que los grupos de población escolar, nivel primaria, constituyen una población en edad adecuada para poder incidir favorablemente, en sensibilizarlos en la problemática asociada a la generación de aguas residuales, su tratamiento y reúso, como parte del cuidado del valioso recurso agua.

En este sentido, se presentan en la Tabla 1, el número de escuelas de educación básica existentes en la Ciudad de México.

La Dirección de Educación Ambiental (DEA) cuenta con programas diseñados para distintos grupos sociales. A su vez, la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECITI) trabaja para mejorar las condiciones de vida de la CDMX a través del apoyo a proyectos y actividades por medio de la vinculación con la academia, el gobierno, los sectores productivos y la sociedad civil.

Algunas de las alcaldías de la Tabla 1, son vulnerables a la falta de agua de primer uso, lo que puede presentar un problema importante para el cumplimiento de la demanda de las escuelas. Sumado a la educación ambiental, es necesaria (en caso de ser posible), el uso de tecnologías que disminuyan el uso de las aguas de primer uso, aprovechando el agua residual que el plantel genera.

Tabla 1. Escuelas de la Ciudad de México nivel básico 2017-2018.

<b>PRINCIPALES CIFRAS CICLO ESCOLAR 2017-2018</b>					
TIPO EDUCATIVO: EDUCACIÓN BÁSICA; NIVEL EDUCATIVO: PRIMARIA ; SOSTENIMIENTO: TODOS; ENTIDAD: CIUDAD DE MÉXICO					
Municipio	Escuelas	Alumnos	Alumnos Hombres	Alumnos Mujeres	Docentes <sup>1</sup>
ÁLVARO OBREGÓN	240	65,050	33,105	31,945	2,374
AZCAPOTZALCO	149	35,784	18,257	17,527	1,483
BENITO JUÁREZ	149	31,986	16,242	15,744	1,269
COYOACÁN	204	50,137	25,468	24,669	1,883
CUAJIMALPA DE MORELOS	91	26,044	13,040	13,004	913
CUAUHTÉMOC	199	43,468	22,107	21,361	1,787
GUSTAVO A. MADERO	463	118,685	59,894	58,791	4,748
IZTACALCO	145	35,199	17,929	17,270	1,398
IZTAPALAPA	590	177,368	90,311	87,057	6,726
LA MAGDALENA CONTRERAS	74	21,561	10,642	10,919	779
MIGUEL HIDALGO	144	32,363	16,319	16,044	1,330
MILPA ALTA	46	15,555	8,018	7,537	526
TLÁHUAC	113	40,355	20,836	19,519	1,405
TLALPAN	223	64,469	32,982	31,487	2,261
VENUSTIANO CARRANZA	159	38,362	19,729	18,633	1,547
XOCHIMILCO	137	42,811	21,906	20,905	1,539
TOTAL	3,126	839,197	426,785	412,412	31,968

\* Recuperado de <https://www.planeacion.sep.gob.mx/principalescifras/>

Un método que permiten la limpieza y reúso de las aguas residuales incluso en el mismo sitio en el que se generan son los humedales artificiales, de ahí la propuesta de instalar un HAM. Se considera un método económico ya que no requiere altos costos para su implementación, operación y mantenimiento. Como medida sustentable se pueden utilizar como un medio en el cual desarrollar proyectos productivos sustentables que generen un beneficio a la población. Lo cual es a su vez, una manera de involucrar y concientizar a la sociedad en el cuidado del agua y el medio ambiente.

Los humedales artificiales, se han desarrollado como una tecnología ecológica y rentable para eliminar no solo contaminantes convencionales (como compuestos orgánicos, nitrógeno total y fosfato) sino también productos farmacéuticos de aguas residuales (Zhang et al., 2018).

## Objetivos

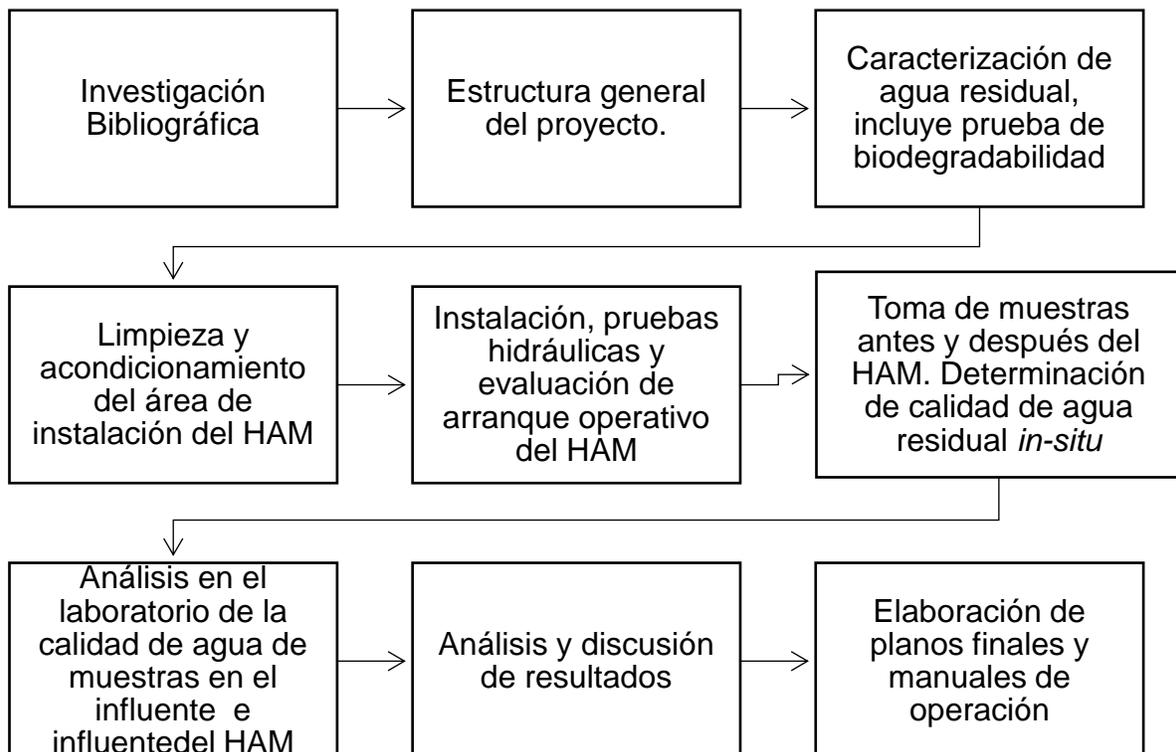
### 1.1 Objetivo general

Realizar la instalación y evaluación del arranque operativo de un Humedal Artificial Modular (HAM) piloto en una escuela de nivel básico, que permita el tratamiento de aguas grises mezcladas con orina usando métodos de análisis *in situ* y de laboratorio.

### 1.2 Objetivos específicos

- Realizar la caracterización del agua residual a tratar usando análisis *in situ* y de laboratorio, incluyendo la determinación de su biodegradabilidad, para obtener la evolución del periodo de arranque del HAM.
- Instalar el HAM en el sitio preestablecido dentro de la escuela seleccionada haciendo uso de diferentes granulometrías de roca y especies vegetales, para el tratamiento de las aguas grises y amarillas provenientes de los baños del sitio.
- Evaluar la calidad del agua obtenida durante el arranque operativo del HAM en un periodo de 10 semanas, usando un multiparámetro HANNA y pruebas en laboratorio como son la DQO y conteo de coliformes fecales.

### 1.3 Estrategia de trabajo



## 2 Antecedentes del proyecto

El problema de la contaminación del agua ha obligado a la búsqueda de alternativas sustentables para su tratamiento. La implementación de tecnologías como los humedales artificiales es una medida para la mejora de calidad del agua, ya que contempla factores ambientales, económicos, sociales y de desarrollo tecnológico. Una de las principales ventajas de estos, es la viabilidad de poder ser usados en áreas rurales, ventaja que los demás tratamientos no presentan. Aunado a esto, otras desventajas que presentan otro tipo de tratamientos es que son tecnologías limitadas e insuficientes cuando se enfrentan con estándares de aguas rigurosos (Wu et al., 2015).

La metodología para seleccionar el sitio de estudio, en el cual se implementó el HAM, permitió identificar un sitio que se encontrara en condiciones socioeconómicas vulnerables y presentara deficiencias considerables en la oferta de servicios urbanos principalmente en el suministro de agua de primer uso, obteniendo un beneficio considerable al instalar el sistema (alcaldías de Milpa Alta, Tláhuac y Xochimilco). Asimismo, se tomó en cuenta la ubicación, accesos y espacio para la construcción del sistema.

Se obtuvo como selección final la Escuela primaria Luis Peniche Vallado, ubicada en Cecilio Acosta #0, Col. Zapotitla, Alcaldía Tláhuac, Ciudad de México, CDMX, cp. 13310.

El tren de tratamiento diseñado se muestra en la Figura 1. Tendrá la facilidad de ser implementado en un espacio propicio para su uso, es decir, el espacio tendrá que ser suficiente para la manipulación y colocación de los módulos y podrá realizarlo cualquier persona, siguiendo los protocolos y guías de instalación. Si el agua es reutilizada en el mismo sitio, y se implementa en condiciones similares, el consumo de agua de primer uso disminuirá a corto y mediano plazo.

El diseño está dividido en 3 módulos:

- Módulo 1: Tanque sedimentador y tanque homogeneizador.
- Módulo 2: HAM y humedal acuático.
- Módulo 3: Tanque de almacenaje y desinfección y tanque distribuidor.

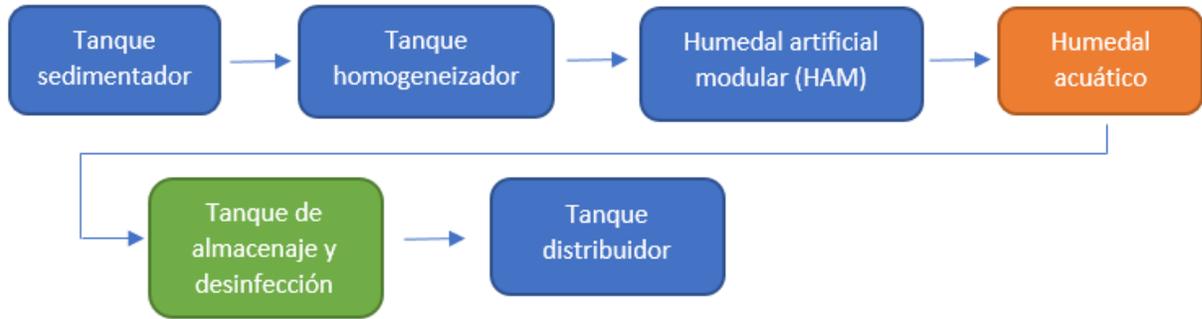


Figura 1. Sistema de tratamiento HAM

Los submódulos mostrados en azul son los instalados como parte de este trabajo. El mostrado en naranja no se realizó hasta después del término de este trabajo y el mostrado en color verde no se completó en su totalidad, debido a que no se seleccionó un método de desinfección, esperando resultados de la evolución del HAM en el periodo de arranque.

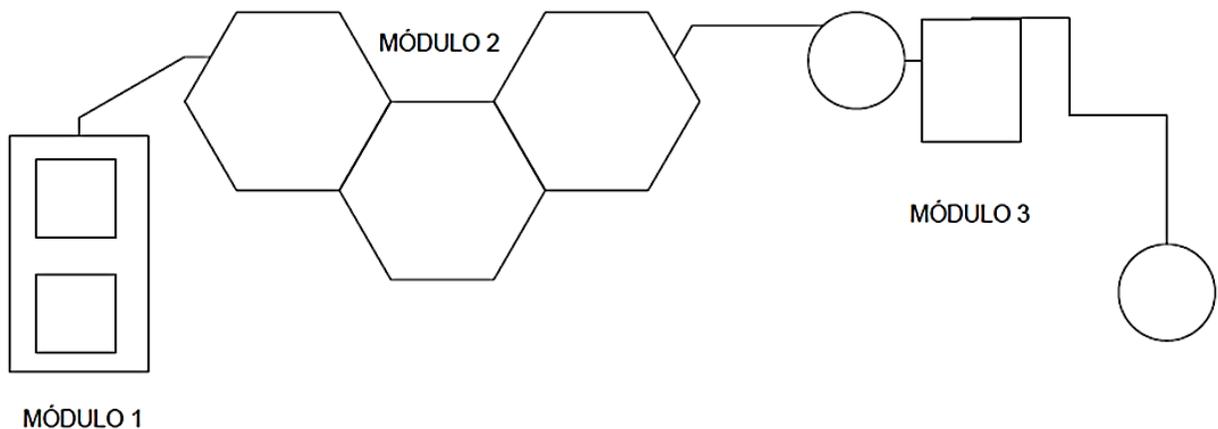


Figura 2. Vista Superior de los módulos del HAM

El tiempo de instalación del sistema, fue de 3 meses, el diseño y selección de los componentes del HAM obedece necesariamente a la calidad de agua a tratar. Para este caso, el equipo del Grupo Multidisciplinario Integral SC (GMI) tomó en cuenta un agua residual tipo mixta, la cual contiene orina humana y agua proveniente del lavado de manos. Este tipo de agua suele contener materia orgánica, así como N y C, microorganismos, grasas, así como restos de jabones y/o detergentes.

El HAM tiene como objetivo producir agua con una calidad apta para ser usada en riego de áreas verdes y reúso en baños. Sin embargo, también su diseño permite poder cumplir lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997 (Tabla 2).

Tabla 2. Calidad de agua a tratar para cumplir lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997.

Parámetro	Unidades	NOM-001-SEMARNAT-1996 Promedio Mensual	NOM-003-SEMARNAT-1997
pH	N.A.	5-10	N.A.
Grasas y aceites	mg/L	15	15
Fósforo total (Fosfatos)	mg/L	10	N.A.
Nitrógeno total	mg/L	25	N.A.
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	60	20-30
Sólidos Sedimentables	mL/L	2	NA
DBO <sub>5</sub>	mg/L	60	20-30
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	1,000 < 2,000	240 - 1,000

NA=No Aplica

Algunos de los beneficios esperados del HAM son:

- El reúso del agua, disminuyendo la demanda de agua de primer uso.
- La implementación del proyecto podrá replicarse en las diferentes alcaldías de la Ciudad de México mejorando el paisaje, contribuyendo a un medio ambiente sano y teniendo un primer acercamiento a una educación ambiental.
- Este sistema permite la limpieza del agua y la educación ambiental, al realizar el proceso de depuración del agua, sensibilizando sobre la importancia de su tratamiento.

La descripción más amplia del sistema y sus módulos se encuentra en el anexo 9.1

### 3 Marco Teórico

#### 3.1 Tratamiento de agua residual en México

A nivel nacional se cuenta con 1,941 plantas para tratamiento (INEGI, 2017). Sin embargo, la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales comúnmente empleados en México, sólo están diseñados para remover materia orgánica de tipo carbonoso y reducir el contenido de microorganismos de origen entérico, dejando concentraciones relativamente altas de nitrógeno y fósforo (Luna Pabello y Aburto Castañeda, 2014).

En la Ciudad de México (Figura 3) se ha tenido un aumento en la operación de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) en todas las alcaldías. Este aumento puede derivarse de los requerimientos sobre el uso de agua en los diversos procesos, o puede deberse a la incorporación de información adicional de las plantas que antes no se reportaba y no necesariamente a la construcción o cese de operación de PTAR, como en el caso de Tláhuac (SEDEMA, 2018).

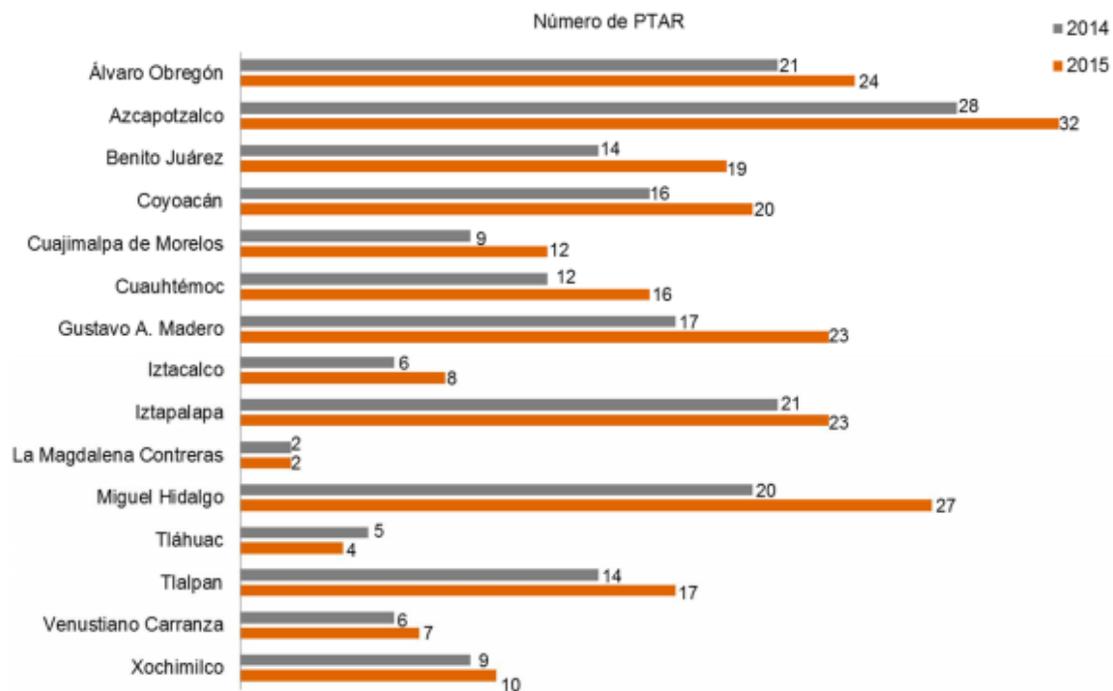


Figura 3. Número de PTAR en la CDMX 2014-2015 (SEDEMA, 2018)

#### 3.2 Marco jurídico

Como mexicanos, todos tienen derechos fundamentales. Todas las autoridades en el ámbito de sus competencias tienen la obligación de promover, respetar, proteger y garantizar los derechos humanos consignados en favor del individuo

(CNDH, 2018). Dos de los más importantes que trata esta tesis son el derecho a la educación y el derecho al agua y el saneamiento.

- Derecho a la educación: La educación es un derecho humano fundamental, reconocido desde 1948, año en el que se firma la Declaración Universal de los Derechos Humanos y se incluye en su artículo 26. El artículo 3° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos lo ampara señalando:

*“Todo individuo tiene derecho a recibir educación”. La reforma educativa reciente, en la Carta Magna, le impone a la educación obligatoria que imparta el Estado la característica de ser de calidad, entendiendo por ello “...que los materiales y métodos educativos, la organización escolar, la infraestructura educativa y la idoneidad de los docentes y los directivos garanticen el máximo logro de aprendizaje de los educandos”*

- Derecho al agua: El Derecho Humano al Agua y el Saneamiento, promulgado por la Organización de las Naciones Unidas el 28 de julio de 2010, responde a la necesidad antes planteada de abastecer a la población que carece de agua potable en el planeta y a más de 2,600 millones de personas que no tienen saneamiento básico (Plaza, 2015).

Derivado de esto, y sumado a la campaña nacional que desde 2006 (año en el que la Coalición de Organizaciones Mexicanas por el Derecho al Agua (COMDA) fue creada) ha luchado por la inclusión de dicho derecho, finalmente en febrero de 2012, en la Carta Magna Nacional, se adoptó lo señalado en la resolución de las Naciones Unidas, plasmando el Derecho Humano al agua y al saneamiento en el artículo 4º párrafo sexto, donde se redacta lo siguiente:

*“Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines.”*

El Estado reconoce y se obliga a respetar todos y cada uno de los derechos humanos. Su realización resulta indispensable para el desarrollo integral de los individuos que viven en sociedades jurídicamente organizadas. Para que sean plenamente vigentes suponen la ausencia de cualquier tipo de discriminación (Avila, 2017).

El proyecto de este trabajo exhibe la posibilidad de cumplir algunas de las Normas Oficiales Mexicanas, por ello es importante su definición.

### 3.2.1 Normas Oficiales Mexicanas

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son regulaciones técnicas de observancia obligatoria expedidas por las Dependencias de la Administración Pública Federal, que establecen reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado y las que se refieran a su cumplimiento o aplicación (SEMARNAT, 2018).

*Tabla 3. Normas Oficiales Mexicanas (SEMARNAT, 2018)*

Título	Objetivo	Autor
Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesca. México.
Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesca. México.
Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesca. México.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) expide las NOM del Sector Ambiental con el fin de establecer las características y especificaciones, criterios y procedimientos, que permitan proteger y promover el mejoramiento del medio ambiente y los ecosistemas, así como la preservación de los recursos naturales (SEMARNAT, 2018), cada una establece límites máximos permisibles en diferentes tipos de descargas (Tabla 3).

### 3.3 Humedales artificiales

En el tratamiento de aguas residuales, los humedales artificiales son sistemas diseñados y construidos para utilizar procesos naturales que involucran vegetación, suelo y procesos microbianos para ayudar al tratamiento de aguas residuales. Los humedales artificiales, son diseñados para aprovechar muchos de los procesos de humedales naturales, dentro de un ambiente controlado (Fath, 2018; Vymazal, 2010).

Vymazal (2010) clasifica los humedales artificiales (HA) basados en:

- Tipo de vegetación: macrófitas flotantes, de hoja flotante, emergente y sumergida.
- Hidrología: flujo superficial, flujo subsuperficial vertical u horizontal.

Para el tratamiento de aguas residuales, existe la posibilidad de usar cualquier combinación que se pueda adaptar a las condiciones ambientales.

Jizheng et al. (2019) por ejemplo, acoplaron aireación para tratar aguas residuales en un humedal artificial de flujo subsuperficial con aireación vertical, sumado a un pretratamiento de oxidación, observando reducciones, por ejemplo, de Nitrógeno Total de entre 40 y 75%.

#### 3.3.1 Humedal artificial de flujo superficial (HAFS)

En este tipo de humedales, cómo su nombre lo indica, el agua circula por encima del sustrato continuamente favoreciendo las condiciones aerobias al estar el agua directamente expuesta a la atmósfera. Este tipo de humedales son los más parecidos a los encontrados en la naturaleza, por lo que no es de sorpresa que atraiga a una gran variedad de vida animal. En la Figura 4, se presenta un esquema típico de este tipo.

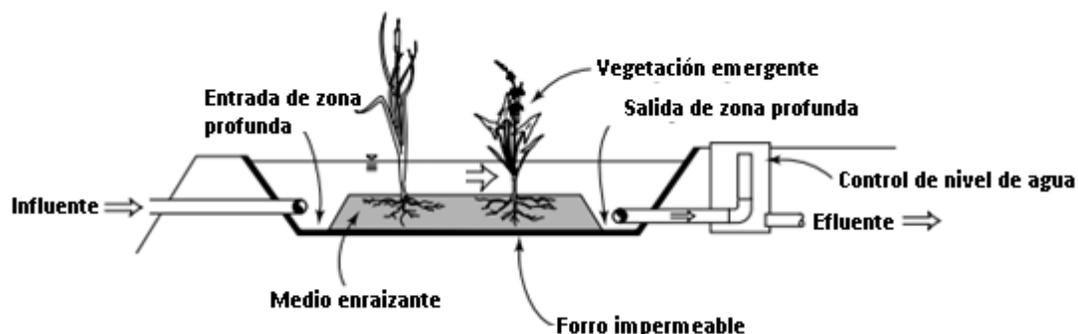


Figura 4. Esquema de un HFS modificado de Kadlec y Wallace, 2009

Siendo que el flujo de agua está expuesto al ambiente, existe el riesgo de exposición a patógenos, por lo que este tipo de humedales rara vez se usa como tratamiento secundario, dejándolo entonces para después de un segundo o tercer tratamiento (Kadlec y Wallace, 2009).

Los procesos de sedimentación y asimilación pueden, en el mejor de los casos, eliminar temporalmente el nitrógeno del agua. El nitrógeno solo puede eliminarse permanentemente mediante la emisión de  $N_2$  en entornos con poco oxígeno, o mediante la volatilización de amoníaco en entornos con pH alto y la recolección de biomasa vegetal (Steidl, Kalettka y Bauwe, 2019).

### 3.3.2 Humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSS)

A diferencia del humedal de flujo superficial, en este el agua circula por debajo de la superficie del sustrato y en la mayoría de los casos, son usados para el tratamiento de aguas residuales de poblaciones menores a los 2000 habitantes. En función del sentido del flujo, pueden ser horizontales o verticales.

Los HAFSS no están diseñados con la intención de remover amoníaco. También la eliminación de fósforo está limitada ya que los materiales usados, como la grava lavada o triturada, proporcionan una baja capacidad de sorción (Vymazal, 2019).

#### 3.3.2.1 Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH)

Este tipo de humedales artificiales emplean típicamente una cama de grava en la que se planta vegetación. Diseñados típicamente para tratamiento primario, el flujo de agua residual es destinada a permanecer debajo de la superficie del empaque fluyendo en y alrededor de las raíces y rizomas de las plantas. Debido a que el agua no está expuesta durante el proceso de tratamiento, el riesgo asociado a la exposición humana o de vida silvestre a los patógenos, es reducido al mínimo. Aunado a esto un HFSS correctamente operado no proporciona un hábitat adecuado para la proliferación de mosquitos (Kadlec y Wallace, 2009). En la Figura 5, se muestra un esquema de este tipo de humedal artificial.

Asimismo, en 2018 se propuso la fitorremediación del flujo residual conocido como “rechazo” o “concentrado” de la osmosis inversa, usada para la remediación de arsénico (As). Los experimentos se llevaron a cabo durante 419 días a temperatura ambiente y utilizando un régimen continuo (flujo de  $36 \text{ L d}^{-1}$ , como concentración alrededor de  $85 \mu\text{g L}^{-1}$ ) de rechazo de una planta de tratamiento de agua ubicada en la provincia de Buenos Aires, Argentina. La eficiencia de los prototipos plantados con *Cyperus haspan*, *Juncus effusus* varió de 10 a 80% siendo el prototipo usando *Juncus effusus* el de mejor rendimiento (40 a 80%) (Corroto, Iriel, Cirelli y Carrera, 2019).

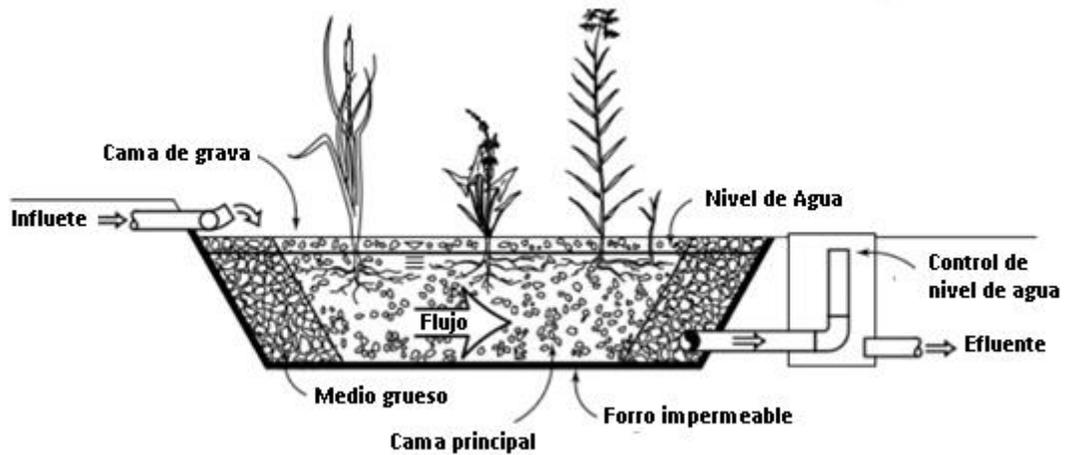


Figura 5. Esquema de un HAFSSH modificado de Kadlec y Wallace, 2009

### 3.3.2.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical (HAFSSV)

El tipo más común de este tipo de humedales artificiales ocupa un inundamiento superficial del lecho empacado en una configuración de un solo paso. Estos sistemas son similares a un mecanismo de dosificación usado en los filtros de arena intermitentes y han sido diseñados típicamente como filtros de grava con vegetación sumado a una recirculación (Kadlec y Wallace, 2009). En la Figura 6, se muestra un arreglo típico de este tipo de humedal artificial.

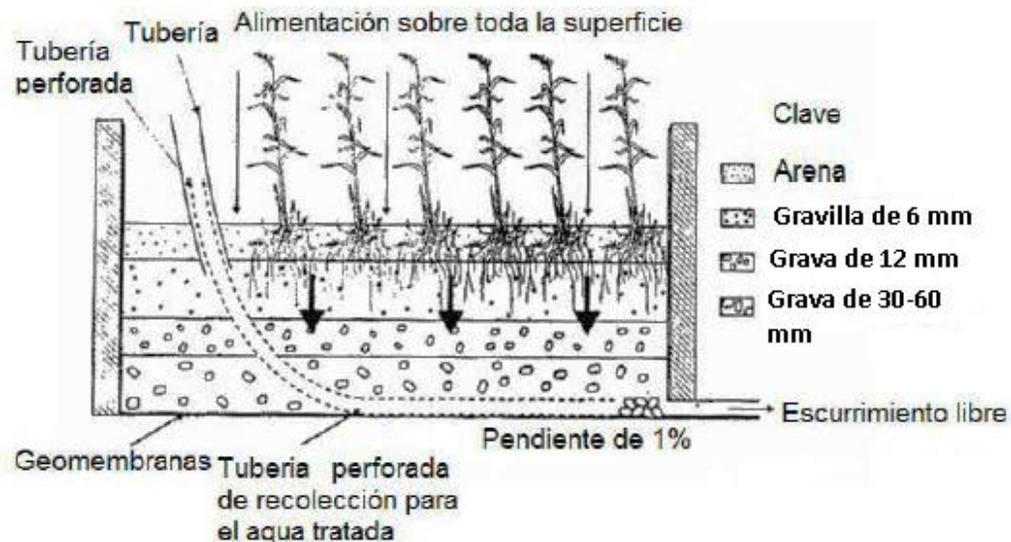


Figura 6. Arreglo típico de un HAFSSV modificado de Kadlec y Wallace, 2009

Los humedales artificiales han sido usados por varias décadas por sus grandes ventajas, las cuales incluyen un bajo consumo energético y menos requerimientos operativos en contraste con tratamientos convencionales, especialmente para

comunidades pequeñas y locaciones remotas. Sin embargo, la correcta aplicación y operación de estos sistemas sigue siendo un reto (Wu et al., 2015).

### 3.4 Vegetación

La raíz del componente vegetal puede secretar carbonos orgánicos, como aminoácidos, ácidos orgánicos, azúcares y polisacáridos, durante crecimiento de la planta. Estos carbonos orgánicos pueden servir como fuente de carbono en la conversión de nitrógeno y mejorar la eficiencia de eliminación de  $\text{NO}_3^-$ . Por lo tanto, el uso de la fuente de carbono derivada de las plantas mejora la eliminación de  $\text{NO}_3^-$  en el humedal (Wang et al., 2019).

El uso del componente vegetal es importante para el correcto funcionamiento del humedal, las plantas ayudan:

- Estabilizando el sustrato y limitando la canalización del flujo.
- Dando lugar a velocidades de agua bajas, permitiendo que los materiales suspendidos se depositen.
- Tomando el carbono, nutrientes y elementos traza para incorporarlos a los tejidos de la planta.
- Oxigenando otros espacios dentro del sustrato.
- Dando sitio de fijación para microorganismos en el tallo y sistemas de la raíz.

Finalmente, debido a que las plantas emplean la energía solar para la fotosíntesis y en consecuencia la transforman en energía química para ser usada en sus funciones vitales, colaborando en el tratamiento del agua (Delgadillo, Camacho y Serie, 2010), sin embargo, un exceso de nutrientes puede causar entre otras cosas, la muerte de la planta (Wu et al., 2015).

En la Tabla 4, se presentan las características de las especies más utilizadas para la construcción de humedales artificiales.

Tabla 4. Tabla comparativa de especies vegetales más usadas en HA modificada (Delgadillo et al., 2010)

Nombre Científico	Familia	Nombre(s) común(es)	Características sobresalientes	Distancia de siembra	Penetración de raíces en grava	Temperatura deseable (°C)	pH
<p><i>Typha spp</i>                      Tenorio, P. (2004). Recuperado de:  <a href="http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/typha-ceae/typha-domingensis/fichas/pagina1.htm">http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/typha-ceae/typha-domingensis/fichas/pagina1.htm</a></p> 	Tifácea	Espadaña, Enea, Anea, Junco, Bayón, Bayunco, Bohordo, Henea	<p>Ubicua en distribución                      Capaz de crecer bajo diversas condiciones medioambientales                      Se propaga fácilmente                      Capaz de producir una biomasa anual                      Tiene potencial pequeño de remoción de N y P por la vía de la poda y cosecha</p>	60 cm	Relativamente pequeña (30 cm) por lo que no es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial	10-30	4-10
<p><i>Scirpus spp</i>                      Bonilla, J.(2019). Recuperado de:  <a href="http://bdi.conabio.gob.mx/fotoweb/archives/5023-Plantas/Plantas/JRBBFM026-47%20Scirpus%20cyperinus.jpg.info">http://bdi.conabio.gob.mx/fotoweb/archives/5023-Plantas/Plantas/JRBBFM026-47%20Scirpus%20cyperinus.jpg.info</a></p> 	Ciperácea	Totora	<p>Perenes                      Crecen en grupo                      Plantas ubicuas                      Crecen en aguas costeras, interiores salobres y humedales                      Crecen bien en agua desde 5 cm hasta 3 m de profundidad</p>	30 cm	60 cm por lo que es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial	18-27	4-9
<p><i>Phragmites spp</i>                      Ciceron, A. (2019). Foto propia</p> 	Gramínea	Carrizo	<p>Anuales y altos                      Rizoma perene extenso                      Plantas acuáticas usadas más extensas                      Pueden ser más eficaces en la transferencia de oxígeno porque sus rizomas penetran verticalmente y más profundamente                      Son muy usadas en humedales porque ofrecen un bajo valor alimenticio</p>	60 cm	40 cm por lo que es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial	12-23	2-8

### 3.5 Aguas residuales

La Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 define a las aguas residuales como:

*“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.”*

Asimismo, considerando el enfoque de tratamiento estas aguas se pueden clasificar según su origen en domésticas, industriales y agropecuarias (SEMARNAT, 2014), cada una con composición particular, siendo las aguas residuales urbanas y de origen agropecuario las más fáciles de tratar.

Para el propósito de este trabajo se considerarán solo las aguas residuales domésticas, estando estas separadas en 3 subgrupos que son: grises, amarillas y cafés, dependiendo de lo que estas contengan. Es importante mencionar que anteriormente las aguas cafés y amarillas estaban comprendidas dentro de las llamadas aguas negras, las cuales incluían a las aguas provenientes del retrete sin separación. Sin embargo, la separación de las mismas permite la recuperación y generación de energía de forma eficiente, así como la concentración de los riesgos en volúmenes menores, lo que hace posible un mejor control y la reducción de los efectos negativos al ambiente (Kujawa-Roeleveld y Zeeman, 2006).

#### 3.5.1 Aguas grises

El término aguas grises, se refiere a todas las aguas domésticas que no provengan de retretes ni mingitorios (Eriksson, Auffarth, Henze y Ledin, 2002), tales como las tinas, duchas, lavamanos y lavadoras, por lo que pueden contener jabón, cabello, suciedad o bacterias y representan entre el 50 y 80 % del volumen total de las aguas residuales de origen doméstico.

El reúso permitiría reducir sustancialmente la demanda de agua potable en el sector doméstico (Lamine, Samaali y Ghrabi, 2012), aunque resulta de vital importancia realizar previamente una caracterización de las aguas grises para definir los riesgos a la salud o al ambiente por la presencia de patógenos y por la acumulación de compuestos orgánicos xenobióticos o metales en suelos o cuerpos de agua (Eriksson et al., 2002).

Además, si solo se reutiliza el agua gris clara, los requisitos de tratamiento son mínimos y se pueden lograr utilizando un sistema de tratamiento de agua gris adecuado en el sitio (Prodanovic, Mccarthy, Hatt y Deletic, 2019).

### 3.5.2 Aguas amarillas

Las aguas amarillas, serán entonces las aguas exclusivamente contaminadas con orina, sin heces fecales como las provenientes de mingitorios, estas aguas junto con las grises fueron las aguas objetivo a tratar en este trabajo.

### 3.5.3 Aguas cafés

Las aguas residuales pardo-rojizas “cafés”, se definen como la corriente de materia fecal sin orina humana (Rajagopal, Lim, Mao, Chen, y Wang, 2013). La corriente de aguas cafés es considerada como la fracción que contiene el mayor porcentaje de patógenos de todas las corrientes de las aguas residuales domésticas (Larsen y Maurer, 2011), por ello su gestión representa el mayor riesgo de contaminación (Paulo, Azevedo, Begosso, Galbiati, y Boncz, 2013).

## 4 Materiales y Métodos

### 4.1 Aguas por tratar

Las aguas residuales a tratar en el HAM serán la combinación de aguas grises y amarillas. Esto debido a diferenciar el tratamiento en dos flujos principales. Uno conteniendo las excretas sólidas fecales y el otro con excretas líquidas, agua de lavado de manos y de trastes. El agua a tratar es la de mayor volumen y sin contenido de materia fecal, lo cual elimina casi por completo la opción de encontrar microorganismos patógenos dañinos para la salud humana.

### 4.2 Plan de muestreo y análisis de calidad de agua

Para el periodo de arranque se realizó un plan de muestreo y análisis, donde se plantearon los puntos de muestreo (PM), cantidad de muestras y condiciones de almacenamiento (Tabla 5).

Tabla 5. Plan de muestreo y análisis.

<b>Puntos de muestreo (PM)</b>	<b>Tipo de recipiente</b>	<b>Cantidad de muestra (mL)</b>	<b>Análisis requerido</b>	<b>Condiciones de almacenamiento</b>
Entrada al HAM (HAMent)	Bolsa Whirl Pack estéril	100	Coliformes totales y coliformes fecales	4°C y Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Botella plástica	250	Fosfatos-SST-nitratos y nitritos surfactantes	4°C ± 2°C
		250	DQO N: NT - N: NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -	4°C, pH<2 con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
		250	Nitrógeno total y amoniacal	
Salida del HAM (HAMsal)	Bolsa Whirl Pack estéril	100	Coliformes totales y coliformes fecales	4°C y Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Botella plástica	250	Fosfatos-SST-nitratos y nitritos surfactantes	4°C ± 2°C
		250	DQO N: NT - N: NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -	4°C, pH<2 con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
		250	Nitrógeno total y amoniacal	
		250	Nitrógeno total y amoniacal	

#### 4.3 Parámetros de calidad del agua

Los parámetros analizados en el presente trabajo se dividen en los realizados *in situ* con la lectura en el multiparámetro y los métodos analíticos en laboratorio.

Parámetros *in situ*:

- a) Oxígeno disuelto
- b) pH
- c) Temperatura
- d) Turbidez
- e) Sólidos disueltos totales (STD)

Analíticos en laboratorio:

- a) Coliformes fecales
- b) Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- c) Nitritos y nitratos
- d) Fosfatos

## e) Biodegradabilidad

### 4.4 Determinación de biodegradabilidad por respirometría

Este parámetro se determinó en un respirómetro BI-2000 Bioscience, Inc.

Para el mismo, se realizó un pequeño manual de uso rápido presentado en el anexo 9.3.

### 4.5 Métodos de análisis de calidad del agua

#### 4.5.1 Análisis *in situ*

Se usó un multiparámetro HANNA HI 9829 para la caracterización del agua residual y tratada en el HAM, así mismo estos datos se presentan en el capítulo de Resultados.

#### 4.5.2 Análisis en laboratorio

Las técnicas utilizadas para el análisis de agua en laboratorio se mencionan a continuación y su procedimiento se encuentra condensado en el anexo 9.2.

##### 4.5.2.1 Cuenta de coliformes

El conteo de coliformes se realizó por el método descrito en la NMX-AA-102-SCIFI-2006, en la cual se usó el método de filtración por membrana.

##### 4.5.2.2 Método colorimétrico para determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La medición de DQO se realizó por reflujo cerrado empleando el método colorimétrico 5220 D de APHA et al. (1992).

##### 4.5.2.3 Espectrofotometría ultravioleta para determinación de nitratos

Se empleó el método espectrofotométrico UV 4500  $\text{NO}_3^-$  B para la determinación de nitratos (APHA et al., 1992). La técnica de monitoreo espectrofotométrico ultravioleta (UV) mide la absorbancia del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) a 220 nm y es adecuada para la determinación rápida de ( $\text{NO}_3^-$ ) y el monitoreo de aguas con bajo contenido de materia orgánica.

##### 4.5.2.4 Diazotización simple para determinación nitritos

La presencia de nitritos se determinó con una técnica colorimétrica a 507 nm basada en reacciones de diazotización simple que se llevan a cabo con p-nitroanilina y acetoacetato de etilo (Sreekumar, Narayana, Hegde, Manjunatha y Sarojini, 2003).

#### 4.5.2.5 Determinación de fosfatos

Se realizó la determinación de fosfatos por medio del método colorimétrico del ácido vanadomolibdofosfórico, descrito en el APHA (1998).

#### 4.6 Materiales usados para la instalación del HAM

Para la realización del proyecto, se utilizaron diferentes componentes, los cuales se presentan en la Tabla 6, cabe mencionar que no se consideraron las bombas ni el pegamento usado para las uniones.

Tabla 6. Materiales usados

Módulos	pieza	Material	Volumen (L)	tamaño (in)	cantidad (pz)	longitud (m)	Área (m <sup>2</sup> )	
<b>a) Tanques 1 y 2</b>	Tinaco Kingplas reforzado con aditamentos		500	35*37.4	2	---	---	
	codo 90	PVC	---	4	6	---	---	
	tee		---		1	---	---	
	tubo		---		---	5	---	
	válvula		---		2	---	---	
<b>b) Humedal de flujo subsuperficial</b>	codo 90	PVC	---	4	10	---	---	
	tee		---		12	---	---	
	brida		---		7	---	---	
	reductores		---		2	---	---	
	coples		---		8	---	---	
	taponos		---		24	---	---	
	tubo		---		---	18	---	---
	cruces		---		1	---	---	
	válvula		---		1	---	---	
	válvula		---		---	1	---	---
	tubo	---	---	1	---	0.5	---	
	Geomembrana HDPE		---	---	---	---	46.2	
	malla 1mm		---	---	---	---	20.4	
<b>c) Tanques de captación de efluente</b>	Tinaco Axteca Tricapa reforzado y accesorios		1200	43.7*48.82	2	---	---	
	codo 90	PVC	---	1	7	---	---	
	tee		---		1	---	---	
	tubo		---		---	12	---	
	válvula		---		2	---	---	

La Tabla 7, muestra la cantidad especie y cantidad de vegetación usada en la instalación del HAM, constando de vegetación usada para la depuración y vegetación usada de ornamento.

*Tabla 7. Vegetación en el HAM*

Vegetación en HAM	Especie	Piezas
HAM para depuración de agua residual	<i>Phragmites australis</i>	28
	<i>Equisetum arvenses</i>	30
	<i>Cyperus papyrus</i>	22
HAM ornamental	<i>Lavandula officinales</i>	39

#### 4.7 Construcción, pruebas hidráulicas y proyecto paisaje del HAM

La construcción obedeció al diseño y se realizaron procedimientos de trasplante, limpieza, doblado de geomembrana y empaque de módulos del HAM, considerando el espacio para la construcción del sistema.

Así mismo se realizaron las pruebas hidráulicas pertinentes en el HAM, para confirmar la ausencia de fugas.

Como parte integral se realizó un proyecto de paisaje dando una vista atractiva al área. La Figura 7, muestra la propuesta final, realizada por el equipo de arquitectos de GMI, donde se encuentran las especies vegetales que complementarán al HAM.

## ARQUITECTURA DE PAISAJE

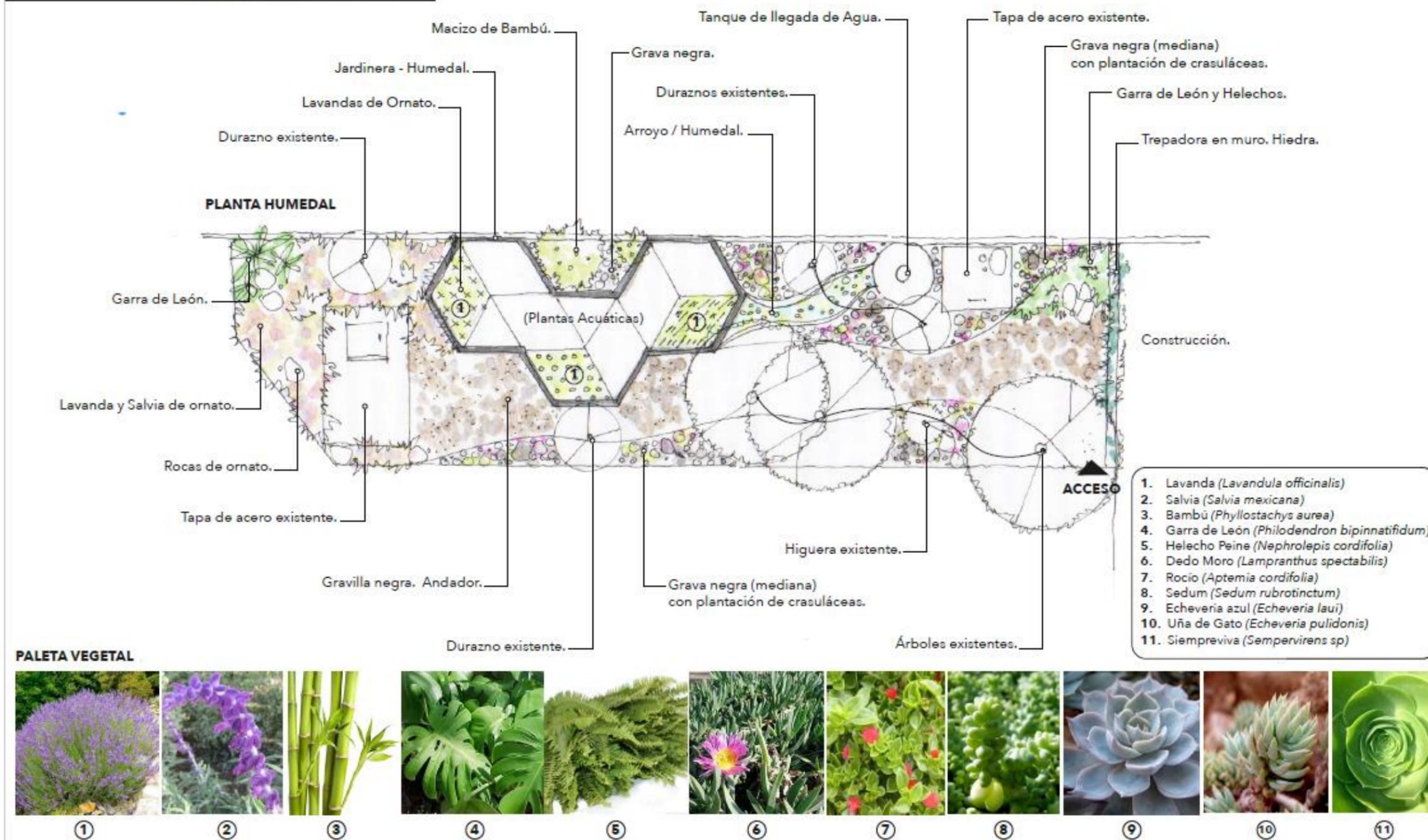


Figura 7. Proyecto paisaje (GMI, 2019)

Sumado a esto, se realizaron etiquetas y cédulas de campo para el control de muestras, presentadas en el anexo 9.4.

Los muestreos se realizaron semanalmente para analizar la evolución del HAM, en los puntos específicos citados en la Figura 8, así mismo la muestra para la determinación de biodegradabilidad se realizó en el registro sanitario ubicado en la entrada del sistema.



*Figura 8. Puntos de Muestreo para análisis*

#### 4.8 Arranque del HAM

El arranque es un paso crítico para el correcto funcionamiento de cualquier tipo de sistema, es por eso por lo que se deben hacer consideraciones específicas para cada uno, en el caso de nuestro HAM se tomó en cuenta lo siguiente:

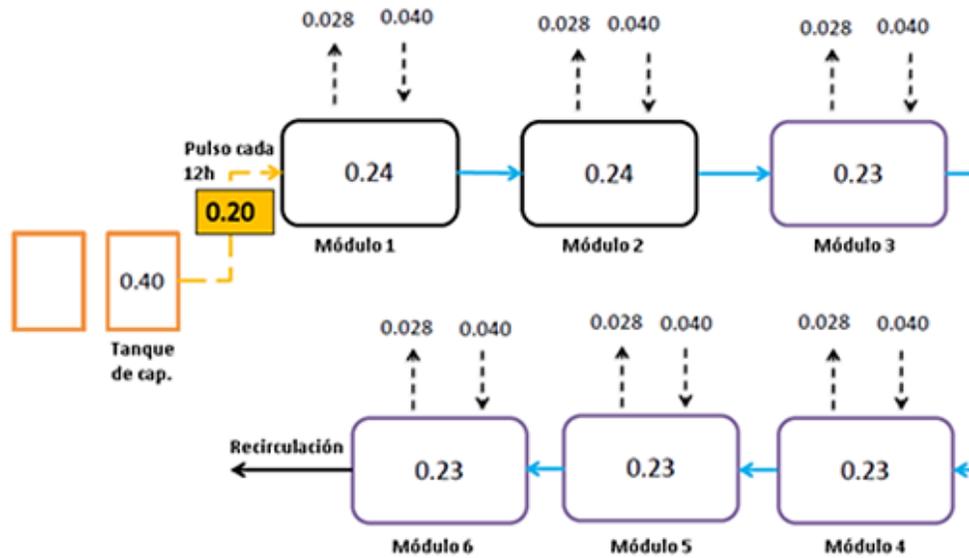
- Carga de agua.
- Carga de orina.
- Supervivencia de plantas.
- Supervivencia de bacterias.

Para la supervivencia de las plantas, es importante controlar la cantidad de  $\text{NH}_4^+$  con el cual se alimentará el sistema, debido a que el componente vegetal no sobrevive con una concentración mayor a  $70 \text{ mg/L NH}_4^+$ . Para tal efecto se realizó una prueba rápida de la cantidad de  $\text{NH}_4^+$  con ayuda de un colorímetro, obteniendo como resultado  $55.1 \text{ mg/L}$ , lo cual fue suficiente para dar los primeros pulsos de  $0.2 \text{ m}^3$  inicialmente cada  $12 \text{ h}$  sin inóculo por 2 semanas (a partir de la tercera semana se dieron pulsos de  $1 \text{ min}$  cada 5 horas), recirculando la salida al Tanque 1.

Para controlar la introducción de  $\text{NH}_4^+$ , se utilizó una recirculación al tanque de alimentación donde se recalibrará la concentración de orina en agua para alimentar el HAM aclimatando las plantas y bacterias que puedan llegar a tener en las primeras semanas. Pasando las 2 semanas antes mencionadas, se inoculará el sistema con las bacterias obtenidas en el laboratorio, es importante destacar que estas bacterias no se lavaron por 2 razones, el flujo no tiene la suficiente fuerza y la recirculación ayudo a no se tener pérdidas significativas de las mismas.

En la Figura 9, se presenta un balance del arranque del sistema, iniciando con los 2 tanques de captación (naranja), ambos con capacidad de  $0.40 \text{ m}^3$  siendo el primero un sedimentador y siguiendo con un homogeneizador, la figura muestra el pulso de  $0.20 \text{ m}^3$  que se dio cada  $12 \text{ h}$  para alimentar los 6 módulos del HAM, que

finaliza con una recirculación al tanque homogeneizador con el fin de aclimatar las plantas del HAM como se dijo anteriormente.



**\* Valores en metros cúbicos**

*Figura 9. Arranque del HAM*

La Figura 10, a diferencia de la Figura 9, muestra un diagrama completo del funcionamiento del sistema, iniciando con la combinación de las aguas grises y la orina de los mingitorios que pasa a los tanques de sedimentado y homogeneizado, con ayuda de una bomba centrífuga, se transporta la combinación de estas aguas al humedal artificial modular, una vez transcurrido el tiempo de residencia hidráulico el agua tratada procede a un tanque de desinfección para su posterior almacenamiento y reúso en los sanitarios y regado del sitio.

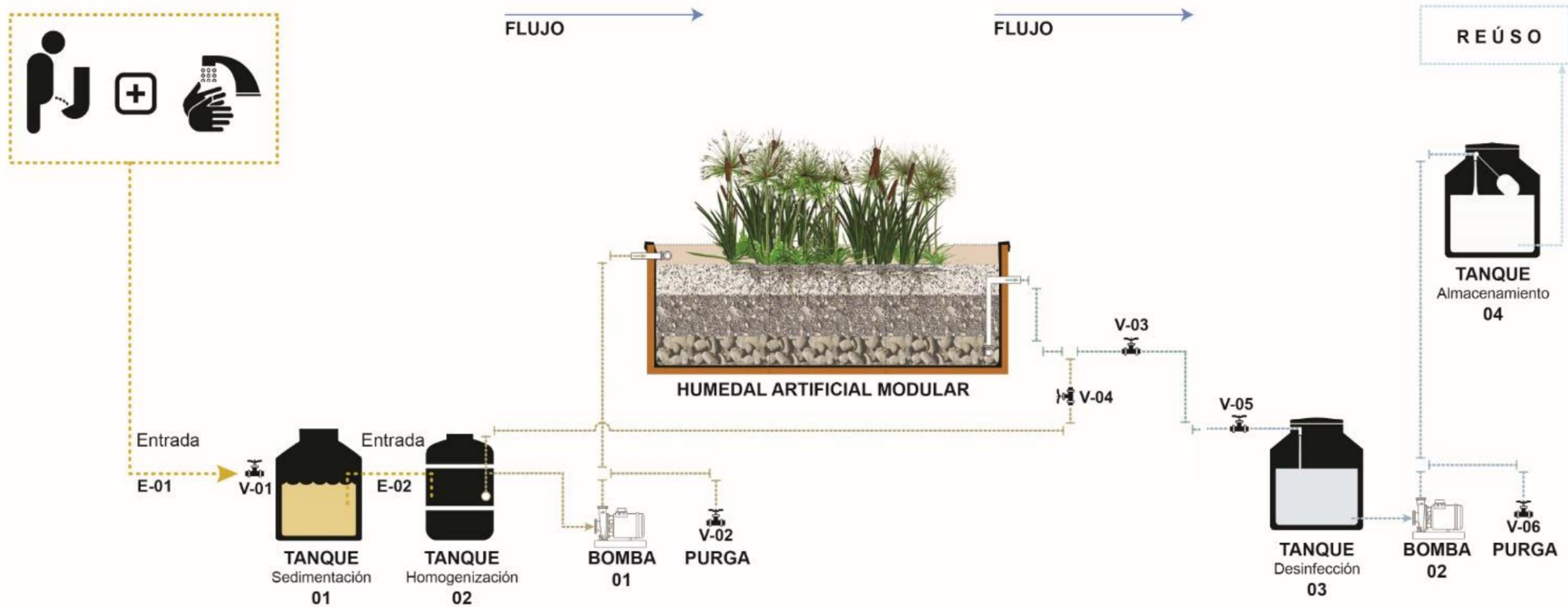


Figura 10. Diagrama del sistema (Tomado de Rodríguez Estrada et al., 2019)

## 5 Análisis y discusión de resultados

Como se menciona en los capítulos anteriores, este trabajo presenta un Humedal Artificial Modular que trata la combinación de aguas amarillas y grises procedentes de los mingitorios y lavamanos de la escuela Luis Peniche Vallado.

Previo al diseño, se realizó una caracterización del agua residual a tratar y se obtuvieron datos de los parámetros de interés como se observa en la (Tabla 8)

Tabla 8. Caracterización del agua a tratar.

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor promedio obtenido</b>
<b>pH</b>	unidades	6.21 ± 0.01
<b>Fósforo total (Fosfatos)</b>	mg/L	643 ± 8
<b>Nitrógeno amoniacal*</b>	mg/L	300
<b>Nitrógeno orgánico*</b>	mg/L	7700
<b>Nitrógeno total*</b>	mg/L	8000
<b>DQO</b>	mgO <sub>2</sub> /L	5174 ±76
<b>Coliformes Fecales</b>	NMP/100 mL	600
<b>Temperatura</b>	° C	20 ± 0.01

\*Valores obtenidos a partir de análisis en el Departamento de Control Analítico, FQ, UNAM

### 5.1 Biodegradabilidad

Se realizó un estudio de biodegradabilidad de las aguas residuales que se introducirán al HAM, para una mejor caracterización de estas, como dicta procedimiento OCDE 301-F: Respirimetría Manométrica la duración total del experimento fue de 28 días.

Para este procedimiento, se utilizaron 7 reactores, sus contenidos se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Reactores del respirómetro y contenido

Reactor	Nombre	Contenido
1 y 2	Blanco (RB1 y RB2)	Solo inóculo
3 y 4	Prueba (RP1 y RP2)	Substancia de prueba + inóculo
5	Referencia + (RR+)	Compuesto de referencia + inóculo
6	Degradación Abiótico (RDA)	Substancia de prueba + agente esterilizante
7	Toxicidad (RT)	Substancia de prueba + compuesto de referencia + inóculo

En la Figura 11, se muestra el consumo de oxígeno de los 7 reactores. Las curvas de los reactores RB1 y RB2, representan el oxígeno consumido por los reactores que sólo contienen inóculo, mostrando el comportamiento de los lodos activados, validando la prueba ya que el consumo de oxígeno no fue mayor a 60 mg O<sub>2</sub>/L. Así mismo, en la curva RDA se observó un consumo de oxígeno no esperado, ya que al final del experimento consumió poco menos que los reactores RB1 y RB2, lo que no debería ser debido a que ésta reactor sólo cuenta con la sustancia prueba (orina) sin microorganismos que le ayuden a degradarse, este resultado puede ser explicado de dos formas, debido a una degradación abiótica por hidrólisis o el caso del cloruro de mercurio utilizado, no fuera el suficiente o estuviera en mal estado, evitando la completa eliminación de microorganismos presentes.

Se observa que en la curva de Referencia positiva, conteniendo anilina (sustancia altamente biodegradable), una degradación al final del periodo de 28 días de un 86.72% (tomando en cuenta la respirometría de RB1 y RB2). Se observa también que a pesar de que las curvas RP1 y RP2 son mayores los primeros 3 días, la curva de RR+ se recupera después de este periodo, tomando en cuenta su porcentaje de biodegradabilidad de 82.70% indica que la sustancia de prueba es altamente biodegradable. Para confirmar esto la curva RT, presenta el consumo de oxígeno de la sustancia de prueba más anilina, esta curva tiene un comportamiento diaúxico, ya que la curva se presenta bifásica, demostrando que la población microbiana, tiene preferencia por una fuente de carbono, en este caso la sustancia de prueba debido a la forma de la curva, para finalmente consumir la anilina.

Finalmente observando las curvas, se obtiene que la sustancia prueba es fácilmente biodegradable, no tóxica y además se degrada abióticamente un 26.29%.

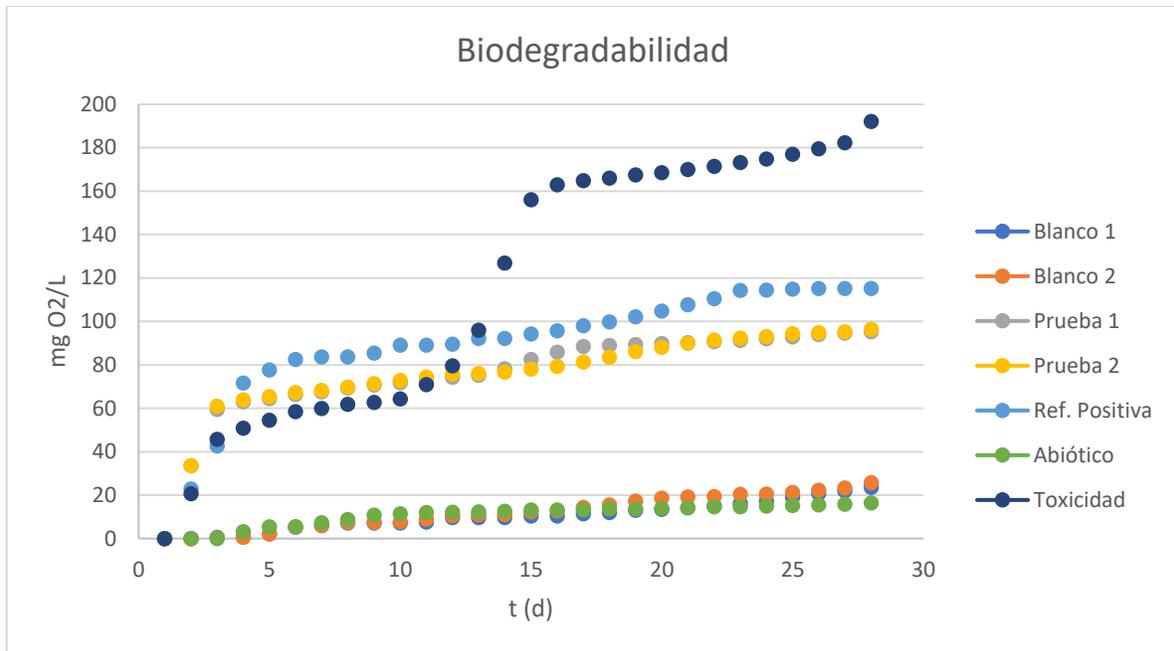


Figura 11. Respirometría

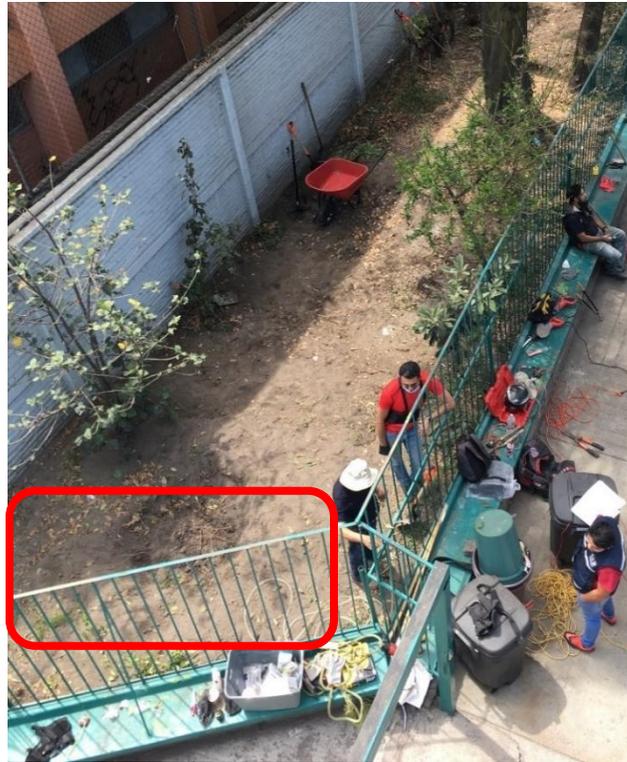
## 5.2 Construcción, pruebas hidráulicas y proyecto paisaje del HAM

Con base al diseño se realizó la construcción del sistema. La zona donde se instaló el humedal presentaba, entre otras cosas: vegetación y basura (Figura 12), se procedió a hacer una limpieza general dividiendo al personal en 2 equipos, uno de ellos encargado del trasplante de árboles frutales y el segundo equipo encargado de la limpieza general de la zona trabajo, este último consistía en remover hojarasca, residuos de muebles pertenecientes a la escuela, rocas, etc.



Figura 12. Área para instalación del HAM.

Una vez completa la limpieza, se procedió a realizar excavaciones de aproximadamente 2 m. de profundidad, en la zona marcada en la Figura 13, con la finalidad de poder introducir los 2 tanques de captación para la primera etapa del HAM.



*Figura 13. Vista panorámica de ubicación del HAM.*

Una vez realizada la excavación (Figura 14) se introdujeron los tanques de captación como se muestra en la Figura 15.



*Figura 14. Preparación de sitio.*



*Figura 15. Colocación de Tanques.*

Para la instalación de la estructura, es necesario un aplanado de la zona donde se colocaron, para esto se usó la tierra ya limpia de piedras recuperada de la excavación para los tanques. Usando un apisonador, se aplanó la zona donde se instaló el HAM (Figura 16), un peso mal distribuido compromete la estructura por lo que este paso es crucial.



*Figura 16. Aplanado del área de instalación.*

Pasado este punto se acomodan en orden las bases de los módulos teniendo cuidado de revisar que las bases no se muevan (Figura 17). El previo armado del prototipo en otra locación ayuda a mejorar la logística, ya que el prototipo tiene como función principal ser la guía de armado.

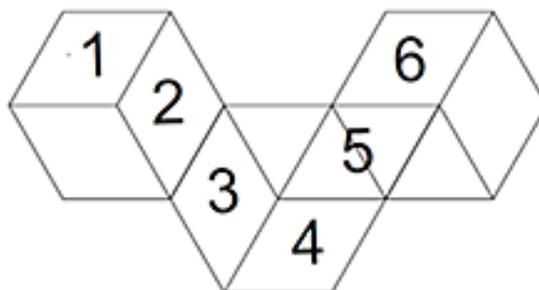


Figura 17. Acomodo de bases de módulos del HAM.

Con las bases en su lugar, se colocaron las paredes de la estructura uniéndolas con “biscuits” y reforzando las paredes para asegurar la resistencia.

Ya armada la estructura, se procede a trabajar con la geomembrana.

Para poder colocar la geomembrana, son necesarios dobleces, para ello se procedió a marcar la geomembrana con las medidas específicas de los módulos en metros (Figura 18).



Submódulo	Diagonal mayor (m)	Diagonal menor (m)	Área (m <sup>2</sup> )
1	1.94	1.16	1.12
2	1.99	1.11	1.1
3	2.01	1.12	1.13
4	1.95	1.16	1.13
5	1.92	1.14	1.09
6	1.95	1.14	1.11
			6.68

Figura 18. Medidas específicas por módulo.

Las marcas se realizaron en 6 piezas de geomembrana de 2.4\*3.5 m. y los dobleces con ayuda de una pistola de calor como muestran la Figura 19 y Figura 20. Se corre el riesgo de dañar la geomembrana por lo que no se recomienda el uso prolongado de la pistola de calor.



*Figura 19. Marcado de geomembrana.*



*Figura 20. Doblado de geomembrana.*

Realizados los dobleces, se introdujeron en los módulos (Figura 21). Con ayuda de la pistola de calor y tijeras, se doblaron y cortaron los excesos (Figura 22).



*Figura 21. Ingreso de geomembrana.*



*Figura 22. Doblado en submódulo.*

El procedimiento anterior, desde el marcado hasta la introducción y doblado en el submódulo se debe hacer con las especificaciones particulares de cada módulo que previamente se obtuvieron (Figura 18), una vez concluido el armado de los módulos se procede a hacer la instalación de tubería.

La instalación de la tubería inició con la conexión de lavabos y mingitorios del baño principal de la escuela, para que esta tubería llegara a los tanques de captación se debieron hacer obras en el piso de la escuela (Figura 23).



*Figura 23. Obra para conexión de tubería.*

La conexión se realizó hasta el primer tanque de captación, continuando con la unión del tanque 1 con el 2 por medio de vasos comunicantes como muestra la Figura 24.



*Figura 24. Conexión entre tanques.*

Asimismo, el tanque 2 se debe conectar al primer módulo del HAM, esto se logra realizando una perforación a 50 cm teniendo cuidado de no dañar la geomembrana para evitar fugas (Figura 25).



*Figura 25. Tubería de entrada de agua residual a tratar en el HAM.*

Una vez perforado, se puede conectar al tanque 2 y conectar la entrada (previamente realizada) como muestra la Figura 26.



*Figura 26. Montado completo de tubería de distribución de agua a tratar.*

Al mismo tiempo, se realizaron las salidas de los módulos #1 a #5 a una altura de 20 cm, siendo la salida del módulo #6 el que controlará el nivel de agua, se decidió colocar la salida a una altura de 35 cm.

Finalmente, se realizó la prueba hidráulica para revisar perforaciones donde pudiera fugarse el agua.

La primera prueba hidráulica es la más sencilla, se llena de agua cada módulo (o todos al mismo tiempo), dejándola por un periodo de 1 hora revisando si existen fugas, mismas que se repararan con parches para sellado. Si esto no da solución

al problema, se deberá cambiar la geomembrana completa del módulo 7o módulos.

El empacado consistió en cubrir las salidas y entradas de los módulos con grava, esto ayudará a tener una base sólida donde las flautas de salida y/o entrada puedan reposar sin peligro a despegarse.

Una vez empacado hasta el nivel de diseño de la primera granulometría se procede a colocar maya que ayudará a separar los drenes de grava como muestra la Figura 27 .



*Figura 27. Colocación de maya en el módulo 1.*

Para concluir, en la segunda prueba hidráulica se llenan los módulos con agua limpia y se revisa que no existieran fugas, si llegara a haber es muy posible que fuera por una mala colocación de la grava, lo que derivó en daños a la geomembrana y se procede al desempaque del módulo en cuestión.

La última fase de la instalación consiste en el plantado de las especies vegetales con el siguiente procedimiento:

1. Se realiza un hoyo con la profundidad necesaria para que la raíz toque el agua cuando el HAM esté en funcionamiento.



*Figura 28. Preparación de sitio para colocación de la vegetación.*

2. Usando las plantas previamente preparadas para su plantación se remojó el rizoma con solución enraizante para ayudar a la planta a crecer.



*Figura 29. Planta preparada y remojada con solución enraizante.*

3. Se introduce la raíz en el hoyo que se hizo en el paso 1 y se cubre con la grava, revisando que no quede apretada, porque puede matar a la planta.



*Figura 30. Plantación de material vegetal.*

Para finalizar con la instalación, es importante que la zona donde se encuentre el HAM sea atractivo a la vista, se recolocaron las piedras recuperadas de la excavación donde no estorbaran y protegieran algunas de las plantas que se encuentran circundantes al HAM.

La Figura 31, se muestra la vista general del HAM, junto con el paisaje antes de la puesta en marcha.



Figura 31. Vista general del HAM

Debido a la gran cantidad de niños que asisten la escuela, es importante que se revise periódicamente este espacio, para evitar la acumulación de basura.

### 5.3 Arranque del sistema

El arranque del sistema empezó el 9 de mayo de 2018, los muestreos indicados en la Tabla 5 se hicieron 1 vez a la semana, el llenado y recalibración del tanque se hizo 2 veces a la semana para evitar pérdidas importantes de agua residual.

#### 5.3.1 Análisis de parámetros *in situ*

Para el análisis *in situ*, se hizo uso del multiparámetro HANNA HI 9829 ampliando el panorama del funcionamiento y estabilización del HAM, los comportamientos de las muestras de algunos de los parámetros se muestran a continuación.

Los resultados puntuales se muestran en las tablas contenidas en el anexo 9.7

## Oxígeno Disuelto (OD)

El OD es esencial para el buen funcionamiento del HAM, principalmente debido a los microorganismos aerobios que se encuentran en él. Un bajo valor de OD, resulta en la muerte de los microorganismos aerobios, lo que reduce la velocidad en la depuración del agua residual recibida en el HAM. En la Figura 32, se muestran el comportamiento de este parámetro.

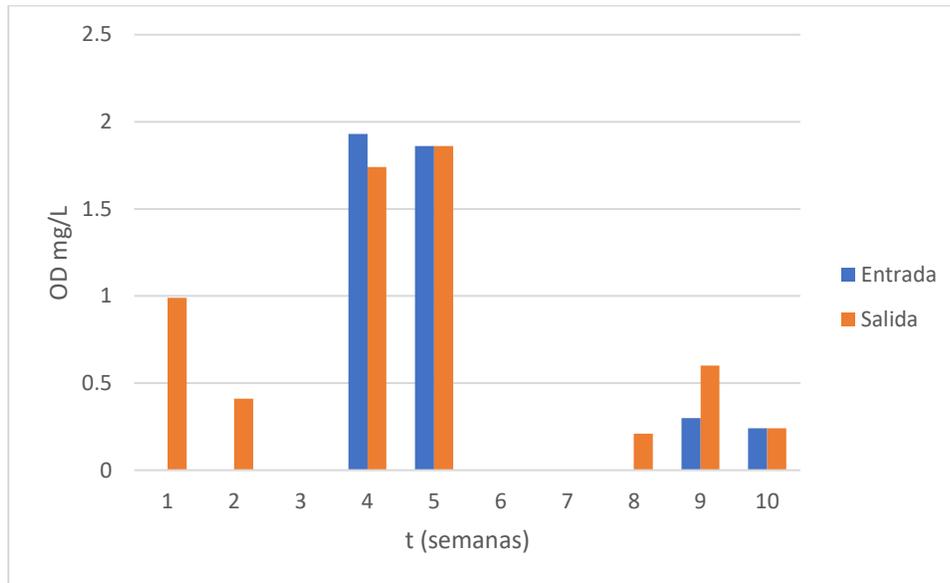


Figura 32. Oxígeno Disuelto del HAM

Es importante observar que, en las semanas 1, 2, 3, 6, 7 y 8, no se detectaron valores de OD a la entrada, haciendo notar la importancia de un contacto con aire antes de que ingrese al HAM. En el resto de las semanas se observa un aumento del valor de entrada debido a que en las semanas 4 y 5 se estuvieron llenando los tanques de captación con las tapas abiertas para poder revisar el llenado de los tanques y esto favoreció la transferencia de oxígeno atmosférico al agua residual a tratar.

## pH

En la Figura 33, se observa el comportamiento del pH de entrada y salida, teniendo un valor promedio de 8.32 y 8.29 respectivamente, es importante destacar que, a pesar de que el pH se podría considerar alto, fue objetivo de usar la piedra caliza en el primer submódulo del HAM, favoreciendo un pH alcalino y manteniendo el valor en el intervalo para evitar inhibición biológica (6.5 - 8.5).

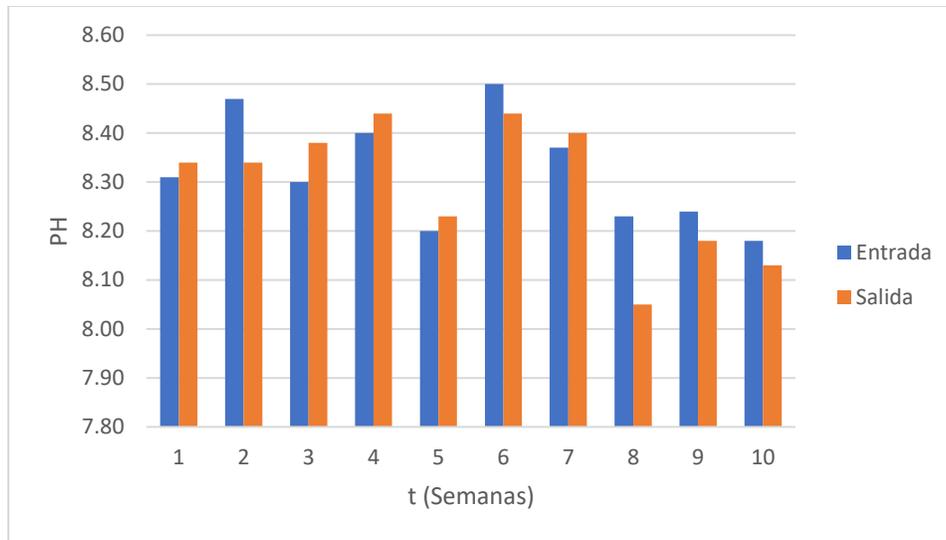


Figura 33. Evolución del pH en el HAM

## Temperatura

En la Figura 34, se muestra temperatura del HAM y se observa una disminución promedio de 2°C entre la entrada y la salida. La temperatura se mantuvo entre 16 y 20 °C. Teniendo en consideración la Tabla 4, esta temperatura se encuentra en el intervalo óptimo aceptable para el desarrollo de la especie vegetal depuradora *Phragmites* (12-23°C).

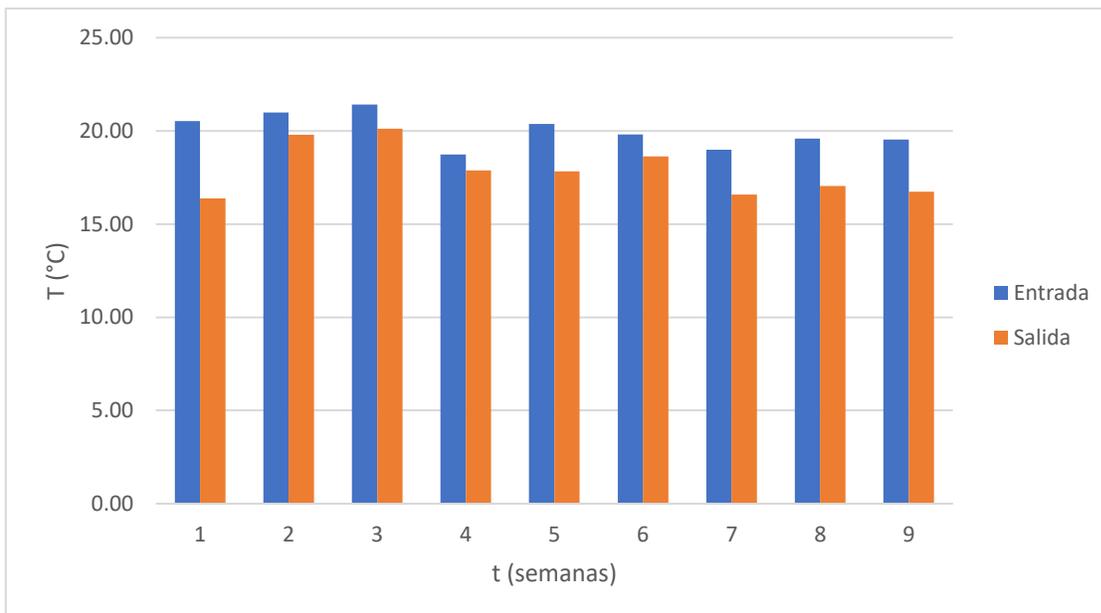


Figura 34. Temperatura del HAM

La temperatura es un parámetro tan importante como el OD. Todos los microorganismos patógenos son capaces de sobrevivir en aguas con baja temperatura. La actividad microbiana y de la reacción de nitrificación-desnitrificación también se ve reducida al disminuir este parámetro.

### Turbidez

La turbidez obtenida, se puede notar mayor en la entrada que en la salida del HAM, teniendo valores de entre 0 y 1000 FNU, este intervalo fue observado en 2 de las 10 semanas de muestreo. Aun así, en comparación, en la mayoría de los muestreos de salida, se obtuvieron valores aceptables para el sistema.

Es importante medir este parámetro, principalmente debido a que un alto valor afecta la depuración, protege a los microorganismos patógenos de los efectos de la desinfección ya que estimula la proliferación de bacterias.

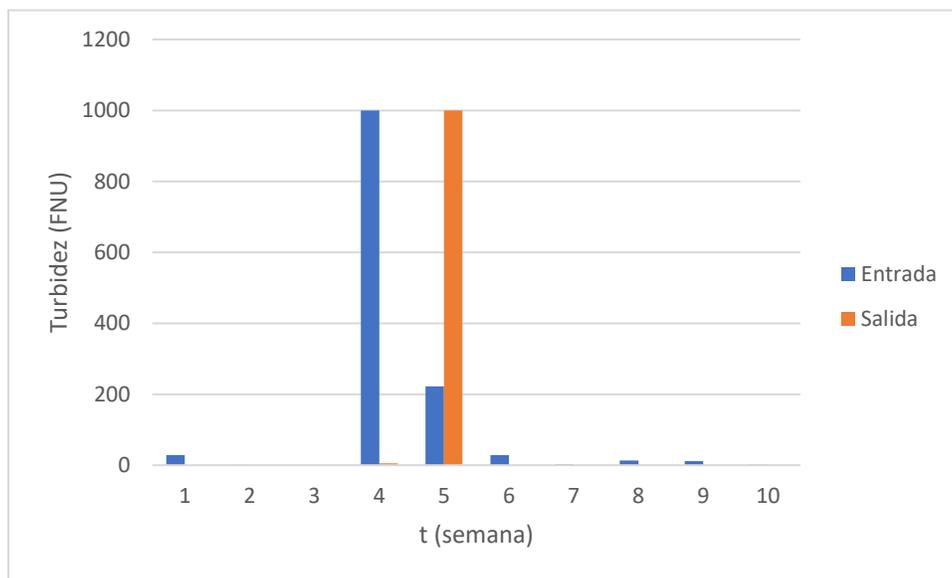


Figura 35. Turbidez de entrada y salida en el HAM

#### 5.3.2 Análisis de parámetros en laboratorio

Los parámetros y métodos con los que fueron analizado se muestran en la Tabla 10. Todas son muestras simples tomadas 1 vez por semana para su análisis.

Los valores puntuales se muestran en tablas contenidas en el anexo 9.7.

Tabla 10. Parámetros y métodos de medición

Parámetro	Método
Coliformes fecales	NMX-AA-102-SCIFI-2006
Amonio	Medidor de amonio HANNA
Nitritos	Diazotización simple (Sreekumar et al. 2003)
Nitratos	Método espectrofotométrico UV 4500 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> B (APHA et al. 1992)
DQO	Método colorimétrico 5220 D (APHA et al. 1992)
Fósforo	Método colorimétrico del ácido vanadomolibdofosfórico (APHA et al. 1992)

### Coliformes fecales

Debido a que un gran número de enfermedades son transmitidas por vía fecal-oral utilizando como vehículo los alimentos y el agua, el conteo de coliformes es importante en la caracterización del agua residual.

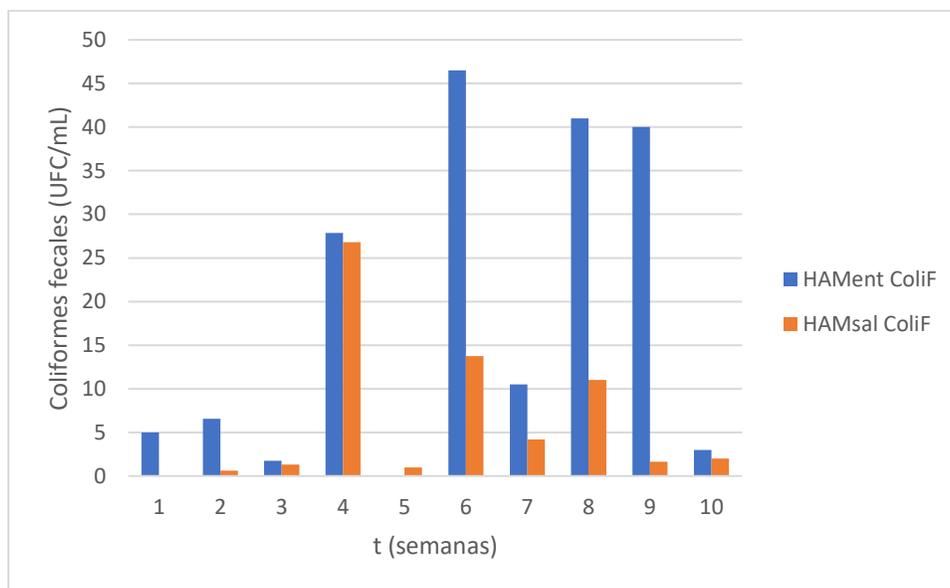


Figura 36. Coliformes fecales del HAM

Como se observa en la Figura 36, la remoción de coliformes fecales es altamente variable, teniendo valores de remoción nula en la semana 5 y total en la semana 1, a pesar de lo anterior, hay que resaltar que el observar los resultados es importante debido a que por ejemplo, la semana 3 presenta un porcentaje de

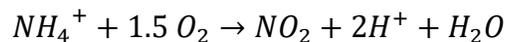
remoción de 26% sin embargo el valor a la salida esa semana es 1 UFC/mL, lo cual es un valor altamente aceptable.

### **Amonio, nitratos y nitritos**

Los humedales artificiales, para la descontaminación del agua usan, en relación simbiótica con los microorganismos, el proceso de nitrificación-desnitrificación, que tiene como principal objetivo la eliminación de componentes nitrogenados en el agua.

Los principales mecanismos de remoción de nitrógeno en humedales construidos son la nitrificación y la desnitrificación, que ocurren en diferentes zonas del sustrato.

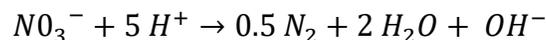
La primera etapa es la oxidación de iones amonio a nitrito con ayuda de bacterias Nitrosomonas:



Siguiendo con la transformación de nitrito a nitrato por medio de bacterias Nitrobacter:



La segunda etapa de la eliminación del nitrógeno en las aguas residuales consiste en la desnitrificación, la cual se da en condiciones anóxicas, donde previamente el nitrato es reducido a nitrito y posteriormente a nitrógeno gas:



Dicho lo anterior, en la Figura 37, Figura 38 y Figura 39, se observa la evolución del HAM para los parámetros de amonio, nitritos y nitratos respectivamente.

Respecto al primer parámetro, se observa una reducción promedio del 27.6% para el amonio en la entrada del HAM, así mismo el amonio de entrada fue aumentando a partir de la semana 6 lo que puede afectar la salud de las plantas debido a que como se menciona en capítulos anteriores, la vegetación puede resistir como máximo 70 mg/L de amonio.

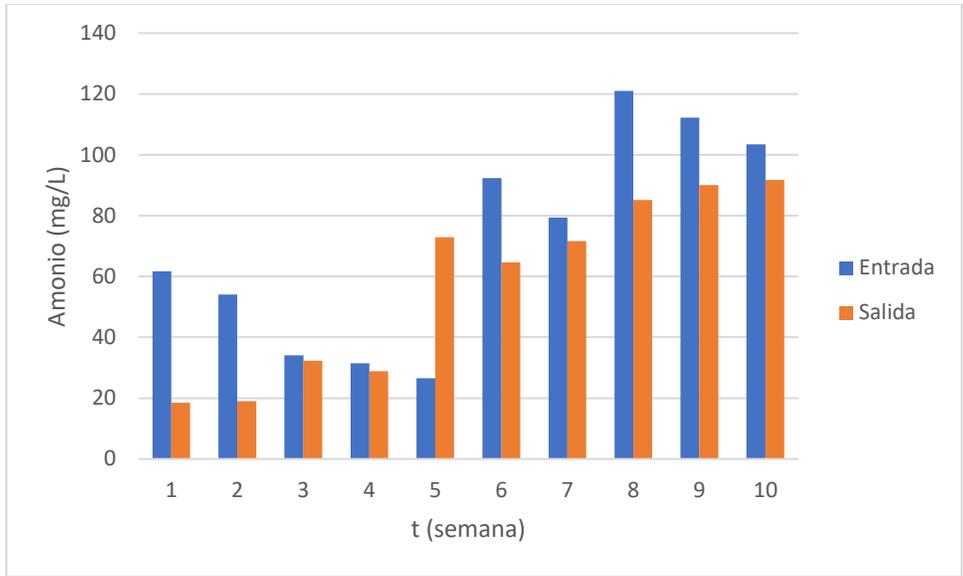


Figura 37. Remoción de amonio en el HAM

La Figura 38, muestra que los nitritos están presentes, si bien por el proceso de nitrificación o desnitrificación rara vez su concentración excede 1 mg/L en las aguas residuales, con excepción de la semana 5 donde en comparación con el día anterior aumenta 7.5 veces el valor de nitritos a la salida, valor que se corregiría las semanas siguientes.

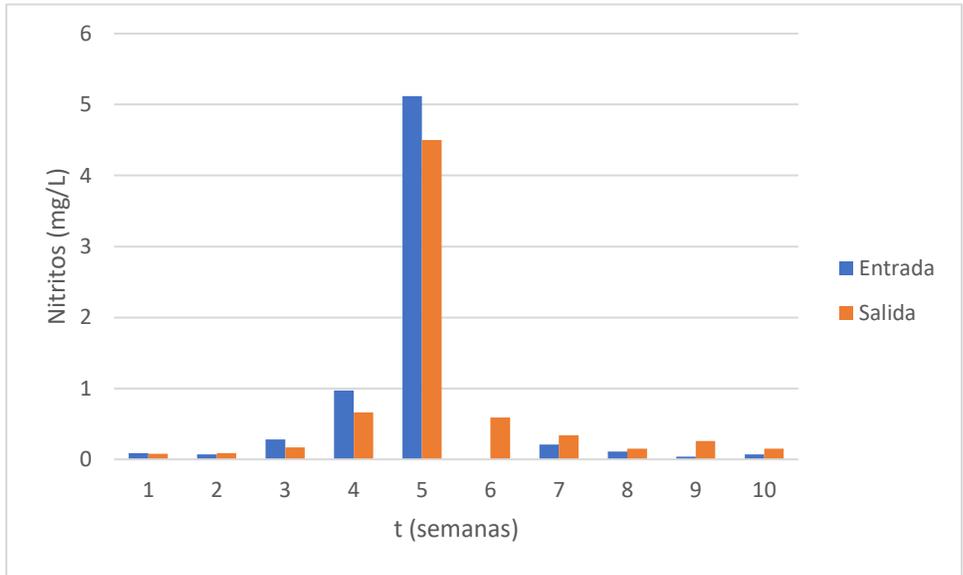


Figura 38. Transformación de nitritos en el HAM

En cuanto a la transformación a nitratos la Figura 39 presenta un aumento en la semana 1, 2 y 6, del 75, 84 y 54% respectivamente, lo que indica que, si bien hubo nitrificación, no hubo un grado de desnitrificación alto, proceso que en condiciones

anaerobias lograría reducir los nitratos a nitritos para, posteriormente, transformarlos a óxido nítrico y nitrógeno molecular.

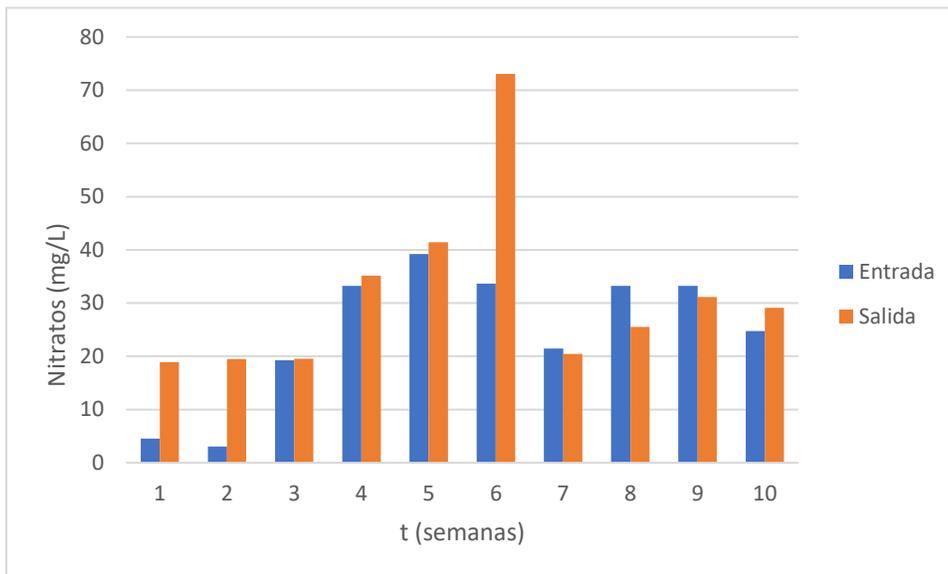


Figura 39. Evolución de nitratos en el HAM

Sumando los valores de amonio, nitratos y nitritos obtenemos el Nitrógeno Total por semana (Figura 40)

Si bien se obtiene una disminución de Nitrógeno Total a la salida, no es la suficiente para cumplir con el parámetro establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996, lo que indica el bajo rendimiento del proceso de Nitrificación/Desnitrificación.

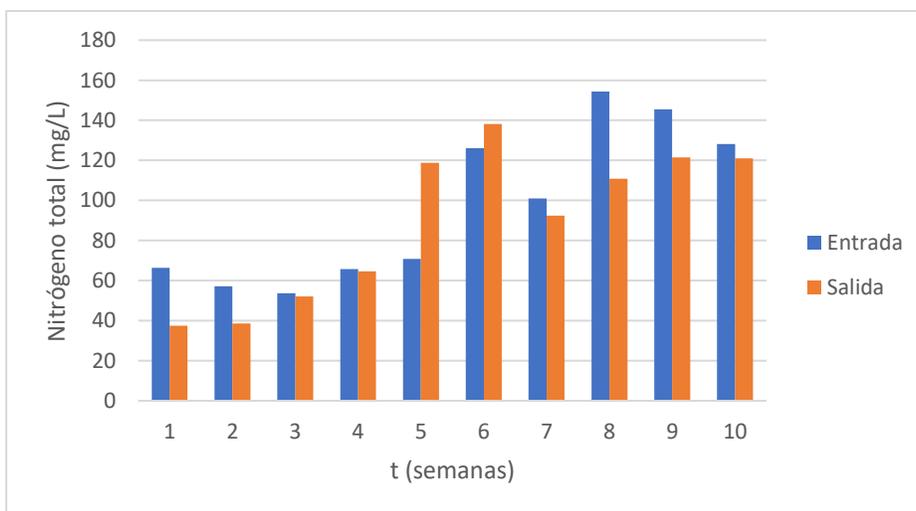


Figura 40. Nitrógeno total en el HAM

## Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El análisis de DQO, a pesar de no estar presente en ninguna de las normas que trata este trabajo, es de gran utilidad, en primer lugar, debido a que la DQO representa toda la materia químicamente oxidable, entonces se puede afirmar que la DBO<sub>5</sub>, siempre será menor. Un índice de biodegradabilidad sencillo y ampliamente utilizado es la relación DBO<sub>5</sub>/DQO. En general, valores por debajo de 0,2 se consideran bajos, mientras que superiores a 0,4 se corresponden con una buena biodegradabilidad. Teniendo en cuenta los resultados de la prueba de la biodegradabilidad (biodegradabilidad alta) la relación entre DBO<sub>5</sub>/DQO será de 0.4 o en relación DQO/DBO<sub>5</sub> de 2.5.

La Tabla 11, presenta los resultados obtenidos de DQO y los resultados calculados de DBO<sub>5</sub> teórica a partir de una relación de 3.5.

Se puede observar que, usando la relación y suposición antes mencionada, el resultado es altamente aceptable, cumpliendo con el valor puntual de las Normas Oficiales Mexicanas (001 y 003), exceptuando las semanas 7 y 10, lo que puede significar una reducción de la disponibilidad de oxígeno para la oxidación de la DQO.

Tabla 11. DQO y DBO<sub>5</sub> supuesta

Semana	DQO (mg/L)		DBO <sub>5</sub> T.
	Entrada	Salida	Suponiendo relación 3.5
1	0.00	0.00	0.00
2	5.00	0.00	0.00
3	31.67	38.33	15.33
4	13.33	28.33	11.33
5	1.67	3.33	1.33
6	11.67	3.33	1.33
7	191.66	231.66	92.66
8	0.00	35.00	14.00
9	23.33	1.67	0.67
10	105.00	86.67	34.67

## Fósforo

Los compuestos del fósforo son nutrientes de las plantas y conducen al crecimiento de algas en las aguas superficiales. Es importante reseñar que la descarga tanto de fósforo como de nitrógeno debe ser controlada porque puede provocar un crecimiento excesivo de algas en las aguas receptoras, lo que disminuye el oxígeno disuelto y por lo tanto inhibe la proliferación de vida acuática propia del sitio.

En la Figura 41, se muestra en un inicio, que el agua de salida del HAM logró una reducción considerable en los fosfatos. Sin embargo, esto se debe principalmente

a que el lecho empacado empezó por adsorber este contaminante y, una vez saturado, ocurre el proceso de desorción.

Los resultados obtenidos a partir de la semana 6, pueden atribuirse al alto contenido de fosfatos tanto los jabones que se usan para lavarse las manos como en el detergente usado para lavar los baños. Se espera que este valor de fosfatos se estabilice dentro de las próximas semanas, ayudado por la actividad de las plantas.

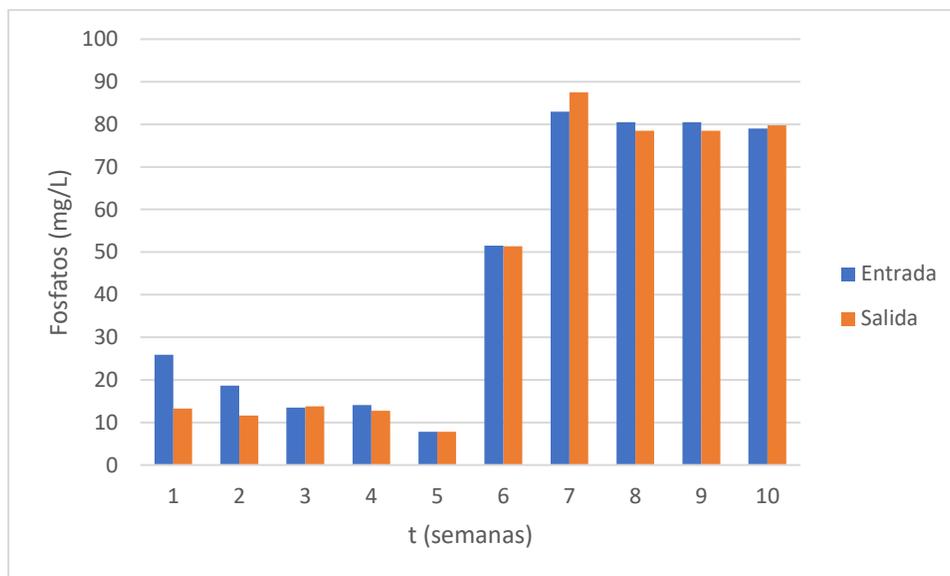


Figura 41. Fosfatos en el HAM

## 6 Conclusiones

Se realizó la evaluación del HAM durante las primeras 10 semanas del periodo de arranque en la escuela primaria Luis Peniche Vallado, usando el multiparámetro para análisis *in situ* y toma de muestras para análisis en laboratorio.

En la determinación de biodegradabilidad se obtuvo como resultado una sustancia fácilmente biodegradable, además de degradarse abióticamente y no ser tóxica para los microorganismos.

La relación de biodegradabilidad, junto con el análisis de DQO, mostró valores de DBO<sub>5</sub> que cumplen con el parámetro establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, exceptuando los días 7 y 10, debido a una reducción de disponibilidad de oxígeno.

Las coliformes fecales lograron ser removidas, llegando a valores en su mayoría de entre 0 y 4 UFC/mL, cumpliendo así con el propósito de la implementación del HAM.

El análisis de nitrógeno amoniacal mostró un aumento a partir de la semana 6 lo que afectó a la vegetación, tornándola amarilla por algunas semanas y teniendo que remplazarlas, el análisis de Nitrógeno Total, muestra que la desnitrificación no se completó por lo que no cumple con los límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

El análisis de fosfatos muestra que hay un aumento considerable a partir de la semana 6, lo que se puede explicar debido a un uso no moderado de detergente usado para lavar los baños en combinación con la vegetación que se plantó, la cual no tenía una raíz suficientemente larga para penetrar todo el sustrato, no logrando retener suficiente el fosfato.

## **7 Recomendaciones**

Es recomendable un estudio en cada uno de los 5 submódulos del HAM, obteniendo un análisis más completo de su comportamiento permitiendo mejorar el diseño.

Se recomienda una división de equipos para el trabajo en laboratorio (propagación y preparación de inóculo) y la preparación del sitio (excavación, aplanado, colocación de tanques, etc.) reduciendo el tiempo de instalación del HAM debido a que se tuvo participación en todas las actividades.

El material usado para el HAM (aglomerado de madera) tiene la ventaja de ser resistente, sin embargo, se recomienda usar otro tipo de material para futuros diseños, debido a que la madera a pesar de tener un tratamiento es más propensa a desgastarse por agentes climáticos como la lluvia o el sol.

El uso de geomembrana es necesario para el buen funcionamiento del HAM, por lo que es recomendable contratar a personal calificado para su manejo e instalación asegurando la calidad de instalación y la inexistencia de fugas.

Tomando en cuenta los resultados de remoción de compuestos nitrogenados y fosfatos el acoplamiento de un humedal superficial para tratar el agua de salida mejoraría la calidad de agua.

## 8 Bibliografía

Alejandro, V. P. 1975. *Notras sobre el sistema jurídico mexicano, a la luz de la Constitución*. Ciudad de México: Departamento de Derecho de la Universidad Iberoamericana.

APHA, AWWA, y WEF. (1992). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (18th ed.). Washington, DC.

Avila, R. (2017). El derecho Humano a la educación en México, 43. En línea: [http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/68828/“EL DERECHO HUMANO A LA EDUCACIÓN EN MÉXICO”.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/68828/EL_DERECHO_HUMANO_A_LA_EDUCACION_EN_MEXICO.pdf?sequence=1&isAllowed=y). 27 de febrero de 2018.

CNDH, Comision Nacional de los Derechos Humanos. (2018). ¿Qué son los Derechos Humanos?. En línea: [http://www.cndh.org.mx/Que\\_son\\_derechos\\_humanos](http://www.cndh.org.mx/Que_son_derechos_humanos). Consulta: 27 de febrero de 2018.

Corroto, C., Iriel, A., Cirelli, A. F. y Carrera, A. L. P. (2019). Constructed wetlands as an alternative for arsenic removal from reverse osmosis effluent. *Science of The Total Environment*, 691, 1242–1250. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.234>

Delgadillo, O., Camacho, A. y Serie, M. A. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Retrieved from [http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion\\_de\\_aguas\\_residuales\\_por\\_medio\\_de\\_humedales\\_artificiales.pdf%5Chttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales](http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf%5Chttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales)

Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M. y Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, 4(1), 85–104. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00064-4)

Fath, B. D. (2018). *Encyclopedia of Ecology*. (Elsevier, Ed.) (2nd ed.). Maryland. United States: Elsevier Science. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=x1h7DwAAQBAJ>

GMI, Grupo Multidisciplinario Integral (2019). Informe final de proyecto Sistema modular sustentable para tratamiento y reúso de agua residual urbana CM-SECTEI/029/2019. Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México.

INEGI, I. N. de E. y G. (2017). Comunicado de prensa num. 127/17, Aguascalientes, Ags., 2–3.

Jizheng, P., Houhu, Z., Xuejun, L., Yong, L., Min, Z. y Hongling, X. (2019). Enhanced nitrogen removal by the integrated constructed wetlands with artificial aeration. *Environmental Technology and Innovation*, 14, 100362. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100362>

Kadlec, R. H. y Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands, Second Edition*. Treatment Wetlands, Second Edition. <https://doi.org/10.1201/9781420012514>

Kujawa-Roeleveld, K. y Zeeman, G. (2006). Anaerobic treatment in decentralised and source-separation-based sanitation concepts. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 5(1), 115–139. <https://doi.org/10.1007/s11157-005-5789-9>

Lamine, M., Samaali, D. y Ghrabi, A. (2012). Greywater treatment in a submerged membrane bioreactor with gravitational filtration. *Desalination and Water Treatment*, 46(1–3), 182–187. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.677553>

Luna-Pabello, V. M. y Aburto-Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *Tip*, 17(1), 32–55. [https://doi.org/10.1016/S1405-888X\(14\)70318-3](https://doi.org/10.1016/S1405-888X(14)70318-3)

Paulo, P. L., Azevedo, C., Begosso, L., Galbiati, A. F. y Boncz, M. A. (2013). Natural systems treating greywater and blackwater on-site: Integrating treatment, reuse and landscaping. *Ecological Engineering*, 50, 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.03.022>

Plaza, C. (2015). Derecho humano al agua. *Impluvium*, 4, 1–49. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Prodanovic, V., Mccarthy, D., Hatt, B. y Deletic, A. (2019). Designing green walls for greywater treatment: The role of plants and operational factors on nutrient removal. *Ecological Engineering*, 130(January), 184–195. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.02.019>

Rajagopal, R., Lim, J. W., Mao, Y., Chen, C. L. y Wang, J. Y. (2013). Anaerobic co-digestion of source segregated brown water (feces-without-urine) and food waste: For Singapore context. *Science of the Total Environment*, 443, 877–886. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.016>

Rodríguez Estrada M. L., Luna Pabello V. M., Dorantes Vera A., González Medina A. y Reyes Alvarado E. C. 2019. Humedales artificiales tratamiento y reúso de

agua en escuelas de nivel básico. En H2O gestión del agua. (21): 18-23. [https://issuu.com/helios\\_comunicacion/docs/h2o\\_21](https://issuu.com/helios_comunicacion/docs/h2o_21)

SEDEMA, Secretaría del Medio Ambiente. Reporte de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, Ciudad de México 2018. En línea: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/RPTAR%202015%20OP%202.pdf>

SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Normas Oficiales Mexicanas. 2018, En línea: <http://www.semarnat.gob.mx/gobmx/biblioteca/nom.html>. Consulta 15 de febrero de 2018.

SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2014. El medio ambiente en México, Agua Calidad. En línea: [http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_resumen14/06\\_agua/6\\_2\\_3.html](http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_3.html). Consulta: 16 de Febrero de 2018.

Sreekumar, N. V, Narayana, B., Hegde, P., Manjunatha, B. R. y Sarojini, B. K. (2003). Determination of nitrite by simple diazotization method. *Microchemical Journal*, 74(1), 27–32. [https://doi.org/10.1016/S0026-265X\(02\)00093-0](https://doi.org/10.1016/S0026-265X(02)00093-0)

Steidl, J., Kalettka, T. y Bauwe, A. (2019). Nitrogen retention efficiency of a surface-flow constructed wetland receiving tile drainage water: A case study from north-eastern Germany. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 283(January), 106577. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106577>

Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2(3), 530–549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>

Wang, Q., Liu, Q., Hu, Y., Ding, J., Ma, Q., Zong, K. y Yang, Z. (2019). Effect of carbon source derived from macrophytes on microbial denitrification in constructed wetlands: Role of plant species. *Bioresource Technology Reports*, 7(May), 100217. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100217>

Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., ... Liu, H. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*, 175, 594–601. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.068>

Zhang, L., Lyu, T., Zhang, Y., Button, M., Arias, C. A., Weber, K. P., ... Carvalho, P. N. (2018). Impacts of design configuration and plants on the functionality of the microbial community of mesocosm-scale constructed wetlands treating ibuprofen. *Water Research*, 131, 228–238. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.050>



## 9 ANEXOS

### 9.1 Sistema construido y descripción de módulos

El tren de tratamiento final construido hasta el término de mi trabajo (como se menciona en la Figura 1) consta de 3 módulos, los cuales llevarán a cabo la mitigación de los contaminantes secuencialmente. Los módulos son:

- Tanque de captación 1 y 2
- Sistema modular de humedales artificiales subsuperficiales (HAM).
- Tanque de captación, desinfección y distribución de efluente del tren de tratamiento.

#### Tanque de captación 1 y 2

Los tanques de captación tienen como función principal captar, sedimentar y homogeneizar el afluente de aguas residuales a ser tratadas, de tal forma que proporcione un flujo constante, homogéneo y libre de sedimento para el sistema de tratamiento. Estos módulos deben considerar un volumen de captación de 0.4 m<sup>3</sup> como mínimo y se deben considerar materiales impermeables para evitar fugas e infiltraciones al manto freático.

Estos tanques funcionarán con un sistema de niveles, reduciendo el costo energético para el tratamiento en este módulo a solo 1 bomba que opera por ciclos, el sistema de niveles se muestra en la Figura 42.

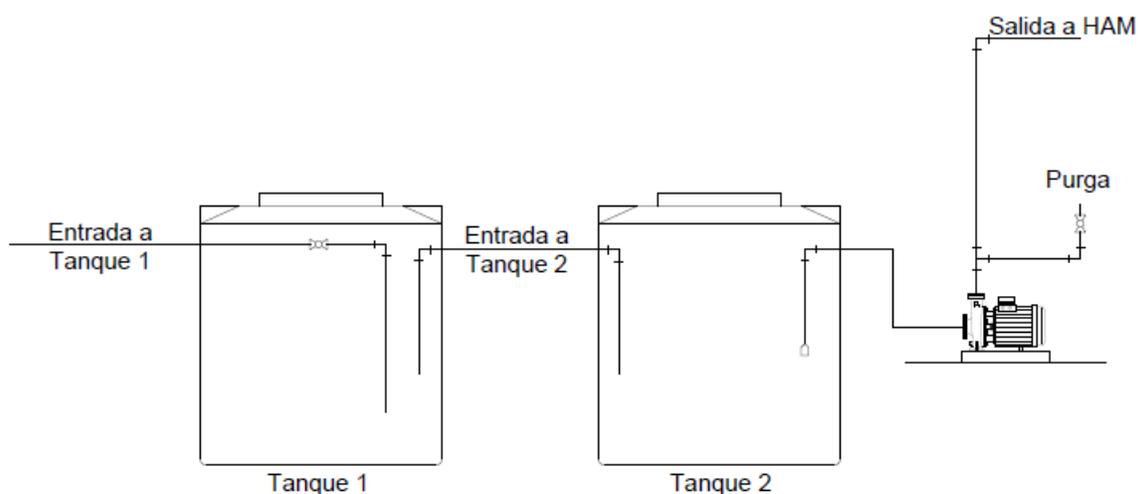
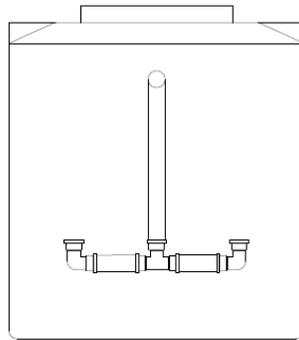


Figura 42. Sistema de niveles módulo 1.

El Tanque 1 entonces funcionará como sedimentador, contando con un reductor de turbulencia mostrado en la Figura 43 y el tanque 2 como un homogeneizador.

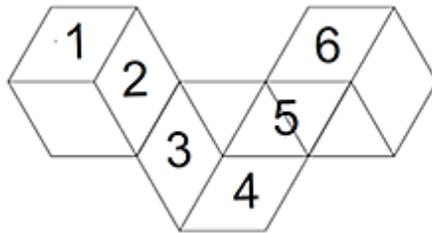


Tanque 1

Figura 43. Reductor de turbulencia en Tanque 1

### Humedal artificial de flujo subsuperficial HASSF

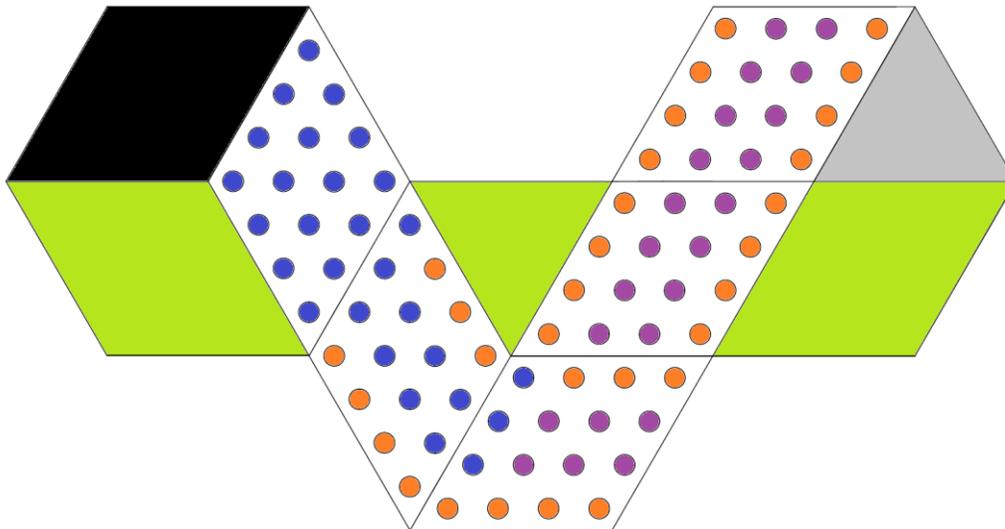
El diseño y selección de los componentes vegetales y material de empaque obedece necesariamente a la calidad de agua a tratar, la consideración aquí mencionada es en relación con un agua residual (orina humana, del aseo personal y general). De tal manera que el sistema estará compuesto por 6 submódulos conectados en serie como muestra la Figura 44, la forma seleccionada de hexágonos es debida a el aprovechamiento de espacio que esta presenta, siendo esta mucho más eficiente que otros polígonos regulares como triángulos o cuadrados, las dimensiones del sistema armado permitirán tratar un volumen nominal de 400 L/d.



Submódulo	Diagonal mayor (m)	Diagonal menor (m)	Área (m2)
1	1.94	1.16	1.12
2	1.99	1.11	1.1
3	2.01	1.12	1.13
4	1.95	1.16	1.13
5	1.92	1.14	1.09
6	1.95	1.14	1.11
			6.68

Figura 44. HAFSS

La vegetación colocada en el sistema está conformada por tres especies de tipo hidrófitas enraizadas emergentes: *Equisetum arvense*, *Cyperus papyrus* y *Phragmites australis*, su distribución se muestra en la Figura 45 a continuación.



Color	Descripción
■ Negro	Solo grava
■ Gris	Espacio para muestra
■ Verde	Jardinera
■ Azul	<i>Phragmites australis</i>
■ Naranja	<i>Equisetum arvense</i>
■ Púrpura	<i>Cyperus papyrus</i>

Figura 45. Distribución de vegetación HAM.

Adicionalmente, los residuos vegetales generados en este módulo podrán ser empleados posteriormente en compostaje.

#### Tanques de captación del efluente del tren de tratamiento

Este módulo recibirá el efluente de todo el tratamiento y contará con un sistema de desinfección, el cual permite llevar a cabo una mitigación de los organismos indeseables sin aportar compuestos residuales al efluente del tratamiento.

Considerando que el agua a tratar por el sistema proviene de una zona escolar donde la calidad de esta es variable (debido a la diversidad de alumnos, así como de los desechos producidos ellos y las diferentes actividades desempeñadas dentro de las instalaciones), se deberá dar seguimiento. El sistema permitirá, por una parte, el mejoramiento sustancial de la calidad de agua para su uso en áreas verdes y uso en W.C. así como la posible implementación de un área de investigación y desarrollo de este tipo de ecotecnologías sustentables.

Los beneficios adicionales que proveen este tipo de sistemas es el bajo costo de operación, pues requiere sólo mantenimiento de jardinería. Las podas del componente vegetal proveen materia orgánica para compostaje y la formación de micro ecosistemas en el sitio, los cuales provén servicios ambientales al entorno.

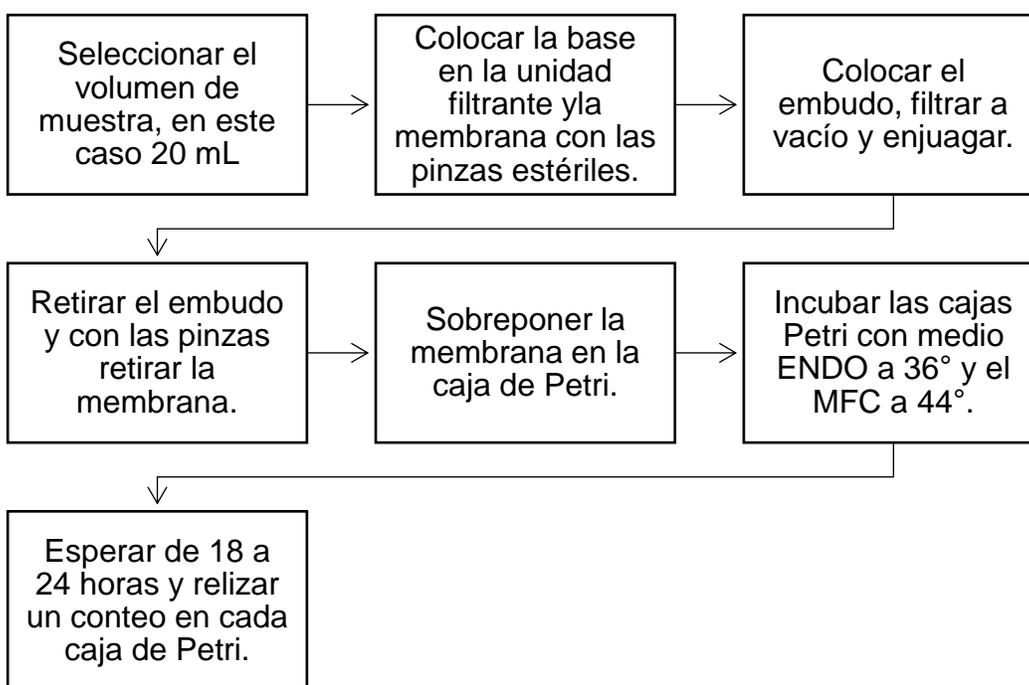
## 9.2 Metodología de pruebas analíticas

### Coliformes

El conteo de coliformes necesita los materiales siguientes:

- Unidad filtrante.
- Sistema de vacío.
- Membranas filtrantes de aproximadamente 47mm de diámetro.
- Pinzas para membrana
- Cajas Petri con medio agar MFC y ENDO.
- Agua estéril

Siguiendo el procedimiento a continuación.



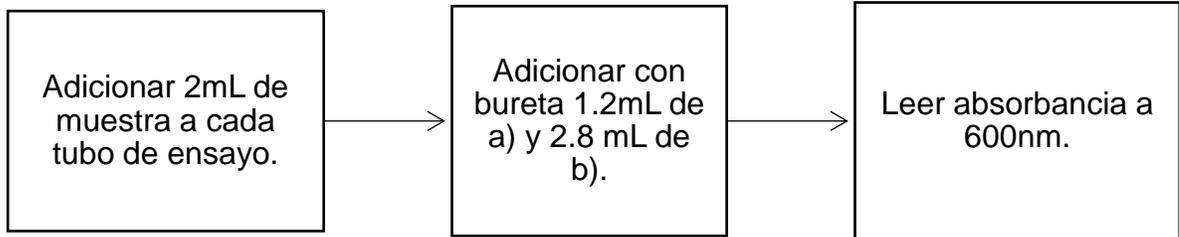
### Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El método colorimétrico utilizado requiere de la preparación de las siguientes disoluciones:

- Disolución de digestión: Añadir a 100 mL de agua 0.0432 g de  $K_2Cr_2O_7$  secado a 150° C por 2 h, adicionar 33.4 mL de  $H_2SO_4$  y 6.66 g de  $HgSO_4$ . Disolver, dejar enfriar y aforar a 200 mL.
- Ácido sulfúrico: adicionar 5.5 g de  $Ag_2SO_4/kg$   $H_2SO_4$  ( $H_2SO_4$  1.84 g/mL), es decir 5.5 g de  $Ag_2SO_4/543.5$  mL de  $H_2SO_4$ . (5.06 g/500 mL)
- Curva de calibración: secar a 110° C ftalato ácido de potasio (KHP)  $HOOC_6H_4$  COOK. Disolver 106.25 mg en 250 mL de agua. El reactivo

tiene una DQO de 1.176 mg O<sub>2</sub>/mg y la disolución una DQO de 500 µg O<sub>2</sub>/mg. La DQO se calcula como:  $\frac{mg\ O_2\ en\ la\ muestra\ (1000)}{volumen\ de\ muestra}$

El procedimiento es el siguiente:

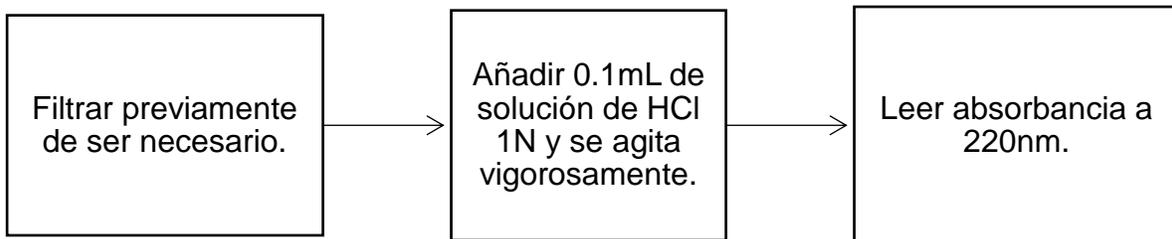


### Nitratos

Este método requiere la preparación de las siguientes soluciones:

- Solución madre: KNO<sub>3</sub> (secar a 105°C/24h) y pesar 0.7218g y aforar a 1000 mL con agua destilada (1 mL= 100 µg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)
- Solución intermedia de nitrato: 100 mL de (a) en 1000 mL de agua destilada (1 mL= 10 µg NO<sub>3</sub>)
- Solución de HCl 1N

El procedimiento que se sigue es el siguiente:

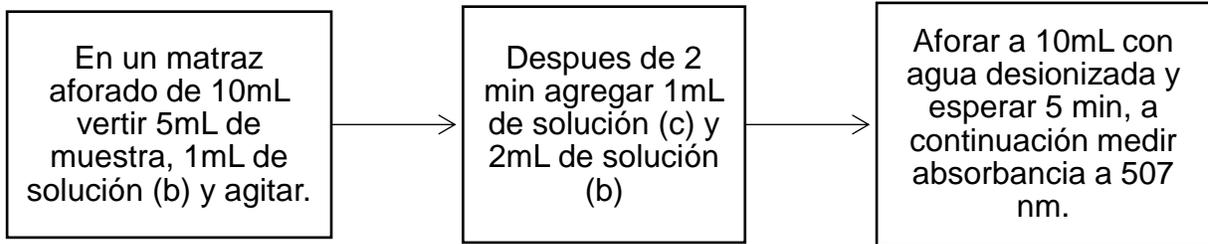


### Nitritos

Para la realización de la prueba se necesitan las siguientes soluciones:

- Solución estándar de nitritos: Disolver 0.150 g de NaNO<sub>2</sub>, previamente secado 2h a 105°C en 100 mL de agua destilada.
- PNA (p-nitroanilina): Disolver 0.125 de PNA en 55.3 de HCl y aforar a 250mL con agua destilada.
- ACE (acetil acetato de etilo): aforar 5mL de ACE a 100mL con alcohol anhidro grado analítico.
- NaOH 2M.

Siguiendo el procedimiento:

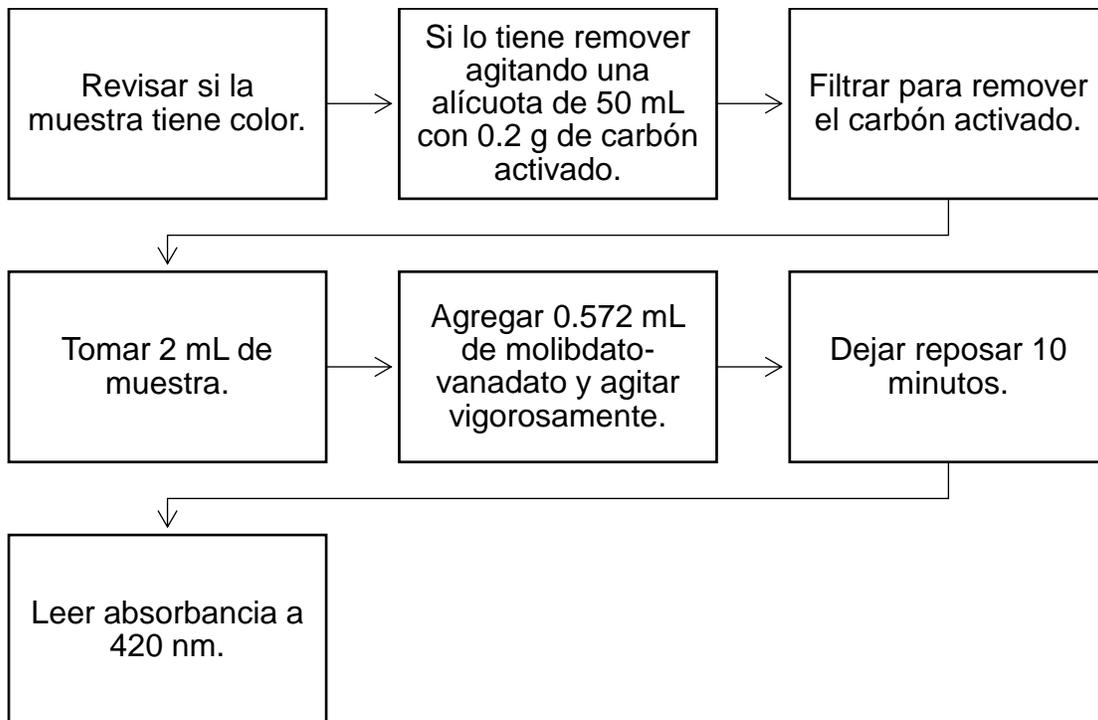


### Fosfatos

Las soluciones necesarias para esta prueba son:

- Disolver 25 g de molibdato de amonio  $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ , en 300 mL de agua.
- Disolver 25g de metavanadato de amonio  $(\text{NH}_4\text{VO}_3)$ , en 300 mL de agua destilada hirviendo. Dejar enfriar la solución a temperatura ambiente y verter a) en b), mezclar y aforar a 1 L de agua, solución c)

El procedimiento es el siguiente:



### 9.3 Manual del Respirómetro BI-2000

Requerimientos previos:

- Corriente: 115/230 Vac, 15/7.5 A 60/50 Hz conectados separados de la computadora
- Oxígeno: flujo de 150 mg/hr
- Temperatura: durante la operación desde 10°C hasta 40°C
- Software: Windows 2000 o XP con mínimo 300MHZ de rapidez, 4G de disco duro, tarjeta de gráficos VGA y un slot de disco para instalar la tarjeta incluida.
- Reactivos:
  1. KOH 45%
  2. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1N
  3. Grasa
  4. 1 hoja de papel filtro
  5. Lodos activados
  6. Solución nutriente stock
  7. Jeringa de 10 ml con aguja de 2 ¼
  8. Agua destilada
  9. Agua desionizada

Se puede usar para:

- Modelado de procesos de biorremediación
- Prueba de biotratamientos
- Bioaumentación y actividad de lodos
- Biodegradabilidad / prueba OECD
- Evaluación de nitrificación
- Proyección de toxicidad
- Biorremediación de suelos
- Modelado de procesos biológicos
- Control de procesos biológicos
- Prueba de actividad de lodos

Antes de comenzar:

El control de temperatura funciona en la tina de baño maría, y puede modificarse desde 10-40°C en intervalos de  $\pm 0.5$  °C. Este controlador está conectado al panel grande pegado a la tina de baño maría, y se opera desde la computadora.

La tarjeta de interfaz debe estar instalada antes de usar el software, esta permite la comunicación entre cada reactor y la computadora.

Los reactores se deben asignar con diferente número en el sistema.

Se recomienda conectar una impresora para los datos recolectados, sin embargo, es opcional.

El módulo del reactor (el que tiene conectados los reactores) debe conectarse a la computadora, a la corriente, al control de temperatura (posterior del equipo), y al control del termostato (también atrás del equipo) (estas dos deberían estar juntas)

#### Encendido

Cada elemento del equipo tiene su propio switch de encendido. No hay un orden específico de encendido de los módulos, sólo la computadora debe ser la última en encenderse.

Cuando no se esté utilizando algún elemento del equipo, o el equipo completo, se pueden apagar dichos componentes o el equipo para ahorrar energía y sin temor a descomponerlo

#### Antes de iniciar el uso de reactores

Verificar antes de su uso, que los reactores y componentes del equipo estén limpios. O con las muestras a analizar. Después de cada uso se recomienda lavar los reactores con ácido crómico para asegurar la limpieza bacteriana, de esta manera no inhibir el crecimiento microbiano.

1. Poner el filtro de fibra de vidrio en la trampa de KOH
2. Colocar 5 mL de KOH 45% en la trampa con cuidado de no salpicar las juntas ya que puede dañar el sello. Si se llegara a salpicar, limpiar con agua desionizada rápidamente.
3. Engrasar uniformemente las juntas exteriores donde se unen las trampas de KOH y la célula del reactor. Es importante que la grasa no entre en contacto con la parte interna del reactor para fomentar el correcto crecimiento microbiológico.
4. Colocar el vidrio exterior de la junta el rack de la célula
5. Engrasar la superficie del fondo de la célula de electrólisis y colocarla en la trampa de KOH. Después rotar la junta y revisar que el sello sea completo (no deben verse burbujas) y correcto (sin interferir dentro). Si hay burbujas o el sello es incorrecto, hay que limpiar y repetir la operación.
6. Llenar las celdas de electrólisis con 1/3 del volumen de la celda con el electrolito  $H_2SO_4$  1N
7. Engrasar la junta de la tapa del vidrio y colocarla con cuidado de no tocar los electrodos de platino. Revisar que el sello sea completo y correcto
8. Alinear los componentes, para dejar que estén a presión atmosférica y quitar cualquier exceso de grasa de los agujeros
9. Insertar después del inóculo la celda de trampa de KOH y revisar el sello correcto y completo.

## Pruebas hidráulicas

### Calibración

La calibración se basa en 2 medidas. Están diseñadas para verificar la exactitud y precisión de las medidas de oxígeno obtenidas por el equipo.

- **ALTO RANGO:** se debe operar el respirómetro completamente operativo, encendiendo todos los switch en la celda electrolítica.
  1. Llenar el reactor con 1.2 l de agua destilada con 1ml  $H_2SO_4$
  2. El depurador de dióxido de carbono debe estar vacío
  3. Agregar a la celda electrolítica solución electrolítica hasta 1/8"-1/4" por debajo de su capacidad.
  4. Encender el switch del electrodo
  5. Alinear los agujeros de la celda electrolítica, a manera que la presión sea la atmosférica dentro.
  6. En el software, definir volumen de muestra=100ml, rango de generación =10-100mg/hr, intervalo de datos=0.2 hr
  7. Dejar que se genere oxígeno por una hr
    - A. Operación apropiada: los resultados deben ser de 100 mg+- 0.3 mg/hr, y la curva de generación de oxígeno vs tiempo debe tener una línea recta con pendiente de 100
    - B. Operación inapropiada: si los resultados de desvían de los parámetros antes dichos, se debe revisar cada paso del procedimiento, y volver a correr la prueba, si no es posible identificar el problema, contactar con Bioscience Inc.
- **RANGO MEDIO:** se debe simular una cantidad discreta de oxígeno de la toma, y compararlo con el oxígeno reportado tomado por el equipo
  1. Encender el baño maría y estabilizar en un rango de 20 a 25°C.
  2. Llenar el reactor con 1.2L de agua desionizada con 1ml de  $H_2SO_4$  concentrado añadiendo un tapón nuevo en la entrada lateral.
  3. Introducir la aguja en el tapón y dentro del agua (al menos 7 mm dentro del agua).
  4. Llenar y vaciar la jeringa (por taponamientos) sin retirarla del tapón.
  5. El depurador de dióxido de carbono debe estar vacío.
  6. Engrasar la celda y la trampa de KOH.
  7. Llenar la celda electrolítica con  $H_2SO_4$  1N hasta que la solución apenas toque el switch del electrodo.
  8. Rotar la tapa de la celda para cerrarla (hasta que los agujeros estén totalmente desfasados).
  9. Colocar la trampa de KOH y el reactor.
  10. Anotar la temperatura del baño y la presión que muestra la pantalla principal.
  11. Ajustar en el software estos parámetros:
    - volumen muestra=100 ml

- velocidad de generación= 100mg/hr
  - intervalo entre datos=0.1hr
  - prueba de fugas= N
12. Despacio, sin mover la aguja, sacar 4-5ml de líquido de la celda, cuidando no dejar el electrodo expuesto.
  13. Dejar que la reacción de generación de oxígeno alcance el equilibrio y volver a sacar de 4-5ml sólo de líquido (volumen total 8-10ml).
  14. Con mucho cuidado, leer y anotar el volumen exacto extraído.
  15. Sacar la jeringa con mucho cuidado de no regresar líquido.
  16. Cuando la generación de oxígeno se detenga, leer y anotar la cantidad de oxígeno generada.
  17. Repetir desde paso 7 hasta 16, para completar 5 series de datos, esperando suficiente para que el sistema se equilibre entre cada muestra. Reponer el ácido removido por la jeringa y reequilibrar entre lecturas repetidas para mejores resultados.
- Este procedimiento se hace para cada celda individual.

$$A = \frac{(R * 100 * 760)}{V * Dt * P}$$

Donde:

A= % exactitud

V= volumen removido (teóricamente igual al volumen de oxígeno generado) (ml)

Dt= Densidad del oxígeno a la temperatura medida (mg/ml)

Densidad del oxígeno (mg/ml)	Temperatura °C
<b>1.331</b>	<b>20</b>
<b>1.326</b>	<b>21</b>
<b>1.322</b>	<b>22</b>
<b>1.317</b>	<b>23</b>
<b>1.313</b>	<b>24</b>
<b>1.309</b>	<b>25</b>

R= toma del oxígeno (mg) lectura de absorción de oxígeno (mg)

P= presión atmosférica (mmHg)

Se debe calcular la media de las 5 medidas:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=0}^n Ai}{n}$$

$$RSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ai - \bar{A})^2}{n - 1}} * \frac{100}{\bar{A}}$$

RSD= desviación estándar promedio

$\bar{A}$ = % precisión promedio

n= número de series de datos.

- A. La exactitud correcta es entre 93-100%, y la precisión debe estar entre +- 4% de la desviación standard relativa
- B. Si no entra en los rangos permisibles, puede haber fugas en las juntas, muy poco espacio entre el sensor del electrodo y el vidrio, fugas del tapón, o fuga en la jeringa.

Cuando todo lo anterior falla, leer los anexos del manual original.

### Operación

1. Llenar el baño de agua a 2/3 de su capacidad
2. Encender el módulo de reactor, el control de temperatura, la pantalla del pc y por último el pc
3. Usando el motor de velocidad, poner agitación a tope por media hora, luego apagarla.
4. Iniciar el software BI-2000 en la computadora y ajustar la temperatura del baño.
5. Colocar el rack de los reactores mientras el baño se calienta
6. Colocar los reactores previamente engrasados y limpios mientras el baño se calienta y colocarlos en el rack al mismo tiempo, se debe agitar al menos 30 minutos.
7. Cuando haya transcurrido el tiempo, y la temperatura sea constante, agregar 10 ml de solución nutritiva y 10 ml de lodos activados.
8. Llenar los reactores con un litro de agua destilada y 10 ml de solución nutritiva
9. Encender agitación en los reactores y dejarla encendida 30 minutos
10. Dejar que alcancen un equilibrio de temperatura los reactores
11. Ajustar la agitación de cada reactor, cuidando que exista al menos una pulgada entre el límite del fluido y el cuello del reactor en el vortex.
12. Colocar las celdas de electrolisis en los reactores y conectar los cables
13. Usar la opción "start sample"
14. Usar "set up each reactor" para iniciar

## 9.4 Cédulas de campo y etiquetas para muestreo

VISITA DE CAMPO				
Nombre de la escuela: <b>Primaria General Luis Peniche Vallado</b>				Número de visita de campo:
Acta N° <b>SECITI/082/2017-</b> ___	Fecha:	Hora:		Hoja ___ de ___
Muestra ___ de ___		Código de identificación:		
Identificación del punto de muestreo:			<input type="radio"/> Vertido a DPH <input type="radio"/> Punto de control <input type="radio"/> Otro _____	Latitud Norte: 19°18'44" N Longitud Oeste: 99°02'16" W
Tipo de muestra <input type="radio"/> Simple <input type="radio"/> Compuesta		Caudal instantáneo, L/s		T <sub>amb</sub> , °C
Parámetros <i>in situ</i>				
OOT muestra, °C		Conductividad <sub>20°C</sub> , µS/cm		
pH _____ mVpH _____		TDS <sup>2</sup> , ppm		
ORP <sup>1</sup> , mV		OD <sup>3</sup> , mg/L		
Resistividad, MΩ·cm		Turbidez, FNU		
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , mg/L (colorimétrico)				
Preservación de la muestra				N° alícuotas: 5
N°	Tipo de recipiente	Volumen	Técnica de preservación	Determinación
	Bolsa Whirl Pack estéril	100 mL	4 °C, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	ColiT- ColiF
	Plástico	500 mL	4 °C ± 2 °C	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> - SST - DBO <sub>5</sub> - N: NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N: NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> Surfactantes
	Plástico	500 mL	4° C, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH<2	DQO N: N <sub>T</sub> - N: NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -
<i>Observaciones:</i>				

<p>No. Muestra <b>02HAM arranque</b> _____</p> <p>Fecha _____</p> <p>Hora _____</p> <p>Razón social del usuario visitado: <b>Primaria General Luis Peniche Vallado</b></p> <p>Acta de visita N°: <b>SECITI/082/2017-___</b></p>		<p>Nombre del muestreador _____</p> <p>Identificación de la descarga <b>HAMent</b> _____</p> <p>Tipo de muestra Simple (<b>X</b>) Compuesta ( )</p> <p>Preservación <b>4 °C ± 2 °C</b></p> <p>Análisis solicitado: <b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - SST - DBO<sub>5</sub> – N: NO<sub>3</sub><sup>-</sup> – N: NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b></p>
<p>No. Muestra <b>03HAM arranque</b> _____</p> <p>Fecha _____</p> <p>Hora _____</p> <p>Razón social del usuario visitado: <b>Primaria General Luis Peniche Vallado</b></p> <p>Acta de visita N°: <b>SECITI/082/2017-___</b></p>		<p>Nombre del muestreador _____</p> <p>Identificación de la descarga <b>HAMent</b> _____</p> <p>Tipo de muestra Simple (<b>X</b>) Compuesta ( )</p> <p>Preservación <b>4 °C ± 2 °C</b></p> <p>Análisis solicitado: <b>Surfactantes</b></p>
<p>No. Muestra <b>04HAM arranque</b> _____</p> <p>Fecha _____</p> <p>Hora _____</p> <p>Razón social del usuario visitado: <b>Primaria General Luis Peniche Vallado</b></p> <p>Acta de visita N°: <b>SECITI/082/2017-___</b></p>		<p>Nombre del muestreador _____</p> <p>Identificación de la descarga <b>HAMent</b> _____</p> <p>Tipo de muestra Simple (<b>X</b>) Compuesta ( )</p> <p>Preservación <b>4° C, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pH&lt;2</b></p> <p>Análisis solicitado: <b>DQO</b></p>
<p>No. Muestra <b>05HAM arranque</b> _____</p> <p>Fecha _____</p> <p>Hora _____</p> <p>Razón social del usuario visitado: <b>Primaria General Luis Peniche Vallado</b></p> <p>Acta de visita N°: <b>SECITI/082/2017-___</b></p>		<p>Nombre del muestreador _____</p> <p>Identificación de la descarga <b>HAMent</b> _____</p> <p>Tipo de muestra Simple (<b>X</b>) Compuesta ( )</p> <p>Preservación <b>4° C, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pH&lt;2</b></p> <p>Análisis solicitado: <b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NT</b></p>

## 9.5 Propagación de plantas terrestres

Procedimiento general:

- Al comprar la planta que se quiere propagar, normalmente la raíz se encuentra contenida junto con el sustrato en una bolsa forestal, así que como primer paso se necesita retirar esa bolsa usando las tijeras, evitando dañar la raíz.
- Una vez retirada la bolsa, se separarán las plantas en secciones, esto hará más sencilla la limpieza de la raíz.
- Separadas en secciones, se procederá a quitar el exceso de sustrato (tierra) de la raíz con el uso de guantes limpiando lo mejor que se pueda.
- El siguiente paso sería, limpiar con la solución salina al 7%, esto se hace con la finalidad de limpiar la raíz de cualquier agente externo al que se quiera tener en la raíz (suciedad, bacterias, etc.) limpiando con agua después.
- Se usa la solución enraizadora, colocándola, con el uso de la brocha sobre la raíz expuesta para su crecimiento.
- Se preparan bolitas de gel en bolsas o macetas hidratándolas agua y con solución fisiológica.
- Se dejará crecer la raíz durante algunos días para luego pasarla al sustrato preparado.
- El sustrato se prepara en una relación 2:1 de tierra negra con *Peat Moss* homogeneizando bien el sustrato ya que será donde la planta continuará su crecimiento.
- A continuación, se llenará aproximadamente media bolsa con este sustrato, después se colocará la planta (en medio de la bolsa/maceta) y finalmente se cubrirá la raíz con el sustrato, es importante recordar que no se debe apretar la tierra, ya que se necesita que esté porosa.

Finalmente, se pondrán las plantas en agua para que el sustrato se sature y se retiraran para evitar la muerte de la planta.

Ejemplo:

*Cyperus papyrus*

Como dicta el procedimiento anterior se rompe la bolsa que contiene la planta como lo muestra la Figura 46.



*Figura 46 Corte de bolsa.*

Siguiendo el procedimiento se separa y se quitará el exceso de tierra Figura 47.



*Figura 47. Limpieza de raíz*

Es muy importante quitar toda la tierra posible, por lo que se procede a lavar las raíces con agua Figura 48.



*Figura 48. Lavado con agua*

Una vez limpia se deben separar los bulbos que componen la planta Figura 49 están muy juntos por lo que es importante saber dónde separar.



*Figura 49. Bulbos de papiro*

Cómo muestra la Figura 50 ya identificados, se separan los bulbos para su propagación.



*Figura 50. Bulbo separado*

A pesar de que la raíz estaba grande, los bulbos al separarse necesitan la solución enraizadora para hacer crecer su propia raíz. Esta solución (anteriormente preparada), se combina con las bolitas de gel ya hidratadas, y se homogeniza, para ayudar a la planta, es recomendable amarrarlas al techo para que se mantengan erguidas.

### 9.6 Tablas de resultados de parámetros in situ

Semana	Oxígeno Disuelto (OD) mg/L		pH		Temperatura (°C)		Turbidez (FNU)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
1	m.l.d.	0.99	8.31	8.34	20.52	16.37	28.2	0
2	m.l.d.	0.41	8.47	8.34	20.98	19.79	0.1	0
3	m.l.d.	m.l.d.	8.3	8.38	21.41	20.12	0	0
4	1.93	1.74	8.4	8.44	18.74	17.88	1000	5.4
5	1.86	1.86	8.2	8.23	20.37	17.82	222.3	1000
6	m.l.d.	m.l.d.	8.5	8.44	20.13	17.45	28.2	0
7	m.l.d.	m.l.d.	8.37	8.4	19.8	18.63	2.5	0
8	m.l.d.	0.21	8.23	8.05	18.99	16.58	13.6	0
9	0.3	0.6	8.24	8.18	19.58	17.04	12	0
10	0.24	0.24	8.18	8.13	19.53	16.73	1.6	0

\*m.l.d. = menor al límite de detección

### 9.7 Tablas de resultados de parámetros de laboratorio

Coliformes Fecales (UFC/mL)			
Semana	P.M.	Coli F	% Remoción
1	Entrada	5	100
	Salida	0	
2	Entrada	7	91
	Salida	1	
3	Entrada	2	26
	Salida	1	
4	Entrada	28	4
	Salida	27	
5	Entrada	0	0
	Salida	1	
6	Entrada	47	70
	Salida	14	
7	Entrada	11	60
	Salida	4	
8	Entrada	41	73
	Salida	11	
9	Entrada	40	96
	Salida	2	
10	Entrada	3	33
	Salida	2	

Semana	DQO (mg/L)		DBO5 T. (mg/L)
	Entrada	Salida	Suponiendo relación 3.5
1	0	0	0
2	5	0	0
3	31.67	38.33	15.33
4	13.33	28.33	11.33
5	1.67	3.33	1.33
6	11.67	3.33	1.33
7	191.66	231.66	92.66
8	0	35	14
9	23.33	1.67	0.67
10	105	86.67	34.67

<b>Semana</b>	<b>Amonio (mg/L)</b>		<b>Nitritos (mg/L)</b>		<b>Nitratos (mg/L)</b>		<b>Nitrógeno Total (mg/L)</b>		<b>Fosfatos (mg/L)</b>	
	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
<b>1</b>	61.7	18.5	0.09	0.08	4.56	18.9	66.35	37.48	25.86	13.24
<b>2</b>	54.1	19	0.07	0.09	3.04	19.49	57.21	38.58	18.65	11.59
<b>3</b>	34.1	32.3	0.28	0.17	19.24	19.54	53.62	52.01	13.48	13.81
<b>4</b>	31.5	28.9	0.97	0.66	33.24	35.14	65.71	64.7	14.05	12.72
<b>5</b>	26.5	72.9	5.12	4.5	39.24	41.44	70.86	118.84	7.84	7.8
<b>6</b>	92.4	64.6	0	0.59	33.64	73.04	126.04	138.23	51.51	51.39
<b>7</b>	79.4	71.6	0.21	0.34	21.44	20.44	101.05	92.38	82.94	87.53
<b>8</b>	121	85.1	0.11	0.15	33.26	25.53	154.37	110.78	80.52	78.5
<b>9</b>	112.2	90.1	0.04	0.26	33.24	31.14	145.48	121.5	80.52	78.5
<b>10</b>	103.4	91.7	0.07	0.15	24.74	29.14	128.21	120.99	79.05	79.77